



Ecole d'ingénieurs

Sciences du vivant
Agriculture • Agroalimentaire
Marketing • Management

Ecole d'Ingénieurs de Purpan
75 Voie du TOEC
31076 TOULOUSE CEDEX



CREAB Midi Pyrénées
LEGTA Auch-Beaulieu
32020 AUCH CEDEX 09

Evaluation et analyse de l'évolution des statuts azotés et
phosphorés des sols d'une exploitation de grandes
cultures menée en Agriculture Biologique, sans élevage
ni irrigation

Olivier FAVARON



Ecole d'ingénieurs

Sciences du vivant
Agriculture • Agroalimentaire
Marketing • Management

Ecole d'Ingénieurs de Purpan
75 Voie du TOEC
31076 TOULOUSE CEDEX



CREAB Midi Pyrénées
LEGTA Auch-Beaulieu
32020 AUCH CEDEX 09

Evaluation et analyse de l'évolution des statuts azotés et phosphorés des sols d'une exploitation de grandes cultures menée en agriculture biologique, sans élevage ni irrigation

Olivier FAVARON

89^{ème} promotion
Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Septembre 2010

Maître de stage : Loïc PRIEUR (CREAB MP)

Professeur tuteur : Michel GAY (EI Purpan)

Comité de pilotage : Bruno COLOMB (INRA Toulouse)
Claire JOUANY (INRA Toulouse)
Eric JUSTES (INRA Toulouse)



Résumé

En grandes cultures biologiques, la conversion en agriculture biologique et la réduction des intrants entraînent une baisse de la production mais aussi une baisse des stocks de nutriments disponibles pour les plantes. Les exploitations ne disposant pas d'élevage ne peuvent épandre des produits de type fumier qui sont une bonne source de matière organique et d'éléments nutritif pour les plantes. Ainsi, les exploitations en grandes cultures biologiques sans élevage sont soumises à une décroissance de la matière organique des sols, à une réduction de la disponibilité du phosphore et la production est généralement limitée par des déficiences en azote des cultures. Bien que ces tendances soient connues, il existe actuellement peu de références permettant d'appréhender l'évolution du sol. Ainsi, depuis 2002, le Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation de Midi Pyrénées réalise un suivi long terme de l'évolution de la fertilité des sols d'une exploitation gersoise. Des prélèvements de sols et de plantes ont permis de quantifier l'évolution des stocks d'azote, de phosphore et de matière organique. Ces résultats ont été mis en relation avec les exportations par les cultures ainsi qu'avec leur état de nutrition. Sur un intervalle de cinq années, nous avons observé des évolutions négatives de la matière organique et du phosphore qui pourraient porter préjudice à la production sur le long terme. Bien que l'intervalle entre les deux prélèvements soit trop court pour noter une évolution franche du stock d'azote organique, les cultures, céréales en premier, présentent de fortes déficiences en azote qui limitent la production et peuvent affecter la qualité des récoltes, traduisant une faible quantité d'azote minéral disponible. Ainsi, après avoir quantifié l'évolution des stocks du sol, analysé les comportements des plantes et mis en évidence les facteurs limitants la production, nous avons réfléchi à des adaptations du système de culture qui lui permettrait d'être plus durable.

Mots clés : grandes cultures sans élevage, agriculture biologique, fertilité, azote, facteur limitant.

Abstract

In stockless cropping systems, conversion to organic agriculture and the reduction of fertilizers use lead to a loss of production and a loss of available nutrients for plants. Stockless system cannot use manure which is an easy source of organic matter and nutrients for plants. Stockless organic farm suffers from decreasing stocks of organic matter and available phosphorus. Moreover, there are very few references about long term evolution of soil fertility in these special conditions. That is why, since 2002, the Local Center of Experimentation and Research about Organic Agriculture of Midi Pyrenees is working on a long term experiment in a stockless farm located in the South West of France. Soil samples analysis permits to quantify evolutions of nitrogen, phosphorus and organic matter in the soil. Plant samples lead to an analysis of the nutritional state of cultures. On a five-year period, we remark decreasing quantities of organic matter and phosphorus in the soil and severe nitrogen deficiency on plants. Hence, the soil evolution is compromising the durability of stockless farm. The study of the soil evolution and of the plants nutrition permits to highlight the limiting factor of the production as mineral nitrogen. Finally, we propose some evolutions for the system with the aim to be as sustainable as possible.

Key words : stockless system, organic agriculture, fertility, limiting factor, nitrogen.

Sommaire

Introduction

Présentation du CREAB

I. Etat des lieux des connaissances

Problématique19

II. Matériels et méthodes

- A. Le site expérimental : le domaine de La Hourre**
- B. Présentation du suivi**
- C. Données utilisés**
- D. Méthodes d'analyses**

III. Présentation des résultats36

- A. N et P dans la plante**
- B. Les stocks du sol**
- C. Relations sol - plante**

IV. Discussion

- A. L'évolution du sol et son impact sur les cultures**
- B. Limites de l'essai**
- C. Durabilité du système de culture**

Conclusion

Références Bibliographiques

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide durant le stage et la rédaction du mémoire.

Je remercie Loïc Prieur et Laurent Laffont pour leur encadrement, le temps et l'énergie qu'ils m'ont consacré ainsi que pour leur convivialité et leurs conseils qui ont fait de ce stage une expérience très enrichissante.

Merci aussi aux membres du comité de pilotage Bruno Colomb, Claire Jouany et Eric Justes qui m'ont permis de mieux cerner la thématique du stage et m'ont offert une aide précieuse durant la rédaction du mémoire.

Merci à Michel Gay pour m'avoir suivi durant le stage, pour sa disponibilité et ses conseils avisés.

Finalement, merci au LEGTA Auch-Beaulieu qui a rendu ce stage possible, pour son hébergement et merci à l'équipe de la ferme du lycée pour sa bonne humeur.

Table des sigles et des abréviations

BTH : Blé Tendre d'Hiver

C : Carbone

CREAB MP : Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation de Midi Pyrénées

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation

CEC : Capacité d'Echange Cationique

cm : centimètre

CV : Coefficient de Variation

GPS : Global Positioning System

g : gramme

ha : hectare

ITAB : Institut Technique de l'Agriculture Biologique

INN : Indice de Nutrition Azoté

INP : Indice de Nutrition Phosphorée

kg : kilogramme

LH : diminutif de La Hourre, sigle suivit du numéro de la parcelle

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

m² : mètre carré

N : Azote

NUE : Nitrogen Use Efficiency

Orga : organique

P : Phosphore

PMG : Poid de Mille Grains

PUE : Phosphorus Use Efficiency

RU : Réserve Utile en eau du sol

SAU : Surface agricole Utile

TCS : Techniques Culturelles Simplifiées

ZR : Zone de Référence

€ : euro

% : pourcent

Introduction

Portée par de nouvelles attentes sociétales ainsi que par des prises de position de l'Europe et de l'Etat Français comme le plan « agriculture biologique Horizon 2012 », l'agriculture biologique s'est fortement développée ces dernières années. Un record de conversions a même été atteint en 2009 avec 23,7 % d'augmentation par rapport à 2008. Ainsi, fin 2009, la France comptait 16 446 exploitations certifiées biologiques, ce qui correspond à 3,14 % des exploitations françaises (Agence Bio, 2010).

Le cahier des charges de l'agriculture biologique proscrivant l'utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires d'origine chimique, les intrants sont limités et les agriculteurs utilisent donc des techniques particulières pour raisonner la fertilité des sols et pour lutter contre les adventices, les ravageurs ou les maladies. En grandes cultures, certains de leurs outils sont : la mise en place de rotations longues incorporant des légumineuses, la réalisation de faux semis ou l'utilisation de variétés résistantes à certaines maladies.

Actuellement, de nombreuses questions se posent et concernent l'évolution de la fertilité des sols sur le long terme dans les systèmes à bas niveau d'intrants tels les grandes cultures biologiques sans élevage. Les objectifs sont d'apprécier le potentiel agronomique des terres, son évolution, ainsi qu'estimer la durabilité des exploitations dans le temps. Dans ce domaine, il existe quelques références en grandes cultures biologiques, mais assez peu dans le cas où il n'y a pas d'élevage.

Ainsi, le CREAB MP (Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique de Midi Pyrénées) effectue depuis 2002 un suivi long terme de la fertilité des sols sur une exploitation de 55 ha dans le Gers (32), menée en agriculture biologique sans élevage ni irrigation. La fertilité est appréhendée par l'analyse de l'évolution des stocks de carbone, azote et phosphore organique du sol. L'évolution du sol, mise en relation avec les observations des cultures permet de suivre l'état de nutrition des plantes et de déceler d'éventuelles carences.

Après une présentation du CREAB MP, nous effectuerons un état des lieux sur les grandes cultures en système biologiques, les essais long terme déjà réalisés, et les méthodes utilisées. Ensuite, la partie matériel et méthode permettra de présenter le dispositif expérimental ainsi que les données, les indicateurs et les outils d'analyse utilisés. Finalement, les résultats seront présentés, suivis d'une partie analyse et discussion.

Présentation du CREAB

Le CREAB MP est le Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique de Midi Pyrénées. Cette structure située à Auch (32) est une association créée en 1989 à la demande des producteurs.

Sa mission est l'acquisition de références techniques dans le domaine des grandes cultures biologiques. Les résultats obtenus sont communiqués aux adhérents du CREAB qui sont des structures régionales (groupements d'agriculteurs biologiques, organismes économiques, chambres d'agriculture et établissements d'enseignement agricole) ainsi que des instituts techniques nationaux.

A. Personnel de l'association

Le CREAB MP est géré par un conseil d'administration et par un bureau composé actuellement des personnes suivantes :

- Pierre Pujos (agriculteur biologique) – Co Président
- Jean Dazère (chambre d'agriculture du Gers) – Co Président
- Paul Baradat (président d'Agri Bio Union) – Trésorier
- Elisabeth Cambot (directrice du LEGTA Auch Beaulieu) – Secrétaire

L'association compte deux salariés : Loïc Prieur et Laurent Laffont qui occupent respectivement des postes d'ingénieur et de technicien.

B. Les essais

Le CREAB MP mène ses expérimentations sur le domaine de La Hourre qui est une exploitation agricole de 55 ha convertie en agriculture biologique depuis 1999.

Les essais réalisés ont pour thèmes : le choix variétal, les itinéraires techniques, les pratiques de fertilisation, la caractérisation des effets précédents après légumineuses et les associations de cultures. De plus, un suivi de durabilité du système de culture est réalisé sur le long terme avec une étude de l'évolution de la fertilité des sols menée sur 12 zones de référence réparties sur l'ensemble du domaine.

Les programmes expérimentaux sont choisis lors d'une réunion du conseil d'administration. Ensuite, les plans d'expérimentation sont définis en concertation avec un conseil scientifique.

Finalement, le CREAB participe aussi à des projets de recherche nationaux (filère du blé au pain, caractérisation des rotations, projet FertiAgribio, essai association de cultures, projet de désherbage mécanique).

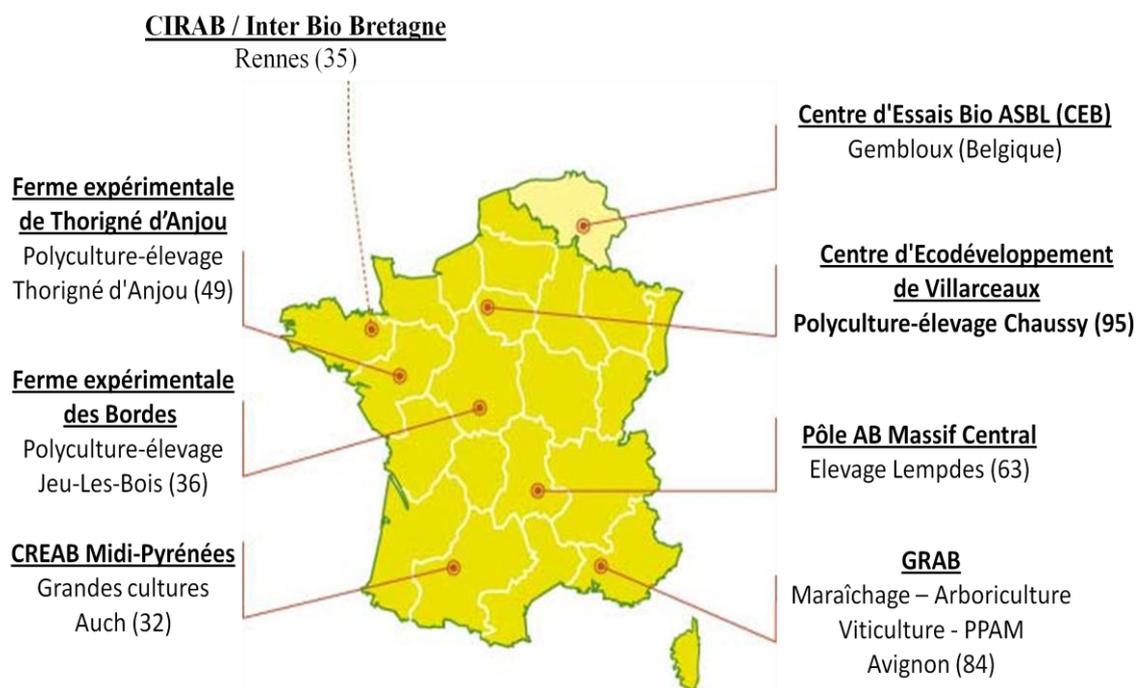


Figure 1 : Les centres techniques spécialisés du réseau de l'ITAB

C. Financement et environnement socio-économique

Le CREAB est une association loi 1901. Elle a donc un but non lucratif. Son financement est assuré en grande partie par des subventions publiques et des cotisations provenant des adhérents. Les subventions proviennent du Conseil Régional de Midi-Pyrénées, de l'Etat français et de FranceAgriMer.

Le CREAB fait partie du réseau de l'ITAB (Institut Technique de l'Agriculture Biologique) depuis 1994 au titre de centre technique spécialisé dans le domaine des grandes cultures (Figure 1).

L'association bénéficie d'un appui technique et scientifique au niveau régional et national de la part d'organismes tels qu'ARVALIS, le CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains), l'ENFA (Ecole Nationale de Formation Agronomique) de Toulouse, l'EI Purpan ou l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique).

I. Etat des lieux des connaissances

Dans cette partie, nous allons faire une synthèse des connaissances concernant l'évolution de la fertilité en système de grandes cultures biologiques sans élevage. Ce travail a pour but de nous amener à préciser la problématique de ce stage.

A partir d'une présentation de différents essais long terme, nous allons dégager les facteurs limitants du système de grandes cultures biologiques sans élevage. Ensuite nous détaillerons les outils dont nous disposons pour suivre leurs évolutions. Finalement, nous nous intéresserons aux moyens de lever ces freins.

A. Les essais long terme en agriculture biologique.

Dans le passé, plusieurs essais long terme ont déjà été réalisés. Ils avaient généralement pour but de comparer l'agriculture biologique à l'agriculture conventionnelle. Les résultats obtenus dans les modalités « biologique » ou « 0 apport » permettent d'appréhender l'évolution sur le long terme de la fertilité des sols.

Nous allons dégager les objectifs de ces essais, les dispositifs mis en œuvre ainsi que les résultats obtenus.

MASCOT (Mediterranean Arable Systems COmparison Trial)

(Barberi et Mazzoncini, 2006)

Le projet MASCOT a été planifié par des agronomes du réseau de l'Université de Pise à la fin des années 90 et a débuté en 2001 en Italie. L'objectif était de comparer sur le long terme deux modalités : agriculture biologique et agriculture conventionnelle, toutes les deux en système sans élevage. Ce choix de système spécialisé a été effectué par volonté de représenter la situation de nombreuses zones du pourtour méditerranéen qui effectuent des grandes cultures et ne comportent pas d'élevage.

Au cours d'une rotation de 5 ans (Betterave sucrière, Blé tendre, Tournesol, Féverole et Blé dur), les éléments pris en considération étaient :

- La dynamique (paramètres physiques, chimiques et biologiques) du sol,
- La dynamique des nutriments du sol (N, P et K),
- L'évolution des adventices, des ravageurs, des maladies et de la biodiversité,
- La qualité de la production,
- Un suivi économique et énergétique.

Résultats 2001-2005 :

De façon générale, il a été constaté que les systèmes sans élevage souffrent d'insuffisances en azote disponible dans le sol. Une solution proposée est l'implantation d'un engrais vert durant la saison hivernale. Elle permet d'apporter au sol une source de biomasse stable (N et C).

Après divers problèmes d'ordre climatique ou liés aux adventices, il a été remarqué que la culture de Blé présentait une forte baisse de rendement en système biologique due à des déficiences en azote. Le Tournesol semblait montrer une capacité supérieure à la Betterave en ce qui concerne l'exploitation des nutriments du sol.

Le Rodale Institute Farming System Trial

(Hepperly, Doubs et Seidel, 2006)

Ce projet, réalisé de 1981 à 2005 en Pennsylvanie (USA), a permis de suivre sur le long terme, le processus de transition entre agriculture conventionnelle et biologique dans le cas de cultures de Soja et de Maïs.

Les critères étudiés étaient : les rendements, la qualité des sols (C, N et biologie du sol) et le lessivage des nitrates et des herbicides. L'aspect économique était aussi pris en compte.

Sur une surface de 6.1 ha, trois modalités ont été mises en place :

- agriculture biologique, fertilisation avec du fumier
- agriculture biologique, fertilisation avec des couverts de légumineuses (trèfle + vesce velue et engrais vert) présents 2,7 années sur 5.
- agriculture conventionnelle avec fertilisation « conventionnelle »

Résultats :

Entre 1981 et 2005, il a été remarqué dans toutes les modalités des gains de carbone organique des sols. Ceci a eu pour effet un accroissement de la rétention d'eau et une baisse du lessivage de l'azote du sol.

Ainsi, même si les rendements étaient supérieurs dans la modalité conventionnelle durant les années « classiques », au cours des années sèches (moins de 350 mm contre une moyenne de 500 mm/an), les rendements des cultures de Maïs étaient supérieurs dans les modalités biologiques car il souffraient moins de la sécheresse.

Les deux modalités biologiques ont présenté des gains d'azote organique (deux fois plus important avec fumier qu'avec les couverts de légumineuses) alors que la modalité conventionnel présentait un bilan légèrement négatif. En effet, les sols en agriculture biologique étaient plus aérés, ce qui entraînait une bonne décomposition et minéralisation de la matière organique.

Ainsi, cet essai montre que des apports de fumier, des modifications des itinéraires techniques, ou la possibilité d'implanter des couverts végétaux (engrais verts) permettent d'apporter de l'azote au sol. Cependant, la dernière solution rencontre une limite dans les zones où les précipitations sont en quantités insuffisante (durant l'essai les précipitations moyennes étaient de 500 mm/an).

Essai DOK

(Mader et al., 2006)

L'essai DOK (ou DOC) est un essai long terme qui a débuté en Suisse en 1978 sur l'initiative du Swiss Federal Office for Agriculture. Il a été réalisé par la Federal Station for Agricultural Chemistry and Hygiene of Environment en collaboration avec le FiBL Research Institute of Organic Agriculture.

Le thème de l'essai était la comparaison sur le long terme des systèmes conventionnels, biologiques et biodynamiques. Un accent a été mis sur l'évaluation de la faisabilité et la viabilité des systèmes biologiques et biodynamiques.

Au commencement, les recherches étaient orientées vers un suivi du sol et de la qualité des récoltes. Ensuite, les centres d'intérêts ont été élargis vers la biodiversité microbienne ainsi que les évolutions du carbone, de l'azote et du phosphore dans les sols.

Les essais présentaient une rotation sur 7 ans. Du fumier était utilisé pour toutes les modalités, excepté pour une modalité agriculture conventionnelle qui utilisait uniquement des fertilisants minéraux.

Résultats :

Le niveau des entrées d'azote, de carbone, de phosphore et de potasse étaient 35 à 40% plus bas en condition biologiques par rapport au conventionnel. Il en a résulté une baisse des rendements en pomme de terre biologique, en raison de carences en potasse et en azote.

Le niveau de matière organique a diminué dans tous les systèmes de culture. Cependant, le niveau de carbone organique diminuait peu dans les systèmes bénéficiant d'apport de fumier composté. En effet, ces apports semblent avoir couvert les besoins du sol pour maintenir sa quantité de carbone organique stable. Cependant, ces résultats se sont avérés être assez variables en fonction de la composition du fumier.

Le pH est resté constant dans la modalité système biologique.

En ce qui concerne la disponibilité du phosphore, elle a semblé être liée au bilan de phosphore. Dans les modalités biologiques et biodynamiques, ce bilan était négatif et la forte activité microbienne constatée dans les sols ne semblait pas compenser le faible niveau du phosphore disponible. En effet, les analyses ont montré une intensification du transfert du phosphore entre la phase aqueuse et la phase solide du sol.

Le Danish organic crop rotation experiment for cereal production

(Rasmussen et al., 2006)

Cet essai long terme a débuté en 1997 au Danemark. L'objectif de cet essai était d'étudier les possibilités d'augmenter, sur le court et le long terme, la production de céréales biologiques par des changements de rotation. Les mesures réalisées se focalisaient sur les rendements des cultures, le lessivage des nutriments et le suivi des adventices.

Résultats :

Sur la période de 1997 à 2000, un bilan négatif a été mis en évidence pour les éléments P, K et Mg, relié à une réduction de leur disponibilité dans le sol. Une augmentation de la teneur en carbone organique du sol a été constatée dans les cas d'apports de fumier. Cette évolution semblait être corrélée à une augmentation de la quantité de carbone d'origine microbienne.

Le Organic Farming Trial Gladbacherhof

(Schmidt et al., 2006)

Ce programme a été mené en Allemagne. L'objectif de l'étude était d'étudier l'effet sur le sol et les cultures de différentes rotations et types de labour. Les essais ont débutés en 1998 avec pour modalités la présence ou non d'élevage ainsi que différents types de labours.

Résultats 1998-2004 :

De façon générale, les systèmes sans élevage ont montré un faible niveau d'azote disponible, une baisse des quantités d'azote total et de carbone organique du sol ainsi qu'une plus faible disponibilité de l'azote.

Essai long terme Phosphore de l'INRA Toulouse

(Colomb, 2007)

Cet essai, réalisé en agriculture conventionnelle, a été mis en place en 1969 en France à Auzeville (31). L'objectif était de suivre l'évolution du Phosphore dans la couche labourée du sol sous 4 régimes de fertilisation différents.

Les modalités étaient les suivantes :

- P0 : régime sans apports de P,
- P1 : apports en P couvrant les exportations,
- P2 : apports en P couvrant 2 fois les exportations,
- P4 : apports en P couvrant 4 fois les exportations.

En 1992, un premier changement a été réalisé sur P1, P2 et P4 qui sont passés respectivement à 11, 22 et 22 kg de P/ha/an. En 1994, le traitement P4 a été remodifié et fixé à 33 kg de P/ha. Les apports étaient réalisés manuellement sous forme de superphosphate contenant 25% de P₂O₅.

Résultats :

Les productions et les concentrations en P des grains les plus importantes ont été obtenues avec les traitements P4 et P2. De plus, le traitement P0 a eu pour effet une baisse significative de la production 32 années sur 36.

Le Tournesol a semblé être la culture la moins sensible au manque de P par rapport aux cultures de Blé tendre et de Sorgho.

Les exportations les plus fortes ont été constatées en P4 (21,9 kg de P/ha/an), contre 18,6 kg de P/ha/an en P1 et 11,7 kg de P/ha/an en P0. Ainsi, les bilans cumulés fin 2002 faisaient état de - 432, - 150, + 320 et + 1180 kg de P/ha respectivement pour P0, P1, P2 et P4.

Des effets du milieu ont été mis en évidence puisque les pertes semblaient être plus importantes dans le cas de sols carbonatés par rapport à des sols non carbonatés.

En utilisant un dérivé du modèle de Mitscherlich, il a été possible de déterminer des teneurs en P seuils (exprimées en ppm de P) au delà desquelles la production diminue significativement : 6,9 pour le Maïs, 7,5 pour le Soja, 7,8 pour le Blé, 8,1 pour le Sorgho et 9,8 pour le Tournesol (étrangement, le seuil du Tournesol est le plus élevé alors que c'est la culture qui a le moins souffert du manque de P). Ces valeurs ont permis d'identifier une gamme de valeurs seuil allant de 7 à 10 ppm de P.

Dans un autre essai, (Bétencourt, 2009), un seuil de 20 ppm de P a été considéré pour la culture de Féverole.

Bien que ces essais aient été réalisés dans des conditions pédoclimatiques et avec des rotations variées, il ressort que les éléments azote et phosphore ont tendance à s'épuiser en système de grandes cultures biologiques sans élevage. Les déficiences occasionnées ont un impact direct sur les rendements et la qualité des cultures. Il est donc nécessaire de connaître les outils, variables et indicateurs permettant d'évaluer et de suivre l'évolution de ces éléments dans le sol.

B. Les moyens d'évaluer le statut azoté et phosphoré d'un sol

Les variables à suivre

La couche de sol étudiée :

Dans les articles de Mader et al. (2007) et Ziadi et al. (2008), la zone de sol étudiée était les 20 premiers cm du sol. Pour Messiga et al. (2009), le suivi du sol a été réalisé sur l'horizon 0-28 cm, qui correspondait à l'horizon labouré.

Le sol :

Dans l'essai long terme de l'INRA d'Auzeville, le site a tout d'abord été caractérisé par sa texture, CEC, teneur en CaCO₃, pH, Carbone total, C/N, P total, P Organique et P Olsen (Colomb, 2007). Ces éléments sont ensuite suivis au cours du temps. Dans d'autres essais moins axés sur le phosphore, le lessivage de l'azote, les teneurs en N et C organique dans le sol et l'humidité étaient suivis (Hepperly et al., 2006).

Pour Mader et al. (2006), l'évolution du carbone organique et du pH sont considérés comme des indicateurs importants de la fertilité des sols en raison de leurs effets sur la stabilité physique et chimique du sol ainsi que sur sa biologie.

Finalement, à l'occasion d'un essai, Felix (2002) a constaté qu'après de forts apports de P minéral, la teneur en P mesurable du sol n'augmentait que très peu. Il pense que ce P apporté peut passer sous une forme non détectable par l'analyse de sol.

Les plantes :

Les prélèvements de plantes permettent d'évaluer la biomasse des cultures et des adventices (Hepperly et al., 2006) ainsi que le rendement et ses composantes comme la densité grain (Colomb, 2007). Des prélèvements à la récolte permettent de connaître les prélèvements d'éléments fertilisants par les cultures (Messiga et al., 2009).

La littérature indique que les analyses des tissus des plantes sont considérées comme des indicateurs fiables de la fraction des nutriments du sol disponible pour la plante.

Selon Ziadi et al., (2008), le rendement relatif (*rendement du traitement / rendement max du site*) peut être utilisé pour évaluer si les conditions azotées sont limitantes ou non :

L'azote est considéré comme non limitant lorsque le rendement relatif > 0,90.

L'azote est considéré comme limitant lorsque le rendement relatif < 0,80.

Dans un autre article, Colomb et al., (2002) présentent la densité grain (nombre de grains/m²) comme un facteur dont dépend fortement le rendement. En effet, lors de leur essai, de bonnes régressions ont été obtenues entre l'état de nutrition azotée des plantes et la densité grain. Les résultats ont montré que d'éventuelles carences en N ou en P affectent le facteur densité grain. Cette relation permettrait de pouvoir prédire la valeur de la densité grain du Blé à partir de la connaissance des indices de nutrition N et P. L'utilisation de la densité grain relative dans cet essai a permis d'affiner les résultats.

Le cycle de l'azote

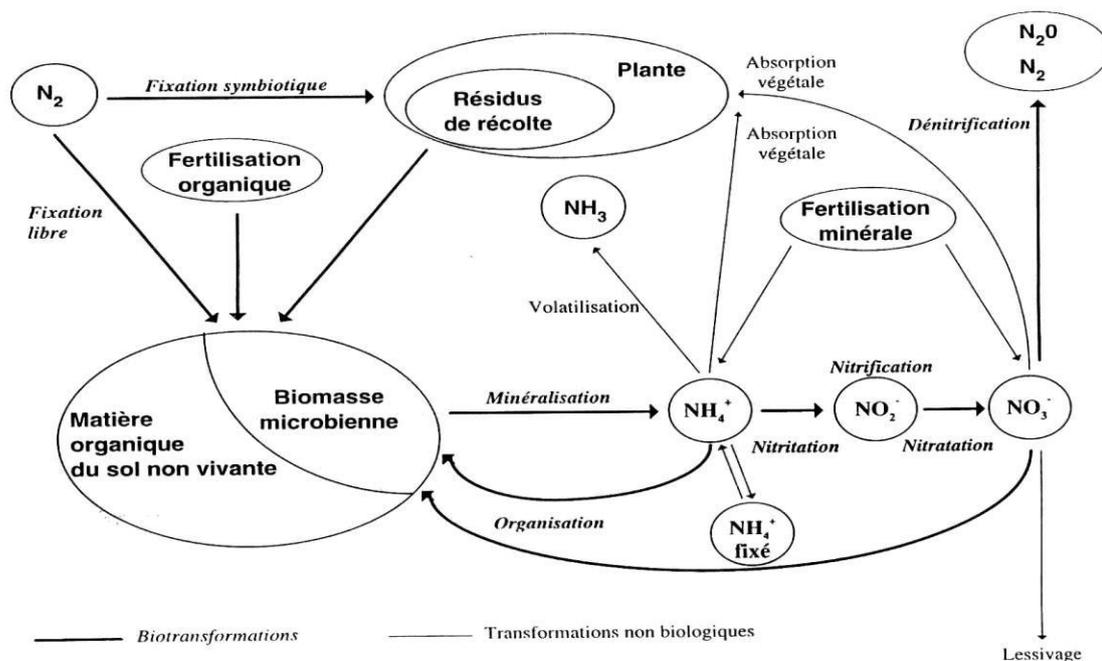


Figure 2 : Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans les sols. Source : Nicolardo et al., 1996.

Tableau 1 : extrait du tableau utilisé par Berry et al (2003).

Input/output	N	P	K	Source
N fixation (kg element/ha/year)			-	
1-2 year old white clover ley	150	-	-	Kristensen et al. (1995)
>2 year old white clover ley	85	-	-	Kristensen et al. (1995)
Red clover (<i>Trifolium pretense</i>)	240	-	-	Shmidt et al. (1999)
Free living soil bacteria	5	-	-	Goulding (1990)
Manures				
Cattle slurry (kg element/m ³)	2.5	0.42	2.1	Shepherd et al. (1999)
Crop nutrient content (% element of dwt)				
Wheat grain	1.7	0.3	0.5	OF0178
Wheat straw	0.46	0.1	0.8	OF0145
Triticale whole crop silage	1.6	0.3	2	Alderman & Cottrill (1995)

OF145 et OF178 correspondent aux mesures des projets DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) n° 145 et 178.

dwt = dead weight tons

L'azote dans les sols

Dans les sols agricoles, l'azote est majoritairement présent sous forme organique : 3 à 5 tonnes par hectare contre quelques dizaines de kilogrammes par hectare d'azote minéral (Nicolardot et al., 1996). L'azote organique peut être classé dans différents compartiments dont les principaux sont la biomasse microbienne, les résidus de récolte et l'humus.

En système agricole, les entrées d'azote minéral se font essentiellement par minéralisation de l'azote organique, fertilisation, fixation (symbiotique ou non) réalisée par des microorganismes et par dépôts aériens. Les sorties sont les prélèvements par les cultures, la dénitrification, la volatilisation et la lixiviation (Figure 2).

Quantification de la libération d'azote dans le sol :

Selon Mary et Justes (2001), il est difficile d'estimer la minéralisation nette d'azote au champ en raison des nombreux processus intervenants et de la forte variabilité spatiale de l'azote. Cependant, la minéralisation nette peut être calculée par un bilan d'azote *a posteriori*.

Les résultats sont généralement plus précis dans des conditions de sol nu et sans apport d'engrais organique. En effet, en présence d'une culture, les régimes hydriques et thermiques du sol sont modifiés et deviennent moins favorables à l'activité des microorganismes du sol. De plus, la plante laisse dans le sol des résidus organiques appelés rhizodépôt dont les effets sont encore peu connus et mal quantifiés (Mary et Justes, 2001).

Dans leurs travaux, Berry et al. (2003) ont réalisé des bilans d'azote à partir de prélèvements de plantes à la récolte ainsi que des prélèvements de sol. Concernant les plantes, un dosage de l'azote et le calcul des rendements a permis de quantifier les prélèvements de nutriments par la plante. Pour le sol, des dosages du N total, du N-NH₄ et du N-NO₃ ont été réalisés.

Pour les entrées non mesurables directement au champ, ils ont utilisé les valeurs d'un tableau issu de la littérature. Ce tableau, (Tableau 1) présente les quantités d'azote et autres nutriments apportés dans les cas de fixation symbiotique, de dépôts aériens, de mise en cultures ou de pâture de la parcelle.

Le lessivage ainsi que la volatilisation étaient calculés grâce à des modèles (respectivement NITCAT et MANNER).

Lors des calculs de bilan, la plus grosse source d'erreur provenait de l'estimation de la fixation symbiotique (Berry et al., 2003).

Finalement, Berry et al. (2003) conseillent de réaliser les bilans à l'échelle d'une rotation et non juste sur un cycle de culture.

Comme nous venons de le voir, la modélisation peut permettre de simuler des évolutions qui sont difficilement mesurables (lessivage ou volatilisation par exemple). Les modèles peuvent être définis comme étant une représentation d'un morceau de la réalité (Jeuffroy et al. 2008). Ils permettent d'extrapoler les connaissances acquises par un petit nombre d'expérimentations à une plus large gamme de conditions (climat, sol, plante, ITK, rotation), de quantifier des variables difficiles d'accès par l'expérimentation et d'appréhender des résultats sur le long terme.

La plupart des modèles actuels utilisés en agronomie simulent le cycle de culture à l'échelle d'une parcelle avec un pas de temps journalier.

Par exemple, le modèle STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards) est un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Il a été développé à partir de données expérimentales par l'INRA depuis 1996, en relation avec des organismes professionnels et de recherche. Ce modèle dynamique à pas de temps journalier simule l'évolution du système sol / culture au cours d'une année. Ce sont les bilans carbonés, azotés et hydriques de la culture qui sont simulés (Mary B., Justes E., 2001).

De tels modèles représentent un intérêt notoire pour raisonner la fertilité des sols agricoles car ils permettent de tester différents scénarios (rotations, travail du sol...) en peu de temps. Cependant, à l'heure actuelle, ces modèles ne sont pas encore utilisables en conditions d'agriculture biologiques car des données sont manquantes. Ainsi, certaines plantes composant les rotations n'ont pas encore été intégrées au modèle. Il en est de même pour les produits fertilisants organiques qui sont nombreux et variés.

Cycle du phosphore

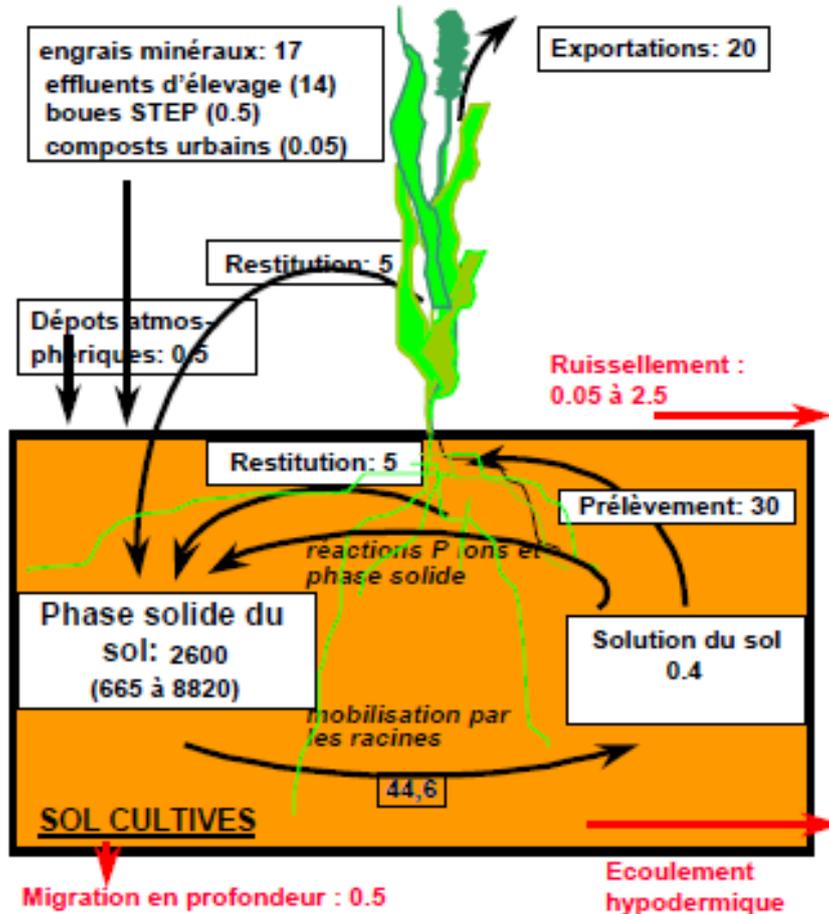


Figure 3 : Cycle terrestre du phosphore

« Ordre de grandeur des stocks et des flux de P (en kg de P/ha/an) dans une parcelle de grandes cultures sous climat tempéré. Ces valeurs sont une compilation de données publiées. L'apport de P sous forme d'engrais minéraux est la consommation moyenne nationale pendant la campagne 1998-1999 (Source UNIFA) » Source : Morel, 2002

Le Phosphore

Dans les sols agricoles, le P minéral est issu de l'altération des roches et il est concentré dans la partie superficielle du sol. En sol alcalin, il est fortement lié aux carbonates de calcium alors qu'il est plutôt lié aux composés d'aluminium et de fer en sols acides. Le P organique provient de la dégradation des végétaux par la faune et la flore du sol (Figure 3).

Seul le P dissous dans la solution du sol est disponible pour les plantes. Cette fraction du P représente moins de 0,5% du P total mais elle semble être constamment rechargée à partir des formes minérales et organiques (Antoni., 2009).

En Agriculture Conventiennelle, ce sont principalement les indicateurs concernant le P minéral et son évolution suite aux processus physico chimiques qui sont utilisés. En Agriculture Biologique, l'utilisation d'engrais minéraux étant extrêmement réduite, il est possible que le compartiment biologique associé aux processus biologiques ait aussi un poids important. En effet, le phosphore disponible pour la plante proviendra de la dégradation de la matière organique, ce qui donne plus de poids aux processus physico chimiques qui ont lieu dans la zone des racines (Pellerin et al., 2003).

Etude du P dans la plante :

Selon Ziadi et al., (2008), il existe un effet direct de l'azote sur le phosphore : en effet, il semble qu'après un apport azoté, l'augmentation de la production de biomasse entraîne un effet de dilution du P dans la plante.

Une formule de calcul de l'INP (indice de nutrition phosphorée, qui sera détaillé dans la partie Matériels et Méthodes) en conditions limitantes en azote est proposée dans cet article. Cependant, il apparait que cette formule n'est pas utilisable dans les cas de sévères déficiences en N, traduites par des rendements relatifs inférieurs à 0,8 (sans fertilisation azotée, les rendements relatifs présentaient des valeurs comprises entre 0,45 et 0,72).

Le traitement des données a tout de même permis de décrire la relation entre les concentrations en P et en N dans le cas de conditions non limitantes en azote :

$$P = 0,94 + 0,107 N.$$

Cette formule permet d'estimer la valeur P critique qui correspond à la concentration minimale en P nécessaire pour atteindre une production de biomasse optimale.

Dans les conditions limitantes en azote :

$$P = 1,7 + 0,092 N, \text{ avec les concentrations exprimées en g/kg}$$

Après avoir détaillé les problèmes d'épuisement des stocks N et P des sols en grandes cultures biologiques sans élevage ainsi que la manière de suivre l'évolution de ces stocks, il est temps de faire un bilan des outils et processus permettant d'apporter ces éléments au sol.

C. Les sources d'azote et de phosphore en grandes cultures biologiques sans élevage

Suite à la Loi d'Orientation Agricole du 04/07/1980, l'agriculture biologique est définie comme une « agriculture n'utilisant pas de produits chimiques de synthèse ». De plus, le cahier des charges européen - Règlement (CE) 834/2007 modifié par le règlement du conseil (CE) 967/2008) - indique que :

Extraits de l'article 12 :

« a) La production végétale biologique a recours à des pratiques culturales qui préservent ou accroissent la matière organique du sol, améliorent la stabilité du sol et sa biodiversité, et empêchent son tassement et son érosion ;

b) la fertilité et l'activité biologique du sol sont préservées et augmentées par la rotation pluriannuelle des cultures, comprenant les légumineuses et d'autres cultures d'engrais verts et par l'épandage d'effluents d'élevage ou de matières organiques, de préférence compostés, provenant de l'agriculture biologique.

d) en outre, les engrais et amendements du sol ne peuvent être utilisés que s'ils ont fait l'objet d'une autorisation d'utilisation dans la production biologique conformément à l'article 16 ;

e) l'utilisation d'engrais minéraux azoté est interdite ; »

En système spécialisé grandes cultures, l'absence d'élevage ne permet pas l'utilisation de fumier.

Les sources d'azote et de phosphore sont donc :

- les fournitures par la minéralisation de la matière organique du sol,
- les fournitures par la minéralisation des résidus de culture,
- l'apport de matières organiques exogènes,
- l'aménagement du système de culture (utilisation de légumineuses, mise en place d'engrais verts...).

La minéralisation des matières organiques du sol

C'est la microflore du sol, et plus particulièrement les bactéries et les champignons qui décomposent les matières organiques (MO) pour aboutir à des molécules solubles et assimilables par les plantes (Mary et Justes, 2001).

Concernant l'azote, la minéralisation peut être divisée en deux étapes qui sont l'ammonification et la nitrification. L'ammonification peut être réalisée par un grand nombre de bactéries et de champignons qui hydrolysent la matière organique pour obtenir des acides aminés. Ces derniers sont ensuite désaminés pour donner de l'azote ammoniacal. Ce phénomène est généralement assez lent du fait de la complexité des molécules organiques (Davet, 1996). Une partie de cet azote est utilisée directement par la microflore pour réaliser des synthèses protéiques et l'autre partie est transformée en nitrates par les microorganismes nitrificateurs du sol (N'Dayegamiye et al., 1997). De son côté, le P organique est transformé en phosphates à l'issue de la minéralisation de la matière organique.

L'organisation (ou immobilisation) est un processus présent en même temps que la minéralisation. C'est la transformation inverse à la minéralisation (Nicolardot et al., 1996) au cours de laquelle l'azote ou le phosphore minéral sont assimilés et transformés par les microorganismes du sol pour donner de l'azote ou du phosphore organique. L'organisation de l'azote organique intervient généralement lorsque le produit enfouit contient peu d'azote. La biomasse microbienne du sol puise alors dans le sol l'azote nécessaire à son métabolisme (Mary et Justes, 2001 ; Guppy et McLaughlin, 2009).

Différents facteurs sont susceptibles d'influencer la minéralisation des matières organiques car ils conditionnent la croissance et l'activité des microorganismes : la température et l'humidité (Valé et Al., 2007), les propriétés du sol : aération, texture (notamment la teneur en argile), structure et pH (Leclerc, 2001), la nature de la matière organique ainsi que les pratiques culturales (mode de travail du sol) (N'Dayegamiye et al., 2007).

Selon Leclerc (2009), en grandes cultures biologiques, l'essentiel des fournitures azotées proviennent de la fourniture du sol. En climat tempéré, de l'ordre d'un à deux pourcents de l'azote organique du sol sont minéralisés chaque année (www.unifa.fr/), ce qui correspond à une centaine de kilogrammes d'azote minéralisés par hectare et par an. Concernant le phosphore, la minéralisation nette en sol non amendé peut monter à 1 ppm de P/jour mais ce rapport peut être réduit dans les systèmes à bas niveau d'intrants (Guppy et McLaughlin, 2009).

L'évolution de l'azote organique du sol étant directement liée à la décomposition des matières organiques, le cycle de l'azote est intimement lié à celui du carbone (Balesdent, 1998).

Les restitutions par les cultures

Les résidus de culture (racines, exsudats racinaires et tiges), ne sont pas exportés en grandes cultures biologiques sans élevage. Ils constituent donc une source importante de MO. Selon Petersen et Brozyna, (2009), le cycle de l'N organique est très rapide et peut jouer un rôle important concernant l'azote disponible pour la plante.

Fertilisants organiques Test d'incubation - N (% C apporté) -

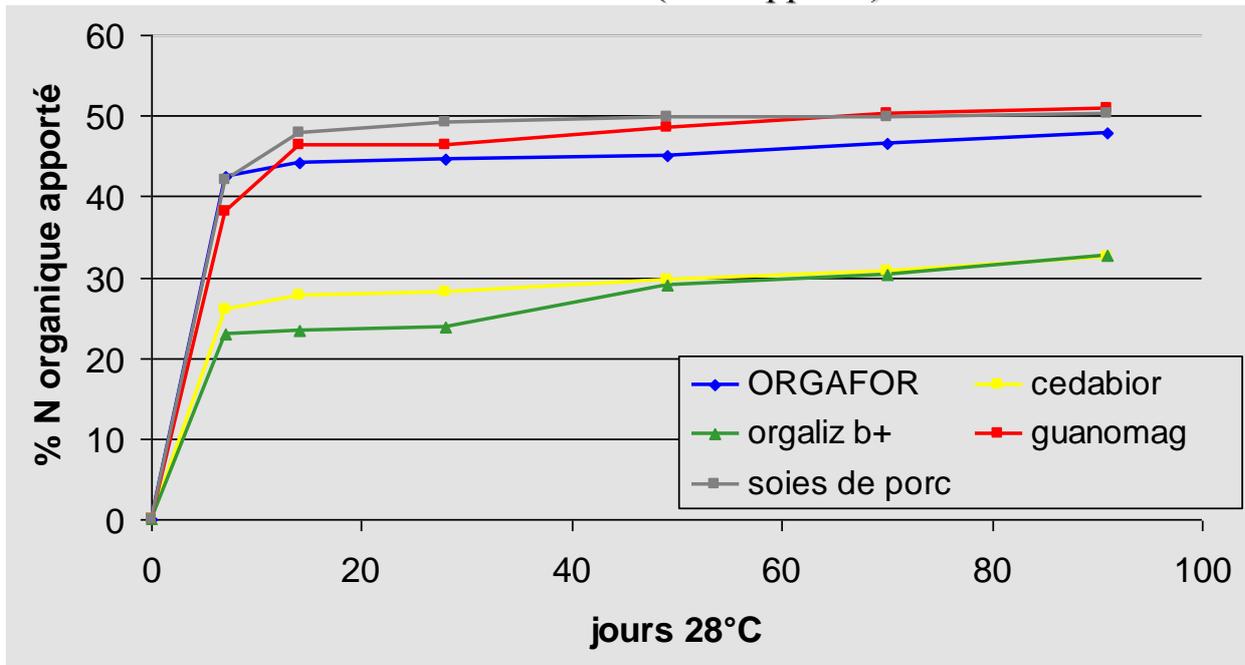


Figure 4 : Dynamique de minéralisation de différents fertilisants organiques en conditions contrôlées. Source : Raynal et Nicolardot, 2006.

Amendements organiques

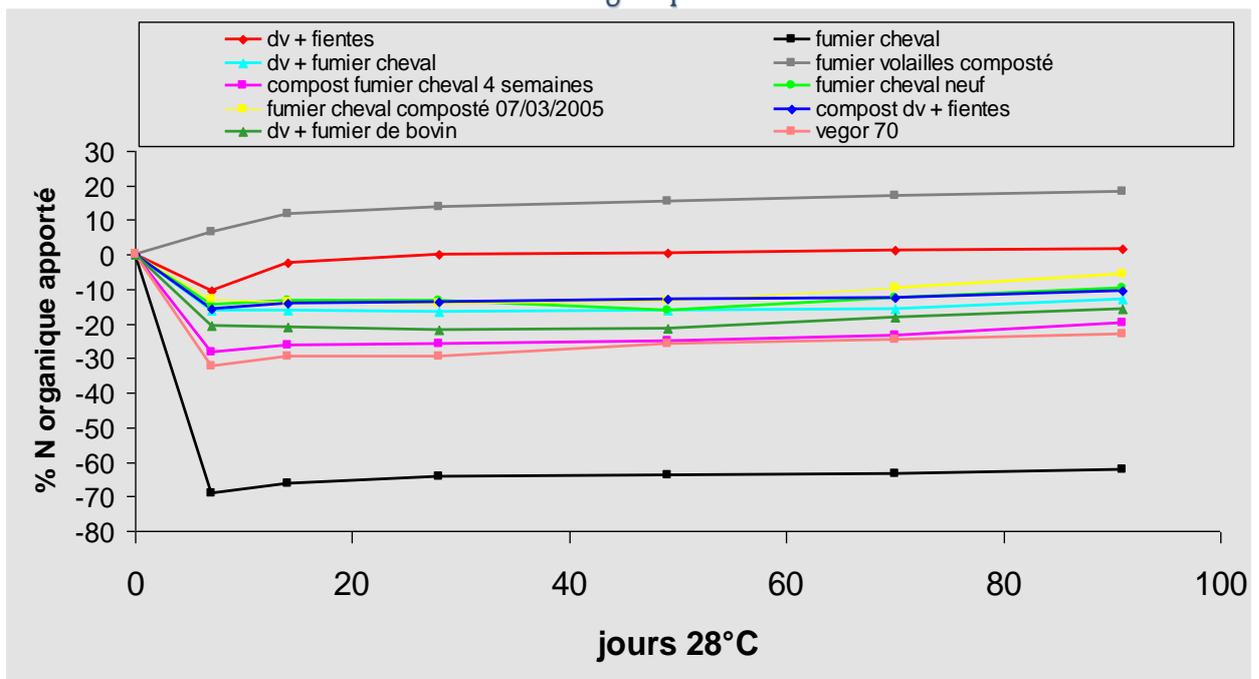


Figure 5 : Dynamique de minéralisation de différents amendements organiques en conditions contrôlées. Source : Raynal et Nicolardot, 2006.

Cependant, la teneur en carbone, ainsi que le rapport C/N des résidus jouent un rôle prépondérant au cours de la dégradation. Bien que ce rapport ne soit pas suffisant pour caractériser la biodégradabilité du produit, il peut en donner une idée (Raynal-Lacroix et Nicolardot, 2006). Ainsi, un C/N inférieur à 10 traduira un produit riche en azote qui sera dégradé rapidement et libérera beaucoup d'azote disponible. Au contraire, un produit présentant un C/N supérieur à 25 aura une dégradation plus lente qui peut passer par une phase d'immobilisation microbienne d'azote (Stengel et Gelin, 1998).

Pour le phosphore, le P présent dans les résidus de culture est potentiellement très disponible pour la plante mais il dépend des caractéristiques du résidu (âge, état de lignification). Il semble que comme pour l'azote, les végétaux jeunes et peu lignifiés se dégradent plus facilement. Cependant, la minéralisation du P semble essentiellement conditionnée par la teneur en P total de la plante, ce qui laisserait à penser que la dégradation de certains résidus est limitée par la disponibilité en P (Guppy et McLaughlin, 2009).

Matière Organique exogène : apports de produits organiques

Les Produits Résiduels Organiques (PRO) sont utilisés en apports exogènes. Ils peuvent être dissociés en deux classes : les amendements organiques et les engrais organiques. Cette distinction est liée à la teneur en N du produit. Ainsi, « les engrais organiques azotés sont des produits résiduels organiques dont la teneur en élément fertilisant est supérieure à 3% de leur matière sèche » (Norme AFNOR NFU 44-051) et les amendements présentent des teneurs plus faibles.

La majorité des engrais organiques sont des sous produits d'origine animale (excréments, déchets d'abatage ou d'industrie agroalimentaire). Exemples : sang desséché, farine d'os, farine de plumes, guano... Les engrais d'origine végétale sont des tourteaux.

Comme le montre la Figure 4, les engrais organiques présentent un apport maximum en azote minéral de l'ordre de 50% de l'azote organique apporté en conditions contrôlées (Leclerc, 2001).

Les amendements ont des origines plus variées : fumier, déchets de cultures, d'industrie (vinasses) ou d'origine urbaine (boues, compost d'ordures ménagères ou de déchets verts). Ils peuvent avoir subi des traitements tels que le compostage ou le séchage.

La Figure 5 montre que très peu ou pas d'azote est apportée par l'incorporation d'un amendement organique. Le but d'un amendement organique est avant tout d'apporter du carbone organique au sol (Leclerc, 2001).

Ces deux types de produits présentent de fortes variations de composition et de valeur azotée entre produits et même au cours du temps pour un même produit. De plus, le CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote) est relativement faible, et les pertes vers l'atmosphère ou les eaux souterraines varient fortement en fonction des produits, de leur mode d'incorporation au sol et des conditions pédoclimatiques (Bouthier et al., 2009).

Les engrais organiques présentent un prix d'achat élevé et l'augmentation du rendement engendrée par leur utilisation étant assez faible et variable, il semble nécessaire de déterminer leurs dynamiques de minéralisation et de calculer la dose d'apport économiquement rentable (Leclerc, 2009).

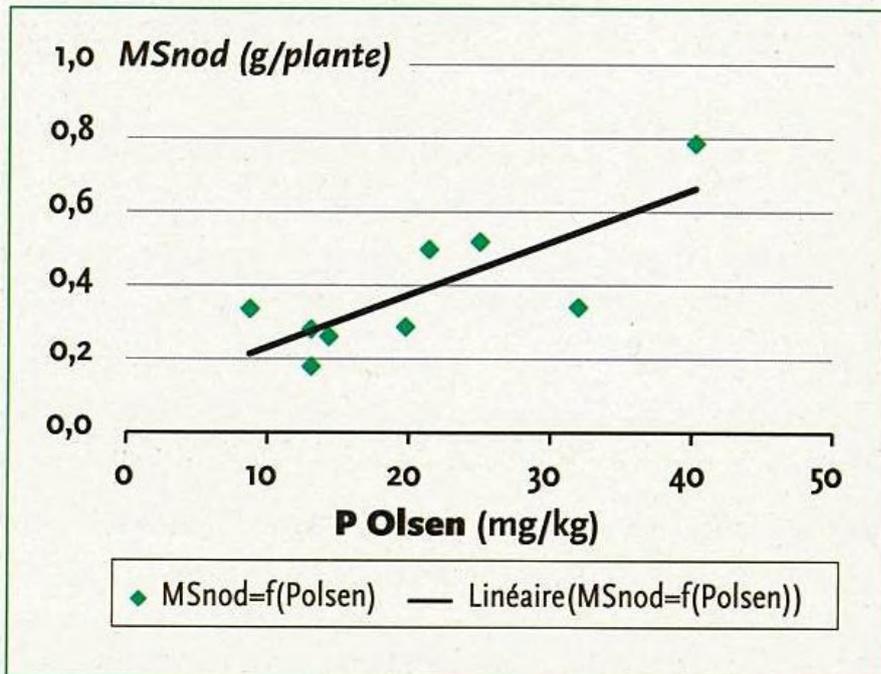


Figure 6 : Matière sèche de nodules et P Olsen pour la Féverole à pleine floraison. Source : Bétencourt et al. 2009.

Aménagement du système de culture

L'utilisation de légumineuses :

Les légumineuses ont la capacité de s'associer avec des bactéries du genre *Rhizobium* et de réaliser une fixation symbiotique de l'azote (Nicolardot et al., 1996).

L'association entre la plante et la bactérie est traduite par le développement de nodosités. Ces dernières présentent une coloration rosée lorsqu'elles sont efficaces, ce qui permet de repérer les nodosités fixatrices des non fixatrices. C'est l'activité d'une enzyme : la nitrogénase, produite par la bactérie lorsqu'elle est dans le nodule qui permet de réaliser la réduction de l'azote atmosphérique. Ainsi, la plante fournit à la bactérie des composés issus de la photosynthèse, et la bactérie fournit à la plante du NH_3 (Trinchant et al., 1997).

Un couvert de légumineuse, grâce au processus de fixation symbiotique, permet d'enrichir le sol d'environ 80 unités d'N pour une production de matière sèche de 3 t/ha/campagne (Labreuche, 2009).

D'autre part, il existe une relation entre la teneur en Phosphore disponible du sol (P Olsen) et le nombre et la masse des nodosités (Figure 6). En effet, les légumineuses implantées sur des sols pauvres en P peuvent présenter une réduction de la fixation symbiotique dans le cas d'une carence en P (Bétencourt et al., 2009). Ce phénomène semble être accentué dans les sols compactés qui ne permettent pas une bonne installation des nodosités. En effet, dans le cas d'un sol compacté, l'aération du sol est réduite alors qu'elle est indispensable pour les bactéries aérobies mises en jeu dans la fixation symbiotique.

L'utilisation de couverts végétaux :

Cette technique peut répondre à différents objectifs :

- Limiter la fuite des nitrates (notamment suite à une culture de légumineuse)
- Améliorer l'autonomie en N de l'exploitation (réduire l'utilisation des PRO)
- Limiter l'érosion
- Favoriser l'activité biologique
- Stocker de la matière organique et du carbone dans le sol (permet de lutter contre la baisse du stock de matière organique du sol)
- Assurer une seconde récolte dans certains cas (améliore la rentabilité économique)

En fonction de l'objectif visé, ces couverts peuvent prendre différentes formes, mais les plus généralement utilisés sont la culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) et l'engrais vert.

Les cultures intermédiaires, par le développement de leur couverture végétale, protègent le sol contre les intempéries, maintiennent la stabilité structurale du sol et stimulent l'activité bactérienne. Certaines cultures comme la vesce sont intéressantes car elles présentent aussi un fort pouvoir d'étouffement des adventices (Morand, 2009).

Les CIPAN sont utilisées pour éviter la perte du reliquat d'azote minéral post récolte pendant la période d'interculture, (Machet et al., 1996). En agriculture conventionnelle, l'objectif est de limiter les pollutions environnementales. En agriculture biologique, même si les quantités d'azote mises en jeux sont plus faibles, l'objectif est d'éviter de perdre de l'azote, issu par exemple d'un précédent légumineuse. La durée d'une CIPAN est donc courte avec une implantation sur deux mois. Ceci permet ainsi de fixer l'azote minéral du sol durant la minéralisation automnale.

L'engrais vert, lui, est utilisé dans un objectif de fertilisation ou d'amendement du sol. Des cultures telles que le Colza, Féverole, Moutarde, Phacélie, Vesce, Sarrasin, Trèfle, Ray gras italien peuvent être implantées pures ou en mélanges (Morand, 2009). Ainsi, il restera en place plus longtemps qu'une CIPAN.

Les légumineuses sont souvent utilisées comme engrais vert car leur capacité à fixer l'azote atmosphérique leur permet de se développer dans des sols relativement pauvres en azote et de les enrichir après leur destruction (Labreuche, 2009). Dans le cas de l'implantation d'une culture non légumineuse, la quantité d'azote accumulée par le couvert sera déterminée par la disponibilité en N minéral dans le sol (Machet et al., 1996). Il est aussi possible de réaliser un mélange type céréale-légumineuse qui apporte à la fois du carbone (via la céréale) et de l'azote (via la légumineuse) (Loïc Prieur, communication personnelle).

L'implantation d'une culture intermédiaire peut éventuellement être réalisée sous couvert d'une céréale quand l'interculture est courte et peut être détruite à l'automne suivant (exemple : trèfle violet ou mélilot sous une céréale à paille) (Labreuche, 2009).

Finalement, le type et la nature du couvert, ainsi que les dates de semis et de destruction seront raisonnés en fonction de la durée de l'interculture, de l'objectif recherché (éviter le lessivage ou enrichir le sol en MO et/ou en N) mais aussi en fonction des conditions pédoclimatiques : la réserve en eau du sol doit être suffisante pour permettre le développement du couvert et la texture doit pouvoir supporter le passage d'un outil au moment de la destruction.

La qualité de la rhizosphère :

Pour Guppy et McLaughlin (2009), le challenge de l'agriculture biologique et de l'agriculture à bas intrants est de réussir à mobiliser le Phosphore peu disponible du sol.

Utiliser le P disponible mais pas accessible :

Il semble que seuls les ions de P situés très proche (environ 1 mm) de la surface des racines soient accessibles. Ainsi, il est important pour la plante d'augmenter son volume de sol exploré pour augmenter sa surface d'absorption par la production de racines fines, de poils racinaires et par la symbiose mycorhizienne (Hinsinger, 2010). Ceci peut passer par une sélection des plantes en fonction de leur système racinaire (architecture) ou en fonction de leur aptitude à réaliser des symbioses avec des mycorhizes (Conyers et Moody, 2009).

Utiliser le P peu ou pas disponible :

Les racines peuvent avoir un effet sur le pH de la rhizosphère. Ces variations de pH peuvent influencer la biodisponibilité de certains nutriments du sol (P, Fe, Zn ou Cu). L'acidification de la rhizosphère permettra notamment d'augmenter la disponibilité du P lorsqu'il est présent sous forme de phosphates de calcium (Hinsinger, 2010).

Il est donc intéressant de sélectionner, stimuler et utiliser les propriétés chimiques de la rhizosphère, notamment les sécrétions de phytases et de carboxilases par les racines et/ou des bactéries (Conyers et Moody, 2009).

Les cultures de la famille des légumineuses, possèdent cette caractéristique d'acidification de la rhizosphère qui est provoquée par la fixation de l' N_2 (Hinsinger, 2010).

Le cyclage de la matière organique :

Le cyclage correspond à utiliser les cycles biologiques pour rendre l'élément convoité disponible pour la plante. Avec le phosphore, le cyclage pourra être effectué par des bactéries capables d'utiliser le P du sol précipité ou bloqué sous une forme non accessible pour les plantes. Ainsi, ce phosphore sera relancé dans un cycle biologique, ce qui permettra à la plante d'y accéder plus facilement (Guppy et McLaughlin, 2009).

Utiliser dans la rotation des cultures présentant un enracinement profond permettra de puiser en profondeur des éléments fertilisants puis de les « remonter » en surface au moment de leur restitution au sol (plantes entières ou résidus de culture). C'est particulièrement vrai dans le cas de l'azote. Sa forme nitrique étant facilement lixiviable, cette technique permet de récupérer des nitrates qui ont migré en profondeur (Leclerc, 2001). Concernant le P, une plante présentant un système racinaire profond et très développé permettra de rapporter dans les horizons superficiels du Phosphore disponible mais pas toujours accessible pour la culture. Ceci aura pour effet d'augmenter la fraction de P labile cyclée dans le sol (Conyers et Moody, 2009).

Les engrais verts, les CIPAN et les couverts végétaux en intercultures sont des formes de cyclage.

Cependant, sans apports externes, le cyclage n'est pas durable (Ziadi et al., 2008).

Problématique

De façon générale, il a été constaté que les exploitations en agriculture biologique sans élevage souffrent principalement d'insuffisances en azote disponible dans le sol. Ceci se traduit par des déficiences chez les cultures et des rendements plus faibles qu'en système bénéficiant d'apports de fumier. D'autre part, des baisses du niveau de matière organique (MO) ont été mesurées et il semble que la balance négative des stocks de phosphore réduit les quantités de phosphore disponible pour la plante. Bien que le fumier semble être une bonne source d'azote et de carbone organique, notre système de grandes cultures sans élevage n'en dispose pas. Ainsi, des résultats encourageants ont été obtenus en utilisant des légumineuses dans la rotation et en développant des couverts végétaux en inter-culture.

La gestion de l'azote est une priorité puisqu'elle limite la production des cultures et que des apports maladroits peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et sur la marge brute de l'agriculteur. Il est donc essentiel de connaître les prélèvements d'azote par les cultures en conditions biologiques, ainsi que l'évolution du stock d'azote du sol afin d'adapter au mieux le système de culture aux potentialités du milieu.

Finalement, le manque de disponibilité du Phosphore est un facteur à surveiller car une déficience en P sur une culture de légumineuse peut avoir pour effet une réduction de la fixation symbiotique de l'azote, ce qui pénaliserait directement la gestion de la fertilité azotée des sols.

Ainsi, nous nous proposons d'utiliser les données issues du suivi long terme réalisé au Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique de Midi Pyrénées qui a réalisé différents prélèvements de sols et de plantes sur la période 2002-2007. L'étude de ces données permet d'appréhender l'évolution des stocks du sol et de caractériser l'état de nutrition des plantes.

Nous allons travailler sur la problématique suivante :

Evaluation et analyse de l'évolution des statuts azotés et phosphorés des sols d'une exploitation de grandes cultures menée en agriculture biologique, sans élevage ni irrigation sur la période 2002-2007.

Les objectifs de ce travail sont : (i) la production de références concernant l'évolution de l'azote et du phosphore sur le long terme dans les sols, (ii) la mise en évidence sur les cultures de facteurs limitants la production et (iii) l'appréciation du potentiel de durabilité d'un tel système agricole.



Figure 7 : Localisation du domaine de La Hourre

II. Matériels et méthodes

Dans cette partie du rapport, nous allons présenter le site expérimental afin de détailler les conditions pédoclimatiques de l'essai ainsi que le fonctionnement de l'exploitation sur laquelle il est réalisé. Ensuite, les modalités de mise en place du suivi, les données utilisées et les méthodes d'analyse seront développées.

A. *Le site expérimental : le domaine de La Hourre*

Le domaine de La Hourre est une exploitation agricole située à 1,7 km au Sud Est de la ville d'Auch (Figure 7), en bordure de la route de Pessan (D626). La ferme présente 55 ha dont 50,5 ha de SAU (surface agricole utile). Les parcelles s'étendent sur un système de coteaux d'orientation Est-Ouest présentant des pentes moyennes à fortes et l'altitude varie entre 150 et 239 m.

Les terres appartiennent à la Fondation Ludovic Lapeyrère, qui est majoritairement administrée par le Conseil Général du Gers. Ce domaine a été géré en agriculture conventionnelle jusqu'en 1999 par un professionnel de la Chambre d'Agriculture. A cette époque la rotation était basée sur une succession Blé tendre d'hiver – Tournesol avec ajout d'un Colza certaines années. Depuis 1999, c'est le LEGTA (Lycée d'Enseignement Général et Technologique Agricole) d'Auch Beaulieu qui est fermier du domaine de La Hourre et il l'a converti immédiatement en agriculture biologique.

La première campagne agricole (1999-2000) a permis de caractériser le site grâce à une série de photographies aériennes, une étude pédologique et au suivi d'une culture de Tournesol mise en place sur l'ensemble des parcelles. Les photographies ont permis de mettre en évidence les grands ensembles de sols et ont orienté la campagne de sondage tarière du pédologue. Finalement, le suivi de la culture de Tournesol a permis de repérer les potentialités agronomiques du domaine.

Les sols

Une étude pédologique a donc été réalisée durant l'hiver et le printemps 2000 par un pédologue de la CACG (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne). Il ressort de cette étude que les sols sont de nature argilo-calcaire. Les principales différences entre les sols de l'exploitation proviennent de leur épaisseur, leur teneur en éléments grossiers et la présence d'horizons plus argileux en profondeur.

Les teneurs en calcaire sont très élevées sur l'ensemble du site et les pH eau ont des valeurs allant de 8,3 à 8,6. En ce qui concerne les oligo-éléments, les sols sont déficitaires en manganèse et en molybdène mais les teneurs en zinc et en bore sont satisfaisantes et excédentaires en cuivre.

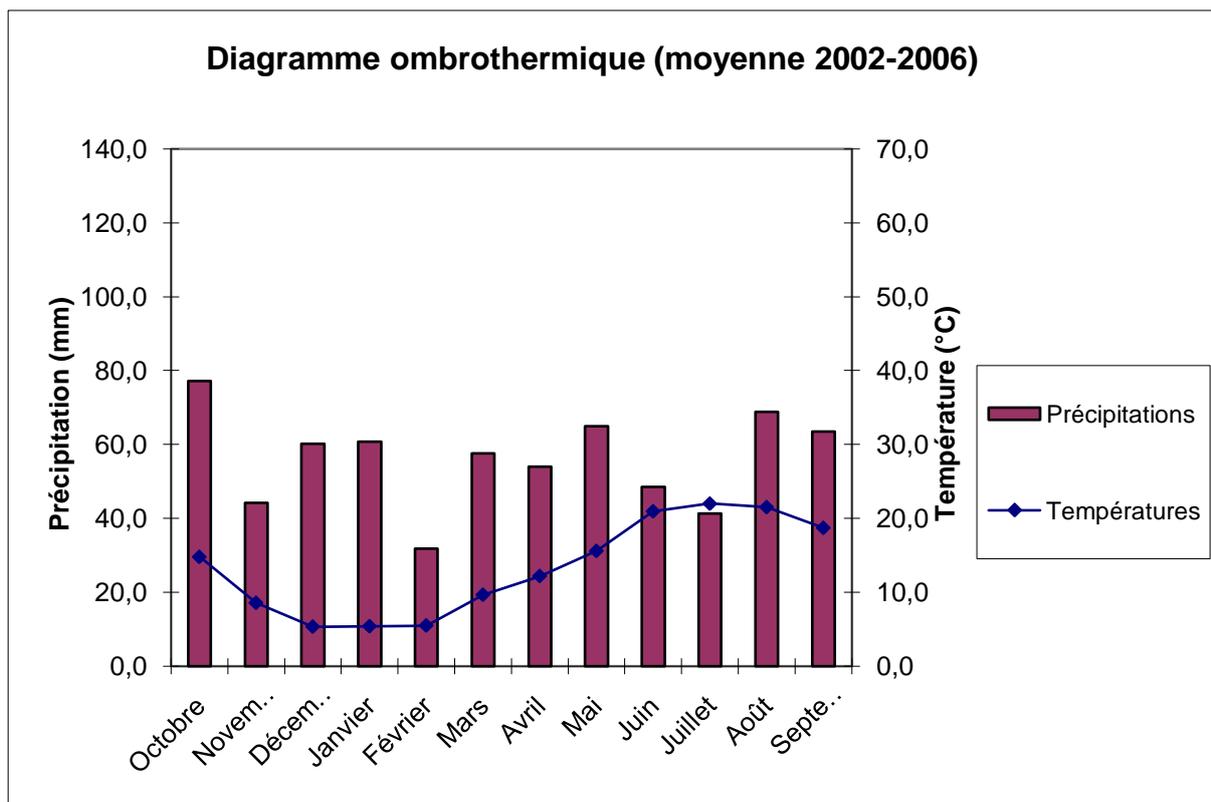


Figure 8 : Précipitations et températures moyennes sur la période 2002-2006

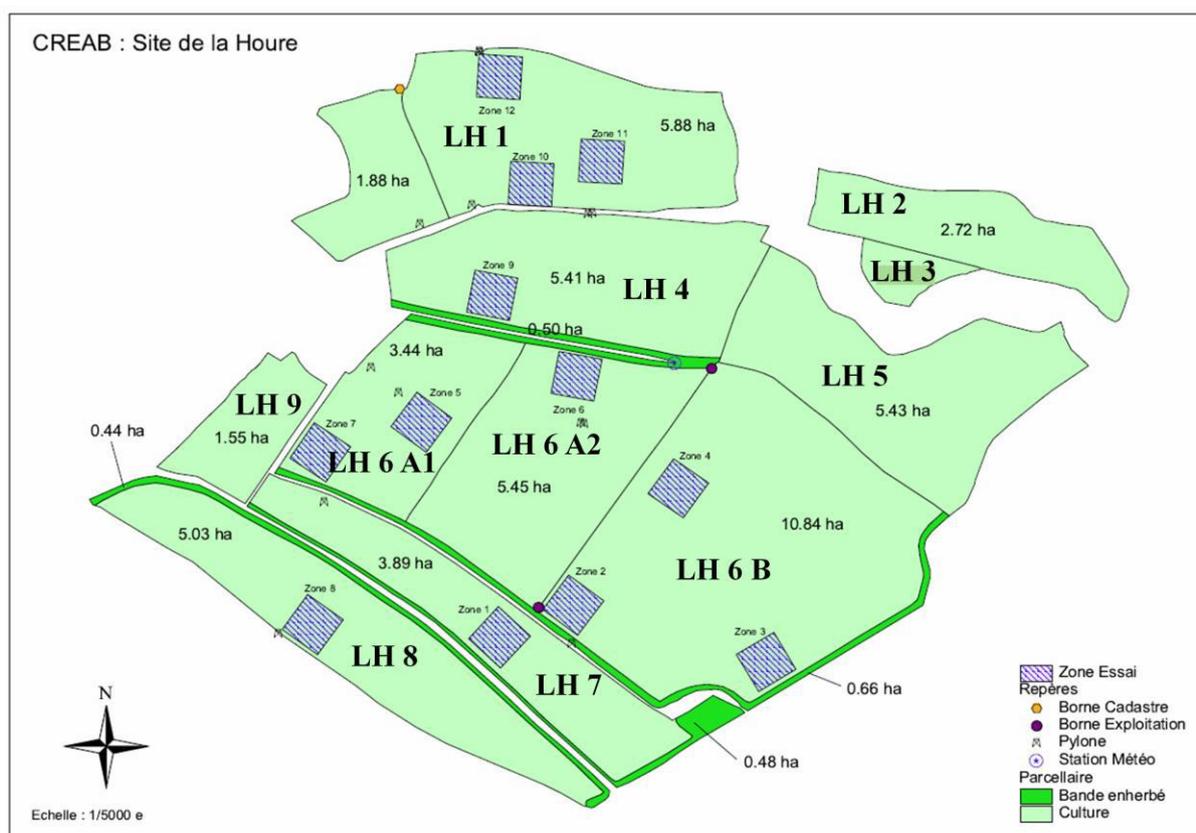


Figure 9 : Parcelleire du Domaine de La Hourre

Le climat

(Figure 8)

De façon générale, le département du Gers possède un climat soumis à différentes influences d'origines océaniques à l'Ouest, méditerranéennes à l'Est et d'une perturbation liée à la chaîne des Pyrénées au Sud. Plus précisément, les données météorologiques de la station expérimentale sont suivies quotidiennement et proviennent du poste Météo France d'Auch Lamothe.

Ainsi, sur la période du suivi (2002-2007), la température annuelle moyenne est de 13,3°C : les mois les plus froids sont Janvier, Décembre et Février et les mois les plus chauds sont Juillet et Août. Ce sont 673 mm de précipitations qui sont enregistrés en moyenne chaque année avec une répartition sur l'ensemble de l'année : un maximum au mois de d'Octobre et un minimum au mois de Juillet. Le mois de Mai est généralement sujet aux orages avec des périodes de grêle et un déficit hydrique est souvent marqué à partir du mois de Juin en raison de fortes chaleurs et de faibles précipitations.

Depuis 2 ans, le CREAB dispose d'une station météo présente sur le domaine de La Hourre qui permet de suivre les facteurs climatiques avec plus de précision.

Les parcelles

Le domaine de La Hourre était initialement découpé en 9 parcelles. Certaines d'entre elles ont été jugées trop grandes et subdivisées. Ainsi, à l'heure actuellement, le domaine compte 11 parcelles sous les dénominations : LH 1, LH 2, LH 3, LH 4, LH 5, LH 6 A1, LH 6 A2, LH 6 B, LH 7 LH 8 et LH 9 (Figure 9).

Une exploitation en grandes cultures biologiques sans élevage ni irrigation

Le cahier des charges de l'agriculture biologique proscrivant l'utilisation de fertilisants de synthèse, la nutrition minérale des cultures, notamment en azote, est un poste clé à gérer.

Ainsi, bien que des apports exogènes puissent être réalisés grâce à des produits naturels ou organiques, l'exploitation ne comportant pas d'atelier élevage, elle ne bénéficie pas d'effluents d'élevages. La fertilisation organique est donc réalisée avec des produits organiques du commerce. Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique, ces produits sont généralement coûteux et présentent des CAU faibles et fortement variables. Leur utilisation est donc limitée aux cultures exigeantes qui présentent des objectifs de qualité (teneur en protéines du Blé par exemple).

Une autre technique largement utilisée en agriculture biologique est l'utilisation de cultures légumineuses. Cette Super famille de plantes (dont le Soja, Pois, Féverole, Luzerne, Trèfle, Lentille...) présente la propriété de fixer l'azote atmosphérique, ce qui permet d'enrichir le sol en azote. Ainsi, le chef d'exploitation élabore des rotations où ces cultures ont une place importante et tend à mettre en place une alternance légumineuse / non légumineuse dans ses rotations.

Les cultures légumineuses sont introduites dans la rotation sous 4 formes différentes :

- Cultures de vente (Féverole, Lentille, Pois et Soja).
- Implantation de trèfle violet durant un an de jachère (semis à l'automne et destruction à l'automne N+1).
- Semis de trèfle sous couvert d'une céréale (au stade épi 1 cm) et destruction à l'automne suivant dans le cas d'une succession Blé –Tournesol ou de deux céréales.
- Implantation d'un couvert de Luzerne durant trois années.

En grandes cultures biologiques, l'utilisation d'herbicides de synthèse n'étant pas autorisée, la gestion des adventices est primordiale. La réalisation de semis tardifs et la mise en place de rotations alternant cultures d'été et cultures d'hiver permet de limiter le développement des adventices. Comme cette alternance n'est pas possible toutes les années, le travail du sol (faux semis, labour) permet de détruire une partie du stock d'adventices. L'implantation d'un couvert de Luzerne durant 3 années et fauché régulièrement permet de lutter efficacement contre les adventices vivaces comme le chardon. Finalement, en végétation, un désherbage mécanique peut être réalisé à l'aide d'outils tel que la herse étrille, la houe rotative ou la bineuse.

Les maladies sont un autre facteur limitant de la production. Celui-ci est géré par la mise en place de rotations longues et variées, et à l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes. Finalement, les attaques de ravageurs sont subies faute de moyens de lutte efficace, mais des recherches sont en cours sur ce sujet.

L'absence d'irrigation sur la Ferme de La Hourre restreint les possibilités de cultures d'été. Ainsi, le Tournesol (depuis 1999) et le Sorgho (depuis 2010) ont été choisis pour les parcelles de coteau qui présentent des RU (réserve utile) limitées et le Soja est implanté sur les parcelles à sol plus profond qui présentent des RU plus élevées.

La présence de cultures intermédiaires utilisées comme engrais vert permet de limiter le lessivage de l'azote. Finalement, l'absence d'élevage permet d'incorporer les résidus de culture au sol, ce qui constitue un apport de matière organique non négligeable.

Tableau 2 : Présentation des rotations

Parcelle	Surface (ha) ¹	2002	2003	2004	2005	2006	2007
LH1 (ZR10, 11, 12)	7,6	Féverole (Castel)	Orge (Platine)	Tournesol (Salsa)	Féverole (Castel)	BTH (Renan)	Tournesol (Salsa)
LH2	2,7	Pois chiche/Lentille	BTH	Tournesol	Féverole	BTH	Trèfle violet
LH3	0,5	Pois chiche/Lentille	BTH	Tournesol	Féverole	BTH	Trèfle violet
LH4 (ZR9)	5,4	Tournesol (Arena)	Trèfle violet (Diper)	BTH (Orpic)	Féverole (Castel)	Orge (Menhir)	Tournesol (Salsa)
LH6A1 (ZR 5, 7)	4	Orge (Platine)	Féverole (Castel)	BTH (Arpège)	Tournesol (Salsa)	Féverole (Castel)	BTH (Renan)
LH6A2 (ZR6)	4,9	Trèfle violet (Diper)	Orge (Platine)	Féverole (Castel)	Tournesol (Salsa)	Lentille (Anicia)	BTH (Renan)
LH6B (ZR2, 3, 4)	10,6	BTH (Cezanne)	Tournesol (Salsa - Arena)	Féverole (Castel)	BTH (Renan)	Tournesol (Salsa)	Féverole (Castel)
LH9	1,5	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Luzerne	Colza
LH7 (ZR1)	4,1	BTH (Arpège)	Soja (Agatha)	Orge (Platine)	Soja (Paoki)	BTH (Renan)	Soja (Shama)
LH8 (ZR8)	5,4	Soja (Paoki)	BTH (Arpège)	Soja (Paoki)	BTH (Renan)	Soja (Isidor)	BTH (Saturnus)
LH5	5,4	Jachère					

¹ Il s'agit de la surface réelle cultivée (hors bandes enherbées) mesurées par arpentage GPS.

ZR = Zone de Référence

BTH = Blé Tendre d'Hiver. L'Orge est aussi de type hiver.

En Bleu : parcelles en rotation longue

En Rouge : parcelles en rotation courte

Tableau 3 : Marges brutes moyennes par cultures (Source : Synthèse du suivi de cultures sur le Domaine de La Hourre réalisé par le CREAB en 2008)

Culture	Marge Brute Moyenne (2002- 2006) en €/ha
Blé tendre	562
Orge	561
Féverole	530
Soja	691
Tournesol	432

Les Rotations

La rotation est un élément clé de la gestion de l'exploitation de par ses effets sur la fertilité des sols, sur la gestion des adventices et des maladies. Cependant, le domaine de La Hourre est mené comme une ferme et non comme un centre d'expérimentation, ce qui implique la nécessité d'une rentabilité économique sur le long terme. Ainsi, les rotations ne sont pas fixes, ce qui permet de s'adapter aux situations du marché et aux contraintes agronomiques (comme la présence d'adventices).

Le CREAB a mis en place deux types de rotation sur le domaine de La Hourre : (Tableau 2)

Une rotation économique :

Les parcelles de fond de vallée présentent une rotation sur deux ans : Soja en sec et céréale à paille (Blé d'hiver ou Orge d'hiver) en alternance sur LH 7 et LH 8 de façon à avoir une parcelle en Soja chaque année. Ces deux parcelles sont les seules à avoir une réserve en eau suffisante pour permettre la culture de Soja sans irrigation. Ce Soja est destiné à l'alimentation humaine et dégage une marge brute importante (Tableau 3). Malgré sa faible durée, cette rotation présente l'avantage d'alterner culture d'hiver et culture d'été ainsi que d'alterner culture légumineuse et culture non légumineuse.

Une rotation longue :

Sur le reste du domaine qui est composé des parcelles en coteau, la rotation effectuée est plus longue et variée. Elle intègre systématiquement trois cultures : Féverole, Blé tendre d'hiver et Tournesol. Elle est allongée par l'intégration d'Orge d'hiver, de Lentille, ou de jachère de Trèfle violet.

L'absence d'irrigation sur l'exploitation ne permet l'utilisation que du Tournesol et du Sorgho comme cultures d'été. Finalement, la culture de Luzerne est utilisée en couvert sur une période d'au moins trois ans sur les parcelles présentant un salissement important, notamment en chardons.

Les variétés mises en place

Toutes les variétés utilisées ont été évaluée (faute de sélection propre à l'Agriculture Biologique) en fonction de leurs aptitudes à être cultivées en agriculture biologique :

- Rendement et teneur en protéines corrects avec une fertilisation réduite
- Pouvoir couvrant du sol pour limiter le développement des adventices
- Tolérance aux maladies

Tableau 4 : les variétés utilisées sur le domaine de La Hourre sur les campagnes 2001-2002 à 2005-2006

Cultures	Débouchés	Contraintes	Variétés et caractéristiques
Blé tendre d'hiver	Alimentation humaine : panification	- Teneur en prot > 11% - Qualités technologiques	- Cezanne - Arpège (bon compromis rdt/prot) - Orpic - Saturnus - Renan (bonne teneur prot et résistance aux rouilles jaune et brune et peu sensible à l'oïdium et à la septoriose)
Orge d'hiver	Alimentation animale		- Platine - Ménhir
Féverole	Alimentation animale		- Castel
Soja	Alimentation humaine	- Teneur en prot > 40%	- Paoki - Agatha - Shama - Isidor
Tournesol	Alimentation humaine : huile		- Arena (résistante au mildiou) - Salsa (résistante au mildiou et au phomopsis)

Remarques :

Les variétés de Blé tendre sont choisies en fonction des recommandations du réseau de criblage variétal de l'ITAB, d'Arvalis et de l'Association Nationale de la Meunerie Française, ainsi qu'en fonction des résultats issus des essais variétés réalisés sur le domaine de La Hourre. Les variétés d'Orge, elles, sont sélectionnées d'après les résultats satisfaisants obtenus sur les essais variétés du CREAB. Finalement, nous noterons que, concernant les variétés de Tournesol, la résistance au mildiou est une obligation en agriculture biologique.

Travail du sol

Comme nous l'avons vu précédemment, le travail du sol est un poste clé car il permet de lutter contre les adventices et de préparer l'implantation de la culture.

Céréales :

Dans le cas de l'implantation d'une céréale en interculture courte, un seul passage de déchaumeur à ailette est réalisé début Octobre. Il est généralement suivi d'un labour après précédent Tournesol ou Trèfle violet mais pas après un Soja. En interculture longue, le passage de déchaumeur est réalisé début Septembre et suivi par le labour. Dans tous les cas, une reprise est réalisée au vibroculteur avant le semis.

Tournesol et Soja :

Ces cultures étant présentes après des cultures d'hiver, 2 ou 3 passages de déchaumeurs sont réalisés en Août. La parcelle est ensuite labourée à l'automne lorsque de bonnes conditions de ressuyage sont présentes. Pour finir, 2 à 5 reprises sont effectuées entre le mois de Mars et la date du semis.

Féverole :

Un passage de déchaumeur est réalisé systématiquement en interculture longue, et de façon plus variable en interculture courte. Le labour est ensuite accompli mi-October et suivit d'une reprise en interculture courte (mi-Novembre). En interculture longue, le labour est effectué mi-Septembre et suivit de deux reprises (fin Octobre et fin Novembre).

Le déchaumage est généralement fait avec un déchaumeur à ailette. Il permet de sectionner les rhizomes des vivaces et de diminuer le stock grainier des adventices annuelles grâce à la réalisation d'un faux semis.

La préparation du sol est ensuite effectuée par un labour à 30 cm de profondeur. Cette profondeur permet de bien retourner la surface du sol et de lutter efficacement contre les adventices. Cette opération en sol argileux a pour effet, dans le cas d'un labour avant une culture d'été, de bénéficier du gel qui crée de la porosité en faisant « éclater » les argiles, ce qui améliore ainsi la structure des sols tassés.

Le semis est réalisé en combiné avec une herse rotative pour les céréales à paille, le Pois et les Lentilles. Un semoir monograine est utilisé pour les cultures de Féverole, Tournesol et Soja.

Le désherbage est effectué de façon mécanique avec une herse étrille et avec une bineuse. La herse étrille permet de désherber le rang et l'inter-rang. Elle est utilisée sur toutes les cultures alors que la bineuse effectue un travail sur l'inter-rang uniquement et n'est utilisée que sur le Tournesol, le Soja et la Féverole.

Seules les cultures de Blé et d'Orge sont respectivement fertilisées à raison de 80 kg et 40 kg d'azote organique/ha. Les apports sont fractionnés en deux fois pour le Blé tendre avec un engrais de type 10-0-0 ou 13-0-0 (farine de plumes hydrolysée). Sur la période étudiée, le CAU moyen des engrais organiques utilisés est de 37% (donnée issue des essais analytiques sur les fertilisants).

Notes : les CAU maximum obtenus en conditions contrôlées (incubations) sont de 50%. Le CAU mesuré au champ ne prend pas en compte l'azote minéralisé qui a été absorbé par les adventices ni les pertes par volatilisation. Une analyse des adventices serait donc nécessaire pour connaître le réel CAU au champ. Cependant, cette manipulation semble difficile à mettre en place (étalement de la croissance et sénescence des adventices sur la période de culture).

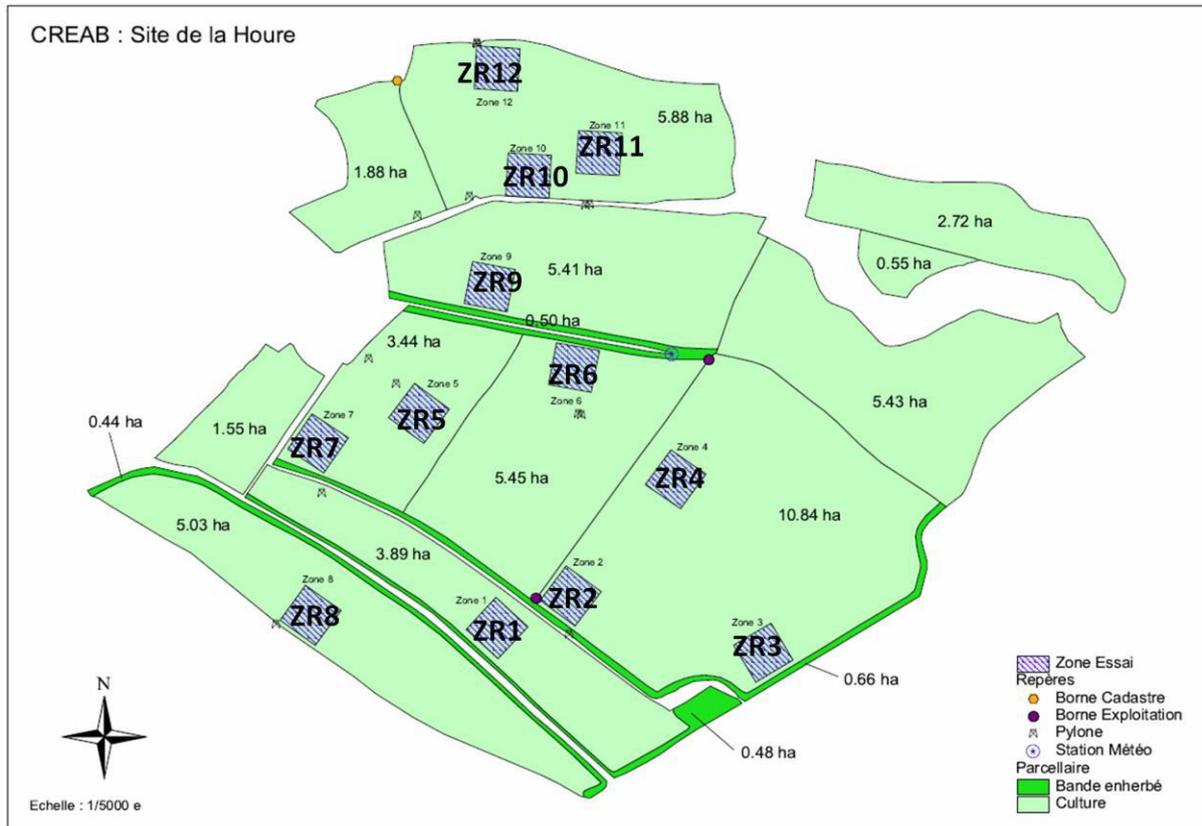


Figure 10 : Position des 12 Zones de Références (ZR)

B. Présentation du suivi

Mise en place des Zones de Référence

Sur le Domaine de La Hourre, 12 Zones de Référence (ZR) (Figure 10) ainsi que les comptages et les mesures s'y référant ont été définis.

La caractérisation des sols a permis de mettre en place des ZR présentant des caractéristiques de sol, de profondeur, de topologie et d'orientation différentes. Ces zones ont une taille de 2500 m² soit 50 m x 50 m. Elles n'ont pas pour vocation d'être représentatives de l'ensemble de l'exploitation mais plutôt de représenter un type de sol.

Ces ZR font l'objet d'un suivi annuel et d'un suivi sur le long terme de la fertilité du domaine de La Hourre. Au cours de chaque campagne, les ZR peuvent être déplacées par le passage d'outils agricoles. Pour y remédier, un positionnement au GPS est réalisé chaque année au mois de novembre.

Chaque zone fait l'objet d'un suivi du sol et d'un suivi des cultures :

Suivi du sol

Le suivi à long terme :

C'est le suivi qui est analysé dans ce stage. Il consiste en une série de prélèvements de sols réalisés tous les cinq ans et a pour but de suivre l'évolution de la fertilité des sols sur le long terme. La première campagne de prélèvements date du mois de Mars 2002, et la seconde campagne a été réalisée en Mars 2007.

En 2002 les prélèvements ont été réalisés avec une tarière manuelle, par horizons de 15 cm, puis regroupés deux par deux pour former des horizons de 30 cm.

En 2007, la campagne de prélèvements a été réalisée par tranche de 15 cm à l'aide d'une tarière hydraulique et les analyses ont été réalisées sur les deux premiers horizons de 15 cm. A cette occasion, la terre prélevée en 2002 a été analysée une nouvelle fois, mais par tranche de 15 cm.

Les caractéristiques étudiées sont : la granulométrie (5 fractions après décarbonatation), pH eau, carbonates de calcium, phosphore total (THF), phosphore organique et dosage Olsen, potassium échangeable, carbone organique total et azote organique total, et CEC Metson sur le 1^{er} horizon. Ces données ont permis de calculer la teneur en matière organique ($MO = C_{orga} \times 1,72$) ainsi que le C/N des sols.

Les analyses réalisées pour le suivi long terme concernent uniquement l'horizon 0-30 cm. Cet horizon a été choisi car il correspond à la profondeur de labour, à la zone d'enfouissement des résidus et à la bande de sol aérée au sein de laquelle l'essentiel des matières organiques sont dégradées.

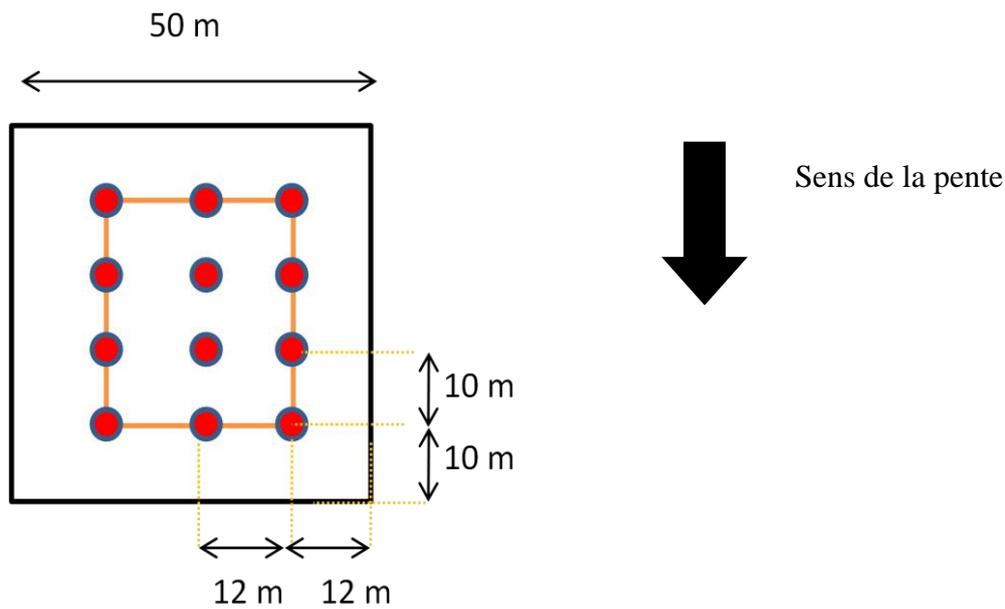


Figure 11 : Schéma des prélèvements de sol (un prélèvement à chaque point rouge)

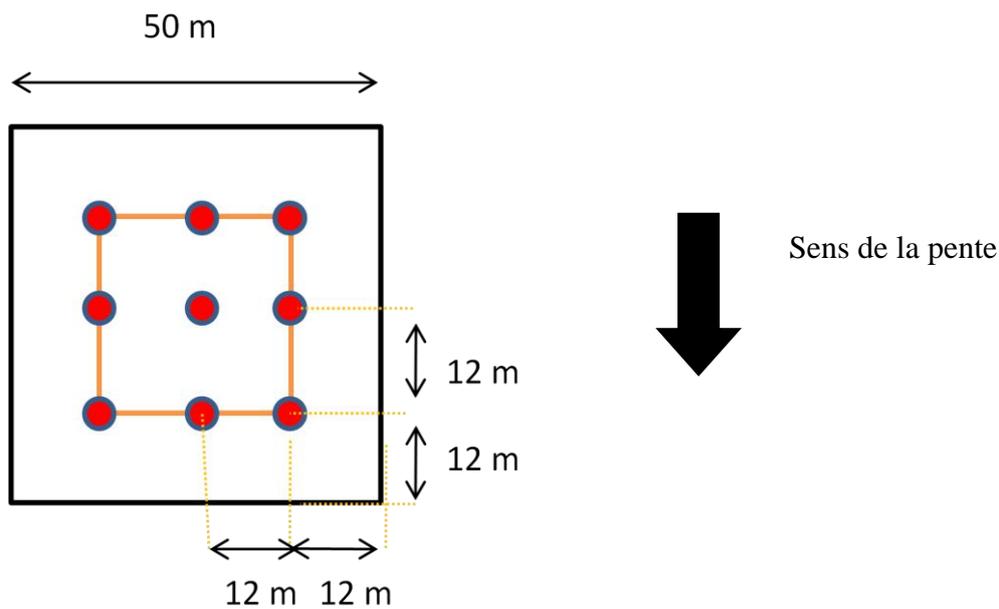


Figure 12 : Schéma des prélèvements de plante (un prélèvement à chaque point rouge)

Le suivi annuel :

Chaque année, trois campagnes de prélèvement de terre sont réalisées sur les Zones de Référence.

Novembre – Décembre (analyse entrée d’hiver et post récolte pour les cultures d’été)

Mars – Avril (analyse sortie d’hiver)

Juillet (analyse post récolte pour les cultures d’hiver)

Les analyses ont pour but de déterminer l’humidité et la teneur en azote minéral (N-NO₃ et N-NH₄) du sol. Les concentrations en azote minéral obtenues sont converties en quantités d’azote par hectare en utilisant une densité apparente de 1,45 sur l’horizon 0-30 cm puis de 1,5 sur les horizons suivants.

Les échantillons de sol sont analysés au laboratoire de l’INRA d’Auzeville (31).

Mode opératoire des prélèvements :

Les prélèvements de sol suivent le schéma présenté en Figure 11. Pour chaque ZR, 12 prélèvements sont effectués avec une zone d’exclusion d’une dizaine de mètres sur le pourtour de la ZR.

Les prélèvements étaient réalisés à la tarière manuelle jusqu’en 2004 avec des prélèvements allant jusqu’à 90 cm de profondeur. Depuis, ils sont réalisés avec une tarière hydraulique de l’INRA de Toulouse qui permet de prélever jusqu’à 120 cm de profondeur.

Les prélèvements sont répartis en 4 échantillons correspondant aux horizons : 0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 90 cm et 90 – 120 cm. Ainsi, chaque échantillon compte 12 prélèvements. Ils sont conservés dans un congélateur jusqu’à leur analyse.

Suivi des cultures

Les prélèvements de plantes sont réalisés trois fois dans l’année aux stades : épis 1cm (pour les céréales à paille seulement), floraison et récolte. La biomasse aérienne totale est prise en compte pour les prélèvements aux stades épis 1 cm et à la floraison alors qu’une séparation est réalisée entre les tiges et les grains pour les prélèvements à la récolte.

Mode opératoire :

Sur chaque ZR, 9 prélèvements sont réalisés en respectant une zone d’exclusion de 12 mètres en bordure de la Zone (Figure 12). Chaque prélèvement est réalisé sur le rang, sur une longueur de 50 cm. La biomasse de la plante est ainsi prélevée en coupant la culture au ras du sol.

Après un passage en étuve à 80°C pendant 48 heures, la pesée des échantillons permet de déterminer la matière sèche produite sur la Zone de Référence. Ensuite, les échantillons sont envoyés au SAS laboratoire (45) où sont réalisés les dosages de l’azote (méthode Dumas) et du phosphore.

Tableau 5 : données utilisées pour le suivi du sol

	Types de prélèvements	Profondeur des prélèvements	Informations complémentaires
Azote minéral	Annuels	0-90 puis 0-120 cm	$N \text{ minéral} = N\text{-NO}_3 + N\text{-NH}_4$
Reliquats azotés	Annuels	0-90 puis 0-120 cm	Les prélèvements de sol au mois de Novembre permettent d'apprécier les reliquats azotés dont vont bénéficier les cultures d'hiver semées à ce moment de l'année. Ces prélèvements permettent de mesurer les reliquats après légumineuses
Azote Organique	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	$N \text{ Organique} = N \text{ résidus} + N \text{ humus} + N \text{ microorganismes}$
P Total HF	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Phosphore total du sol (minéral et organique, soluble et insoluble), obtenu lors d'un dosage très destructif réalisé à l'acide fluoridrique
P Total intermédiaire	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Obtenu par dosage à l'acide sulfurique sur sol calciné
P Minéral intermédiaire	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Obtenu par dosage à l'acide sulfurique sur sol non calciné
P Organique	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	$P \text{ Organique} = P \text{ Total intermédiaire} - P \text{ Minéral intermédiaire}$
P Minéral	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	$P \text{ Minéral} = P \text{ Total HF} - P \text{ Organique}$
P Olsen	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Phosphore potentiellement disponible et assimilable par la plante obtenu par la méthode de dosage Olsen
C Organique	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Dosage du carbone composant la matière organique du sol.
Teneur en Potassium du sol	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Dosage du potassium contenu dans le sol.
CaCO₃	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	Teneur en carbonate de calcium du sol
pH	Mars 2002 et 2007	0-30 cm	pH eau de la solution du sol

C. Données utilisés

Grâce aux différents prélèvements de sols et de plantes, nous utilisons différents types de données, d'indicateurs et d'indices.

Sol

Les données et indicateurs utilisés concernant le sol sont présentés dans le Tableau 5.

Plante

Nutrition azotée :

Un indicateur largement utilisé pour caractériser l'état de la nutrition azotée des plantes est l'indice de nutrition azoté (INN). Cet indicateur est calculé après estimation de la teneur en azote optimale de la plante qui est calculée à partir de sa biomasse. Cet indicateur est utilisable de la levée à la floraison de la plante et permet de déterminer l'état de nutrition azotée de la plante. Un INN inférieur à 0,8 traduit une situation de déficience en azote.

$INN = \text{teneur en N de la plante mesurée} / \text{teneur critique en N de la plante.}$

Avec :

$\text{Teneur critique en N} = 5,35 \times (\text{MS mesurée en t/ha})^{-0,44}$ pour le Blé tendre si la biomasse $\geq 1,55\text{t/ha}$. Sinon, la teneur critique en N = 4,4% (Justes, 1993).

$\text{Teneur critique en N} = 5,08 \times (\text{MS mesurée en t/ha})^{-0,32}$ pour le Pois protéagineux si la biomasse $\geq 1\text{t/ha}$. Sinon, la teneur critique en N = 5,08%.

$\text{Teneur critique en N} = 4,53 \times (\text{MS mesurée en t/ha})^{-0,42}$ pour le Tournesol si la biomasse $\geq 0,75\text{t/ha}$. Sinon, la teneur critique en N = 5,1 (P. Debeake, communication personnelle).

Dans nos conditions de culture, les plantes présentent des déficiences en azote et les productions de biomasse sont faibles. Ainsi, nous nous trouvons en limite du domaine de validité de l'INN, qui a été calibré dans des conditions d'agriculture conventionnelle (et donc avec des productions de biomasse plus élevées) (E. Justes, communication personnelle).

De plus, notre rotation est très variée et il est nécessaire de comparer les différentes cultures avec des indicateurs identiques et les plus fiables possibles. A l'heure actuelle, aucun INN n'a été calibré pour l'Orge, la Féverole ou le Soja (la seule légumineuse possédant une formule d'INN est le Pois protéagineux). Dans ces conditions, le choix a été fait d'utiliser la teneur en N des plantes pour apprécier leur niveau de nutrition azotée. L'INN sera calculé pour le Blé tendre et le Tournesol à titre indicatif.

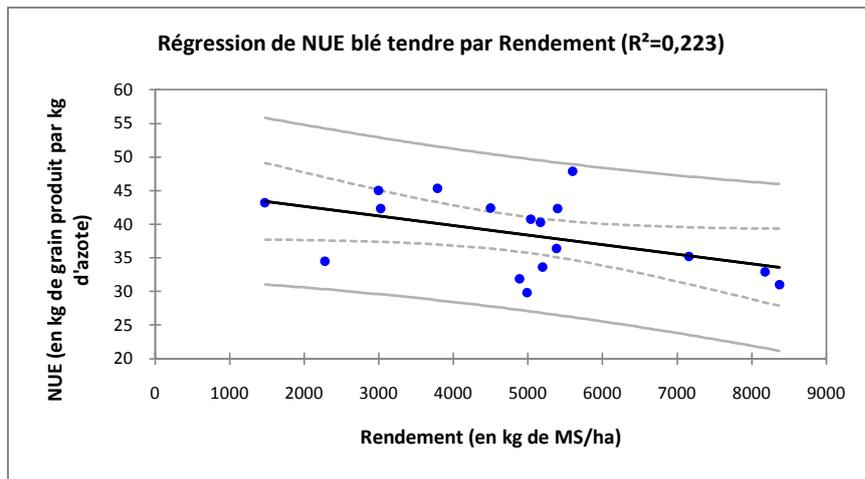


Figure 13 : Régression entre NUE et rendement pour un Blé tendre limitée en azote

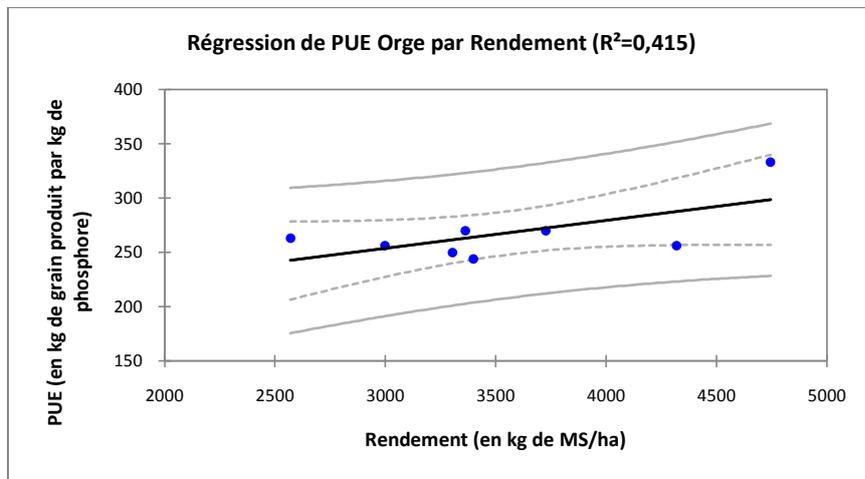


Figure 14 : Régression entre PUE et rendement pour une Orge d'hiver non limitée en Phosphore

Un autre indicateur de la nutrition azotée est le NUE (Nitrogen Use Efficiency). Bien qu'il soit dans la littérature souvent assimilé au CAU pour calculer l'azote utilisée par la plante provenant d'un engrais, nous utilisons ici une formule différente qui permet de calculer la quantité de grain produite à partir d'un kilogramme d'azote absorbé par la plante. Sa valeur seule nous informe sur l'efficacité de l'utilisation de l'N par la plante, mais sa relation avec le rendement ou une composante du rendement permet d'appréhender la nutrition de la plante.

$NUE = \text{Rendement grain (en kg de MS/ha)} / N \text{ abs (récolte parties aériennes, en kg d'N/ha)}$
(E. Justes, communication personnelle).

Le choix a été fait de ne pas utiliser de coefficient racinaire concernant l'azote absorbé pour cause de manque de précision dans l'estimation de ce coefficient.

Une relation positive entre NUE et rendement traduira que la plante n'est pas limitée en N puisque la plante est capable de produire des grains avec moins d'N (NUE augmente) sans en affecter le rendement (rendement augmente aussi). Dans le cas d'une relation négative (Figure 13), cela signifiera que la plante présente une certaine sensibilité vis-à-vis de l'azote puisque la plante a besoin de beaucoup d'azote pour produire du grain. Ainsi, la nutrition azotée limite les hauts rendements.

Nutrition phosphorée :

Comme pour la nutrition azotée, l'indicateur largement utilisé pour appréhender la nutrition phosphorée est l'INP.

$INP = \text{teneur en P de la plante à la floraison} / \text{teneur critique en P à la floraison.}$

La teneur critique de la plante en P est calculée à partir de sa teneur en N :

INP (Duru, 1997) : $\text{teneur critique en P} = 0,15 + 0,065 \times \%N$, est calibré pour les graminées.

INP (Ziadi, 2008) : $\text{teneur critique en P} = 1,7 + 0,092 \times \%N$, a été conçu pour le Blé tendre d'hiver en conditions légèrement limitantes en Azote.

Nous nous confrontons au même problème qu'avec l'INN. D'après la littérature (ZIADI et al., 2008), l'INP ne peut pas être utilisé dans des conditions de sévères déficiences en azote. De plus, cet indicateur n'a été calibré que pour les prairies de graminées ou pour le Blé tendre. Nous utiliserons donc la teneur en P de la plante pour faire état de la nutrition phosphorée.

Un autre indicateur utilisé est le PUE (Phosphorus Use Efficiency).

$PUE = \text{Rendement grain (en kg de MS/ha)} / P \text{ abs (récolte parties aériennes, en kg de P/ha)}$.

Son utilisation et son interprétation sont identiques au NUE : une régression positive entre PUE et rendement (Figure 14) indiquera une culture non limitée en Phosphore puisque la plante est capable de produire du grain avec moins de P sans en affecter son rendement.

Les prélèvements par la plante :

Les prélèvements azotés et phosphorés sont calculés pour chaque culture et peuvent être additionnés entre eux pour évaluer les prélèvements cumulés au sein de la même Zone de Référence à l'échelle de la rotation.

A la floraison, ces données correspondent à P abs et N abs et concernent les parties aériennes. A la récolte les prélèvements sont séparés en exportations (P et N des grains) et restitutions (P et N des tiges). Ces valeurs sont exprimées en kg de P ou d'N/ha.

Teneur en protéines des grains à la récolte :

Cette teneur est calculée à partir de la teneur en N des grains à la récolte.

Lorsque le grain est destiné à l'alimentation humaine :

$$\text{teneur en protéine} = \text{teneur en N des grains à la récolte} \times 5,7.$$

Lorsque le grain est destiné à l'alimentation animale :

$$\text{teneur en protéine} = \text{teneur en N des grains à la récolte} \times 6,25.$$

Le rendement et quelques unes de ses composantes :

Le rendement d'une plante est élaboré à partir de différentes composantes :

$$MS_{\text{grains}} \text{ m}^{-2} = NB_{\text{plantes}} \text{ m}^{-2} \times NB_{\text{talles}} \text{ plante}^{-1} \times (NB_{\text{épi}} \text{ talle}^{-1} \times NB_{\text{grains}} \text{ épi}^{-1}) \times MS_{1\text{grain}}$$

Détailler ces composantes permettra, lors de corrélations de cibler quelle composante du rendement est influencée par un facteur donné.

Ces données sont obtenues à partir des prélèvements et des comptages réalisés en végétation et à la récolte.

Rendement : exprimé en quantité de MS produite par hectare.

Densité plante : nombre de plantes par m²

Densité épis ou densité gousse : nombre d'épis par m²

Densité grain : exprimée en nombre de grains par m².

Densité grain relative :

$$\text{Densité grain relative} = \text{densité grain} / \text{densité grain max constatée sur les essais variété.}$$

Utilisée avec la culture de Blé tendre, cette variable permet de gommer les effets variété et d'évaluer le niveau de la densité grain par rapport à un potentiel maximum constaté sur le domaine de La Hourre, en conditions biologiques.

Le PMG : poids de mille grains, est exprimé en g.

Le calcul de la Minéralisation nette par la méthode du défaut de bilan :

La minéralisation nette, est la résultante de la minéralisation de l'humus additionnée à la minéralisation des résidus de culture, à la minéralisation des cultures intermédiaires et à la minéralisation du fertilisant organique.

Elle correspond à un bilan : minéralisation brute - organisation brute.

Le calcul de la minéralisation nette est réalisé à l'échelle de chaque Zone de Référence, par la méthode du défaut de bilan. Cette méthode utilise une équation dont tous les termes sont mesurés, estimés ou négligés.

L'équation est basée sur un bilan entrées-sorties de l'azote dans le système sol-plante :

$$(1) \mathbf{Ni} + \mathbf{Nx} + \mathbf{NP} + \mathbf{NI} + \mathbf{Nfix} + \mathbf{Mn} = \mathbf{Nf} + \mathbf{Nabs} + \mathbf{Nlix} + \mathbf{Nd} + \mathbf{Nvol}$$

Avec :

Ni et **Nf** : azote minéral initial et final. Les valeurs proviennent des prélèvements effectués chaque année au mois de Novembre. **Ni** de l'année n est égal au **Nf** de l'année n-1. La valeur du N minéral initial pour l'année culturale 2002 correspond donc au N minéral présent dans le sol en Novembre 2001. Les prélèvements ayant commencés en Novembre 2002, nous ne disposons pas de cette valeur en 2001. Elle a été estimée par la moyenne des reliquats d'azote minéral en sortie d'hiver du précédent cultural.

Nx : azote issu de la fertilisation = *quantité d'N apportée x CAU*
avec $CAU = (Nabs X_1 - Nabs T_0) / \text{Quantité d'N apportée}$. (X_1 plante fertilisée et T_0 plante témoin non fertilisée). Durant la période de temps étudiée, seuls des engrais sous forme de farine de plumes ont été utilisés : la valeur moyenne du CAU = 37% a été utilisée.

Nabs : azote absorbé par la culture et la culture intermédiaire
 $Nabs = \text{Matière Sèche produite par la culture} \times \text{teneur en N} \times \text{coefficient racinaire} (1,15)$.

NP et **NI** : azote provenant de la pluie et de l'irrigation

Nfix : azote fixé par fixation symbiotique. On estime sa valeur à 60% de l'N absorbé par la plante soit $Nfix = Nabs \times 0,6$.

On ne prend pas en compte la fixation libre de l'azote qui est considérée comme négligeable dans les sols cultivés français (Nicolardot et al., 1996)

Mn : minéralisation nette

Nlix : azote perdu par lixiviation (NO_3^-)

Nd : azote perdu par dénitrification. ($\text{N}_2, \text{N}_2\text{O}$)

Nvol : azote perdu par volatilisation

Ainsi, on obtient :

$$(2) \mathbf{Mn} = \mathbf{Nf} + \mathbf{Nabs} + \mathbf{Nlix} + \mathbf{Nd} + \mathbf{Nvol} - \mathbf{Ni} - \mathbf{Nx} - \mathbf{NP} - \mathbf{NI} - \mathbf{Nfix}$$

Le domaine de La Hourre n'ayant pas d'irrigation, $NI = 0$. De plus, on considère l'hypothèse que $NP = Nd + Nvol$. Ainsi on obtient l'équation suivante :

$$(3) \mathbf{Mn} = \mathbf{Nf} + \mathbf{Nabs} + \mathbf{Nlix} - \mathbf{Ni} - \mathbf{Nx} - \mathbf{Nfix}$$

On connaît : Ni, Nf, Nabs

On estime : N fix et Nx

On simule : N lix

Le suivi de Mn permet d'apprécier l'évolution du stock d'azote minéral du sol, et d'appréhender indirectement un stockage ou un déstockage d'azote organique.

Si $Mn > 0$, cela signifie que la fourniture d'azote minéral par le sol (minéralisation) est supérieure au processus d'organisation.

Si $Mn < 0$, cela traduit que l'organisation d'azote minéral est supérieure à la minéralisation des matières organiques du sol.

Ces bilans sont réalisés chaque année pour les cinq années étudiées (2001-2002 à 2005-2006) et peuvent être mis bout à bout pour simuler la période entière.

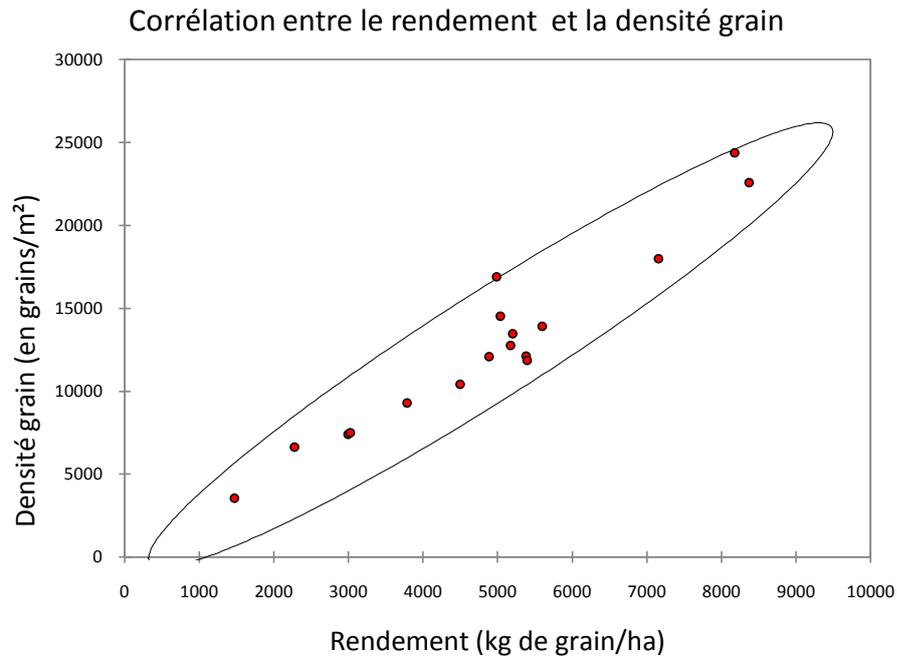


Figure 15 : Corrélation entre le rendement et la densité grain pour une culture de Blé tendre

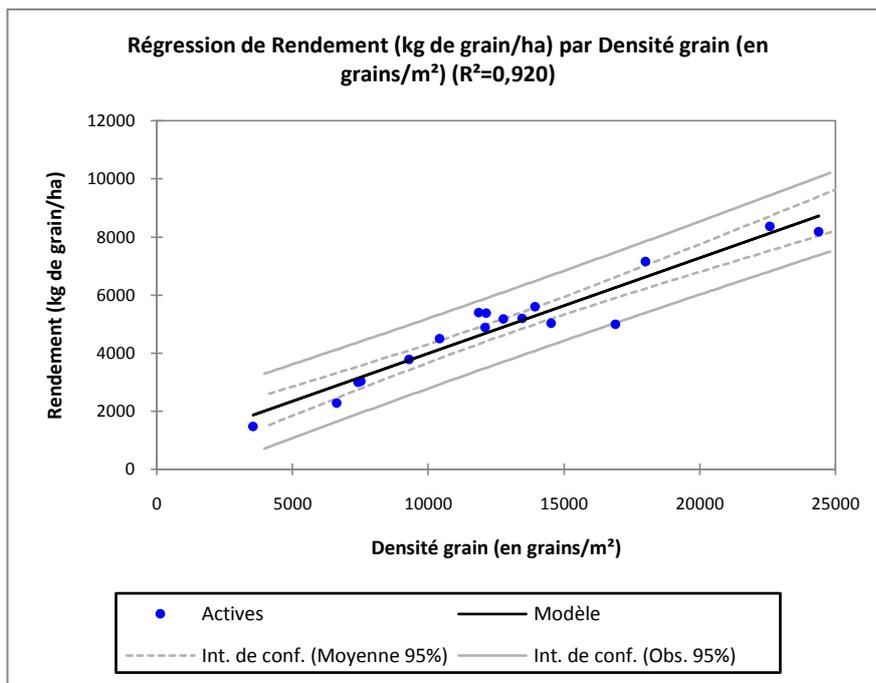


Figure 16 : Régression entre densité grain et rendement pour une culture de Blé tendre

D. Méthodes d'analyses

Logiciel XLSTAT

Un traitement statistique des données a été réalisé avec le logiciel XLSTAT. Les fonctions utilisées sont : Test de corrélation, Régression linéaire, Analyse de variance (ANOVA) et Test SNK (Student Newman-Keuls).

Corrélation

La corrélation est un outil qui permet d'évaluer le degré de liaison linéaire entre deux variables quantitatives (Figure 15). Aucune relation de cause/effet n'est prise en compte entre les variables.

Nous utilisons la corrélation car c'est un outil adapté lorsque les variables sont mesurées et non contrôlées.

Le coefficient de corrélation de Pearson est calculé en fonction du nombre de degrés de liberté de la variable et du niveau de signification (α) choisi. Il permet de mesurer le niveau de relation linéaire entre les deux variables étudiées. Sa valeur, comprise entre -1 et 1, permet aussi d'apprécier le sens de l'évolution des variables, l'une par rapport à l'autre.

Régression linéaire

La méthode de la régression linéaire permet d'évaluer la relation entre une variable dépendante Y et une ou plusieurs variables explicatives X. Le but est de prévoir la valeur de Y à partir de la valeur de X (Figure 16).

$$y_i = \beta_0 + \sum \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i$$

Avec y_i la valeur observée de la variable dépendante pour l'observation i , x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'observation i et ε est l'erreur du modèle.

Le coefficient de Pearson mis au carré, appelé R^2 permet de mesurer la proportion de la variation de Y expliquée par la variation de X.

$$R^2 = S_{xy}^2 / S_x^2 S_y^2 \quad \text{Avec } S^2 \text{ les variances estimées}$$

Ainsi, il est possible de mettre en évidence certaines relations entre deux variables, ou d'expliquer l'évolution d'un facteur, par l'évolution de deux autres facteurs présentant des interactions.

Analyse de variance

L'analyse de variance (ou ANOVA) nous permet de mettre en relation une variable quantitative avec une ou plusieurs variables qualitatives.

Conditions d'utilisation :

(Mouchiroud D., 2003)

L'indépendance : les différentes valeurs de la variable mesurée doivent être indépendantes les unes des autres. Les p échantillons comparés doivent être indépendants.

La normalité : la variable quantitative étudiée doit suivre une loi normale dans les p populations comparées. La variable aléatoire étudiée Y dont y_{ij} est une représentation, suit une loi normale.

Homoscédasticité : les p populations comparées doivent avoir une même variance. Ainsi, le facteur A agit seulement sur la moyenne de la variable Y et ne change pas sa variance.

L'expérimentation se déroulant en milieu naturel, la normalité et l'homoscédasticité sont respectées. De plus, le dispositif expérimental confère une indépendance entre les ZR et donc entre les différents échantillons.

Test de comparaison de moyennes : test SNK (Student Newman-Keuls)

Ce test, en complément de l'analyse de variance, permet d'évaluer si deux ou plusieurs traitements entraînent une différence significative entre les moyennes des échantillons. Ainsi, des groupes homogènes sont constitués concernant la variable étudiée. Les éléments de deux groupes homogènes sont considérés comme différents au risque de 1^{ère} espèce choisi (dans notre cas, $\alpha = 5$ ou 10%). Pour les éléments d'un même groupe homogène, il n'est pas possible de mettre en évidence une éventuelle différence.

La constitution des groupes homogènes se fait à partir des plus petites amplitudes significatives (p.p.a.s.) : lorsque l'amplitude observée entre les moyennes extrêmes d'un groupe de k moyennes sera inférieure à la p.p.a.s. pour k moyennes, on déclarera que ces k moyennes constituent un groupe homogène.

Note : les relations et régressions présentées dans la partie Résultat ne sont valables que sur l'intervalle des valeurs constatées.

Tableau 6 : INN floraison et teneurs en N moyennes à la floraison selon les cultures

Cultures	INN moyens à la floraison	C.V.	%N moyennes à la floraison	C.V.
Blé tendre (n =17)	0,56	27%	1,2%	18%
Féverole (n = 15)			3,3%	13%
Orge (n = 8)			1,2%	24%
Soja (n = 5)			3,5%	11%
Tournesol (n = 12)	0,92	18%	2,2%	9%

Tableau 7 : Teneurs en P moyennes à la floraison selon les cultures

Cultures	Cultures	%P floraison moyennes	Coeff de variation
Blé tendre (n =17)	Blé tendre	0,18%	13%
Féverole (n = 15)	Féverole	0,32%	18%
Orge (n = 8)	Orge	0,25%	20%
Soja (n = 5)	Soja	0,30%	4%
Tournesol (n = 12)	Tournesol	0,23%	23%

Tableau 8 : P Use Efficiency et N Use Efficiency moyens par culture

Cultures	PUE (kg de grain/kg de P)	CV PUE	Utilisation (kg de P/quintal de MS)	NUE (kg de grain/kg de N)	CV NUE	Utilisation (kg de N/quintal de MS)
Blé tendre (n =17)	236	12%	0,43	39	15%	2,6
Orge (n = 8)	277	10%	0,36	47	13%	2,1
Féverole (n = 15)	181	23%	0,55	18	11%	5,5
Soja (n = 5)	181	13%	0,55	13	11%	7,9
Tournesol (n = 12)	207	20%	0,48	21	11%	4,7

CV : Coefficient de Variance

III. Présentation des résultats

Dans cette partie, nous allons exposer les différents résultats issus du suivi long terme. Nous commencerons par l’N et P des plantes en détaillant l’état de nutrition des plantes, les éventuelles déficiences et les prélèvements des cultures. Ensuite, nous aborderons l’N et le P du sol en présentant les stocks et l’évolution de ces éléments sous leur différentes formes. Finalement, nous présenterons les résultats concernant les relations entre le sol et la plante (correspondance entre évolution des stocks et exportations par les plantes, effet du précédent cultural ou d’une rotation).

A. N et P dans la plante

La nutrition N et P

Différents indicateurs ont été utilisés dans le but d’apprécier l’état de nutrition ainsi que les besoins des cultures.

INN, teneurs en N et en P de la plante à la floraison :

(Tableau 6 et Tableau 7)

Sur la période 2002-2006, l’INN du Blé tendre présente une valeur moyenne de 0,56 alors que celui du Tournesol est plus élevé avec une valeur moyenne de 0,92.

Les teneurs moyennes en N à la floraison de l’Orge et du Blé sont identiques. Ces valeurs sont quasiment trois fois plus élevées pour les légumineuses que pour les céréales. De son côté, le Tournesol se trouve entre ces deux classes avec une teneur de 2,2 %.

Les légumineuses présentent les teneurs en P les plus élevées. Suivent ensuite l’Orge, le Tournesol puis le Blé.

NUE et PUE :

(Tableau 8)

On constate que les légumineuses utilisent beaucoup de P et d’N par quintal de grain produit car elles présentent des valeurs faibles de PUE et NUE. Au contraire, les céréales présentent des valeurs de PUE et NUE élevées, ce qui se traduit par une utilisation plus modeste de P et d’N pour produire un quintal de grains. Encore une fois, le Tournesol se situe entre ces deux classes.

Tableau 9 : régressions : rendement – composante du rendement

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	r	R ²	Degré de signification de F
Rendement Blé tendre	Densité grain Blé tendre	17	15	0,96	0,92	<0,01%
Rendement Blé tendre	Densité grain relative Blé	17	15	0,97	0,94	<0,01%
Rendement Féverole	Densité grain Féverole	15	13	0,64	0,41	1%
Rendement Féverole	Densité gousse Féverole	15	13	0,85	0,72	<0,01%
Rendement Orge	Densité grain Orge	8	6	0,91	0,83	0,2%
Rendement Soja	Densité grain Soja	5	3	0,81	0,65	9,8%
Rendement Soja	PMG	5	3	0,97	0,94	1%
Rendement Tournesol	Densité grain Tournesol	12	10	0,92	0,84	<0,01%

Régressions entre INN, teneur en N et en P, et composante du rendement

Cette régression va permettre de voir si la nutrition azotée ou phosphatée des plantes a une influence sur le rendement des cultures. Ceci nous permettra ensuite de déterminer d'éventuelles situations de déficiences pour les cultures ou de mettre en évidence un élément limitant la production.

En premier lieu, il est important de s'assurer qu'il est possible de comparer les différentes années (2002 à 2006) entre elles.

Effet année et ZR :

L'analyse de variance et un test SNK sont les outils permettant de détecter d'éventuels effets des facteurs année et ZR sur les variables INN, %N, %P, NUE et PUE ainsi que sur le rendement et les composantes du rendement.

La période étudiée ne comptant que 5 années, nous ne disposons que d'une, voire pas de répétitions d'une même culture sur la même ZR, ce qui ne permet pas d'utiliser ces outils pour déterminer s'il y a des interactions entre les facteurs années et ZR.

Cependant, d'après l'analyse des prélèvements de sol, il semble que l'ordre des ZR entre elles reste inchangé au fil des années, ce qui traduit une absence d'interactions ZR/années. Ainsi, les valeurs obtenues des années différentes sur des ZR différentes seront utilisées comme des répétitions dans des corrélations.

Régression rendement – densité grain ou densité gousse :

(Tableau 9)

Le rendement est la résultante de nombreuses composantes. Nous avons donc cherché pour chaque type de culture laquelle de ces composantes influe le plus sur le rendement.

Dans les cas du Blé tendre, de l'Orge et du Tournesol, les meilleures corrélations ont été réalisées entre le rendement et la densité grain. La densité grain relative a aussi été utilisée pour la culture de Blé et permet d'obtenir un coefficient R^2 plus élevé.

Pour la Féverole, la relation est plus significative avec la densité gousse plutôt qu'avec la densité grain.

Finalement, pour la culture du Soja, ni la densité grain ni la densité gousse ne donnent de résultats significatifs. En revanche, on obtient une bonne corrélation positive avec le PMG.

Tableau 10 : régressions INN et teneurs en N à la floraison - composantes du rendement

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	r	R ²	Degré de signification de F
Densité grain Blé tendre	INN Blé tendre	17	15	0,754	0,569	0,1%
Densité grain Blé tendre	%N flo	17	15	0,434	0,188	8,2%
Densité gousse Féverole	%N flo	15	13	0,582	0,339	2,3%
Densité grain Orge	%N flo	8	6	0,658	0,443	7,6%
Densité grain Soja	%N flo	5	3	0,42	0,177	45%
PMG Soja	%N flo	5	3	0,674	0,338	30,4%
Densité grain Tournesol	%N flo	12	10	-0,191	0,036	55,2%
Densité grain Blé tendre	NUE	17	15	-0,574	0,33	1,6%
Densité gousse Féverole	NUE	15	13	-0,301	0,09	27,6%
Densité grain Orge	NUE	8	6	-0,732	0,535	3,9%
Densité grain Soja	NUE	5	3	-0,234	0,055	70,5%
PMG Soja	NUE	5	3	-0,028	0,001	96,3%
Densité grain Tournesol	NUE	12	10	-0,007	0	98,3%

Composante du rendement – INN et teneur en N à la floraison : (Tableau 10)

Pour le Blé tendre, on obtient une corrélation positive entre la densité grain et l'INN. Il en est de même avec la teneur en N de la plante à la floraison pour le Blé et l'Orge. Cependant, le coefficient de corrélation et la significativité de la régression sont plus élevés lorsqu'on utilise l'INN plutôt que la teneur en N.

Une bonne corrélation est obtenue entre la teneur en N et la densité gousse pour la culture de Féverole. Concernant le Soja et le Tournesol, les corrélations réalisées ne sont pas assez significatives pour être analysées.

Composante du rendement - NUE : (Tableau 10)

On constate une relation négative et significative à 1,6 et 3,9 % entre la composante du rendement et le NUE pour le Blé tendre et l'Orge.

Synthèse : les résultats font état d'une relation significative entre l'azote dans la plante à la floraison et le rendement concernant les céréales et la Féverole. Cependant, peu de relations sont observées pour les cultures d'été (Soja et Tournesol).

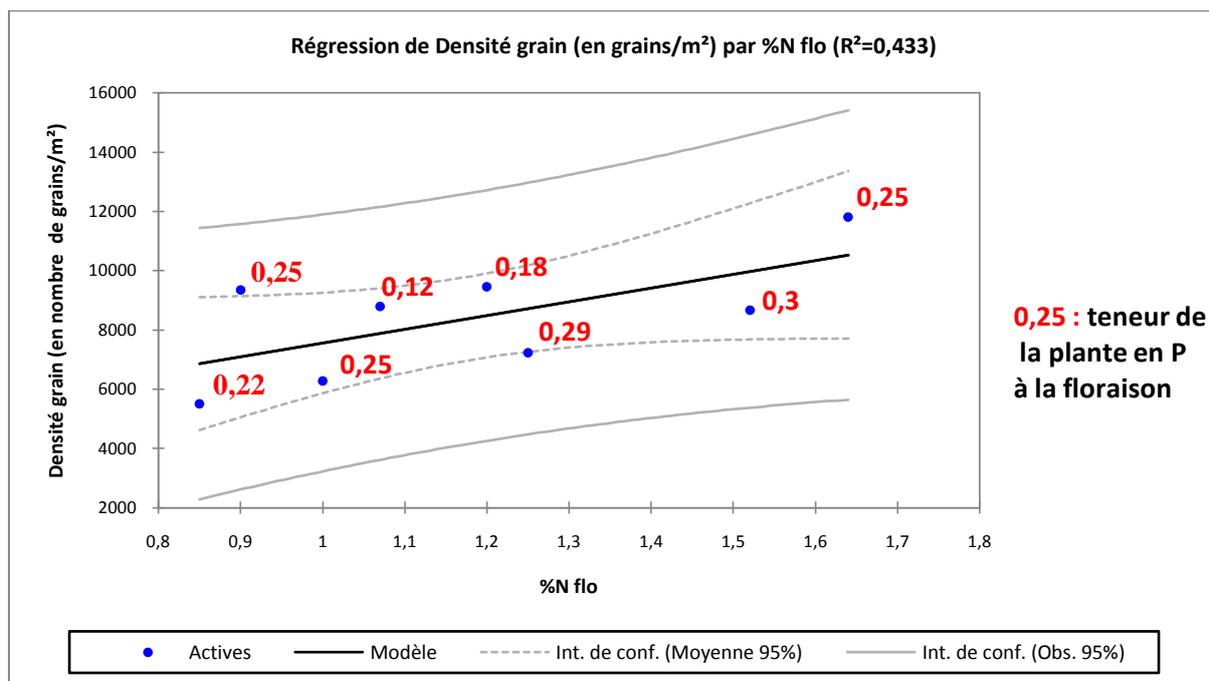


Figure 17 : Régression entre la densité grain et la teneur en N à la floraison pour la culture d'Orge

Tableau 11 : Régressions entre teneur en P des pailles ou des grains et densité grain

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	r	R ²	Degré de signification de F
Densité grain Orge	Teneur P grain à la récolte	8	6	- 0,664	0,442	7,2 %
Densité grain Tournesol	Teneur P tige A la récolte	12	10	0,669	0,448	1,7 %
Densité grain Orge	Teneur P tige A la récolte	8	6	- 0,698	0,488	5,4 %

Composante du rendement – Teneur en P :

Les régressions obtenues entre une composante du rendement et la teneur en P de la plante à la floraison manquent de significativité et ne permettent pas de mettre en évidence d'éventuelles relations entre ces deux facteurs.

Les résultats précédents nous ont montré qu'il existe des corrélations significatives entre la teneur en N à la floraison et la composante du rendement pour les cultures de Blé, d'Orge et de Féverole. Sur les graphiques de régression entre ces deux variables, les points situés en dessous de la courbe de tendance sont susceptibles de voir leur comportement expliqué par une teneur en P de la plante faible. Nous avons donc analysé ces points dans le but de mettre en évidence un éventuel effet de la nutrition P sur le rendement des cultures de Blé, d'Orge (Figure 17) et de Féverole. Nous avons constaté que les points situés en dessous de la courbe de tendance (qui présentent un rendement faible par rapport à leur teneur en N de la plante à la floraison) ne correspondent pas avec de faibles teneurs en P qui auraient pu avoir un impact négatif sur la composante du rendement et donc expliquer les faibles rendements. Ainsi, il n'est pas possible de mettre en évidence un éventuel effet de la nutrition phosphorée sur la composante du rendement.

Note : nous avons remarqué que certaines Zones de Référence (ZR 10, 11 et 12, qui sont situées sur la même parcelle) présentent, de façon récurrente, une composante du rendement faible, malgré des teneurs en N relativement élevées mais les teneurs en P associées ne semblent pas avoir limité le rendement.

Cette analyse n'a pas été réalisée pour les cultures de Tournesol et de Soja car le Tournesol ne présente pas d'assez bonne corrélation entre la composante du rendement et la teneur en N à la floraison, et le Soja n'a qu'un nombre de points limité du fait des rotations ($n = 5$).

Relation entre la composante du rendement et le PUE ; et entre la Teneur en N et celle en P des plantes à la floraison :

Seule la culture d'Orge présente une relation positive et significative à 6 % entre la composante du rendement et le PUE. Cependant, aucune corrélation ne s'est avérée être significative à un seuil $\alpha = 15$ % entre les teneurs en N et P de la plante à la floraison.

Relation entre densité grain et – teneur en P du grain ou de la tige à la récolte

Seule la culture d'Orge présente un coefficient de corrélation élevé et une relation négative entre la densité grain et la teneur en P du grain à la récolte ($\alpha = 10$ %). La culture d'Orge et le Tournesol présentent de bonnes relations entre les facteurs densité grain et teneur en P de la tige à la récolte : relation négative pour l'Orge ($\alpha = 10$ %) et positive le Tournesol ($\alpha = 5$ %) (Tableau 11).

Synthèse : il demeure beaucoup d'incertitudes concernant la mise en évidence d'un éventuel effet d'une déficience en P sur les composantes du rendement ou sur les teneurs en P des grains et des tiges à la récolte. Cependant, on a constaté quelques relations entre la composante du rendement et le PUE concernant l'Orge et le Tournesol.

Tableau 12 : régressions entre l'INN ou la teneur en N de la plante à la floraison et la teneur en protéine des grains à la récolte

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	Sens de la relation	Degré de signification de F
% protéines Blé	INN	17	15	0,598	+	0,01%
% protéines Blé	%N flo	17	15	0,375	+	0,9%
% protéines Féverole	%N flo	15	13	0,031	+	53,1%
% protéines Orge	%N flo	8	6	0,346	+	12,5%
% protéines Soja	%N flo	5	3	0,819	+	3,5%
% protéines Tournesol	%N flo	11	9	0,142	-	22,8%

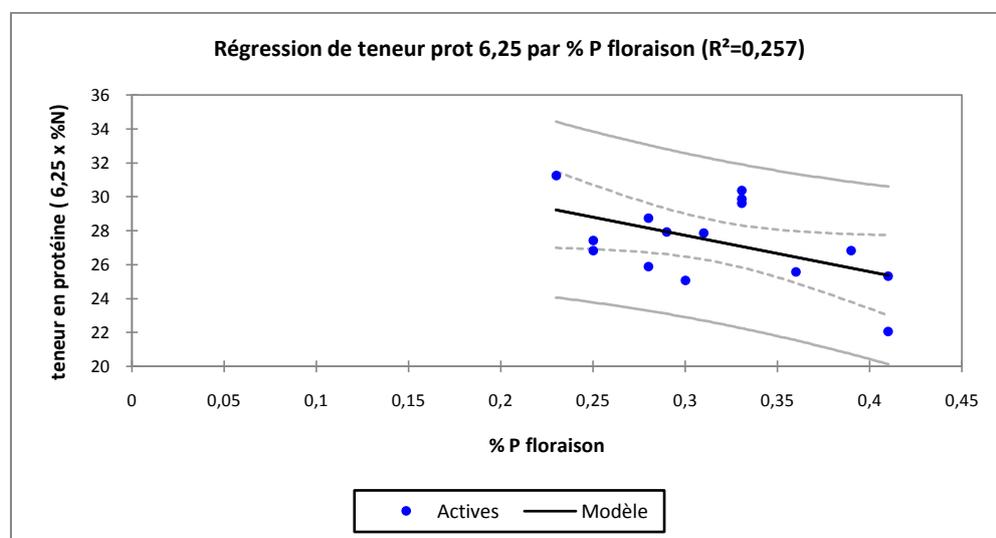


Figure 18 : régressions entre la teneur en P de la plante à la floraison et la teneur en protéine des grains à la récolte pour la culture de Féverole.

Tableau 13 : régressions entre le PMG et la teneur en protéine des grains à la récolte

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Degré de signification de F
% protéines Blé	PMG	17	15	0,189	3,49	8,1%
% protéines Orge	PMG	8	6	0,014	0,082	78,4%
% protéines Féverole	PMG	14	12	0,098	1,306	27,5%
% protéines Soja	PMG	5	3	0,136	0,474	54,1%

Effet de la nutrition N et P sur la teneur en protéine du Blé tendre, de l'Orge, de la Féverole et du Soja

Pour étudier les relations entre nutrition N et P et la teneur en protéine, différentes régressions ont été réalisées :

Relation entre le rendement et la teneur en protéine :

Le Blé et l'Orge présentent des régressions positives et significatives à 5 % entre le rendement et la teneur en protéines. La Féverole présente une relation positive et significative à 10 % entre ces deux facteurs. Pour le Soja, la régression n'est significative qu'à 35 %, ce qui ne permet pas de mettre en évidence une éventuelle relation entre ces deux facteurs pour cette culture.

Relation entre l'INN floraison et/ou teneur en N à la floraison et la teneur en protéines des grains à la récolte (Tableau 12)

Le Blé tendre présente une régression significative entre la nutrition azotée à la floraison et la teneur en protéine à la récolte. Cependant, les résultats sont plus précis en utilisant l'INN floraison ($\alpha = 0,01\%$) plutôt que la teneur en N ($\alpha = 1\%$). La relation entre ces deux facteurs est significative à un seuil $\alpha = 12,5\%$ pour l'Orge et $\alpha = 3,5\%$ concernant le Soja. La Féverole et le Tournesol ne présentent pas de relations entre la teneur en N à la floraison et la teneur en protéines à la récolte.

Relation entre la teneur en P à la floraison et la teneur en protéines des grains à la récolte

La Féverole est la seule culture présentant une relation significative (à 5,4%) entre sa teneur en P à la floraison et sa teneur en protéine des grains à la récolte (Figure 18).

Relation entre le PMG et la teneur en protéines des grains à la récolte

Cette régression permet de noter s'il y a une relation entre la taille du grain et sa teneur en protéines. Cependant, aucune régression ne permet de mettre en évidence une éventuelle relation entre ces deux facteurs (Tableau 13).

Synthèse : la teneur en protéine des grains semble être liée au rendement de façon positive. Il en est de même pour la nutrition azotée. Cependant, la nutrition phosphorée ne semble avoir d'effet sur la teneur en protéine que pour la culture de Féverole.

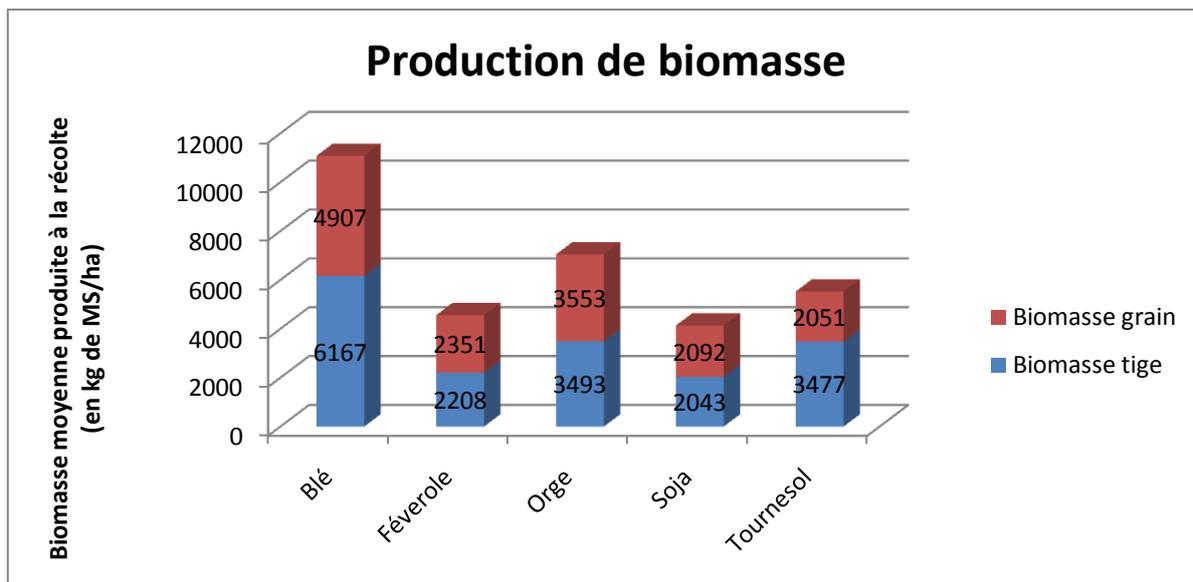


Figure 19 : production de biomasse par les différentes cultures

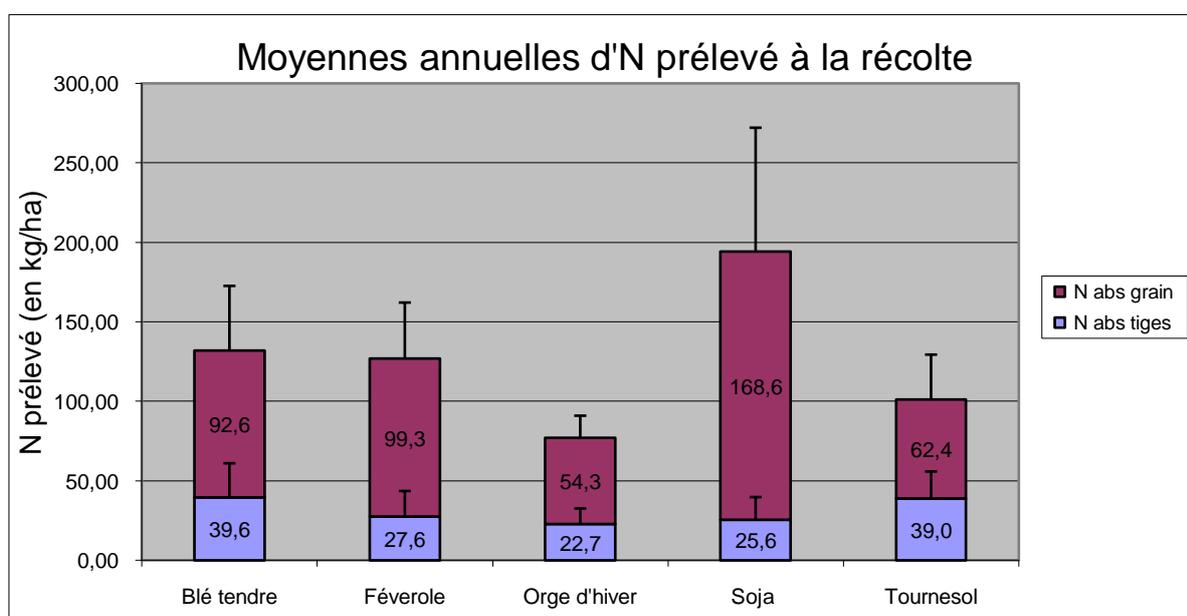


Figure 20 : Prélèvements moyens d'azote par culture pour une année

Tableau 14 : Teneur des tiges et des grains en azote à la récolte

Cultures	teneur des tiges en N	coeff var	teneur des grains en N	coeff var
Blé tendre	0,61%	40%	1,88%	11%
Féverole	1,25%	30%	4,38%	9%
Orge d'hiver	0,65%	32%	1,51%	7%
Soja	1,13%	32%	6,87%	5%
Tournesol	1,07%	27%	2,75%	6%

Production de biomasse par les cultures et indice de récolte

Les céréales, le Blé tendre en tête (11 tonnes), sont les cultures produisant le plus de biomasse. Les légumineuses sont les cultures qui produisent le moins de biomasse (un peu plus de 4 tonnes). Le Tournesol se trouve en position intermédiaire avec une moyenne de 5,4 tonnes de matière sèche produite à la récolte.

L'indice de récolte a été calculé avec la formule $IR = \text{Poids des pailles} / \text{Poids des grains}$ (Desclaux et al., 2008) L'indice est le plus fort dans le cas du Tournesol (1,87) et le plus faible pour la Féverole (0,92). Il faut cependant noter que pour les Féveroles, au moment du prélèvement de la biomasse à maturité, toutes les feuilles, qui représentent 50% de la biomasse produite, sont tombées au sol et ne sont donc pas prises en compte). Le Blé tendre a une valeur de 1,3 et l'Orge et le Soja sont proche de 1 avec $IR = 0,97$.

Prélèvements annuels d'azote et de phosphore par les cultures

La connaissance des prélèvements permet de suivre les quantités d'éléments exportés (qui quittent le sol via les exportations de grain) ou restitués (qui y retournent sous forme organique via les résidus de cultures : ici les tiges).

Azote :

(Figure 20)

Le Blé tendre présente de forts prélèvements (132 kg d'N/ha). Malgré une faible teneur en N des grains (Tableau 14), sa production de MS est forte (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'Orge présente les prélèvements les plus faibles (77 kg d'N/ha) à cause d'une faible teneur en N des grains et d'une faible production de MS. Le Soja et la Féverole présentent de forts prélèvements (respectivement 194 et 127 kg d'N/ha) Malgré des productions de biomasse assez faible.

Il faut noter que le Tournesol présente comme le Blé, beaucoup d'N dans les tiges à la récolte.

Note : Les coefficients de variation présentent des valeurs élevées mais sont généralement plus faibles concernant l'azote absorbé par les grains que pour l'azote absorbé par les tiges.

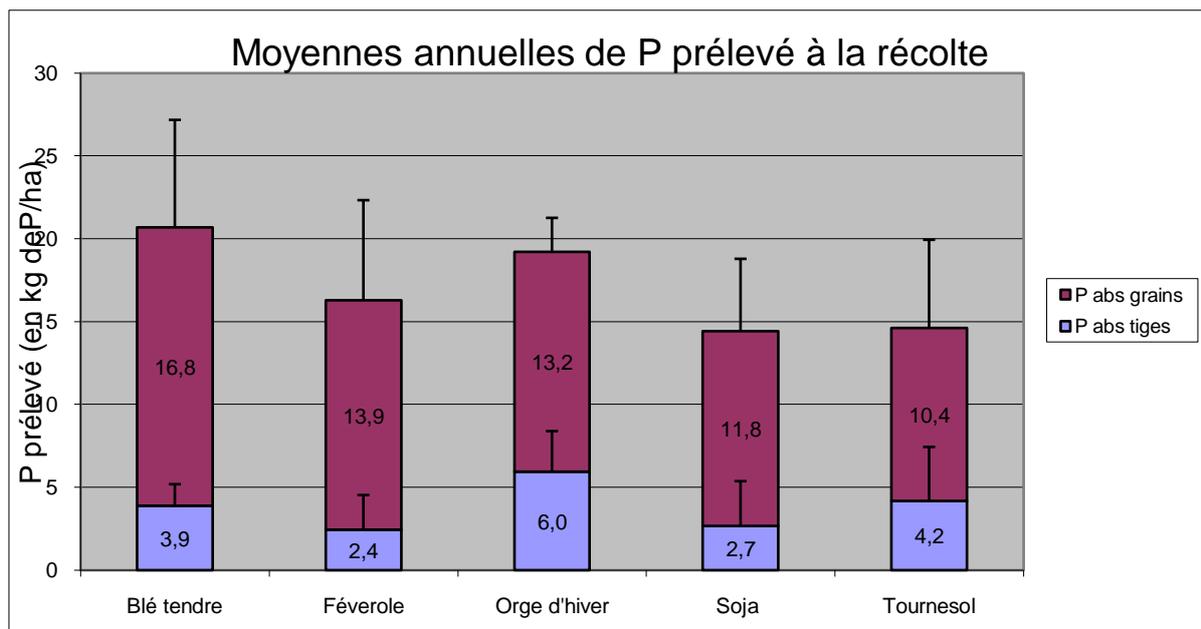


Figure 21 : Prélèvements moyens de phosphore par culture pour une année

Phosphore :

(
Figure 21)

Les coefficients de variation sont élevés et présentent des valeurs allant de 16 à 89%.

Le Blé tendre et l'Orge d'hiver sont les cultures qui prélèvent le plus de phosphore avec une vingtaine de kilogrammes de P prélevé/ha/an par la plante entière. Cependant, il faut noter que l'Orge d'hiver prélève beaucoup de P dans ses tiges (5,98 kg/ha/an). Cette culture présente ainsi la teneur en P dans les tiges la plus forte.

Les légumineuses (Soja et Féverole) prélèvent peu de P dans leurs tiges, mais présentent les plus fortes concentrations de P dans les grains. Ainsi, malgré des productions de biomasse grain plus faibles que les céréales, elles exportent via leurs grains des quantités de phosphore assez élevées.

Le Tournesol présente des moyennes assez basses concernant les exportations par les grains, car malgré une teneur en P des grains élevée (0,5%), sa production de biomasse grain reste faible.

Synthèse : les prélèvements par les cultures sont dépendants de la production de biomasse (qui est assez variable) et des teneurs en éléments des différents organes de la plante. Ces teneurs semblent plus stables dans les grains que dans les tiges. Ainsi, les cultures présentent des exportations (grains) et des restitutions (tiges) plus ou moins chargées en éléments nutritifs.

Tableau 15 : Bilans cumulés de l'azote et du phosphore sur la période 2002 – 2007

En kg d'N ou de P/ha/5ans	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de variation
N exportation	212	614	409	26%
N restitution	54	291	148	43%
P exportation	51	133	63	28%
P restitution	9	32	18	41%
N exp /P exp	5,3	7,1	6,5	18%

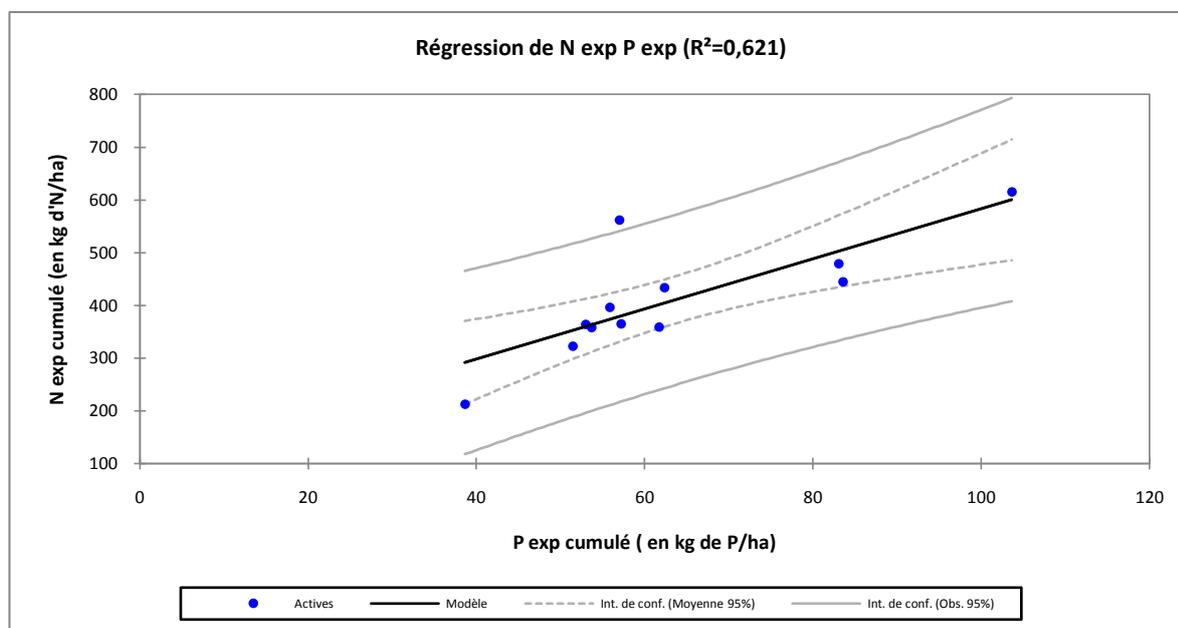


Figure 22 : régression entre P exporté cumulé et N exporté cumulé

Prélèvements cumulés sur la période 2002 – 2007 par ZR

(Tableau 15)

Prélèvements N :

Les valeurs des exportations s'étalent de 212 à 614 kg d'N/ha/5ans selon les ZR, avec une moyenne de 409 kg d'N exporté/ha/5ans.

Les restitutions présentent des valeurs comprises entre 54 et 291 kg d'N/ha/5ans avec une moyenne de 148 kg d'N/ha.

Prélèvements P :

Les prélèvements de P vers les grains (exportations) présentent des valeurs de 51 à 133 kg/ha/5ans avec une moyenne de 63 kg/ha/5ans.

Les prélèvements de P vers les pailles (restitutions) vont de 9 à 32 kg/ha/5ans avec une moyenne à 18 kg/ha/5ans.

En effectuant un rapport N exporté cumulé 2002-2007 sur P exporté cumulé 2007 pour chaque ZR, on obtient une moyenne de 6,5. Ceci correspond à 6,5 kg d'N exporté pour 1 kg de P exporté. On constate que ce rapport semble être relativement stable puisque le coefficient de variation de ce dernier est de 18%, ce qui est plus faible que les autres coefficients de variation des exportations.

Régression entre exportations P cumulées et exportations N cumulées

(Figure 22)

Cette régression permet de mettre en évidence les liens entre les exportations azotées et les exportations phosphorées. Pour cette régression, $n = 12$ (chaque point correspondant à une ZR). Le coefficient de corrélation R^2 est de 0,62 et cette relation est significative à 1%.

Synthèse : la forte variabilité des prélèvements traduit de fortes différences de production selon les ZR. Les régressions mettent en évidence une forte relation entre les exportations azotées et phosphorées.

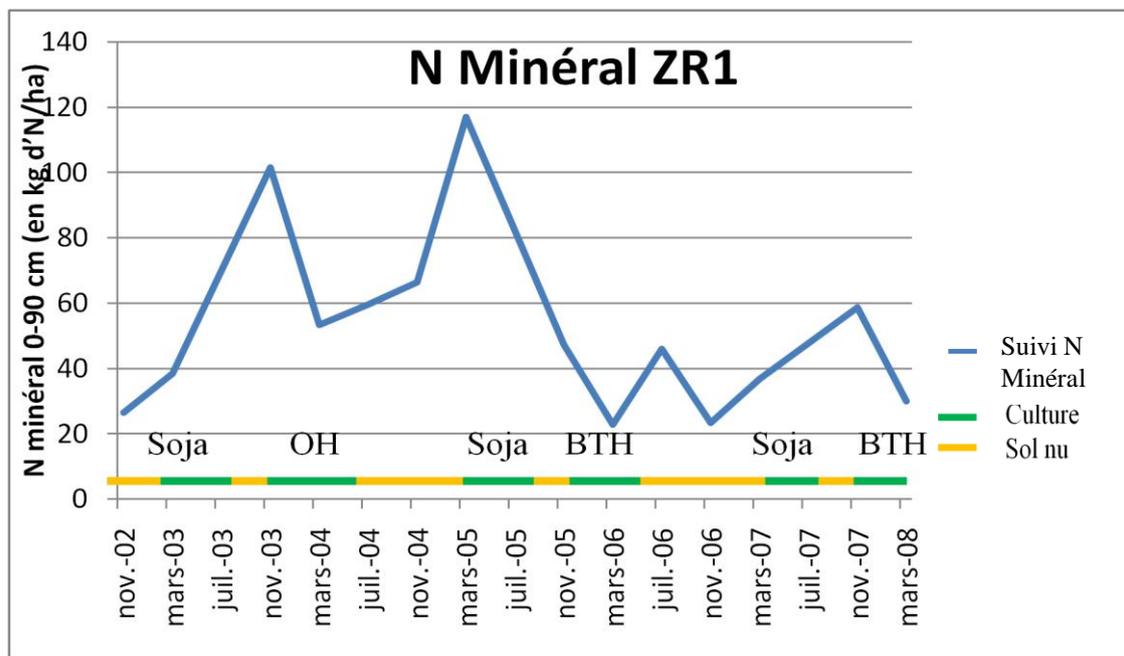


Figure 23 : N minéral au cours du temps sur la ZR 1

Tableau 16 : Reliquats azotés après culture de légumineuses

Cultures	Valeurs moyenne La Hourre Novembre (en U d'azote/ha)	Coefficient de variation	Valeur maxi	Valeur mini
Féverole (n = 14)	74	43%	169	12
Soja (n = 5)	43	119%	101	13
Trèfle violet (n = 2)	60	116%	96	23

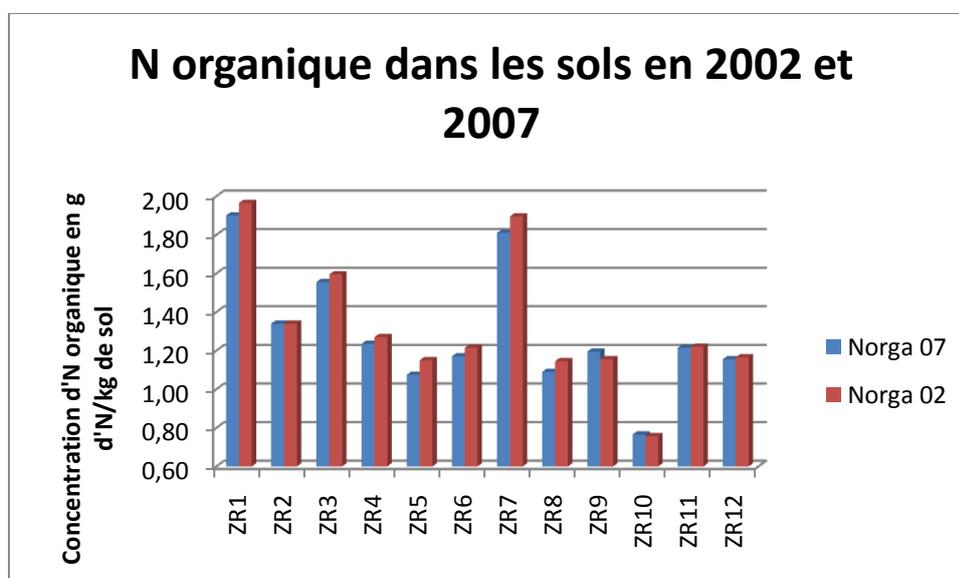


Figure 24 : Evolution des concentrations d'N organique entre 2002 et 2007.

B. Les stocks du sol

Statut de l'N Minéral

N minéral :

Grâce aux prélèvements annuels, il est possible de suivre le stock d'azote minéral au cours de l'année et tout au long de la rotation. Des variations sont constatées au cours de l'année et en fonction des cultures. Les maximums d'N minéral se situent en Novembre, et les minimums en Mars. On notera aussi la forte variabilité des reliquats post Soja et Féverole. Les valeurs obtenues sur l'ensemble des ZR descendent rarement en dessous des 20 kg/ha (Figure 23).

Quantification des reliquats azotés après légumineuses sur la profondeur 0-90 cm :

(Tableau 16)

On constate tout d'abord que les coefficients de variation sont très élevés et traduisent des reliquats automnaux fortement variables selon les parcelles et les années. Le Soja est le précédent légumineuse qui laisse le moins de reliquats azotés.

Calcul de la Minéralisation nette par la méthode du défaut de bilan :

La minéralisation nette cumulée sur la période 2002-2006 présente des valeurs allant de 146 à 898 kg d'N/ha/5ans. Le coefficient de variation est élevé (42%) en raison de la variabilité des rotations et des caractéristiques des ZR.

La moyenne sur les 12 ZR est de 455 kg d'N minéralisé/ha/5ans soit une moyenne de 91 kg d'N/ha/an. La minéralisation est donc supérieure à l'organisation et permet de fournir des éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes.

Bilan N Organique (Figure 24)

Sur la période 2002-2007, on constate que les valeurs des bilans sont différentes en fonction des ZR. En moyenne, 6 ppm d'azote organique ont été perdu/ha/an. Cette valeur est faible, à la limite de l'erreur expérimentale et du dosage.

Les ZR 5 et 7 présentent les plus grosses pertes d'Azote organique (noter que ces deux ZR sont situées sur la même parcelle). A l'inverse, la ZR 9 présente le plus fort gain avec + 40 ppm en 5 ans.

Synthèse : on constate que les légumineuses peuvent être une source intéressante d'N mais que les restitutions au sol sont très variables. La minéralisation nette ainsi que le bilan d'azote organique présentent de forts coefficients de variation.

Tableau 17 : Etat initial du stock de phosphore

	Etat initial (en ppm)					
	P ₂ O ₅ THF	P ₂ O ₅ Olsen	P ₂ O ₅ Orga	P ₂ O ₅ minéral	% P Olsen	% P Orga
ZR1	1635	30	605	1030	1,8	37,0
ZR2	1475	21	490	985	1,3	33,2
ZR3	1740	27	625	1115	1,7	35,9
ZR4	1210	16	415	795	1	34,3
ZR5	1230	21	380	850	1,3	30,9
ZR6	1440	32	395	1045	2	27,4
ZR7	1520	23	650	870	1,4	42,7
ZR8	1480	31	470	1010	1,9	31,7
ZR9	1165	17	450	715	1,0	38,6
ZR10	1047	21	235	812	1,3	22,5
ZR11	1365	31	430	935	1,9	31,5
ZR12	1225	22	455	770	1,4	37,4
moyenne	1378	24	467	911	1,5	33,6
coeff de variation	15%	24%	25%	14%	24%	16%

Tableau 18 : Bilan des différentes formes du phosphore entre 2002 et 2007 en ppm.

zone	Δ P ₂ O ₅ THF	Δ P ₂ O ₅ OLS	Δ P ₂ O ₅ ORG	Δ P ₂ O ₅ minéral
ZR1	-120	-7	-37,5	-82,5
ZR2	-165	-1,5	-22	-143,0
ZR3	-180	-3,5	-32,5	-147,5
ZR4	-45	-0,5	-12	-33,0
ZR5	-135	-5	-40	-95,0
ZR6	-145	-4	-47,5	-97,5
ZR7	-45	-1	-65	20,0
ZR8	-55	-0,5	-34,5	-20,5
ZR9	15	-3	-16,5	31,5
ZR10	-57,5	2,5	-7,5	-50,0
ZR11	-70	-4,5	-38,5	-31,5
ZR12	-5	-3	-27	22,0
moyenne	-83,96	-2,58	-31,71	-52,25

Bilan du P et ses différentes formes dans le sol

Le phosphore est un nutriment complexe qui peut être présent dans le sol sous de nombreuses formes différentes. Les suivre permet d'avoir une vision globale de la répartition et de l'évolution de cet élément.

Etat initial : (Tableau 17)

Dans les sols étudiés, le phosphore se présente à 33,6% sous forme organique et à 66,4% sous forme minérale. De son côté, le P assimilable par la plante, évalué par le P Olsen, représente seulement 1,5 % du P total (ou P THF).

Evolution entre 2002 et 2007 : (Tableau 18)

De façon générale, c'est une diminution des teneurs moyennes du sol qui est constatée. Cependant, les évolutions varient en fonction des ZR, des fractions du phosphore ainsi que selon leurs proportions par rapport au P total (P THF). Les résultats suivants sont présentés en ppm de P_2O_5 .

La concentration en phosphore total (P THF) du sol présente une baisse moyenne de 84 ppm de P_2O_5 sur 5 ans. Le P organique et minéral diminuent respectivement de 31,71 et 52,25 ppm de P_2O_5 sur cette même période. Ainsi, la proportion de P organique baisse et celle de P minéral augmente légèrement répartissant le P total à 33,2% sous forme organique et 66,8% sous forme minérale. Finalement, la concentration de P Olsen dans le sol présente une perte moyenne de 2,58 ppm/5ans.

Remarque : le P Olsen ne représente qu'une très faible part du P total.

Evolution de la matière organique

Nous avons constaté une perte moyenne de 0,47 g de carbone organique/kg de sol sur la période 2002-2007, ce qui correspond à 413 kg de C orga/ha/an (Da 1,5). Seuls deux ZR (2 et 4, situées sur la même parcelle) présentent un bilan positif.

P organique, N organique et C organique

Les régressions sont réalisées avec 12 points correspondants aux 12 ZR. Le coefficient de corrélation R^2 est donc calculé avec 10 degrés de liberté pour les régressions simples et 8 degrés de liberté pour les régressions multiples.

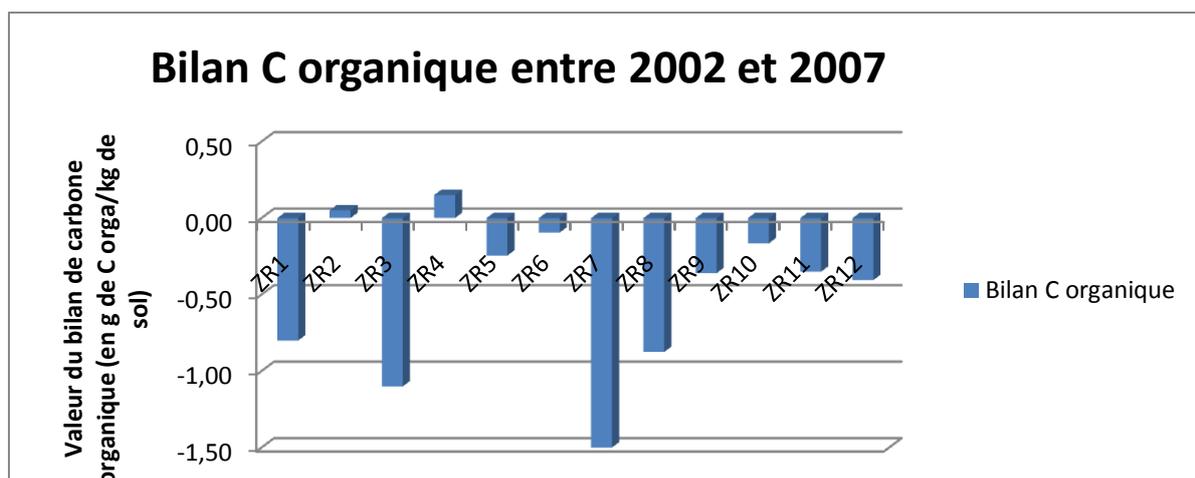


Figure 25 : Valeurs du bilan de carbone organique sur la période 2002-2007

Tableau 19 : Régressions entre N orga, P orga et C orga.

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Degré de signification de F
P Orga 02	C Orga 02	12	10	0,875	70,2	0,01%
P Orga 02	C & N Orga 02	12	8	0,93	35,5	0,01%
P Orga 02	C Orga & CaCO ₃ 02	12	8	0,933	36,91	0,01%
N Orga 02	C Orga 02	12	10	0,976	410,9	0,01%
N Orga 02	C Orga & CaCO ₃ 02	12	8	0,981	139,8	0,01%
N Orga 07	C Orga 07	12	10	0,98	502,2	0,01%
N Orga 07	C Orga & CaCO ₃ 07	12	8	0,985	175,94	0,01%
P Orga 07	N Orga 07	12	10	0,835	50,7	0,01%
P Orga 07	N Orga & CaCO ₃ 07	12	8	0,927	33,69	0,01%

Tableau 20 : Rapports C/N, C/P et N/P en 2002 et en 2007

Rapports	Valeurs 2002	Valeurs 2007
C Orga/P Orga	23,75	24,30
C Orga/N Orga	8,33	8,13
N Orga/P Orga	2,85	2,98

Toutes les régressions à une variable explicative sont significatives à 0,01%. Des régressions multiples ont ensuite été réalisées dans le but d'améliorer les corrélations en bénéficiant d'interactions entre les deux variables explicatives (Tableau 19).

Au départ, le pH et le CaCO₃ ont été choisis puis la variable pH a été écartée. En effet, la variable pH 2007 présentait des problèmes de multi-colinéarité avec les autres variables explicatives (cette variable présente une relation linéaire avec l'autre variable explicative). Ceci ne permet pas d'utiliser l'interaction entre le pH 2007 et l'autre variable explicative. Étonnement, ce problème n'est pas apparu avec la variable pH 2002 mais par précaution, cette variable a aussi été écartée.

Les régressions multiples permettent d'augmenter le coefficient R².

C/N, C/P et N/P :

En forçant les corrélations simples $y = ax + b$, de façon à obtenir une équation de la forme $y = ax$, (contrainte : constante = 0), il est possible de calculer les rapports C/P, C/N et N/P (

Tableau 20).

On constate ainsi une augmentation des rapports C/P et N/P entre 2002 et 2007 alors que le rapport C/N a baissé. Il semblerait donc qu'entre 2002 et 2007, la proportion de P Organique ait plus diminué et celles de C et d'N Organique. Cette diminution du C/N traduit une augmentation de la teneur en N de la matière organique du sol.

Bilans ramenés à l'hectare - effet de la densité apparente

Pour convertir les teneurs de P et N dans le sol en kg d'élément par ha, la densité apparente du sol est utilisée. Le sol étant labouré sur 30 cm, la densité apparente est considérée comme identique sur cette profondeur avec une valeur de 1,45 : soit $100 \times 100 \times 0,3 \times 1,45 = 4350$ tonnes de terre/ha.

Dans la réalité, la densité apparente peut varier entre parcelles et entre ZR en fonction de la texture et de la teneur en cailloux su sol, mais aussi selon la période de l'année suite aux passages d'outils et à leur condition de réalisation.

De plus, concernant le phosphore, les équivalences entre P₂O₅ et P se font en divisant par 2,29.

Ainsi, nous pouvons réaliser les estimations suivantes :

Perte moyenne d'N organique : 26,4 kg d'N/ha/an
Perte moyenne de P organique : 12,04 kg de P/ha/an
Perte moyenne de P minéral : 19,85 kg de P/ha/an
Perte moyenne de C organique : 412,89 kg de C/ha/an

Tableau 21 : régressions entre exportations, stocks d’N organique 2002 et minéralisation nette.

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	Degré de signification de F
Mn	N exporté	12	10	0,358	5%
Mn	N prélevé plante entière	12	10	0,676	0,1%
Δ N Organique	N exporté	12	10	0,061	43,8%
N exporté	N Orga 2002	12	10	0,217	12,6%
Mn	N Orga 2002	12	10	0,136	23,8%
P exporté	N exporté	12	10	0,621	1%

Tableau 22 : régression entre P exporté par les cultures et différentes formes de P

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Degré de signification de F
P exporté	P Olsen Relatif	12	10	0,015	0,151	70,6%
P exporté	Δ P Organique	12	10	0,083	0,90	36,4%
P exporté	Δ P Minéral	12	10	0,234	3,05	11,1%
P exporté	Δ P Olsen	12	10	0,01	0,105	75,3%
P exporté	Δ P Total HF	12	10	0,206	2,59	13,9%
P exporté	P205 Olsen 2002	12	10	0,0001	0,002	97%

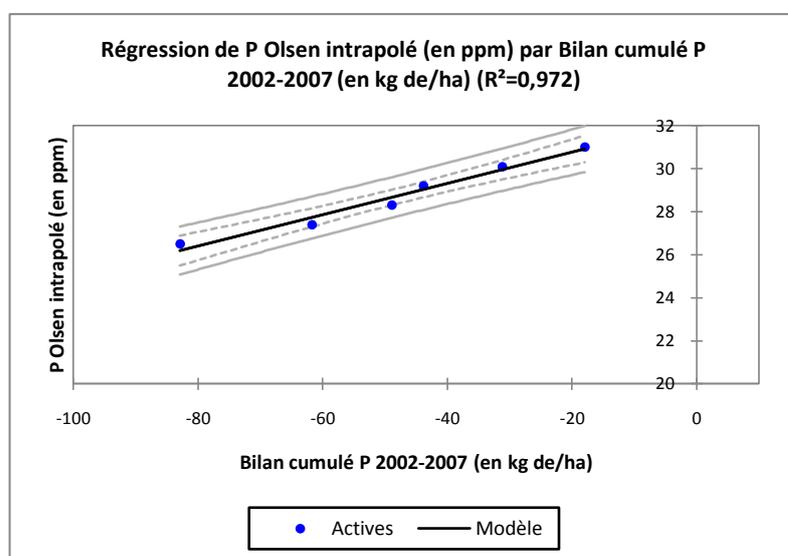


Figure 26 : régression entre le bilan P exporté cumulé et le P Olsen intrapolé.

C. Relations sol - plante

Relations entre N exporté et différents calculs d’N (Tableau 21)

Régression N prélevé par la culture – Minéralisation nette (Mn) :

Il existe une corrélation positive et significative à 5% entre l’N exporté par les grains et la Minéralisation nette calculée par la méthode du défaut de bilan (Mn).

Il existe aussi une corrélation positive, significative à 1% entre l’N prélevé par la plante entière et Mn.

Ces résultats sont logiques puisque l’N prélevé par la plante (Nabs) est un élément de l’équation permettant de calculer Mn.

Régression N exporté cumulé, Mn – N Organique :

Les corrélations entre N exporté et Δ N Organique et celles entre Mn ou N exporté et l’état initial du stock d’N Organique ne permettent pas de mettre en évidence d’éventuelles relations entre ces facteurs.

Relations entre P exporté et différentes formes de P

Il semble que le P exporté soit corrélé avec l’évolution du P minéral et du P THF (Tableau 21 : régressions entre exportations, stocks d’N organique 2002 et minéralisation nette.

Tableau 22) car leurs régressions sont respectivement significatives à 11,1 et 13,9%

Cependant, un résultat assez marquant est la différence non négligeable entre les bilans de P THF et de P exporté : - 164 kg de P THF/ha en moyenne et une moyenne des exportations en P de 63 kg/ha sur les 5 années étudiées.

D’autres régressions réalisées entre P exporté et P Olsen 2002 ou P Olsen relatif (P Olsen 2007 / P Olsen 2002) ne nous permettent pas de mettre en évidence l’existence de relations entre ces facteurs.

Finalement, la relation entre le P exporté cumulé au sein de chaque ZR et le P Olsen intrapolé (Figure 26) donne de très bonnes régressions avec des valeurs de R^2 comprises entre 0,94 et 0,99 selon les ZR. Le P Olsen intrapolé est calculé en suivant une évolution linéaire pour le P Olsen entre les deux valeurs de 2002 et 2007, il permet d’avoir une valeur de P Olsen chaque année pour chaque ZR. Les régressions obtenues sont positives sauf dans le cas de la ZR 10 qui présente un bilan P Olsen positif. Ainsi, le P Olsen du sol semble décroître linéairement en relation avec les prélèvements des plantes.

Note : la période étudiée étant de 5 années seulement, les variations de P Olsen sont très faibles et ces résultats devront être confirmés par les prélèvements de 2012.

Tableau 23 : régressions entre P Olsen intrapolé et teneurs en P à la floraison.

Variable à expliquer Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	Degré de signification de F
% P flo Blé	P Olsen intrapolé	17	15	0,19	8%
% P flo Féverole	P Olsen intrapolé	15	13	0,448	0,6%
% P flo Orge	P Olsen intrapolé	8	6	0,173	30,5%
% P flo Soja	P Olsen intrapolé	5	3	0,568	14,1%
% P flo Tournesol	P Olsen intrapolé	12	10	0,246	10,1%

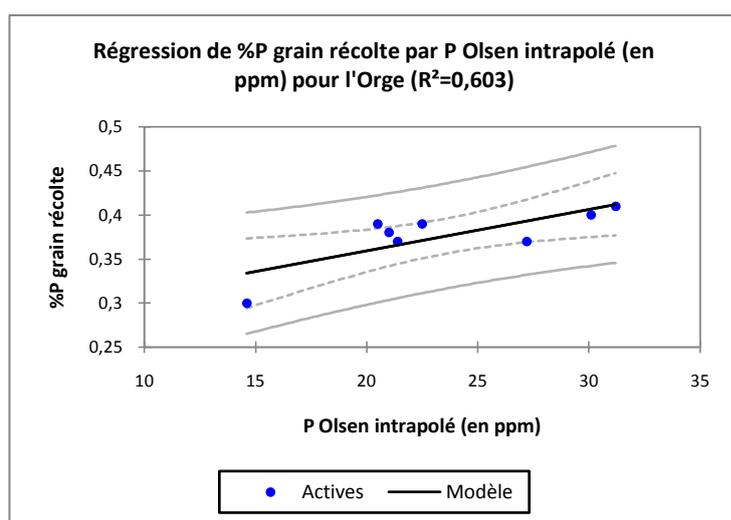


Figure 27 : Régression entre P Olsen intrapolé et teneur en P des grains d'Orge.

Tableau 24 : Résultats des tests SNK sur l'effet du précédent sur le Blé tendre.

Facteur étudié	Moyennes		Significatif
	Soja (n=3)	Féverole (n=10)	
INN floraison	0,47	0,62	8,9%
%N floraison	1,11%	1,36%	6,4%
Teneur en P floraison	0,198%	0,185%	39,9%
Densité grain (Grains/m ²)	9 814	14 695	22,8%
Rendement (kg de MS/ha)	3 686	5 481	18,5%
N abs floraison (kg d'N/ha)	72	108	12,8%
N abs récolte (kg d'N/ha)	87	156	14,3%
Teneur en protéines	9,8%	11,1%	14,5%

Relations entre N exporté cumulé et P exporté cumulé

Il existe une corrélation positive et significative à 1% entre l’N et le P exportés cumulés sur la période 2002-2007.

Corrélation entre teneur en P de la plante et des grains et P Olsen intrapolé

Les teneurs en P de la plante à la floraison sont corrélées à l’évolution du P Olsen intrapolé de façon positive pour le Blé, la Féverole et le Tournesol et de façon négative pour le Soja (Tableau 23).

Les teneurs en P des grains sont significativement et positivement corrélées au P Olsen intrapolé pour les cultures du Blé tendre, d’Orge (Figure 27) et de Féverole. La culture de Soja présente une relation négative entre ces deux facteurs.

Synthèse : les relations entre exportations en variations de stocks dans le sol restent assez floues. Cependant, le P Olsen intrapolé semble être un indicateur fortement lié aux exportations de phosphore ainsi qu’aux teneurs en P des plantes. D’autre part, les exportations de P et d’N présentent de bonnes relations

Effet du facteur précédent cultural sur la culture de Blé tendre

(
Tableau 24)

Nous allons comparer l’effet du précédent Soja par rapport à la Féverole sur différents facteurs avec un test SNK à 95%. Sur la période 2002-2007, la culture de Blé tendre a eu comme précédents de la Féverole (n = 12) et du Soja (n = 4).

Nous avons sélectionné les données obtenues sur des années climatiques où ces deux cultures étaient présentes. Ainsi, nous utilisons les données des années 2002, 2005 et 2006 car il n’y a pas eu de Soja précédant le Blé en 2004 et pas de Féverole précédant le Blé en 2003. Nous obtenons donc Féverole (n = 10) et Soja (n = 3).

Les variables présentant les différences les plus significatives (à 10 %) entre les deux précédents sont la teneur en azote de la plante à la floraison, suivie de l’INN floraison. Les valeurs sont systématiquement plus élevées après la culture de Féverole.

Viennent ensuite les variables N abs floraison, N abs récolte et teneur en protéine dont les valeurs sont plus importantes après Féverole de façon significative à un seuil de 15%.

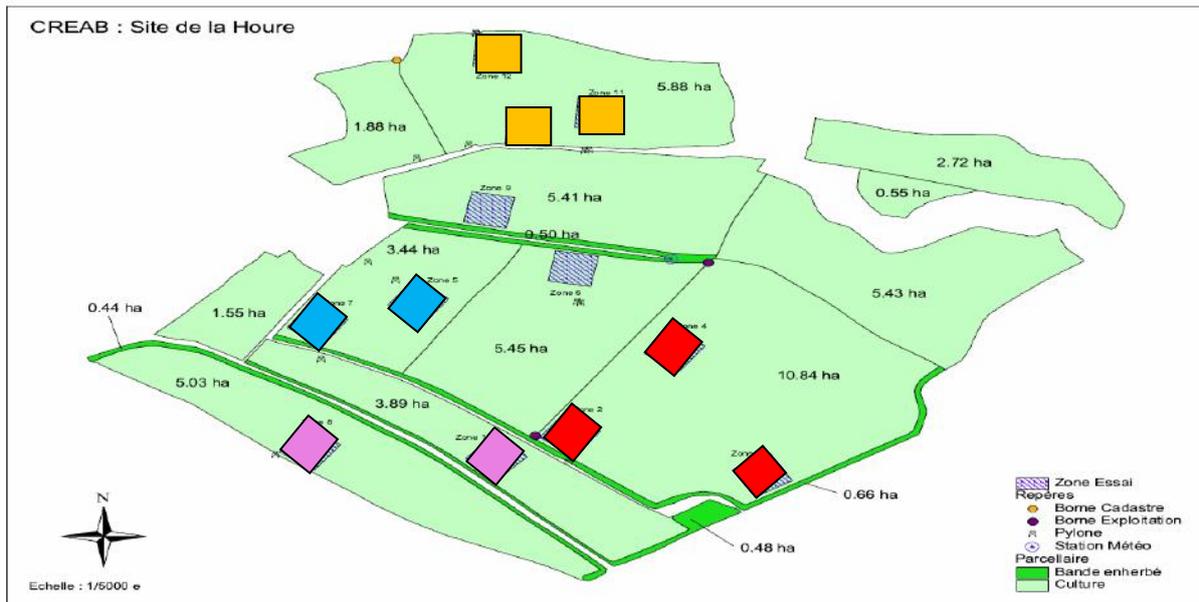


Figure 28 : Position des ZR utilisées pour les comparaisons de rotations

Tableau 25 : détail des rotations comparées

	Rotation 1	Rotation 2	Rotation 3
Zones de Références	■ 2, 3 et 4	■ 10, 11, 12 ■ 5, 7	■ 1 et 8
Céréales	40% (Blé)	40% (Blé et Orge)	50% (Blé et Orge)
Tournesol	40%	20%	0%
Féverole	20%	40%	0%
Soja	0%	0%	50%

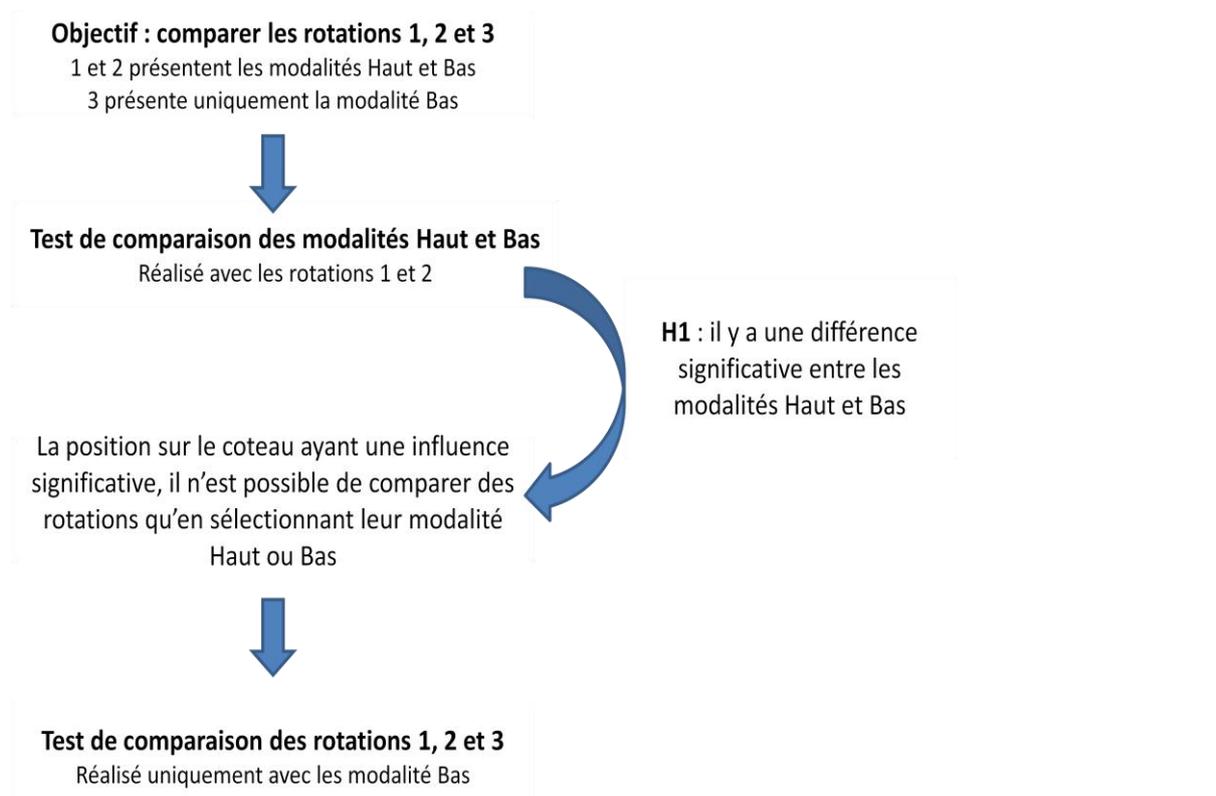


Figure 29 : schéma décisionnel pour la sélection des données à comparer

Influence du facteur rotation

Les ZR 2, 3 et 4 sont situées sur la même parcelle et présentent la rotation 1. Les ZR 5 et 7 et les ZR 10, 11 et 12 sont situées sur deux parcelles différentes qui présentent la rotation 2. Finalement, les ZR 1 et 8 sont situées sur deux parcelles voisines qui présentent la même rotation céréale/Soja). Il est ainsi possible de comparer les trois rotations (Figure 28 et Tableau 25).

Nous testons 2 variables explicatives : la rotation et la position de la Zone de Référence sur le coteau (2 modalités : haut ou bas) pour suivre l'évolution de différentes variables.

Les variables étudiées sont : Bilan N organique, Bilan C organique, Bilan P Organique, N exporté et variation de la teneur en P₂O₅ Organique du sol. Les bilans et variations sont pris en compte sur une période de 5 ans (Mars 2002 – Mars 2007).

Note : la position Haut/Bas de coteau n'est présente que sur les rotations 1 et 2, la rotation 3 ne présentant que la position Bas. Les données doivent donc être testées et sélectionnées (Figure 29).

Modalité Haut / Bas de coteau :

Une ANOVA et un test SNK avec un seuil $\alpha = 10\%$ sont réalisés sur les rotations 1 et 2, seul les variables N exporté et biomasse exportée présentent une différence significative entre les modalités Haut et Bas, la modalité Bas présentant les exportations les plus fortes.

Ainsi, on pourra utiliser les interactions entre rotation et position du coteau uniquement pour comparer les rotations 1 et 2. Cependant, pour comparer les trois rotations, il est nécessaire de sélectionner les modalités bas de coteau uniquement.

Rotations 1 / 2 / 3 Bas :

Aucune différence significative n'est constatée entre les différentes rotations pour les facteurs Bilan N Orga, C orga, P Orga, ni pour l'N exporté.

Concernant la variable Evolution de la teneur en P₂O₅, le test statistique distingue 3 groupes différents : la rotation 1 qui présente une évolution positive, la rotation 3 avec une évolution légèrement négative (-0,37) puis la rotation 2 avec une évolution bien négative (-2,14).

Pour les variables N restitué, biomasse restituée, biomasse exportée et Mn calculée, la rotation 1 présente des valeurs significativement plus élevés par rapport aux rotations 2 et 3.

IV. Discussion

Dans cette étude, nous avons pour but d'apprécier l'évolution de la fertilité des sols sur le long terme dans un système de grandes cultures biologiques sans élevage. En effet, dans ce type de système agricole à bas niveau d'intrants, les statuts N et P des sols ont tendance à décroître avec le temps. Cette évolution entraîne des déficiences chez les cultures qui sont traduites par des baisses de rendement et de qualité de la production. Ainsi, il est légitime de se poser des questions sur l'évolution d'un tel système sur le long terme et sur sa durabilité.

Nous avons donc cherché à apprécier le potentiel agronomique des terres et son évolution au cours du temps. Après quelques recherches bibliographiques, nous avons décidé de nous concentrer sur les éléments azote et phosphore qui ont été présentés dans de nombreux travaux comme les facteurs limitants de la production. Nous suivrons aussi l'évolution de la matière organique puisque les systèmes biologiques sans élevages souffrent de pertes de carbone organique et que la MO est un facteur important dans la fertilité des sols.

La problématique que nous avons définie s'articule autour de l'évaluation et l'analyse de l'évolution des statuts azotés et phosphorés des sols d'une exploitation de grandes cultures menée en agriculture biologique, sans élevage ni irrigation. Ce travail va permettre de produire des références concernant l'évolution de l'azote et du phosphore sur le long terme dans les sols de ce type d'exploitation. De plus, l'étude des états de nutrition des cultures, mis en relation avec l'évolution des sols aboutira à la mise en évidence des facteurs limitants la production. Nous essayerons alors d'apprécier la durabilité d'un tel système agricole.

Pour répondre à ces questions, nous avons analysé les données issues du dispositif long terme mis en place sur une ferme gersoise par le CREAB Midi Pyrénées (Auch, 32). Cet essai, repose sur le suivi de 12 Zones de Référence, disposées sur une exploitation de grandes cultures biologiques d'une cinquantaine d'hectares, ne disposant pas d'élevage ni d'irrigation. Ainsi, depuis 2002, des prélèvements de sol sont réalisés tous les 5 ans de façon à suivre l'évolution des éléments C, N et P organique. Les résultats présentés dans ce rapport sont issus de la première série de prélèvements, qui correspond à la période 2002-2007. Le CREAB réalise aussi un suivi des cultures qui lui permet de connaître l'état de nutrition des plantes et de déceler d'éventuelles carences.

Une partie importante du travail a été de quantifier l'évolution des différents stocks (N, C, P) du sol et d'évaluer l'importance de ces variations. Ensuite, nous avons étudié les relations existant entre l'état de nutrition (N ou P) des cultures et les données de production (rendement, teneur en protéine...). Finalement, nous avons réussi à mettre en évidence des relations entre les caractéristiques du sol et les comportements des plantes.

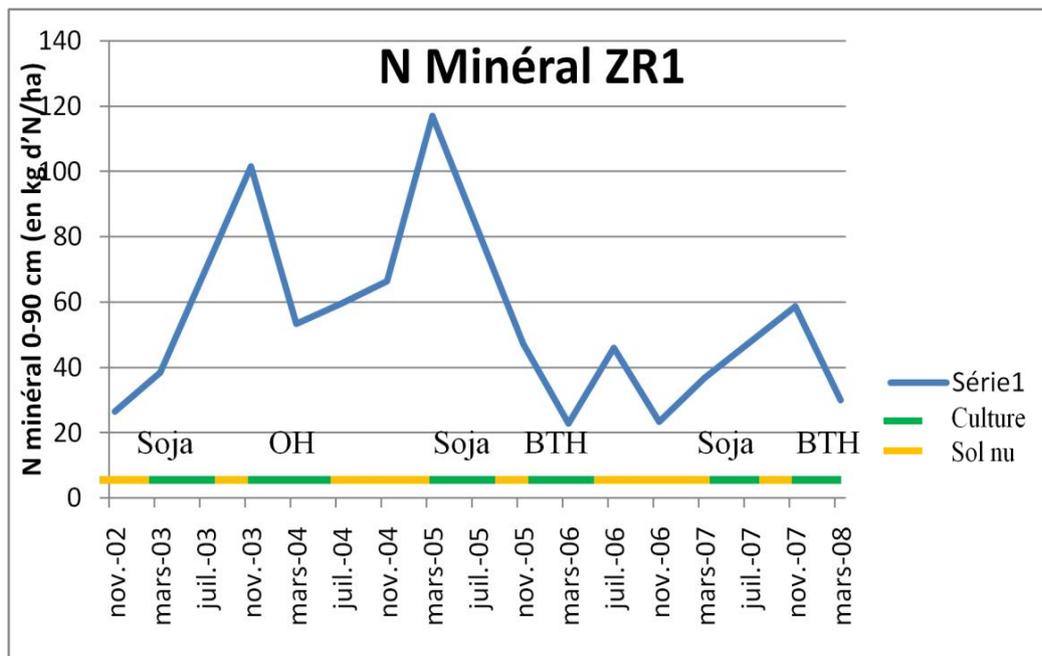


Figure 30 : N minéral au cours du temps sur la ZR 1

Tableau 26 : évolution annuelle moyenne de différents stocks de phosphore

	Evolution en kg de P /ha/an (Da = 1,45)
P THF	- 32
P Organique	- 12
P Olsen	- 0,97

A. L'évolution du sol et son impact sur les cultures

A partir de l'analyse de l'évolution des stocks du sol, qui nous permet de quantifier les pertes d'éléments N, P et C organique, nous allons pouvoir expliquer le comportement des cultures en déterminant les facteurs limitant le développement des plantes.

Evolution des fournitures du sol

L'azote du sol :

Les valeurs de minéralisation nette obtenues par la méthode du défaut de bilan présentent une moyenne de 91 kg d'N/ha/an. Ceci correspond aux valeurs rencontrées dans la littérature qui font état d'une minéralisation nette du sol d'une centaine de kilogrammes d'N/ha/an (Arvalis, 2009). Il semble donc que le sol de La Hourre dispose d'une dynamique de minéralisation de l'N organique « correcte ». En ce qui concerne l'N organique, une perte moyenne de 6 ppm/ha/an a été constatée sur la période 2002-2007. Cette évolution est très faible (- 26 kg d'N organique/ha/an en considérant une Da de 1,45) et correspond à l'ordre de grandeur de potentiels erreurs expérimentales (Justes, communication personnelle) ou de dosage. Ainsi, l'intervalle de cinq années est encore trop court pour se prononcer sur l'évolution de l'N organique.

En ce qui concerne l'N minéral, il présente une forte variabilité spatiale (Mary et Justes, 2001) et dans le temps. Ainsi, même si la matière organique est minéralisée tout au long de l'année, les vitesses de minéralisation les plus élevées sont constatées en sol chaud et humide, ce qui correspond aux conditions de fin d'été et d'automne (Figure 30). Finalement, sur l'ensemble des Zones de Références, les valeurs des stocks d'N descendent rarement en dessous des 20 kg/ha, ce qui pourrait traduire un renouvellement constant de l'N minéral du sol à partir de la matière organique.

Le phosphore :

Les évolutions du P font état de pertes moyennes de 84 ppm de P₂O₅ THF et de 31 ppm de P₂O₅ organique sur la période 2002-2007. Ces variations sont relativement faibles car le pas de temps est court. Cependant, on constate des bilans négatifs concernant les différentes formes du phosphore dans le sol car le système de culture présente des exportations de P via les grains et aucun apport (hormis les restitutions qui ne couvrent pas les exportations). Ainsi, nous nous trouvons en situation « minière » vis-à-vis du phosphore, entraînant des risques d'épuisement des réserves de cet élément dans le sol. Il faudra suivre avec attention l'évolution du P Olsen qui est un indicateur important puisqu'il caractérise le phosphore disponible pour la plante. Les variations sur la période étudiée (Tableau 26) sont encore trop faibles pour pouvoir être discutées.

L'essai DOC, avait mis en évidence une relation positive entre l'évolution du stock de P et sa disponibilité pour la plante (Marder et al., 2006). Ainsi, dans notre cas (épuisement des ressources en P), il faudrait s'attendre à une réduction des valeurs de P Olsen. Cependant, comme les sols présentent déjà des niveaux de P Olsen faibles, il serait possible d'atteindre une valeur seuil de P Olsen autour de laquelle cet indicateur se stabilise malgré un bilan de P THF négatif (Jouany, communication personnelle). Cette valeur seuil étant propre à chaque sol, ces différentes hypothèses seront à vérifier avec les prochains prélèvements de sol.

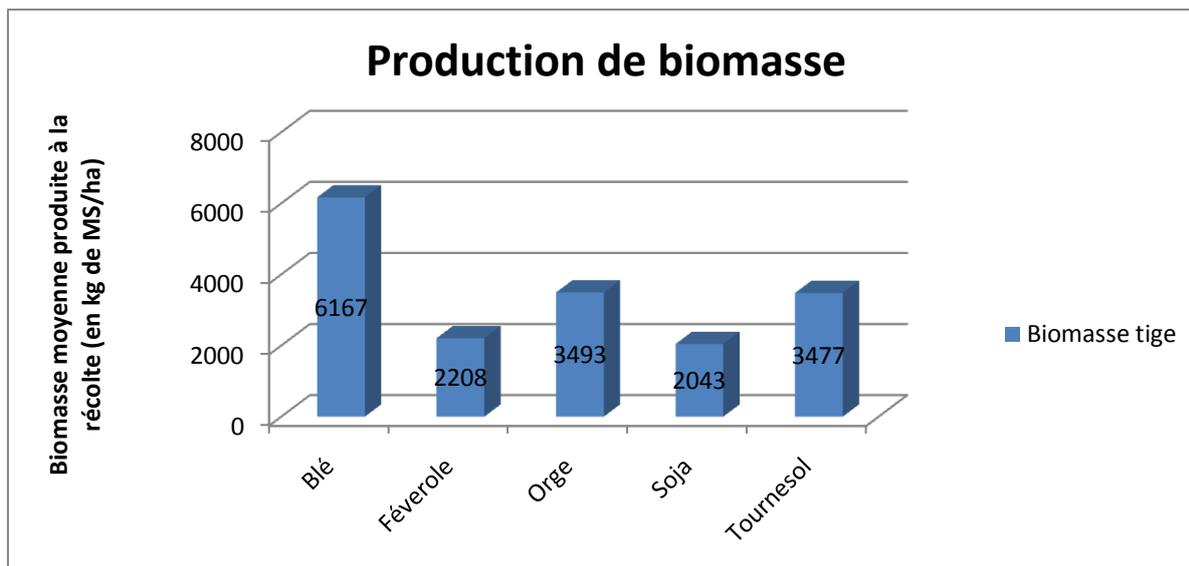


Figure 31 : Biomasse restituée par culture, (valeurs moyennes sur 5 ans)

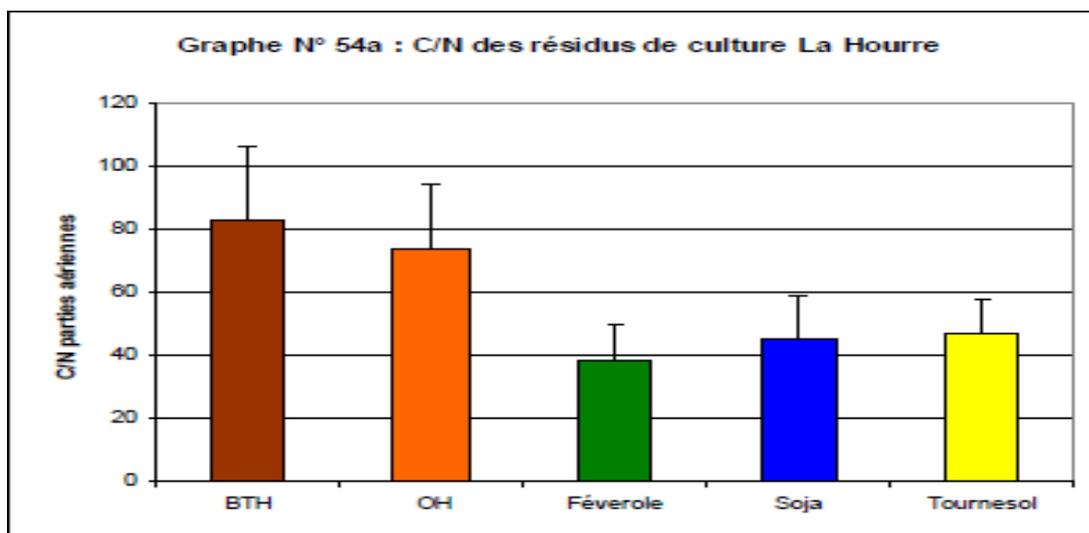


Figure 32 : C/N des résidus de culture observés sur le domaine de La Hourre (Source : Prieur, 2009)

La matière organique :

Le carbone organique des sols subit une perte moyenne de 2,06 t de C/ha/5ans (Da = 1,45). Annuellement, ce sont ainsi 413 kg de C organique/ha qui sont perdus. Cette valeur élevée traduit une forte minéralisation de la MO, ce qui concorde avec les « bonnes » valeurs de minéralisation nette obtenues avec l'azote. De plus, la perte de carbone organique est essentiellement liée au passage en agriculture biologique. En effet, depuis la conversion en 1999, la production de biomasse sur l'exploitation a diminuée : baisse des rendements par rapport au conventionnel engendrant une baisse de la biomasse restituée par chaque culture. De plus, l'utilisation d'une forte proportion de légumineuses (au détriment des céréales) engendre une baisse de la production de biomasse à l'échelle de la rotation (Blé : 6 t contre 2,2 t de matière sèche (MS) restituée pour la Féverole). Le niveau des restitutions en carbone de la parcelle est donc réduit (Figure 31).

Composition de la MO :

L'étude de l'évolution des rapports C/N, C/P et N/P a permis de déterminer que la proportion de P Organique est celle qui a le plus diminué. Cependant, on observe une diminution de la valeur du rapport C/N, traduisant une augmentation de la teneur en N de la matière organique. Cette évolution du C/N est conditionnée par la rotation mise en place sur le domaine de La Hourre et plus généralement en Grandes Cultures Biologiques. En effet, l'augmentation de la proportion des légumineuses dans la rotation a pour effet une baisse de la quantité de biomasse restituée au sol (C organique) ainsi qu'une augmentation de la quantité d'N apporté sol (N organique issu de la fixation symbiotique et minéralisation des résidus). Ainsi, au cours de la rotation, la proportion de résidus avec un C/N faible augmente (Figure 32), entraînant une diminution du rapport C/N de la matière organique, d'autant plus qu'avant la conversion, l'assolement (succession Blé / Tournesol avec Colza certaines années) ne comprenait pas de légumineuses.

Une baisse du rapport C/N de la matière organique du sol signifie une amélioration de sa « qualité » car celle-ci présente une meilleure dégradabilité. Ceci devrait permettre une meilleure fourniture en N minéral pour les plantes et réduire l'impact des processus d'organisation. Cependant, il faut se demander si, sur le long terme, il n'y aurait pas un risque d'épuisement rapide de la matière organique du sol, d'autant plus que le bilan de C organique est négatif, traduisant une forte minéralisation de la matière organique.

Relations N, P et C organique et effet du milieu :

Les différentes régressions réalisées ont permis de mettre en évidence des relations positives entre les valeurs des stocks N, P et C organique. Ceci traduit une évolution conjointe de la matière organique et de ses composants N et P, ce qui correspond à la littérature qui présente le cycle de l'azote comme étroitement associé au cycle du carbone et il est sous sa dépendance (Mary et Justes 2001).

L'ajout d'un deuxième facteur explicatif (le facteur CaCO_3) lors des corrélations entre N, P et C organique a eu pour effet d'augmenter le coefficient de corrélation R^2 , ce qui traduit un effet du milieu sur la matière organique. On note qu'une forte concentration en CaCO_3 du sol a un effet négatif sur l'évolution des stocks de matière organique (Valé, 2006).

De même, nous avons remarqué que les ZR 10, 11 et 12, qui sont situées sur la même parcelle présentaient de façon quasi systématique des rendements faibles par rapport à l'état de nutrition azotée des plantes. L'étude de la nutrition phosphorée a révélée des teneurs en P des plantes à la floraison faibles qui ont pu affecter le rendement. Cependant les analyses de sol ne montrent pas de valeurs faibles des stocks de P Olsen des sols. Nous avons donc supposé des soucis de disponibilité du phosphore, explication qui concorde avec le fait que cette parcelle présente les valeurs de pH les plus élevées du domaine.

Conclusion :

L'analyse des données issues des suivis réalisés par le CREAB nous a permis de cerner la tendance globale de l'évolution des stocks d'éléments (N, P et C organique) du sol. Bien que la période étudiée soit encore trop courte pour observer une évolution franche de l'azote organique, nous observons le début d'une évolution négative des stocks de phosphore et une décroissance franche des stocks de carbone organique.

La perte de quantités importantes de matière organique est une évolution du sol inquiétante. En effet, la matière organique du sol constitue un réservoir alimentaire et énergétique pour les animaux et les végétaux, ce qui la classe au rang d'agent majeur de la fertilité chimique des sols (Waligora, 2008). Du point de vue de la fertilité physique, la MO a un effet positif sur l'aération, elle améliore la stabilité structurale, la réserve en eau des sols et la CEC (Capacité d'Echange Cationique). Ainsi la MO se présente comme une étape obligatoire pour équilibrer les stocks du sol et fournir des quantités suffisantes d'N et de P disponible pour les plantes.

Finalement, nous avons vu que certains facteurs du milieu, comme le pH ou la teneur du sol en CaCO_3 peuvent avoir un effet significatif sur la nutrition des plantes ou l'évolution de la composition de la MO. En effet, les microorganismes du sol présentent une activité optimale avec un pH entre 6 et 7,5 (Leclerc, 2001). Sur le domaine de La Hourre, les valeurs du pH du sol sont très élevées (de 8,2 à 8,6), ainsi que les teneurs du sol en CaCO_3 (de 152 à 445 g/kg), ce qui doit freiner l'activité des microorganismes.

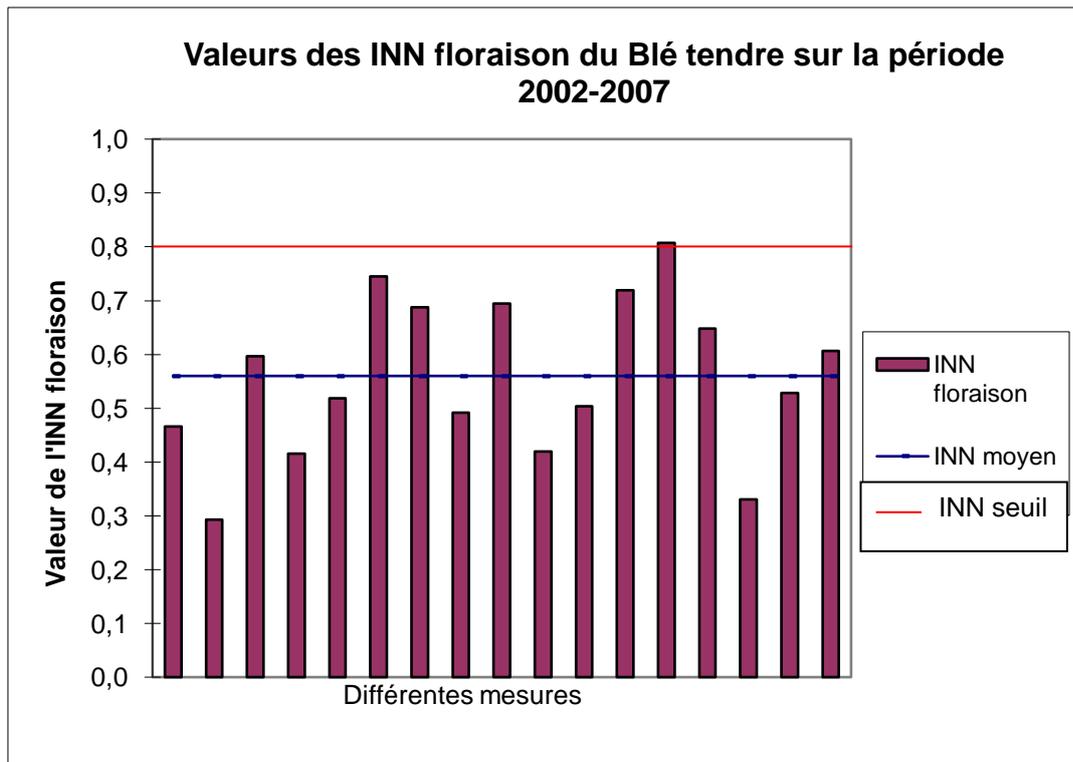


Figure 33 : différentes valeurs de l'INN floraison du Blé tendre sur la période 2002-2007, sur l'ensemble de l'exploitation de La Hourre

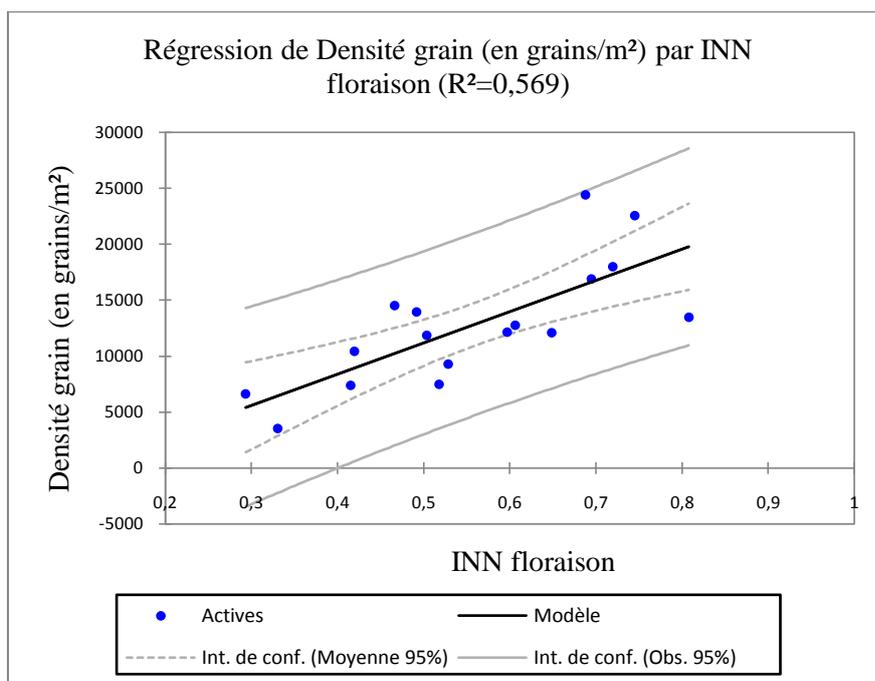


Figure 34 : Relation entre la densité grain et l'Indice de Nutrition Azoté pour le Blé tendre

Les facteurs limitants

Suite à l'analyse de l'évolution des sols et aux résultats obtenus sur les plantes, nous avons dégagé plusieurs facteurs potentiellement limitants de la production : la nutrition azotée, phosphorée et la teneur en MO du sol. De plus, nous avons vu que l'intégration d'une forte proportion de légumineuses dans la rotation pour subvenir aux besoins des plantes semble accélérer la dégradation des stocks de MO. Au moment de proposer des possibilités d'évolution du système, nous risquons de nous trouver face à un dilemme entre l'utilisation des légumineuses et la gestion des stocks de matière organique. Ainsi, dans cette partie, nous allons chercher à voir s'il est possible de hiérarchiser les facteurs limitants de la production.

L'azote :

L'étude de l'état de nutrition des plantes ainsi que les différentes corrélations réalisées ont permis de mettre en évidence un effet du manque d'azote sur les cultures de Blé tendre, d'Orge et parfois de Féverole.

De façon générale, on considère qu'il y a déficience azotée lorsque la valeur de l'INN floraison est inférieure à 0,8. Ainsi, la culture de Blé tendre, avec un INN moyen à la floraison de 0,56 est en situation de déficience (Figure 33). De plus, l'Orge présente une teneur en N dans la plante à la floraison identique à celle du Blé. Etant toutes les deux des céréales, on peut supposer que leurs statuts azotés sont analogues, ce qui implique une déficience azotée pour la culture d'Orge.

Les déficiences sont à surveiller car, comme le montre la Figure 34, la nutrition azotée de la plante (INN) a un effet direct sur la densité grain et donc sur le rendement. En effet, les céréales sont des cultures présentant de forts besoins pour obtenir un rendement correct et une qualité de récolte (protéine) permettant une bonne valorisation.

La Féverole présente de fortes relations entre la composante du rendement (nombre de gousses au m²) et la teneur de la plante en N. Le nombre de gousse au mètre carré étant fortement relié au rendement, ceci traduit une alimentation azotée limitante. Ce constat est surprenant car la Féverole étant une légumineuse, elle est capable de fixer l'azote atmosphérique, ce qui lui permet d'être assez dépendante du statut azoté du sol. Cependant, des observations de terrain ont fait état d'attaques régulières de sitones qui endommagent les nodosités et réduisent le pouvoir de fixation symbiotique de la Féverole. De plus, l'état structural du sol, notamment le tassement, joue un rôle important dans le développement des nodosités et pour la circulation de l'oxygène et de l'azote atmosphérique dans le sol. Ainsi, dans des conditions de sol tassé ou lors d'attaques de sitones, la plante peut devenir plus dépendante de l'N contenu dans le sol et présenter des déficiences (Bétencourt et al., 2009).

En ce qui concerne les cultures d'été, le Tournesol a présenté un INN moyen à la floraison de 0,92 et le Soja n'a pas montré de relations entre la composante du rendement et les indicateurs de l'azote dans la plante. Ces deux cultures ne semblent donc pas être touchées par des carences azotées. Cette absence de relation est surprenante puisque toutes les autres cultures sont touchées par une nutrition azotée limitante. Il semblerait donc que les cultures d'été soient soumises à un facteur limitant plus le développement de la plante que l'azote. L'exploitation étant démunie d'irrigation, l'eau pourrait être le facteur prépondérant, limitant de la production de ces deux cultures.

Tableau 27 : Teneurs seuil (en P Olsen) du sol tirées des travaux de Colomb (2007)

	Teneur seuil d'après Colomb, 2007.
Soja	7,5 ppm de P
Blé Tendre	7,8 ppm de P
Tournesol	9,8 ppm de P

Tableau 28 : Comparaison des teneurs des plantes en P de La Hourre avec des références d'agriculture conventionnelle

Cultures	Teneurs moyennes La Hourre	Teneurs références COMIFER 2007	Teneurs références ITCF 1984	Unités
Blé tendre grain	0,80	0,65	0,9	kg P2O5/q
paille	1,59	1,7	-	kg P2O5/t
Féverole	1,35	1,2	1,1	kg P2O5/q
Orge d'hiver grain	0,86	0,65	0,8	kg P2O5/q
paille	4,27	1	-	kg P2O5/t
Soja	1,31	1	1,6	kg P2O5/q
Tournesol	1,22	1,2	1,3	kg P2O5/q
Trèfle violet ensilage		8,3	-	kg P2O5/t

Le phosphore :

Vis-à-vis du P, il est possible de distinguer trois catégories de cultures :

Espèces exigeantes : Luzerne

Espèces moyennement exigeantes : Orge, Blé dur, Sorgho, Féverole

Espèces peu exigeantes : Tournesol, Soja, Blé tendre (ITCF, 1995)

Comme nous l'avons vu dans la partie I, Colomb (2007), a déterminé des seuils de P Olsen (dans le sol) induisant une diminution significative de la production (Tableau 27). D'après ces valeurs seuil, le Tournesol, qui est considéré comme une culture peu exigeante en P présente étonnamment le seuil le plus élevé. Sur la ferme de La Hourre, le dernier prélèvement de sol du suivi long terme datant de Mars 2007 présente une teneur moyenne du sol en P Olsen de 9,44 ppm de P avec une évolution moyenne de - 0,23 ppm de P/an (sur la période 2002-2007). On se rend ainsi compte que les teneurs en P Olsen actuelles avoisinent la teneur seuil du Tournesol (9,8 ppm de P).

D'un autre côté, nous disposons aussi de valeurs de référence des teneurs en P des plantes en agriculture conventionnelle (COMIFER, 2007 et ITCF, 1984) (Tableau 28). Tout d'abord, on note que les références ont évolué au cours du temps. On constate ainsi une tendance à la baisse des teneurs de référence en phosphore des plantes entre 1984 et 2007. Selon le COMIFER, cette évolution est liée aux évolutions des pratiques de fertilisation, au progrès génétique et à l'amélioration des conduites de culture qui permettent une augmentation de l'efficacité du phosphore absorbé. De façon générale, on s'aperçoit que les plantes de La Hourre présentent des teneurs moyennes en phosphore toujours supérieures aux références du COMIFER (sauf pour la paille de Blé qui est légèrement inférieure). Ainsi, nous sommes dans une situation où la nutrition en P des plantes n'est pas limitante.

Note : la teneur en P de la paille d'Orge est largement supérieure aux références. Ceci est lié aux fortes teneurs en P des grains et des pailles d'Orge. Ces valeurs élevées pourraient être dues à la conduite en Agriculture Biologique, car dans ce contexte, les cultures d'Orge sont régulièrement atteintes par l'helminthosporiose en fin de cycle. Ainsi, les fortes teneurs présentes dans les pailles pourraient s'expliquer par une mauvaise translocation du P vers les grains du fait d'une sénescence foliaire prématurée, engendrée par la maladie.

Finalement, la dernière ligne du Tableau 28 présente la valeur référence du Trèfle violet ensilage. Dans notre système de culture, le Trèfle n'est pas exporté : les coupes sont laissées au sol. Ainsi, cette valeur permet d'avoir un ordre d'idée de la quantité de phosphore du sol qui est absorbée par la plante, puis qui retourne au sol. Ce phosphore passe ainsi d'une forme minérale (dans le sol) vers une forme organique (dans la plante) puis retourne au sol après la coupe. Cette utilisation du trèfle violet est une voie de cyclage du P du sol.

Ainsi, malgré des teneurs du sol en P Olsen faibles, les cultures présentent des teneurs en P dans la plante « normales ». De plus, la réalisation de diverses corrélations entre les teneurs en P des plantes, le PUE et le rendement ou ses composantes n'avait pas permis de mettre en évidence d'éventuelles relations qui auraient pu traduire des situations de déficiences.

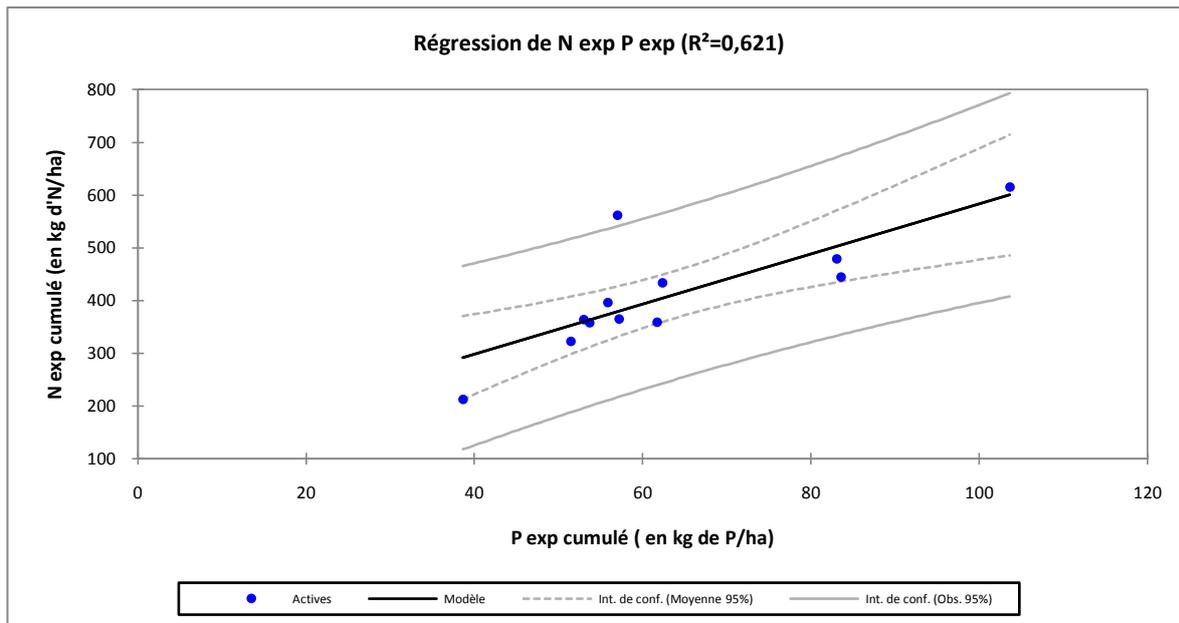


Figure 35 : Régression entre les exportations cumulées d'azote et de phosphore

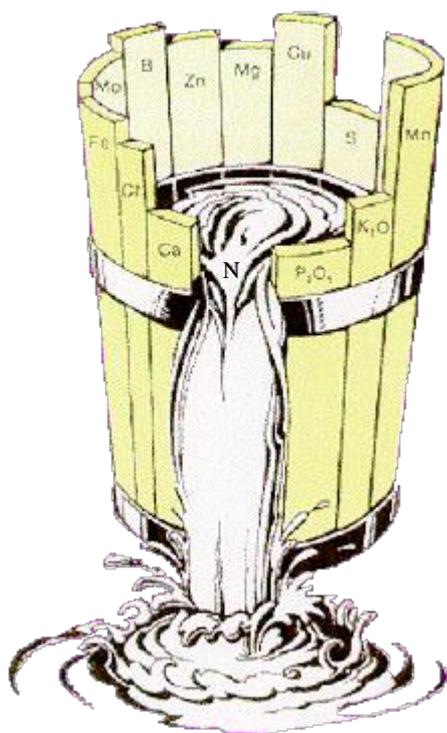


Figure 36 : Le tonneau de Liebig, illustration de la loi du facteur limitant ou loi du minimum

Teneur en protéines :

La teneur en protéine est un facteur important pour l'agriculteur. Il est suivi avec attention car il conditionne souvent la valorisation de la récolte et donc son prix de vente. Ainsi, un Blé présentant plus de 11 % de protéine pourra être valorisé en Blé panifiable et un Soja présentant plus de 40 % de protéines sera transformé pour l'alimentation humaine.

D'après les régressions réalisées dans la partie résultat, le rendement est positivement et significativement ($\alpha = 10\%$) relié à la teneur en protéine pour le Blé, l'Orge et la Féverole. Ainsi, plus le rendement est élevé et plus le taux de protéines l'est aussi. Il semble donc qu'il n'y ait pas d'effet de dilution de l'N qui pénalise généralement la teneur en protéines des grains lors de forts rendements. Dans le cadre de notre suivi, le rendement et la teneur en protéine des plantes sont généralement limités par la richesse de la parcelle en azote. Ainsi, seules les parcelles les plus riches permettent une bonne nutrition de la plante, un bon rendement et une bonne teneur en protéines.

Du point de vue de la croissance des plantes, les cultures de Blé, d'Orge et de Soja présentent de bonnes relations entre les teneurs en N de la plante à la floraison et les teneurs en protéines des grains. Ainsi, la nutrition azotée à la floraison est une étape clés dans la détermination de la teneur en protéine de la plante. Il faut cependant noter que l'on obtient de meilleures corrélations en utilisant l'INN pour le Blé tendre.

Finalement, la Féverole est la seule culture présentant une bonne relation entre la teneur en P de la plante à la floraison et la teneur en protéine des grains à la récolte. Ceci peut être interprété comme le signe d'une déficience en phosphore qui limite le rendement et la teneur en protéine des grains par une réduction de l'efficacité des nodosités. La Féverole n'étant pas rémunérée en fonction du taux de protéines, une légère carence en P n'aura pas de répercussion économique directe. Cependant, il faudrait éviter ce type d'effet sur la culture de Soja qui elle, est valorisée en fonction de son taux de protéines.

Nexp/Pexp :

Nous avons calculé le rapport N exporté cumulé sur P exporté cumulé pour chaque ZR. Il présente une valeur moyenne de 6,5, soit 6,5 kg d'N exporté par kg de P exporté. Ce rapport est relativement stable sur les différentes Zones des Référence (CV de 18%) malgré de fortes variations des exportations en fonction des ZR et des rotations mises en place. Cette constatation concorde avec la corrélation positive et significative à 1% existant entre l'N et le P exporté cumulés (Figure 35). Le fait que le rapport entre ces deux variables soit stable traduit une situation équilibrée entre les prélèvements N et P sur l'ensemble des ZR, quels que soient les statuts de leurs stocks N et P. Cela peut être le reflet de 2 types de situations :

- ce rapport est fixé par la physiologie et le métabolisme des plantes,
- suivant la loi du minimum de Liebig, « le rendement est limité par l'élément nutritif en carence ». Ainsi, la faible quantité d'un élément dans le sol peut affecter la croissance de la plante, ce qui peut limiter l'absorption de l'autre élément selon un rapport constant. Il y a alors déficience en un élément du sol (Figure 36). L'azote étant plus limitant que le phosphore, ce rapport traduirait une carence en azote.

Synthèse :

Dans notre suivi long terme, l'azote est le principal facteur limitant la production concernant les céréales (Blé tendre et Orge) et dans certains cas la Féverole. En effet, malgré la faible évolution des stocks d'azote organique sur la période étudiée, les plantes font état de déficiences azotées qui pénalisent la production. Nous sommes donc dans une situation où le sol ne comble pas les besoins en azote minéral des plantes, en termes de quantité et/ou de saisonnalité, bien que des apports exogènes soient réalisés pour le Blé et l'Orge. Cependant, il faut prendre en compte que notre but n'est pas d'atteindre un INN optimum. En effet, en agriculture biologique, une légère carence azotée est souhaitable car elle diminue la pression des maladies et des adventices sur la culture.

D'un autre côté, les cultures ne semblent pas souffrir d'insuffisances en phosphore (ou ces déficiences sont cachées par le manque d'azote) malgré des teneurs du sol en phosphore disponible faibles. Ces résultats sont à relativiser car, bien que les teneurs en P des plantes soient supérieures aux normes trouvées dans la littérature, ces références sont obtenues dans des conditions pédoclimatiques différentes, présentant certainement de faibles stress hydriques. Dans nos conditions d'expérimentation, le manque d'eau limite la biomasse des cultures et donc les prélèvements, ce qui nous permet d'arriver à des teneurs en P dans la plante satisfaisantes étant donné que la production de biomasse est bridée.

Les cultures d'été n'ont pas montré de sensibilité par rapport à la nutrition azotée ou phosphorée, ce qui laisse à penser que ce ne sont pas des facteurs ayant une influence sur leur production. D'après les observations de terrain, il semblerait que ce soient les ressources hydriques qui limitent le développement et la production du Tournesol et du Soja. L'exploitation fonctionnant sans irrigation, il sera important d'équilibrer le bilan de MO pour éviter d'affaiblir (et si possible augmenter) la capacité de rétention en eau du sol.

Du fait du faible nombre de données concernant la matière organique (seulement 2 prélèvements), il n'est pas encore possible de mettre en évidence d'éventuels effets directs avec les caractéristiques des cultures. Cependant, la MO étant la principale réserve d'azote du sol, son évolution conditionnera les quantités d'élément disponibles pour les plantes et donc leur état de nutrition et leur production.

B. Limites de l'essai

Durant ce travail, nous nous sommes heurtés à certaines limites :

Nous avons besoin de connaître des indicateurs utilisables pour les cultures menées en système de bas niveau d'intrants. Dans de nombreuses corrélations, les résultats se sont avérés être plus précis avec les INN qu'avec les teneurs en N des plantes. Cependant, les INN et INP ont été conçus pour des productions de biomasse « conventionnelles ». Ainsi, il serait intéressant qu'un travail soit effectué sur la formule de calcul de ces indices afin de les adapter aux faibles productions de biomasse rencontrées en agriculture à bas niveau d'intrants. Cependant, ces indices de nutrition sont spécifiques à chaque culture. Il n'existe donc pas, à l'heure actuelle (même en agriculture conventionnelle) d'indicateurs pour chaque culture présente dans notre rotation. Un travail colossal serait donc à fournir pour arriver à des indicateurs fiables pour toutes les cultures de la rotation utilisées en agriculture à bas niveau d'intrant. En attendant, il est important de développer des référentiels permettant de cerner la nutrition des cultures à partir de données accessibles plus facilement comme la teneur en azote ou en phosphore de la plante.

Le dispositif de suivi de l'azote pourrait être plus précis grâce à une meilleure quantification des fuites d'azote (avec des outils de simulation adaptés à nos conditions par exemple) et en réussissant à quantifier l'effet de cultures comme le Trèfle violet qui subissent plusieurs coupes successives. Les coupes retournant au sol, il n'est pas possible de différencier les éléments prélevés dans le sol de ceux cyclés dans les résidus de culture.

Les caractéristiques de la Féverole vont être affinées grâce au suivi des feuilles de Féverole. En effet, au moment des prélèvements de plante, la Féverole a déjà perdue la majeure partie de ses feuilles, ce qui amène un biais lors du calcul du bilan. La connaissance de la teneur en azote des feuilles permettra d'être plus précis.

D'autre part, les évolutions des stocks organiques étant faible, le suivi long terme du CREAB va se poursuivre de façon à vérifier les tendances que nous avons entrevues et confirmer infirmer les différentes hypothèses que nous avons formulé sur l'évolution des stocks du sol. Ensuite, les rotations étant longues, la poursuite de l'essai permettra de mieux cerner les caractéristiques des cultures. En effet, à l'heure actuelle, le faible nombre de répétition engendre une forte variabilité des données, ce qui est gênant lors de l'utilisation de tests statistiques.

Lors des prélèvements de sol à venir, il serait intéressant de mesurer la densité apparente du sol de façon à obtenir des résultats plus précis. En effet, en fonction des conditions pédoclimatiques et de travail du sol, le sol peut être plus ou moins tassé au moment du prélèvement. Ainsi, d'un prélèvement à l'autre, on n'est pas sûr de mesurer (et de comparer par la suite) la même « épaisseur » ou le même « volume » de sol.

Tableau 29 : Comparaison entre l'évolution du stock de P total du sol et les quantités de P exportées par les cultures.

	Evolution moyenne en kg de P ₂ O ₅ /ha/an
P THF	- 73
P Exporté	- 29

L'évolution de la matière organique étant un sujet important, des mesures complémentaires vont être réalisées sur les prélèvements futur afin d'affiner sa caractérisation et de suivre de façon plus précise son évolution. L'ISB (indice de stabilité biologique) et le CBM (caractérisation biochimique de la matière organique) sont deux techniques basées sur le fractionnement des matières organiques qui expriment la proportion de MO stable dans le produit étudié (Raynal Lacroix, 2006). La connaissance de ces indices permettra d'évaluer le niveau de stabilité de la MO de façon précise, car il ne peut pas être appréhendé uniquement via le rapport C/N.

Questions en suspens :

Suite à analyse des résultats, certaines questions restent en suspens. C'est le cas des exportations de phosphore qui est le plus préoccupant. En effet, il y a de fortes différences entre le bilan de P exporté par les plantes et le bilan de P total du sol (

Tableau 29). Le sol semble perdre plus de deux fois la quantité de P exportée par les cultures. Cette différence est elle due à des pertes par érosion ou aux prélèvements des adventices ? Une hypothèse déjà évoquée par Félix (2002) serait qu'une partie du P est capable de passer sous une forme non détectable à l'analyse de sol.

Finalement, il reste assez difficile de prévoir et de quantifier l'évolution d'un système de culture sur le long terme. L'utilisation de modèles informatiques adaptés à nos conditions de culture (rotation, cultures et produits fertilisants utilisés) pourrait être utile afin de tester différents scénarios. Le modèle STICS dont nous avons parlé dans la bibliographie est capable de simuler les bilans carbonés et azotés au niveau d'une parcelle. A l'heure actuelle, ce sont ces deux éléments qui sont les plus préoccupants. Cependant, pour que son utilisation soit correcte, il faudrait s'assurer que le phosphore ne devienne pas un facteur influant sur la production des cultures, car le cas échéant, le P aurait un impact sur les dynamiques de l'azote et du carbone et le modèle ne nous serait d'aucune utilité car le P n'est pas pris en compte dans le modèle STICS.

C. Durabilité du système de culture

Après analyse des résultats précédents, la limitation de la production des cultures par des déficiences en azote, ainsi que l'allure négative de l'évolution des stocks d'éléments du sol, nous pousse à nous poser des questions au sujet de la durabilité d'un tel système. Nous allons donc entrevoir divers scénarios d'évolution de l'exploitation, dans le cas où l'on resterait dans le système actuel.

Point de départ

Pour point de départ de cette réflexion, nous allons nous intéresser à la vitesse d'épuisement des stocks d'azote et de phosphore. Le rapport $N_{\text{exp}} / N_{\text{restit}}$ (2,73) est inférieur au rapport $P_{\text{exp}} / P_{\text{restit}}$ (3,5), ce qui indique que le stock de phosphore s'appauvrit relativement plus vite que celui d'azote. Ainsi, bien que la Loi du Minimum ne permette pas au phosphore d'être plus limitant que l'azote vis-à-vis de la production, d'éventuelles carences en P pourraient fortement impacter le système de culture.

En effet, la gestion de l'azote, dans notre système de grandes cultures biologiques (ainsi que dans de nombreux systèmes de bas niveau d'intrants), repose essentiellement sur l'utilisation des légumineuses et, dans notre cas, plus particulièrement de la Féverole. Cependant, la littérature fait état d'une réduction du développement des nodosités chez la Féverole lorsque le P Olsen est limitant. La baisse de fixation symbiotique déséquilibrerait la dynamique de l'azote au sein de la rotation. En effet, la Féverole est utilisée systématiquement en précédent Blé afin que la céréale profite des reliquats azotés de la culture. Une réduction de la fixation d'azote réduirait les reliquats et pénaliserait directement la culture de Blé (rendement et teneur en protéine), ce qui se traduirait par une moins bonne rentabilité économique de l'exploitation. Ainsi, le phosphore est une thématique, certes secondaire (à l'heure actuelle) face à l'azote, mais qu'il faut garder à l'esprit car elle peut avoir des répercussions lourdes pour le système de culture.

D'autre part, la baisse du niveau de MO est problématique. Bien que la forte minéralisation des ressources en matière organique soit positive pour la nutrition des plantes, elle ne l'est qu'à court terme. En effet, sur le long terme, la baisse du stock de carbone organique ainsi que l'évolution de sa composition poseront de lourds problèmes. Comme nous l'avons vu précédemment, la matière organique affecte directement les fournitures en N et en P du sol assimilable par la plante, ainsi que les qualités physiques du sol (aération, stabilité, rétention d'eau). Sachant que faire gagner de la matière organique à un sol est une procédure lente, il est important d'éviter d'en perdre trop.

Ainsi, bien que la situation actuelle ne soit pas critique (l'exploitation est rentable et la production correcte), l'évolution des sols reste préoccupante. Etant donné que le système de grandes cultures biologiques utilise la rotation et les cycles biologiques (minéralisation de la MO par les microorganismes) comme principaux acteurs de la fertilité des sols, les évolutions pour l'améliorer seront lentes. Ainsi, il est nécessaire de mettre en place un raisonnement global, et sur un long terme de façon à pérenniser le système de culture.

Propositions de stratégies à mettre en place

En agriculture biologique, il est difficile de mettre en place une gestion de la fertilité « par élément ». En effet, les moyens que nous avons à notre disposition jouent sur différents facteurs de la fertilité en même temps. Des apports de fertilisants sont assez rares et ceux d'engrais minéraux naturels le sont encore plus en raison d'un choix restreint et de prix prohibitifs. Ainsi, nous allons commencer par voir quelques moyens de gestion de la matière organique. Ensuite, nous détaillerons d'autres techniques plus axées sur la gestion de l'azote ou du phosphore.

Gestion de la MO :

L'utilisation de couverts végétaux en interculture peut être une solution efficace pour équilibrer le stock de carbone organique du sol et constitue ainsi une bonne alternative à d'éventuels apports de matière organique exogène.

Les cultures intermédiaires sont généralement connues pour leurs vertus concernant l'azote : limitation des pertes par lixiviation pour les CIPAN et apports azotés pour les engrais verts. Cependant, ces couverts sont aussi l'occasion d'apporter de la matière organique au sol. La quantité et la qualité de la biomasse variera en fonction de l'âge et de la composition du couvert. Les CIPAN produiront une biomasse jeune alors que les engrais verts laisseront une biomasse plus âgée (et donc plus stable) et en plus grande quantité. Aussi, la composition du couvert peut être adaptée en fonction du but recherché. Ainsi, des légumineuses seront utilisées pour apporter de l'N au sol (C/N faible) alors que des graminées permettront d'apporter plus de carbone organique au sol (C/N plus élevé). Il est donc possible, via la sélection du couvert, de gérer la qualité de la matière organique apportée au sol.

D'après le modèle Henin Dupuis, lors d'un apport de MO au sol, 60% du carbone apporté quitte le système sous forme de CO₂ via la respiration des microorganismes. Ainsi, pour équilibrer le système, la quantité de matière organique à apporter serait de $413 \times (1 - 0,6) = 1032$ kg de C organique. Il faudrait donc incorporer au sol chaque année environ une tonne de matière organique, en plus des restitutions des cultures. Sachant qu'il y a 0,42% de C dans la biomasse sèche, 2 460 kg de matière sèche végétale devraient être apportés chaque année.

Quelques chiffres :

Durant 4 années, des essais de couverts végétaux ont été réalisés au CREAB. Le couvert de moutarde (en CIPAN) a montré des résultats encourageants avec une production de 1,7 tonnes de matière sèche, ce qui correspond à 714 kg de C Organique (286 kg de C orga après décomposition de la MO).

Le Trèfle violet peut aussi être utilisé, mais en tant que culture annuelle en étant semé sous couvert d'une céréale. Cependant, il est encore assez difficile de réussir une bonne implantation (levée homogène et ne prenant pas le dessus sur la céréale). Sinon, cette culture semble intéressante avec une production de 7,5 t de MS (sans les racines). Avec un C/N moyen de 18, cela correspond à 1,2 t de C organique (essais CREAB 2007 et 2008).

Tableau 30 : Eléments de comparaison entre les précédents Soja et Féverole

	Soja	Blé
INN floraison	0,47	0,63
Teneur en protéines (%)	9,8	11,1

La gestion de l'azote :

Les légumineuses :

Comme nous l'avons vu à plusieurs reprises, les légumineuses sont des cultures incontournables dans les systèmes à bas niveau d'intrant. Leur capacité à fixer l'azote atmosphérique leur permet de se développer dans des sols pauvres en azote et de les enrichir avec leurs résidus de culture et leurs nodosités. La Féverole est actuellement une culture légumineuse bien maîtrisée qui donne de bons résultats : le semis en ligne permet de réaliser des désherbages efficaces à la bineuse, la culture présente une production assez constante et les reliquats à l'automne après minéralisation sont élevés (74 U d'N/ha en moyenne sur 90 cm). La principale source de variabilité sur cette culture est la possibilité d'attaques de sitones qui endommagent les nodosités et pénalisent ainsi la nutrition azotée des plantes.

La culture de Soja, malgré des reliquats azotés faibles (42 kg d'N/ha sur 90 cm) et de fortes exportations azotées (168 kg/ha), reste une culture largement utilisée en raison de son intérêt économique. Si l'on compare les résultats techniques d'un Blé précédent Soja à un Blé précédent Féverole (Tableau 30), on se rend aisément compte que le précédent Féverole est bien plus favorable que le Soja pour le Blé.

Finalement, après avoir enrichi le sol en azote, il est important d'éviter d'en perdre. Ainsi, étant donné que le système présente peu d'intrants, l'intégration d'une culture intermédiaire permettrait de piéger l'N minéral provenant de la minéralisation nette du sol pour éviter qu'il soit perdu par lixiviation (Justes et al., 2009). Les meilleurs résultats sont obtenus avec des plantes à implantation rapide, ce qui permet d'immobiliser de 30 à 120 kg d'N/ha. D'après les travaux de Justes et al., (2009), les couverts de Moutarde présentent une bonne capacité d'absorption car le système racinaire de la plante se développe vite en profondeur. De plus, ces essais ont montré des effets positifs des CIPAN sur le rendement et la teneur en protéine de la céréale suivante.

Ainsi, l'utilisation de couverts en interculture semble très intéressante. Cependant, il faut garder à l'esprit que l'efficacité de ces couverts dépend fortement des conditions pédoclimatiques. De bonnes conditions d'implantation pour la culture garantiront une forte efficacité durant les hivers pluvieux.

Comparaison avec des Fertilisants Organiques :

Pour avoir un ordre de grandeur, au CREAB, la fertilisation organique d'une culture de Blé est de 80 kg d'N/ha avec des farines de plumes. Le CAU moyen de cet engrais (issu des essais CREAB) étant de 0,37, l'apport réel d'N est de 30 kg d'N/ha. Or, après une culture de légumineuses, le sol présente entre 12 et 170 kg d'N/ha au mois de Novembre (date de semis des céréales). Ceci correspond à une quantité pouvant aller jusqu'à 5,7 fois la dose d'N apportée par la fertilisation. Enfin, il faut prendre en compte le prix élevé des engrais organiques ainsi que la variabilité de leur dégradation en fonction des conditions pédoclimatiques. C'est pourquoi à l'heure actuelle, les précédents légumineuses sont la base de la gestion de l'azote en agriculture biologique. Le produit fertilisant n'intervient que comme un complément, lorsqu'il faut garantir une teneur en protéine suffisante pour un débouché en panification par exemple.

La gestion du P :

Nous allons voir que dans l'éventualité d'un manque de phosphore, il existe différents moyens d'augmenter la teneur du sol en P Olsen ou d'améliorer la nutrition des plantes en P. C'est le P organique fixé dans l'humus ou le P minéral fixé qui seront sollicités. Ces techniques sont applicables mais bien que les stocks de P soient importants (2,46 tonnes de P THF/ha), seuls des apports de P exogènes permettront d'équilibrer le système et d'avoir une gestion durable du Phosphore sur le long terme.

En premier lieu, sans faire d'apports, les sols présentent une réserve de phosphore qui peut être sollicitée par différents moyens :

Utiliser le P disponible mais pas accessible : cela passera par la sélection et l'utilisation de plantes présentant des racines bien développées et éventuellement des symbioses avec des mycéliums par exemple.

Rendre disponible le P non disponible : cela peut s'effectuer en réussissant à augmenter la minéralisation du P (concernant le P Organique par le cyclage) ou à augmenter la dissolution du P minéral non soluble (et donc non disponible). Dans ce deuxième cas, une solution est d'utiliser des plantes dont l'appareil racinaire possède des propriétés chimiques spéciales ou attirant des bactéries possédant ces qualités dans leur rhizosphère.

Par exemple, il a été montré par Zheng (2010), que le Soja réagit (en sols acides) à la déficience en P par la sécrétion de malate et d'oxalate qui améliorent les prélèvements de P et évitent d'éventuelles intoxication à l'Al. D'autre part, la sécrétion d'exsudats racinaires peut avoir pour effet d'abaisser le pH dans la zone proche des racines, ce qui permet une meilleure solubilisation du P dans la solution du sol.

Utiliser moins de P : il serait possible de sélectionner des plantes plus efficaces par rapport au phosphore, c'est-à-dire, présentant moins d'exportations P.

Finalement, il ne faut pas oublier que, comme pour l'azote, la plante a des besoins en P concentrés sur certaines périodes du cycle de culture et qu'en dehors de ces période, le P minéral disponible peut rapidement retourner sous des formes non assimilables pour la plante.

Le cyclage (Guppy et McLaughlin, 2009)

Une grande quantité du P du sol est victime de sorptions et de précipitations qui le rendent moins disponible. Une des solutions est le cyclage biologique.

L'objectif est d'améliorer la nutrition P des plantes par le cyclage du P non disponible dans du P labile, c'est-à-dire via l'utilisation des cycles biologiques présents dans le sol. Le P organique bloqué est généralement sous forme de phytates ou de composés synthétisés par les microorganismes similaires aux phytates qui s'associent à l'humus et aux acides flaviques, rendant cette source de P non accessible.

Cependant, certaines bactéries sont capables de produire des enzymes (phytases) qui peuvent rendre ce P soluble et utilisable par la plante. Il a été montré que les éléments C, N et P appartiennent à un cycle biologique. Ces cycles biologiques vont donc s'appuyer sur des apports de C et P organique ainsi que sur les transformations microbiennes qui découlent de la dégradation de la MO. Il semble que le cyclage du P est assez indépendant de la composition C/N de la MO. Cependant, l'élément clé à prendre en compte est la teneur en P total de la MO (C/P faible).

- ⇒ Incorporation de MO facilement dégradables (C/N faible) au sol. La dégradation est rapide et s'accompagne d'une prolifération des microorganismes. Ces derniers ont besoin de P pour se développer et puisent dans des formes de P non solubles, les faisant entrer dans le cycle biologique, augmentant ainsi les quantités de P potentiellement disponibles pour la plante.
- ⇒ Incorporation de MO difficilement dégradables (C/N fort). Dans ce cas, il n'y aura pas de prolifération de microorganismes mais une sélection de la flore du sol capable d'utiliser le P difficilement accessible. L'entretien et le développement de cette flore sur le long terme permettra de fournir du P soluble à partir de P non disponible. Cependant, il y a un risque d'immobilisation du P puisque le turnover de la microflore est plus lent. Cette solution est peut-être déjà mise en place sur le Domaine de La Hourre. En effet, nous avons vu que l'Orge présentait des restitutions chargées en phosphore (forte teneur en P des tiges). Ainsi, la culture d'Orge permet, dans nos conditions de faire un apport de biomasse avec un C/N élevé (73) et présentant une quantité de P total élevée (pour une céréale) avec 6 kg de P/ha/campagne (sans prendre en compte les racines).

Le cyclage peut aussi prendre une autre forme : utiliser des plantes avec des systèmes racinaires très développés (ou s'associant avec des mycéliums), permettant une meilleure exploration du sol de façon à atteindre le P disponible jusqu'à présent non accessible. Ceci aura pour effet de « remonter » ce P vers les horizons de surface et de le faire entrer dans le cycle biologique évoqué précédemment. La Luzerne, en raison d'un système racinaire bien développé et profond (FRAB, 2008) pourrait répondre à cette forme de cyclage.

Les couverts végétaux peuvent entrer dans le cadre du cyclage : par exemple, une année de trèfle violet apporte 10 kg de P organique/ha, ce qui équilibre quasiment le bilan annuel de P organique (12 kg de P organique perdu/ha/an) (Essais CREAB 2007-2008).

Une dernière solution :

Contrairement aux solutions présentées précédemment, cette dernière suggestion demande, pour sa mise en œuvre, un changement du système de culture : il s'agit de l'adoption de techniques culturales simplifiées (TCS).

L'objectif premier des techniques simplifiées de travail du sol est de protéger la matière organique du sol. En effet, le travail profond du sol a un effet négatif sur la MO : elle est diluée sur une plus grande profondeur et les conditions d'aération créées par le passage de l'outil stimulent les processus de minéralisation (Waligora, 2008). Au contraire, dans une parcelle en TCS, la MO est cumulée en surface, ce qui favorise le développement de la faune et de la flore du sol (vers de terre, champignons et mycorhizes) et crée une augmentation de la porosité (Tourdonnet, 2008). De plus, la formation d'une litière en surface limite l'évaporation et retient plus d'eau dans le sol.

Cependant, ce changement de travail du sol (arrêt du travail profond) entraîne une diminution de la minéralisation et favorise l'immobilisation de l'N, ce qui peut entraîner sur un court terme, un manque d'N disponible pour les plantes. Ensuite, avec le temps, le sol évolue vers un équilibre entre les apports de MO et les besoins des plantes par l'augmentation de la quantité de MO du sol, ainsi que par l'intensification de l'activité des microorganismes. L'objectif final est d'arriver à un équilibre où la minéralisation est seulement influencée par le climat et les besoins des plantes (Waligora, 2008). La phase de transition est donc la plus difficile. En effet, en plus de la réduction des quantités d'azote disponible pour les plantes, le labour est, en agriculture biologique, un fort moyen de contrôle des adventices par l'enfouissement des graines d'adventices en profondeur (Calderan et Delaunois, 2006). L'abandon du labour soulève donc des questions concernant la gestion de l'azote pour garantir une production correcte et sur le mode de gestion des adventices.

Ainsi, dans les conditions de réduction du travail du sol, l'amélioration de la MO pénalise fortement la dynamique de l'azote. Une solution adaptée est donc la mise en place de cultures associées, ce qui permettrait de profiter des bienfaits des TCS sans pénaliser la nutrition azotée des cultures.

Les cultures associées consistent en la culture simultanée de deux plantes : dans notre cas une légumineuse et une céréale. Dans le contexte de TCS, la céréale est semée en semis direct dans un couvert de légumineuse (Luzerne par exemple) déjà implanté. Ce système de culture permet d'utiliser la complémentarité des espèces vis-à-vis de l'utilisation des sources d'azote (azote minéral du sol et fixation symbiotique) et de réaliser une meilleure utilisation de l'énergie solaire (via une architecture des plantes différentes) (Justes et al., 2009).

Ainsi, une meilleure alimentation en N de la plante est possible durant l'ensemble de la période de croissance et la culture sera moins sensible aux maladies et aux ravageurs. De plus, la présence permanente d'un couvert végétal permet un contrôle des adventices : la Luzerne a des propriétés d'étouffement des adventices (FRAB, 2008). Couplée aux TCS, les cultures associées participent donc à l'amélioration de la structure du sol (augmente porosité du sol), du taux de MO, à la réduction des fuites d'éléments nutritifs (N) et permettent d'augmenter la biodiversité et l'activité biologique du sol (Tourdonnet, 2008).

Concernant la céréale, elle est victime d'une compétition de la part de la légumineuse, ce qui réduit le nombre d'épis par plante. Ces derniers sont alors mieux alimentés en azote. Ainsi, comme l'expriment Justes et al. (2009) « contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce ne sont pas les transferts d'azote de la légumineuse vers la céréale qui permettent d'obtenir une meilleure nutrition azotée de la céréale mais c'est l'effet d'une complémentarité dans l'utilisation des ressources disponibles et une bonne gestion des compétitions entre la céréale et la légumineuse ». Ainsi, lors de l'utilisation de cultures associées, l'important est de choisir les cultures et les variétés pour gérer au mieux l'équilibre entre relations compétitives et avantageuses entre les deux cultures (Tourdonnet, 2008).

Ainsi, les cultures associées semblent être amenées à se développer car elles présentent de réels intérêts. Cependant, il faut faire attention à la compétition entre les deux cultures, surtout si les ressources hydriques sont limitées. De plus, les associations n'ont été expérimentées qu'entre une culture de céréale et une légumineuse fourragère (Luzerne) ou à graine (Féverole, Pois) et il faudra réfléchir à l'intégration de cette technique au sein des rotations du système actuel ou en TCS. En effet, la culture associée permet de gérer les adventices durant la culture de la céréale mais cette gestion risque d'être plus problématique durant les autres cultures de la rotation dans le cas d'un travail du sol simplifié.

Conclusion

Le domaine de La Hourre est une exploitation représentative des fermes en grandes cultures biologiques, qui représentent 37% des fermes certifiées biologiques en 2009 (Agence Bio). Bien que la ferme de La Hourre n'ait jusqu'à présent jamais montré de baisse de productivité ni de qualité des cultures, elle suit la tendance globale des systèmes à bas niveau d'intrants en présentant une baisse des stocks de phosphore et de matière organique dans les sols. En effet, à l'heure actuelle, les restitutions des cultures et les apports d'intrants ne couvrent pas les exportations des cultures. De plus, l'absence d'élevage ne permet pas de bénéficier d'effluents d'élevages qui seraient une bonne source de matière organique et de nutriments pour les cultures.

Ainsi, comme dans la plupart des exploitations biologiques, nos résultats ont fait état d'une déficience azotée des cultures qui limite la production des céréales (ainsi que la qualité) et dans certains cas de la Féverole. La baisse du taux de matière organique des sols, ainsi que la baisse des quantités de phosphore disponible pour les plantes sont préoccupante car la MO est garante de la fertilité du sol : elle est notamment la source principale d'azote minéral pour les cultures. Enfin, les déficiences en P peuvent entraver la fixation symbiotique des légumineuses et bouleverser la dynamique de l'azote à l'échelle de l'exploitation.

Le système de grandes cultures biologique sans élevage est donc assez déséquilibré avec de fortes exportations et peu d'entrées d'éléments (faibles restitutions et apports exogènes). Un tel système ne peut être durable sur le long terme car la situation « minière » concernant le phosphore, ainsi que la baisse du stock de carbone organique entraînent une évolution du sol qui pénalise le développement des cultures (faibles quantités d'azote et de phosphore disponible pour les plantes).

Nous nous heurtons donc à des facteurs limitants la production. Cette notion de facteur limitant est primordiale en agriculture biologique ou en agriculture à bas niveau d'intrant. En effet, au contraire de l'agriculture conventionnelle, l'exploitant n'a pas à sa disposition de produits spécifiques permettant de lever une carence rapidement en apportant directement l'élément minéral manquant. Les leviers dont disposent les agriculteurs sont directement liés au système de culture : travail du sol, choix de la rotation et des cultures et le choix des apports exogènes (engrais organiques) est limité en absence d'élevage car les produits fertilisants organiques sont onéreux et peu efficaces.

Ainsi, l'agriculteur biologique a mis en place un raisonnement global. La mise en place de rotations comportant une forte proportion de légumineuses, qui apporte de l'azote au sol par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique permet de répondre, dans une certaine mesure aux besoins des cultures. L'objectif n'est pas de couvrir intégralement les besoins de la plante. En effet, une légère déficience en azote est souhaitable car elle réduit la pression des maladies, ravageurs et le développement des adventices. Le but est d'obtenir un rendement correct et une qualité de récolte (taux de protéine pour le Blé et le Soja) permettant une bonne valorisation de la culture.

Actuellement, le stock de MO diminuant, les réserves d'azote organique risquent d'être touchées. De plus, la matière organique est un constituant important du sol qui est le support de la culture. En effet, cette matière organique possède de nombreuses qualités concernant la fertilité chimique et physique du sol. Outre les qualités fertilisantes que nous avons déjà évoquées, la MO peut apporter de la stabilité au sol et l'activité biologique au sein de la matière organique du sol est créatrice de porosité naturelle permettant une meilleure infiltration de l'eau, accroissant la RU du sol (avec le fait que la MO retient mieux l'eau que les argiles).

Un système durable étant un système équilibré, il est nécessaire de mettre en place un raisonnement visant à équilibrer les différents stocks du sol qui permettra une meilleure nutrition des plantes sur le long terme. Ainsi, nous avons vu que les solutions pour lutter contre l'appauvrissement des sols sont nombreuses et variées (cultures intermédiaires, cyclage de la MO est des nutriments, réduction du travail du sol...). Ces adaptations du système de culture, à l'image des TCS et des cultures associées, sont souvent complémentaires les unes des autres et répondent à un raisonnement global de l'exploitation.

Ainsi, l'agriculture biologique sans élevage, malgré une gestion de la fertilité des sols a priori difficile dispose de nombreuses ressources, faisant appel aux qualités des cultures implantées (fixation de l'azote atmosphérique, système racinaire profond ou doté de qualités biochimiques) et à l'activité de la faune et de la flore du sol pour répondre aux besoins et garantir une nutrition correcte des plantes. C'est la gestion de ces ressources qui permettra au système de grandes cultures sans élevage d'atteindre un équilibre et d'être durable dans le temps.

Références Bibliographiques

Agence Bio, 2010, Les chiffres de la Bio sont au vert, Dossier de Presse, 47 p.

Antoni V., SOeS, 2009, Le Phosphore dans les sols : nécessité agronomique, préoccupation environnementale, Commissariat général au développement durable, Observation et statistiques, n°14, Juin 2009, 4 p.

Arvalis Institut du Végétal, 2009, Gérer la fertilisation azotée, brochure 3 p.

Barberi P. et Mazzoncini M., 2006, The MASCOT (Mediterranean Arable System Comparison Trial) long-term experiment (Pisa, Italy) Long Term Field Experiments in Organic Farming, ISOFAR Scientific Series, 1. Raupp J., Pekrun C., Oltmanns M., Köpke U., (Eds.) Verlag Dr. Köster, Berlin. p 1-14.

Bétencour E., Glandières A., Collet S., et Justes E., 2009, Diagnostic agronomique en Midi Pyrénées, Comment améliorer les rendements en pois protéagineux et féverole biologiques. AlterAgri n°94, Mars-Avril 2009, p 10-12.

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 crops rotation on nine organic farms in the UK, Soil Use and Management n°19, p 112-118.

Bouthier A., Trochard R., Parnaudeau V., Nicolardo B., Morvan T., 2009, Valeur fertilisante azotée des produits résiduaux organiques : mieux prendre en compte la dynamique de la fourniture d'azote, Journée Technique Grandes Cultures ITAB/Arvalis, 23 Mars 2009 à Paris. p 11-14.

Calderan P. et Delaunoy A., 2006, Le travail du sol en agriculture biologique dans le Tarn, Premier diagnostic, Chambre d'Agriculture du Tarn, 36 p.

Colomb B., Duru M., Jeuffroy M.H., 2002, Predicting wheat grain number from nitrogen and phosphorus nutrition indexes in low input cropping systems, In VII Congress of the European Society for Agronomy book of proceedings, Villalobos F.J. and L. Test Editors. Cordoba, Spain 15-18 July 2002, p 483-484.

Colomb B., 2007, Apport de l'essai de longue durée de Toulouse Auzeville pour la gestion du phosphore à partir des analyses de terre, dans les systèmes de culture à bas niveaux d'intrants du Sud de la France, 8^{ème} Rencontre fertilisation raisonnée et Analyses de terre, COMIFER & GEMAS, 20-21 novembre 2007, Blois.

Conyers M. K. & Moody P.W., 2009, A conceptual framework for improving the P efficiency of organic farming without inputs of soluble P fertilizer, Crop and Pasture Science, n°60, p 100-104.

Davet P., 1996, Vie microbienne du sol et production végétale, INRA éditions, p 157.

Desclaux D., Nolot J. M., Chiffolleau Y., Gozé E., Leclerc C., 2008, Changes in the concept of genotype interactions to fit agriculture diversification and decentralized participatory plant breeding : pluridisciplinary point of view, 2008, Euphyca n° 163 (3) p 533-546.

Felix I., 2002, Le P : un apport indispensable en sols pauvres, Perspectives agricoles, n°284, Novembre 2002, p 78-81.

FRAB (Fédération Réionale des AgroBiologistes) Champagne Ardenne, 2008, La Luzerne = plante indispensable en grandes cultures bio en Champagne Ardenne, 3 p.

Guppy C. N. & McLaughlin M. J., 2009, Option for increasing the biological cycling of phosphorus in low input and organic agricultural system, Crop and Pasture Science, n°60, p 116-123.

Hepperly P. R., Douds D., and Seidel R.. 2006, The Rodale Institute Farming Trial 1981 to 2005 : Long-term analysis of organic and conventional maize et soybean cropping systems, Long Term Field Experiments in Organic Farming, ISOFAR Scientific Series, 1. Raupp J., Pekrun C., Oltmanns M., Köpke U., (Eds.) Verlag Dr. Köster, Berlin, p 15-31.

Hinsinger P., 2010, Les racines au cœur du fonctionnement de la rhizosphère, Alter Agri, Mai-Juin, n° 101, p 16-17.

Jeuffroy M. H., Bergez J. E., David C., Flénet F., Gate P., Loyce C., Maupas F., Meynard J. M., Reau R., Surleau-Chambenoit C., 2008, Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétales : bilan et perspectives, Systèmes de culture Innovants et durables, éducaagri édition, Paris.

Justes E., Bedoussac L., Prieur L., 2009, Est-il possible d'améliorer le rendement et la teneur en protéine du blé en agriculture biologique au moyen de cultures intermédiaires ou de cultures associées, Innovations Agronomiques, 2009, 4, p 165-176.

Justes E., 1993, Diagnostic de la nutrition azotée du blé à partir de la teneur en nitrates de la base de la tige, Application au raisonnement de la fertilisation, Thèse INA PG, Paris, 1993, 231 p.

Labreuche J, 2009, Engrais verts : Atouts en contraintes en grandes cultures biologiques, Journée Technique Grandes Cultures ITAB/Arvalis, 23 Mars 2009 à Paris. p 29-33.

Leclerc B., 2001, Guide des matières organiques, Tome 1, édition ITAB, p 67-77 ; 96-103.

Leclerc B., 2009, La question des engrais organiques azotés en grandes cultures biologiques, Journée Technique Grandes Cultures ITAB/Arvalis, 23 Mars 2009 à Paris, p 15-17.

Machet J.M., Laurent F., Chapot J.Y., Dore T., Dulout A., 1996, Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères, Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, Reims, 19-20 novembre 1996, Edition INRA, Paris 1997 (Les colloques, n°83), p 271-288.

Mäder P., Fliebach A., Dubois D., Gunst L., Jossi W., Wiemken F., Gattinger A., Niggli U., 2006, The DOK experiment (Switzerland), Long Term Field Experiments in Organic Farming, ISOFAR Scientific Series, 1. Raupp J., Pekrun C., Oltmanns M., Köpke U., (Eds.) Verlag Dr. Köster, Berlin, p 41-57.

Mary B., Justes E., 2001, La fourniture d'azote par les matières organiques du sol, Colloque GEMAS-COMIFER, 5èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, Blois, 27-29 Novembre 2001, p 1-11.

Messiga A. J., Ziadi N., Parent L-E., Morel C., 2009, Mise à l'épreuve d'un modèle décrivant l'évolution pendant 18 ans de la quantité de Phosphore biodisponible en fonction du cycle géochimique du P dans un champ cultivé, Journées d'Etudes des Sol 11-15 mai 2009, Strasbourg, 2 p.

Morand P., 2009, L'interculture, une période à ne pas négliger pour gérer la fertilité du sol, AlterAgri n°95, Mai-Juin 2009, p 13-16.

Morel C., 2002, Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution, Considérations théoriques et analyses du cycle du P et du comportement des plantes dans les parcelles de grandes cultures, Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, 91 p.

N'Dayegamiye A., 2007, La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteurs climatiques et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote, CRAAQ – OAQ, colloque sur l'azote, 2007, p1-28.

Nicolardot B., Mary B., Houot S. et Recous S., 1996, La dynamique de l'azote dans les sols cultivés, Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, Reims, 19-20 novembre 1996, Edition INRA, Paris 1997 (Les Colloques, n°23), p 87-103.

Pellerin S., Le Clech B., Morel C., Linères M., Vivès A., Martin E., 2003, Gestion de la fertilité phospho potassique en agriculture biologique : questions posées et premiers résultats, compte rendu de l'académie d'agriculture Française, p 30-34.

Petersen S. O., Brozyna M. A., 2009, Nitrogen dynamics in organic crop rotations, ICROFS news, November 2009, p 6-7.

Prieur L., 2009, Synthèse du suivi des cultures sur le Domaine de La Hourre, campagnes 2002-2007- Partie II, document interne, 58 p.

Rasmusseen I. A., Askegaard M., Olesen J. E. 2006, The Danish organic crop rotation experiment for cereal production 1997-2004, Long Term Field Experiments in Organic Farming, ISOFAR Scientific Series, 1. Raupp J., Pekrun C., Oltmanns M., Köpke U., (Eds.) Verlag Dr. Köster, Berlin, p 117-132.

Raynal-Lacroix C., Nicolardot B., Les produits organiques utilisés en Agriculture Biologique : Caractérisation et étude de la minéralisation, *Infos-Ctifl*, Septembre 2006, n° 224, p 43-48.

Raynal C. et Nicolardot B., 2006, Programme FertiAgribio, connaître et prévoir la disponibilité des éléments fertilisants, étude de la minéralisation et caractérisation physico-chimique et biochimique des produits organiques utilisés en agriculture biologique, présentation powerpoint du 19 janvier 2006.

Schmidt H., Schulz F., Leithold G., 2006, Organic Farming Trial Gladbacherhof, Effects of different crop rotation and tillage systems, Long Term Field Experiments in Organic Farming, ISOFAR Scientific Series, 1. Raupp J., Pekrun C., Oltmanns M., Köpke U., (Eds.) Verlag Dr. Köster, Berlin, p 165-180.

Stengel P. et Gelin S., 1998, Sol : interface fragile, Editions Quae, p 74-75.

Tourdonnet S., 2008, Utilisation de cultures associées en semis direct, Techniques Culturelles Simplifiées n°46, Janvier/Février 2008, p 21-23.

Trinchant J.C., Drevon J.J. et Rigaud J., 1997, Chapitre 7 : Fixation symbiotique de l'azote, Assimilation de l'azote chez les plantes, INRA Paris, 1997, p 133-145.

Valé M., Laurent F., Mary B., Justes E., Mangin M., 2007, Minéralisation de l'azote organique : effets de la température et de l'humidité du sol, Perspectives agricoles, Février 2007, n°331, p 46-49.

Valé M., 2006, Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol *in situ*, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français, rapport de thèse, 182 p.

Waligora, 2008, les matières organiques du sol : identité, évolution et effets de l'AC, Techniques Culturelles Simplifiées n° 46, Janvier/Février 2008, p 10-14.

Zheng S. J., 2010, Crop production on acidic soils: overcoming aluminium toxicity and phosphorus deficiency, 2010, Annals of Botany, Volume 106, n°1, p 183-184.

Ziadi N., Bélanger G., Cambouris A. N., Tremblay N., Nolin M. C., Claessens A., 2008, Relationship between Phosphorus and Nitrogen Concentrations in Spring Wheat, Agronomy Journal, Volume 100, Issue I, p 80-86.

Règlements :

Règlement (CE) 834/2007

Règlement du conseil (CE) 967/2008

Sites internet :

www.unifa.fr/

www.itab.asso.fr/

www.agencebio.org/

Table des illustrations

Table des figures :

Figure 1 : Les centres techniques spécialisés du réseau de l'ITAB

Figure 2 : Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans les sols. Source : Nicolardo et al., 1996.

Figure 3 : Cycle terrestre du phosphore

Figure 4 : Dynamique de minéralisation de différents fertilisants organiques en conditions contrôlées. Source : Raynal et Nicolardot, 2006.

Figure 5 : Dynamique de minéralisation de différents amendements organiques en conditions contrôlées. Source : Raynal et Nicolardot, 2006.

Figure 6 : Matière sèche de nodules et P Olsen pour la Féverole à pleine floraison.

Figure 7 : Localisation du domaine de La Hourre

Figure 8 : Précipitations et températures moyennes sur la période 2002-2006

Figure 9 : Parcellaire du Domaine de La Hourre

Figure 10 : Position des 12 Zones de Références (ZR)

Figure 11 : Schéma des prélèvements de sol (un prélèvement à chaque point rouge)

Figure 12 : Schéma des prélèvements de plante (un prélèvement à chaque point rouge)

Figure 13 : Régression entre NUE et rendement pour un Blé tendre limitée en azote

Figure 14 : Régression entre PUE et rendement pour une Orge d'hiver non limitée en Phosphore

Figure 15 : Corrélation entre le rendement et la densité grain pour une culture de Blé tendre

Figure 16 : Régression entre densité grain et rendement pour une culture de Blé tendre

Figure 17 : Régression entre la densité grain et la teneur en N à la floraison pour la culture d'Orge

Figure 18 : régressions entre la teneur en P de la plante à la floraison et la teneur en protéine des grains à la récolte pour la culture de Féverole.

Figure 19 : production de biomasse par les différentes cultures

Figure 20 : Prélèvements moyens d'azote par culture pour une année

Figure 21 : Prélèvements moyens de phosphore par culture pour une année

Figure 22 : régression entre P exporté cumulé et N exporté cumulé

Figure 23 : N minéral au cours du temps sur la ZR 1

Figure 24 : Evolution des concentrations d’N organique entre 2002 et 2007.

Figure 25 : Valeurs du bilan de carbone organique sur la période 2002-2007

Figure 26 : régression entre le bilan P exporté cumulé et le P Olsen intrapolé.

Figure 27 : Régression entre P Olsen intrapolé et teneur en P des grains d’Orge.

Figure 28 : Position des ZR utilisées pour les comparaisons de rotations

Figure 29 : schéma décisionnel pour la sélection des données à comparer

Figure 30 : N minéral au cours du temps sur la ZR 1

Figure 31 : Biomasse restituée par culture, (valeurs moyennes sur 5 ans)

Figure 32 : C/N des résidus de culture observés sur le domaine de La Hourre

Figure 33 : différentes valeurs de l’INN floraison du Blé tendre sur la période 2002-2007, sur l’ensemble de l’exploitation de La Hourre

Figure 34 : Relation entre la densité grain et l’Indice de Nutrition Azoté pour le Blé tendre

Figure 35 : Régression entre les exportations cumulées d’azote et de phosphore

Figure 36 : Le tonneau de Liebig, illustration de la loi du facteur limitant ou loi du minimum

Table des tableaux :

Tableau 1 : extrait du tableau utilisé par Berry et al (2003). Tableau entier en ANNEXES

Tableau 2 : Présentation des rotations

Tableau 3 : Marges brutes moyennes par cultures (Source : Synthèse du suivi de cultures sur le Domaine de La Hourre réalisé par le CREAB en 2008)

Tableau 4 : les variétés utilisées sur le domaine de La Hourre sur les campagnes 2001-2002 à 2005-2006

Tableau 5 : données utilisées pour le suivi du sol

Tableau 6 : INN floraison et teneurs en N moyennes à la floraison selon les cultures

Tableau 7 : Teneurs en P moyennes à la floraison selon les cultures

Tableau 8 : P Use Efficiency et N Use Efficiency moyens par culture

Tableau 9 : régressions : rendement – composante du rendement

Tableau 10 : régressions INN et teneurs en N à la floraison - composantes du rendement

Tableau 11 : Régressions entre teneur en P des pailles ou des grains et densité grain

Tableau 12 : régressions entre l'INN ou la teneur en N de la plante à la floraison et la teneur en protéine des grains à la récolte

Tableau 13 : régressions entre le PMG et la teneur en protéine des grains à la récolte

Tableau 14 : Teneur des tiges et des grains en azote à la récolte

Tableau 15 : Bilans cumulés de l'azote et du phosphore sur la période 2002 – 2007

Tableau 16 : Reliquats azotés après culture de légumineuses

Tableau 17 : Etat initial du stock de phosphore

Tableau 18 : Bilan des différentes formes du phosphore entre 2002 et 2007 en ppm.

Tableau 19 : Régressions entre N orga, P orga et C orga.

Tableau 20 : Rapports C/N, C/P et N/P en 2002 et en 2007

Tableau 21 : régressions entre exportations, stocks d'N organique 2002 et minéralisation nette.

Tableau 22 : régression entre P exporté par les cultures et différentes formes de P

Tableau 23 : régressions entre P Olsen intrapolé et teneurs en P à la floraison.

Tableau 24 : Résultats des tests SNK sur l'effet du précédent sur le Blé tendre.

Tableau 25 : détail des rotations comparées

Tableau 26 : évolution annuelle moyenne de différents stocks de phosphore

Tableau 27 : Teneurs seuil (en P Olsen) du sol tirées des travaux de Colomb (2007)

Tableau 28 : Comparaison des teneurs des plantes en P de La Hourre avec des références d'agriculture conventionnelle

Tableau 29 : Comparaison entre l'évolution du stock de P total du sol et les quantités de P exportées par les cultures.

Tableau 30 : Eléments de comparaison entre les précédents Soja et Féverole

ANNEXES

Annexe I : tableau utilisé par Berry et al (2003) pour estimer les quantités de nutriment apportés par la fixation symbiotique, les dépôts aériens ou l'épandage de fumiers. p 2

Annexe II : résultats des analyses de sol de 2002 et 2007 p 3

Annexe III : résultats des prélèvements de Blé tendre p 4

Annexe IV : résultats des prélèvements de Féverole p 4

Annexe V : résultats des prélèvements de l'Orge p 5

Annexe VI : résultats des prélèvements du Soja P 5

Annexe VII : résultats des prélèvements du Tournesol p 5

Annexe VIII : régressions linéaires p 6

Annexe I : tableau utilisé par Berry et al (2003) pour estimer les quantités de nutriment apportés par la fixation symbiotique, les dépôts aériens ou l'épandage de fumiers.

Input/output	N	P	K	Source
N fixation (kg element/ha/yr)			-	
1-2 year old white clover ley (<i>Trifolium repens</i>)	150	-	-	Kristensen et al. (1995)
>2 year old white clover ley	85	-	-	Kristensen et al. (1995)
Red clover (<i>Trifolium pratense</i>)	240	-	-	Shmidt et al. (1999)
Spring/winter beans (<i>Vicia faba</i>)	200	-	-	Kopke (1087)
Spring/winter beans residue after grain harvest	25	-	-	Sylvester-Bradley & Cross (1001)
Free living soil bacteria	5	-	-	Goulding (1990)
Atmospheric deposition (kg element/ha.yr))
Close to urban areas	40	0.5	-	Goulding et al. (1998)
Rural areas	30	0	-	Goulding et al. (1998)
Areas unaffected by sea spray			3	NEGTAP (2001)
Manures				
Cattle FYM (kg element/t/fwt)	5.2	1.1	5.5	Shepherd et al. (1999)
Cattle slurry (kg element/m3)	2.5	0.42	2.1	Shepherd et al. (1999)
Poultry (layer) manure (kg element/t/fwt)	16	4.5	6	Anon (2000)
Crop nutrient content (% element of dwt)				
Wheat grain	1.7	0.3	0.5	OF0178
Wheat straw	0.46	0.1	0.8	OF0145
Spring/winter beans	3.4	0.5	1	OF0145
Barley grain	1.3	0.3	0.5	OF0178
Oat grain	1.6	0.3	0.5	OF0178
Triticale grain	1.5	0.4	0.5	OF0178
Triticale whole crop silage	1.6	0.3	2	Alderman & Cottrill (1995)
Grass/clover silage	2.7	0.3	2.1	Alderman & Cottrill (1995)
Fodder beet	1	0.1	0.6	Alderman & Cottrill (1995)
Potatoes	1.4	0.1	0.6	OF0145
Livestock				
Milk offtake during grazing	19	3	5.5	Jarvis (1993)
Cattle growth during grazing	14	4.1	1	Jarvis (1993)
Cattle gaseous losses during grazing	11	-	-	Scholefield (1991); Sommer & Hutchings (1997)

OF145 et OF178 correspondent aux mesures des projets DEFRA n° 145 et 178.

Annexe II : résultats des analyses de sol de 2002 et 2007

P205THF07	P205THF02	P205OLS07	P205OLS02	P205ORG07	P205ORG02	P minéral 07	P minéral 02	Norga 07	Norga 02	COT07	COT02
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	--------------	--------------	----------	----------	-------	-------

moyenne	1,29	1,38	0,02	0,02	0,43	0,47	0,86	0,91	1,29	1,32	10,37	10,84
unité	g de P2O5/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg							

Annexe III : résultats des prélèvements de Blé tendre

	Rendement (kg de grain/ha)	Densité grain (en grains/m ²)	INN floraison	INP1 floraison	%P floraison	%P pailles récolte	%P grain récolte	teneur prot 5,7	P abs floraison (en kg de P/ha)	PMG (g)	N abs flo (kg/ha)	N abs récolte (kg/ha)	%N flo
Moyennes	4907,09	12789,67	0,56	0,79	0,18	0,07	0,35	10,72	13,80	37,45	95,24	133,44	1,23
CV	38,19	42,79	26,56	12,55	13,28	37,72	7,50	10,79	32,59	10,28	38,73	47,90	18,01

Annexe IV : résultats des prélèvements de Féverole

	Rendement (kg de grain/ha)	Densité grain (en grains/m ²)	Densité gousse (en gousses/m ²)	INN floraison	% P floraison	%P pailles récolte	%P grain récolte	teneur prot 6,25	P abs floraison (en kg de P/ha)	PMG (en g)	%N flo
Moyennes	2351,30	538,17	188,83	0,72	0,32	0,11	0,58	27,38	4,92	404,24	3,32
CV	32,67	30,57	36,39	29,48	17,97	50,37	20,21	8,83	65,59	19,71	12,76

Annexe V : résultats des prélèvements de Orge

	Rendement (kg de grain/ha)	Densité grain (en grains/m ²)	INN floraison	INP1 floraison	%P floraison	%P pailles récolte	%P grain récolte	teneur prot 6,25	P abs floraison (en kg de P/ha)	PMG (en g)	%N flo
Moyennes	3552,75	8390,00	0,42	1,09	0,25	0,21	0,39	9,29	10,69	41,77	1,11
CV	19,72	23,89	27,91	17,16	19,53	35,54	8,73	7,27	33,40	10,59	25,51

Annexe VI : résultats des prélèvements de Soja

	Rendement (kg de grain/ha)	Densité grain (en grains/m ²)	INN floraison	% P floraison	%P pailles récolte	%P grain récolte	teneur prot 5,7	P abs floraison (en kg de P/ha)	PMG (en g)	%N flo
Moyennes	2091,80	1357,22	0,90	0,30	0,10	0,56	39,17	8,11	156,54	3,49
CV	34,21	14,26	18,69	13,21	79,42	10,56	5,03	108,92	30,49	11,05

Annexe VII : résultats des prélèvements de Tournesol

	Rendement (kg de grain/ha)	Densité grain (en grains/m ²)	INN floraison	INP1 floraison	% P floraison	%P pailles récolte	%P grain récolte	teneur prot 6,25	P abs floraison (en kg de P/ha)	%N flo
Moyennes	2051,15	4859,6	0,92	0,79	0,23	0,11	0,50	17,19	38,45	2,16
CV	44,86	32,31	17,69	22,38	22,58	54,19	15,81	5,61	49,21	9,48

Annexe VIII : régressions linéaires

Régressions entre densité grain, ou densité gousse et INN

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de significati on de F
Densité grain Blé tendre	INN Blé tendre	17	15	0,569	19,79	$Y = -2752,96 + 27891,71X$	0,1%
Densité gousse Féverole	INN Féverole	15	13	0,727	34,55	$Y = 9,83 + 277,22 X$	0,01%
Densité grain Orge	INN Orge	8	6	0,746	17,62	$Y = 2187,58 + 14754,25 X$	1%
Densité grain Soja	INN Soja	5	3	0,442	2,38		NON
Densité grain Tournesol	INN Tournesol	11	9	0,092	0,91		NON

Régressions entre densité grain et INP

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de significati on de F
Densité grain Blé tendre	INP Blé tendre	17	15	0,141	2,47		NON
Densité grain Orge	INP Orge	8	6	0,128	0,88		NON
Densité grain Tournesol	INP Tournesol	11	9	0,115	1,31		NON

Régressions entre densité grain et teneur en P à la floraison

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de significati on de F
Densité grain Blé tendre	Teneur P flo Blé tendre	17	15	0,026	0,397		NON
Densité gousse Féverole	Teneur P flo Féverole	15	13	0,018	0,24		NON
Densité grain Orge	Teneur P flo Orge	8	6	0,003	0,02		NON
Densité grain Soja	Teneur P flo Soja	5	3	0,101	0,34		NON
PMG Soja	Teneur P flo Soja	5	3	0,213	0,81		NON
Densité grain Tournesol	Teneur en P flo Tournesol	12	10	0,084	0,918		NON

Régressions entre INP et INN

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
INP Blé tendre	INN Blé tendre	17	15	0,132	2,29		NON
INP Orge	INN Orge	8	6	0,030	0,18		NON
INP Tournesol	INN Tournesol	11	9	0,191	2,126		NON

Régressions entre teneur en P à la floraison et INN

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
Teneur P flo Blé tendre	INN Blé tendre	17	15	0,002	0,027		NON
Teneur P flo Féverole	INN Féverole	15	13	0,029	0,38		NON
Teneur P flo Orge	INN Orge	8	6	0,045	0,286		NON
Teneur P flo Soja	INN Soja	5	3	0,099	0,33		NON
Teneur P flo Tournesol	INN Tournesol	11	9	0,29	3,675		NON

Régressions entre densité grain et teneur en P du grain à la récolte

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
Densité grain Blé tendre	Teneur P grain A la récolte	17	15	0,02	0,311		NON
Densité grain Féverole	Teneur P grain A la récolte	15	13	0,036	0,489		NON
Densité grain Orge	Teneur P grain A la récolte	8	6	0,442	4,76		NON
Densité grain Soja	Teneur P grain A la récolte	5	3	0,167	0,602		NON
PMG Soja	Teneur P grain A la récolte	5	3	0,036	0,11		NON
Densité grain Tournesol	Teneur P grain A la récolte	12	10	0,139	1,613		NON

Régressions entre densité grain et teneur en P des tiges à la récolte

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
Densité grain Blé tendre	Teneur P tige A la récolte	17	15	0,023	0,351		NON
Densité grain Féverole	Teneur P tige A la récolte	15	13	0,013	0,169		NON
Densité grain Orge	Teneur P tige A la récolte	8	6	0,488	5,715		NON
Densité grain Soja	Teneur P tige A la récolte	5	3	0,081	0,264		NON
PMG Soja	Teneur P tige A la récolte	5	3	0,013	0,041		NON
Densité grain Tournesol	Teneur P tige A la récolte	12	10	0,448	8,126	$Y = 2919,27 + 17737,91 X$	5%

Régressions entre teneur en protéines des grains et INN à la floraison

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
% protéines Blé	INN	17	15	0,598	22,3	$Y = 7,36 + 6,04 X$	0,01%
% protéines Féverole	INN	15	13	0	0		NON
% protéines Orge	INN	8	6	0,468	5,272		NON
% protéines Soja	INN	5	3	0,037	0,117		NON
% protéines Tournesol	INN	11	9	0,063	0,604		NON

Régressions entre teneur en protéines des grains et INP à la floraison

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
% protéines Blé	INP	17	15	0,196	3,66		NON
% protéines Orge	INP	8	6	0,01	0,185		NON
% protéines Tournesol	INP	12	10	0,006	0,057		NON

Régressions entre teneur en protéines des grains et teneur en P des plantes à la floraison

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
% protéines Blé	%P flo	17	15	0,021	0,32		NON
% protéines Féverole	%P flo	15	13	0,257	4,504		NON
% protéines Orge	%P flo	8	6	0,149	1,047		NON
% protéines Soja	%P flo	5	3	0,243	0,964		NON
% protéines Tournesol	%P flo	12	10	0,026	0,268		NON

Régressions entre P absorbé à la floraison et teneur en P des plantes à la floraison

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
P abs flo Blé tendre	Teneur P flo	17	15	0,002	0,028		NON
P abs flo Féverole	Teneur P flo	15	13	0,015	0,196		NON
P abs flo Orge	Teneur P flo	8	6	0,117	0,791		NON
P abs flo Soja	Teneur P flo	5	3	0,103	0,346		NON
P abs flo Tournesol	Teneur P flo	12	10	0,005	0,053		NON

Régressions entre les différents stocks organiques

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
P Orga 02	C Orga 02	12	10	0,875	70,2	$Y = 122,1 + 31,77 X$	<0,01%
P Orga 07	C Orga 07	12	10	0,803	40,7	$Y = 109,64 + 31,37 X$	<0,01%
N Orga 02	C Orga 02	12	10	0,976	410,9	$Y = 0,26 + 9,81 E-02 X$	<0,01%
N Orga 07	C Orga 07	12	10	0,98	502,2	$Y = 0,23 + 0,10 X$	<0,01%
P Orga 02	N Orga 02	12	10	0,849	56,2	$Y = 49,8 + 315,18 X$	<0,01%
P Orga 07	N Orga 07	12	10	0,835	50,7	$Y = 36 + 308,77 X$	<0,01%
P Orga 02	C & N Orga 02	12	8	0,93	35,5	$= -183,8 + 73,6 X_1 + 132,8 X_2 - 21 X_1 X_2$	<0,01%
P Orga 07	C & N Orga 07	12	8	0,884	20,2	$Y = -289,32 + 10,22 X_1 + 698,78 X_2 - 19,91 X_1 X_2$	1%

Régressions entre les bilans N, P et C organiques

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
Bilan P orga	Bilan N Orga	12	10	0,53	11,27	$Y = -22,21 + 0,31 X$	1%
Bilan N orga	Bilan C Orga	12	10	0,263	3,57		NON
Bilan P Orga	Bilan orga	12	10	0,407	6,87	$Y = -21,89 + 20,69 X$	5%

Régressions entre les évolutions des différentes formes de P et le P exporté cumulé sur 2002 – 2007

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
P Olsen relatif	P exporté	12	10	0,083	0,904		NON
Δ P205 Minéral	P exporté	12	10	0,154	1,815		NON
Δ P205 Olsen	P exporté	12	10	0,01	0,105		NON
Δ P205 THF	P exporté	12	10	0,206	2,588		NON
P Olsen 2002	P exporté	12	10	0	0,539		NON

Régressions entre Mn, P exporté et Δ N Organique et N exporté

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
Mn	N exporté	12	10	0,358	5,579	$Y = 256,02 + 0,34 X$	5%
P exporté	N exporté	12	10	0,621	16,351	$Y = 9,93 + 0,13 X$	1%
Δ N Organique	N exporté	12	10	0,061	0,653		NON
Mn	N total abs cumulé	12	10	0,676	20,9	$Y = -114,09 + 1,02 X$	0,1%
Mn	N Orga 2002	12	10	0,136	1,576		NON

Régressions entre INP floraison et P Olsen Intrapolé

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de signification de F
INP Blé Méthode 1	P Olsen intrapolé	17	15	0,415	10,66	$Y = 0,51 + 6,3 X$	1%
INP Blé Méthode 2	P Olsen intrapolé	17	15	0,479	8,261	$Y = 0,46 + 7,35 X$	5%
INP Orge Méthode 1	P Olsen intrapolé	8	6	0,15	1,055		NON
INP Tournesol Méthode 1	P Olsen intrapolé	12	10	0,214	2,729		NON

Régressions entre les exportations de P et différentes formes de P

Variable expliquée Y	Variable explicative X	n	ddl	R²	F	Degré de signification de F
P exportations (grain)	P Olsen Relatif	12	10	0,015	0,151	NON
P exportations (grain)	Δ P Organique	12	10	0,083	0,90	NON
P exportations (grain)	Δ P Minéral	12	10	0,234	3,05	NON
P exportations (grain)	Δ P Olsen	12	10	0,01	0,105	NON
P exportations (grain)	Δ P Total HF	12	10	0,206	2,59	NON
P exportation	P205 Olsen 2002	12	10	0,0001	0,002	NON

Régressions entre teneur en P des plantes à la floraison et P Olsen Intrapolé

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de significati on de F
Teneur P floraison Blé Méthode 1	P Olsen intrapolé	17	15	0,19	3,528		NON
Teneur P floraison Blé Méthode 2	P Olsen intrapolé	11	9	0,479	8,261	$Y = 0,11 + 1,57 X$	5%
Teneur P floraison Féverole Méthode 1	P Olsen intrapolé	15	13	0,448	10,557	$Y = 0,14 + 3,90 X$	1%
Teneur P floraison Féverole Méthode 2	P Olsen intrapolé	10	8	0,746	23,53	$Y = 0,14 + 4,14 X$	0,1%
Teneur P floraison Orge Méthode 1	P Olsen intrapolé	8	6	0,173	1,259		NON
Teneur P floraison Soja Méthode 1	P Olsen intrapolé	5	3	0,568	3,951		NON
Teneur P floraison Tournesol Méthode 1	P Olsen intrapolé	12	10	0,246	3,269		NON

Régressions entre teneur en P du grain à la récolte et P Olsen Intrapolé

Variable expliquée Y	Variable(s) explicative(s) X	n	ddl	R ²	F	Equation	Degré de significati on de F
Teneur P grain réc blé	P Olsen intrapolé	17	15	0,296	6,307	$Y = 0,28 + 1,38 X$	5%
Teneur P grain réc Féverole	P Olsen intrapolé	15	13	0,195	3,152		NON
Teneur P grain réc Orge	P Olsen intrapolé	8	6	0,603	9,113	$Y = 0,27 + 4,72 E^{-3} X$	5%
Teneur P grain réc Soja	P Olsen intrapolé	5	3	0,529	3,369		NON
Teneur P grain réc Tournesol	P Olsen intrapolé	12	10	0,03	0,31		NON

Table des matières

Résumé	5
Sommaire.....	7
Remerciements	9
Table des sigles et des abréviations.....	11
Introduction.....	13
Présentation du CREAB	1
A. Personnel de l'association.....	1
B. Les essais	1
C. Financement et environnement socio-économique.....	2
I. Etat des lieux des connaissances	3
A. Les essais long terme en agriculture biologique.....	3
<i>MASCOT (Mediterranean Arable Systems COmparison Trial)</i>	3
Le Rodale Institute Farming System Trial	4
Essai DOK	5
Le Danish organic crop rotation experiment for cereal production	6
Le Organic Farming Trial Gladbacherhof	6
Essai long terme Phosphore de l'INRA Toulouse	7
B. Les moyens d'évaluer le statut azoté et phosphoré d'un sol.....	8
Les variables à suivre	8
Le cycle de l'azote	9
L'azote dans les sols.....	10
Le Phosphore	12
C. Les sources d'azote et de phosphore en grandes cultures biologiques sans élevage.....	13
La minéralisation des matières organiques du sol	14
Les restitutions par les cultures.....	14
Aménagement du système de culture.....	16
Problématique	19
II. Matériels et méthodes.....	20
A. Le site expérimental : le domaine de La Hourre	20
Les sols	20
Les parcelles	21
Une exploitation en grandes cultures biologiques sans élevage ni irrigation	21
Les Rotations	23
Les variétés mises en place.....	24
Travail du sol	25
B. Présentation du suivi	27
Mise en place des Zones de Référence	27
Suivi du sol	27
Suivi des cultures.....	28
C. Données utilisés	29

D.	Méthodes d'analyses.....	34
	Logiciel XLSTAT	34
	Corrélation	34
	Régression linéaire.....	34
	Analyse de variance	35
	Test de comparaison de moyennes : test SNK (Student Newman-Keuls).....	35
III.	Présentation des résultats	36
A.	N et P dans la plante	36
	La nutrition N et P	36
	Régressions entre INN, teneur en N et en P, et composante du rendement	37
	Relation entre densité grain et – teneur en P du grain ou de la tige à la récolte	39
	Effet de la nutrition N et P sur la teneur en protéine du Blé tendre, de l'Orge, de la Féverole et du Soja	40
	Prélèvements cumulés sur la période 2002 – 2007 par ZR	43
	Régression entre exportations P cumulées et exportations N cumulées	43
B.	Les stocks du sol.....	44
	Statut de l'N Minéral	44
	Bilan N Organique	44
	Bilan du P et ses différentes formes dans le sol.....	45
	Evolution de la matière organique	45
	Bilans ramenés à l'hectare - effet de la densité apparente.....	46
C.	Relations sol - plante	47
	Relations entre N exporté et différents calculs d'N	47
	<i>Relations entre P exporté et différentes formes de P</i>	<i>47</i>
	Relations entre N exporté cumulé et P exporté cumulé	48
	Corrélation entre teneur en P de la plante et des grains et P Olsen intrapolé	48
	Effet du facteur précédent cultural sur la culture de Blé tendre	48
	Influence du facteur rotation	49
IV.	Discussion.....	50
A.	L'évolution du sol et son impact sur les cultures	51
	Evolution des fournitures du sol	51
	Les facteurs limitants	54
B.	Limites de l'essai.....	58
C.	Durabilité du système de culture	60
	Point de départ.....	60
	Propositions de stratégies à mettre en place	61

Conclusion

Références Bibliographiques

Table des illustrations

Table des figures

Table des tableaux

Table des matières

Résumé

En grandes cultures biologiques, la conversion en agriculture biologique et la réduction des intrants entraînent une baisse de la production mais aussi une baisse des stocks de nutriments disponibles pour les plantes. Les exploitations ne disposant pas d'élevage ne peuvent épandre des produits de type fumier qui sont une bonne source de matière organique et d'éléments nutritif pour les plantes. Ainsi, les exploitations en grandes cultures biologiques sans élevage sont soumises à une décroissance de la matière organique des sols, à une réduction de la disponibilité du phosphore et la production est généralement limitée par des déficiences en azote des cultures. Bien que ces tendances soient connues, il existe actuellement peu de références permettant d'appréhender l'évolution du sol. Ainsi, depuis 2002, le Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation de Midi Pyrénées réalise un suivi long terme de l'évolution de la fertilité des sols d'une exploitation gersoise. Des prélèvements de sols et de plantes ont permis de quantifier l'évolution des stocks d'azote, de phosphore et de matière organique. Ces résultats ont été mis en relation avec les exportations par les cultures ainsi qu'avec leur état de nutrition. Sur un intervalle de cinq années, nous avons observé des évolutions négatives de la matière organique et du phosphore qui pourraient porter préjudice à la production sur le long terme. Bien que l'intervalle entre les deux prélèvements soit trop court pour noter une évolution franche du stock d'azote organique, les cultures, céréales en premier, présentent de fortes déficiences en azote qui limitent la production et peuvent affecter la qualité des récoltes, traduisant une faible quantité d'azote minéral disponible. Ainsi, après avoir quantifié l'évolution des stocks du sol, analysé les comportements des plantes et mis en évidence les facteurs limitants la production, nous avons réfléchi à des adaptations du système de culture qui lui permettrait d'être plus durable.

Mots clés : grandes cultures sans élevage, agriculture biologique, fertilité, azote, facteur limitant.

Abstract

In stockless cropping systems, conversion to organic agriculture and the reduction of fertilizers use lead to a loss of production and a loss of available nutrients for plants. Stockless system cannot use manure which is an easy source of organic matter and nutrients for plants. Stockless organic farm suffers from decreasing stocks of organic matter and available phosphorus. Moreover, there are very few references about long term evolution of soil fertility in these special conditions. That is why, since 2002, the Local Center of Experimentation and Research about Organic Agriculture of Midi Pyrenees is working on a long term experiment in a stockless farm located in the South West of France. Soil samples analysis permits to quantify evolutions of nitrogen, phosphorus and organic matter in the soil. Plant samples lead to an analysis of the nutritional state of cultures. On a five-year period, we remark decreasing quantities of organic matter and phosphorus in the soil and severe nitrogen deficiency on plants. Hence, the soil evolution is compromising the durability of stockless farm. The study of the soil evolution and of the plants nutrition permits to highlight the limiting factor of the production as mineral nitrogen. Finally, we propose some evolutions for the system with the aim to be as sustainable as possible.

Key words : stockless system, organic agriculture, fertility, limiting factor, nitrogen.