



ISTOM

Ecole Supérieure d'Agro-Développement International



Mémoire de fin d'études

Diagnostic de la fertilité Phosphatée dans les systèmes de grandes cultures biologique

Mise au point d'outils de diagnostic sols et plantes- Evaluation de leviers d'action

Léopold Yoann

Promotion 107

Stage effectué à Auzeville-Tolosan, France
du 01/04/2021 au 17/09/2021
au sein de : INRAe, UMR AGIR

Maître de stage : Jouany Claire / Burel Enguerrand
Tuteur pédagogique : Paillat Jean-Marie

Résumé

Résumé : L'agriculture Biologique est en plein essor et la demande sociétale autour de ce mode de production augmente. De plus certains scénariis prévoient des complications au niveau de la disponibilité en engrais AB (législation, raréfaction...). Certains facteurs limitants comme la fertilité phosphatée sont pointés du doigt et risquent à terme de nuire à la durabilité des systèmes biologiques. De façon générale, il y'a un manque de données et de références sur les systèmes bas intrants (AB). Ces données et références sont nécessaires pour construire des outils de diagnostic (comme P_Olsen, les bilans F-E ou bien l'indice de nutrition phosphatée) valides en AB. Ainsi que des leviers capables de répondre aux besoins des cultures, comme les couverts ou les rotations.

Mots clé : Agriculture Biologique, Phosphore, Fertilité, Système bas intrants, Outils de diagnostic, P_olsen, bilan Fumure - exportations, Indice de Nutrition Phosphaté, leviers, Couverts, rotations

Abstract : Organic farming is growing and societal demand for this production method is increasing. Moreover, some scenarios about the complications in the disponibility of organic fertilisers (legislation, scarcity, etc.). Some limiting factors such as phosphate fertility are pointed out and may ultimately affect the sustainability of organic systems. In general, there is a lack of data and references on low-input systems. These data and references are needed to build diagnostic tools avaible in AB(such as P_Olsen, F-E balances or the phosphate nutrition index). As well as means avaible to respond to the neede of crops, such as cover crops or rotations.

Keyword : Organic farming, Phosphorus, Fertility, Low input system, Diagnostic tools, P_olsen, manure-export balance, Phosphor Nutrition Index, levers, Covers crops, rotations

Resumen : La agricultura ecológica está en auge y la aplicacion social de este método de producción va en aumento. Además, algunos escenarios prevén complicaciones en la disponibilidad de fertilizantes orgánicos (legislación, escasez, etc.). Algunos factores limitantes, como la fertilidad del fosfato, pueden afectar la sostenibilidad de los sistemas orgánicos. En general, hay un vacío en las referencias sobre los sistemas de bajos insumos. Estos datos y referencias son necesarios para construir herramientas de diagnóstico (como el P_Olsen, los balances F-E o el índice de nutrición de fosfatos) que esatan válidados en AB. Así como palancas capaces de satisfacer las necesidades de los cultivos, como los cultivos de cobertura o las rotaciones.

Palabra claves: Agricultura ecológica, Fósforo, Fertilidad, Sistema de bajos insumos, Herramientas de diagnóstico, P_olsen, balance estiércol-exportación, Índice de nutrición de fosforo, palancas, Cultivos de cobertura, rotaciones

Table des matières

I- Introduction	10
II- Etat de l'art ou état des connaissances	12
II.1 Le P dans le sol. Illustré par le cycle du P	12
II.2 Le phosphore et le végétal.....	13
II.3 Les outils de gestion du P dans les systèmes de culture	15
II.4 Gestion de la nutrition minérale dans les systèmes AB (spécificités et enjeux sur le P) et leviers disponibles.....	17
II.4.1 Principes de la gestion.....	17
II.4.2 Les leviers disponibles en AB pour gérer la fertilité (notamment en P).....	19
III Matériels et méthodes.....	23
III.1 L'essai analytique longue durée d'Auzeville-tolosan.....	23
III.1.1 Contextualisation	23
III.1.2 Caractéristiques pédo climatiques	24
III.1.3 Rotations et Itinéraires techniques.....	25
III.1.4 Les dispositifs d'études en 2021	26
III.1.4.1 Réponse d'un couvert (Vesce-Moutarde) au gradient de P	26
III.1.4.2 Réponse du soja au gradient de P : Construction de la courbe critique.....	27
III. 2 L'essai système longue durée de la Hourre	28
III.2.1 Contextualisation	28
III. 2.2 Caractéristiques pédo climatiques	29
III.2.3 Rotations et ITK	31
III.2.4 Précisions d'éléments de l'itinéraire technique.....	32
III.2.5 Les dispositifs d'études en 2021	32
III.2.5.1 Mesure de la densité apparente des sols des zones de références	32
III.2.5.2 Analyses de la composition minérale des plantes	34
III.2.5.3 Mesure des teneurs en éléments CNPS.....	34
III.3 Analyses des données.....	35
III.3.1 Traitements des données	35
III.3.1.1 Biomasses et teneurs du couvert de Vesce et de Moutarde et du Soja	35
III.3.1.2 Calcul des bilans annuels de P (fumures – exportations)	35
III.3.1.3 Le calcul de la densité apparente	37
III.3.1.4 Le calcul de la quantité de P du sol par hectare	38
III.3.1.5 Construction de la courbe critique du phosphore du soja.....	38
III.3.2 Analyse de données	39
IV– Résultats.....	40
IV.1 Réponse du couvert Vesce-Moutarde au gradient de P.....	40
IV.1.1 Biomasse.....	40

IV.1.2 Teneurs minérales (NPS) et quantités restituées	41
Les teneurs en C, bien qu'analysées, ne feront pas l'objet de description dans les résultats, car elles sont constantes malgré les traitements.	41
IV.2 Réponse du soja au gradient de P	43
IV.2.1 Dynamique d'accumulation de biomasse : Biomasse = f(temps)	43
IV.2.2 Dilution du P au cours de la biomasse : Concentration en P=f(temps)	45
IV.2.3 Dynamique du prélèvement de P : P prélevé=f(temps)	46
IV.2.4 Construction de la courbe de dilution du P	47
IV. 3 Dynamique des bilans de P (F-E) sur le dispositif système de La Hourre	49
IV.3.1 Bilans cumulés de P (F-E) de 2000 à 2017	49
Apport de P (F)	49
Exportations de P (E)	50
IV.3.2 Dynamique du P Olsen en relation avec les bilans de P à la parcelle	52
Dynamique des bilans	52
Dynamique du stock de P (kg/ha) dans le temps	53
V-Discussion	56
V.1 L'utilisation des outils de diagnostic de fertilité en AC est-elle pertinente en AB ?	56
V.1.1 P_Olsen est-il un indicateur fiable dans l'évaluation de la fertilité des sols en AB ? ..	56
V.1.2 Le suivi des stocks via l'outil P-olsen (et densité apparente) dans le temps permet-il de représenter correctement l'évolution de la fertilité des sols ?	57
V.1.3 Existe-t-il une différence dans les seuils de réponse des cultures entre l'AB et l'agriculture conventionnelle ?	58
V.1.4 L'indice de nutrition phosphaté (INP) est-il un outil de qualité dans le diagnostic de l'état nutritionnel des légumineuses en AB : Le cas du Soja?	59
V.2 Quel-est l'impact d'un couvert de Moutarde et de Vesce sur la fertilité d'une parcelle ? .	62
V.3 De quelle manière le mode de gestion AB impacte la fertilité en P au niveau de l'exploitation ?	63
V.4 Limites	67
VI Conclusion	69
VI.1 La gestion de la fertilité phosphatée en AB par des outils et leviers utilisés en agriculture conventionnelle	69
VI.2 Perspectives	70

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du cycle du phosphore dans le sol et l'eau (Ghanimi, 2014).....	12
Figure 2 : Schéma des différents compartiments de P dans le sol (UNIFA).....	13
Figure 3 : Exigence des cultures pour le phosphore et le potassium (COMIFER).....	14
Figure 4 : Relation entre la croissance, exprimée par le rendement relatif, et la concentration en éléments (Jouany et Valé, 2017).	16
Figure 5: Plan de l'essai longue durée d'Auzeville-Tolosane.....	23
Figure 6 : Diagramme ombrothermique d'Auzeville-Tolosane des température, minimum, moyen, maximum et des pluviométries moyennes sur 20 ans (CLIMATIK plateforme INRAe)	25
Figure 7 : Schéma descriptif de la méthodologie de suivi sur le Soja.....	28
Figure 8 : Plan de répartition des zones de références (ZR) de l'essai de la Hourre.....	29
Figure 9 : Diagramme ombrothermique du domaine de la Hourre de 2000 à 2020.....	31
Figure 10 : Photo descriptive du prélèvement de sol pour la mesure des densités apparentes.....	34
Figure 11 : Dynamique d'accumulation de la biomasse par le Soja entre le 28/06/2021 et le 11/08/2021 selon le type de traitements.	44
Figure 12 : Dynamique d'évolution des teneurs en P du Soja entre le 05/07/2021(2 ^{ème} prélèvement) et le 11/08/2021 (11 ^{ème} prélèvement) selon le type de traitements phosphatés.	45
Figure 13 : Dynamique des quantités de P absorbées par le Soja entre le 05/07/2021 et le 19/07/2021, selon le type de fertilisation phosphatée.....	46
Figure 14 : Relation entre les teneurs en P du soja (essai P) et les biomasses à 6 dates de prélèvements entre le 05/07/2021 et le 11/08/2021.....	47
Figure 15 : Courbe critique du P sur Soja cultivé à Auzeville selon un gradient de P en 2021.	48
Figure 16 : Apports moyens annuels décroissants sur 18 années de culture par zone de référence.	50
Figure 17 : Exports moyens annuels décroissants sur 18 ans de culture par zones de références.....	51
Figure 18 : Moyennes annuelles des bilans F-E par zone de référence.....	52
Figure 19 : Dynamique des bilans cumulés F-E en P pour chaque ZR de 1999 à 2017.....	53
Figure 20 : Schéma de l'évolution des stocks de P (kg/ha) pour chaque ZR, de 2002 à 2017.....	54
Figure 21 : Relation entre le bilan F-E et le stock de P sur la ZR 1 « productive » et la ZR 2 « autonome ».....	55
Figure 22 : Relation P_Olsen et le rendement grain soja sur la Hourre et Auzeville.....	58
Figure 23 : Relation entre L'INP et la biomasse du Soja mesurée au stade R6-R7, en 2021 à Auzeville, en 2015 pour la ZR 1, en 2016 pour la ZR 2 et 3, en 2017 pour la ZR 8 à La Hourre.....	60
Figure 24 : INP et INN pour 4 Zones de Références du domaine de la Hourre.....	61
Figure 25 : relation entre P_Olsen (g/kg) et les quantités prélevées en P par le couvert (kg/ha), à la Hourre et à Auzeville.	63
Figure 26 : Evolution des apports, exports et bilan F-E de 1999 à 2017 pour la ZR 2.	65
Figure 27 : Evolution des apports, des exports et des bilan F-E de 1999 à 2017 pour la ZR 1.....	65
Figure 28 : Relation entre Olsen et les bilans selon les systèmes de production des ZR 1, 2, 4 et 5. ...	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des 25 premiers cm des sols de l'essai de longue durée d'Auzeville à l'automne 1968 (Colomb et Al, 2007).	24
Tableau 2 : Tableau des successions culturales, des apports d'eau/d'azote ainsi que les indicateurs de stress annuels de l'essai d'Auzeville depuis 1969. Source : (Colomb 2007).	26
Tableau 3 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de la Hourre (Campagne 2002).	30
Tableau 4 : Successions culturales et quantité de N ajouté annuellement sur le domaine de la Hourre depuis 2001	32
Tableau 5 : Données de plantes pour la Hourre.....	36
Tableau 6 : Engrais utilisés. Avec la valeur nutritive commerciale et la valeur nutritive analysée en laboratoire.....	37
Tableau 7 : Réponse d'un couvert de Vesce et Moutarde à un gradient de P selon 3 paramètres : biomasses moyennes, teneurs en N, P et S moyennes et quantités de N, P, S immobilisées.	40
Tableau 8 : Dynamique du P sur les zones de références du domaine de la Hourre. Les trois premières colonnes du tableau témoignent des termes du bilan F-E de 1999 à 2017.	49

Tables des abréviations

AB : agriculture biologique

ADP : Adénosine diphosphate

ADN : Acide désoxyribonucléique

AGRESTE : La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'agriculture et de l'alimentation

AFNOR : Association Française de NORmalisation

Al : Aluminium

ARN : Acide ribonucléique

ATP : Adénosine triphosphate

Ca : Calcium

COMIFER : Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

CIMS : ouverts Intermédiaire multi services

CREABio : Centre Régional de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique

Ha : Hectare

Fe : fer

K : Potassium

Kg : Kilogramme

INP : indice de nutrition phosphaté

INRAe : Institut National de recherche pour l'Agronomie et l'Environnement

ITAB : Institut de l'Agriculture et de l'alimentation Biologique

ITK : itinéraires techniques

N : Azote

MO : Matières organiques

P : phosphore

SAU : Surface Agricole Utile

UE : Union européenne

UGB : Unité gros bovins

USDA : United State Departement of Agriculture

S : Souffre

ZR : Zones de références

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements tout particulièrement aux deux personnes qui m'ont encadré durant ce stage, Claire Jouany et Enguerrand Burel. Que ce soit pour leur gentillesse, leurs accompagnements de qualité ou leurs nombreux conseils apportés pour la rédaction de ce rapport. Je tiens à leurs montrer ma reconnaissance pour l'ensemble des enseignements apportés ainsi que pour les moments vécus ensemble comme les matinées agrémentées des délicieux gâteaux de Claire ou bien les après-midis ensoleillés de prélèvements de terre avec Enguerrand.

Je tiens à remercier à la même hauteur, Eric Lecloux, pour sa gentillesse et pour la passion de son travail qu'il partage sans compter aux stagiaires. Merci également pour son implication dans son travail fournissant des résultats de qualités nécessaires aux bons déroulements des études menées.

Merci Philippe DEbaeke et Jay Ram-lamichame m'ont apporté de nombreuses connaissances sur le soja. De plus je tiens à remercier Claire Jouany, Eric Lecloux, Noémie Verge et Marie Tarrieu pour leur aide apportée durant les prélèvements de soja.

Je tiens de façon générale à remercier l'ensemble de l'équipe de l'unité AGIR, qui a été pour moi une agréable compagnie tout au long de cette expérience à Toulouse. Je les remercie également pour les sujets enrichissants dont nous avons pu parler.

L'accès à ce stage ne m'aurait pas été permis sans le travail du personnel de l'ISTOM, que je remercie profondément pour ces cinq années magnifiques tant sur le plan de l'éveil personnel que professionnel. J'ai pu partager de nombreuses discussions tenues par des profils aux cultures et historiques différents. Cela ne m'aurait pas été possible sans l'ouverture sur le MONDE qu'apporte l'ISTOM par sa définition et sa volonté d'ouvrir les visions des futurs ingénieurs à des contextes différents des leurs. Enfin je tiens à montrer ma reconnaissance pour les expériences humaines et professionnelles qui m'ont beaucoup apporté durant mes stages à l'étrangers comme en France.

C'est ce tout qui m'a guidé durant cinq années, qui font ce que je suis aujourd'hui. Comme disais... je sais qui je suis aujourd'hui et cela est en autre grâce à vous, équipes de l'ISTOM, intervenants, encadrants, et personnes rencontrées durant mes stages.

Je remercie également Mr. Rondu et Mme. Champeix, deux enseignants dévoués qui m'ont confirmé ma passion pour le monde des sciences et ont su éveiller chez moi la volonté de poursuivre mes rêves de vie. Je les remercie surtout pour leur sagesse et leur volonté d'aider et de guider les nouvelles générations à construire leurs vies.

Sans toutes ces personnes, dont l'enseignement est une conviction personnelle, rien de ce monde ne serait possible, c'est donc un MERCI dévoué que je vous renvoie en guise de reconnaissance.

Enfin je ne saurais comment remercier mes parents pour l'amour et la confiance qu'ils m'ont porté. Sans eux, mais surtout sans leurs soucis de m'apporter toutes les clés nécessaires à ma construction, je n'aurais jamais pu prétendre à un avenir stable et sans lesquels je n'aurais pas pu faire émerger les rêves qui m'animent encore aujourd'hui. Je les remercie tout autant que les enseignants et équipes administratives pour m'avoir montré les bons chemins durant ma construction personnelle. Merci à mes parents pour m'avoir guidé à travers le chemin de

l'objectivité et de la bienséance, sans lesquelles je n'aurais jamais pu atteindre mes buts personnels et sans lesquelles je n'aurais pas pu (re)connaître la beauté de la vie.
Je remercie également mes grands-parents pour leur sagesse et la joie qu'ils m'ont apporté.
Tous ces investissements sont coûteux pour un humain, et je vous remercie pour ces intentions et ce dévouement que vous m'avez porté.

Je remercie inconditionnellement les élèves de l'ISTOM, sans lesquels je n'aurais su apprendre à apprécier chaque moment de la vie. Et sans lesquels je n'aurais pu m'ouvrir à tant de nouveaux horizons.

Merci à vous TOUS.

I- Introduction

Une tendance mondiale à la baisse de la fertilité phosphatée des sols suscite de plus en plus d'interrogations de la part des acteurs de la recherche/développement et des agriculteurs. De plus les sources en engrais P se font de plus en plus rare à cause de l'épuisement des gisements miniers (Van Vuuren et al., 2010). En 2019 Scholz et al montraient que 70% des terres cultivées mondialement souffrent d'un déficit en Phosphore (P). Ces interrogations se posent davantage dans des systèmes agricoles faibles en intrants. Nous pouvons penser aux système AB en France où des constats alarmants se font quant à la baisse des teneurs en P échangeables des sols, en particulier pour les exploitations converties depuis longtemps (Pellerin et al., 2003) et celles pour lesquelles l'accès aux ressources en P est limité du fait du prix des engrais ou de l'éloignement géographique dans le cas de zones enclavées. Dans ce type de système il devient nécessaire de gérer la fertilité P en mobilisant des leviers ayant un impact sur la quantité et la disponibilité en P (apports/maintient).

La conduite des sols arables qui s'effectue depuis l'après-guerre sur le territoire français suit majoritairement une logique conventionnelle. De ce fait l'ensemble de la filière agricole a été réfléchié selon ce mode de production ; développement d'agro-industries, d'outils et de leviers, et de débouchés. De facto la majorité des recherches menées sur la gestion des systèmes AB sont récentes, en particulier sur la gestion de la fertilité phosphatée. Cependant, en France l'augmentation d'une demande sociétale de produits de qualité et respectueux de l'environnement incite un nombre important d'agriculteurs à convertir leurs modes de productions. En effet, la consommation des ménages a augmenté de 13,3% entre 2018 et 2019. En conséquence entre 2014 et 2019, les surfaces agricoles biologiques ont doublés (Agence Bio, 2019). Il devient urgent de mieux cerner l'impact de l'AB sur la fertilité des systèmes en particulier vis-à-vis de la ressource phosphore.

De grands changements récents dans la définition/ délimitation de l'AB (règlement CE 2018/848 applicable en 2022) impliquent de concevoir et développer des modes de gestion innovants du fait de l'interdiction des effluents d'élevages industriels. A l'échelle d'une exploitation en AB, les leviers disponibles pour gérer la fertilité P sont donc de plus en plus limités. Les engrais et autres matières organiques transformées, seules autorisées en AB avec les phosphates naturels, sont très coûteux et leurs libérations en formes de P solubles/disponibles est faible. Leurs effets sur la fertilité P des sols est plus faible que celle des engrais de synthèse utilisés dans les systèmes conventionnels (Colomb et al., 2013 ; Morel et al., 2018). Le maintien de la fertilité par compensation des exports, pourrait devenir de plus en plus compliquée, pouvant conduire à une érosion de la fertilité (Fontaine et al., 2019).

A cela se rajoute le raisonnement de la fertilité des sols selon la loi de l'élément le plus limitant, en l'occurrence l'azote. Cette démarche, priorisée sur l'N, participe à construire une gestion indirecte de la fertilité phosphatée des sols ; la quantité d'engrais P est réfléchié selon l'apport en azote, l'apport de P est donc fait de façon arbitraire risquant de conduire à des situations déficitaires. Enfin le P, est selon Colomb et al. (2013), le premier nutriment dont la disponibilité dans les sols tend à diminuer.

Afin d'assurer la durabilité des systèmes AB, il devient urgent de disposer d'outils adaptés pour faire un diagnostic sur le niveau de fertilité phosphatée et de proposer des leviers adaptés pour

améliorer le statut P des cultures en systèmes AB. Les outils de diagnostic actuellement disponibles ont été calibrés sur des systèmes conventionnels, où l'offre en N est non limitante, voire excédentaire. Les seuils et références déterminés pour les systèmes conventionnels utilisés sont donc à questionner sur leurs utilisations en AB (système bas intrants) pour laquelle leur validité n'a pas été démontrée (Fontaine et al., 2019).

De même, l'érosion de la fertilité et la difficulté d'avoir accès à des engrais phosphatés en AB, nécessitent de tester l'impact des leviers innovants capables de valoriser le P déjà présent localement. L'insertion dans les rotations de couverts, utilisés comme engrais verts et l'optimisation des rotations sont des leviers prometteurs à l'échelle de la parcelle. Leurs efficacités restent cependant mal connues en ce qui concerne le phosphore.

C'est de ce constat préoccupant et de l'ensemble des questionnements qui en sont issus qu'émerge le projet PHOSPHOBIO :

« Le P comme élément clé de la fertilité des sols en AB : conception d'outils de diagnostic et évaluation de leviers d'action pour l'améliorer et la gérer durablement. »

Le projet PhosphoBio a pour vocation d'apporter des réponses sur les risques liés aux pertes de fertilité liées au phosphore dans les systèmes en AB. Le projet s'articule autour de 5 actions réparties en tâches, détaillées dans l'annexe1. L'ensemble des partenaires s'engagent à (I) dresser un observatoire national de la fertilité des sols en AB, (II) caractériser la réponse des cultures biologiques au statut P des sols, (III) évaluer l'effet des pratiques agricoles et du développement de l'AB sur ce statut en P. Et (IV) adapter des outils et référentiels pour le diagnostic de la fertilité P des sols en AB, capables aussi de prédire l'évolution de cette fertilité en P.

Le travail du stage s'inscrit dans ce projet et se focalisera sur les points suivants :

- Etudier les déterminants des baisses de fertilité en P dans les systèmes en AB
- Valider les outils de diagnostics existants pour le contexte de l'AB
- Construire un outil de diagnostic pour une légumineuse : le soja

Selon l'ITAB et le COMIFER, il est nécessaire de continuer la recherche et l'expérimentation dans ces systèmes de production en AB. Concernant la fertilité en P des agro-systèmes, il est nécessaire d'effectuer un travail de recherche sur la validité des outils de diagnostic de la fertilité en P de l'agriculture conventionnelle en AB. Notamment et surtout sur les légumineuses où l'indice de nutrition n'est pas disponible faute de référence. Pour les leviers il est nécessaire de poursuivre les recherches pour quantifier l'impact des couverts sur le statut de la fertilité en P notamment via la compréhension des facteurs influençant leur gain de biomasses et leurs teneurs en P. Pour cela, un état des lieux des connaissances actuelles permettra la délimitation du sujet et la démonstration des objectifs de l'étude. Les deux dispositifs mobilisés dans l'étude ainsi que les méthodes d'analyse seront présentés par la suite. La mise en relation des résultats avec la bibliographie présentée dans l'état des connaissances permettra de les discuter et de tester leur valeur générale. Par la suite l'exposition des limites de l'étude amorcera la réflexion autour des perspectives pour la thématique du diagnostic et de l'amélioration de la fertilité phosphatée. Enfin la conclusion via l'exposition des limites et des perspectives viendra clore le présent rapport.

II- Etat de l'art ou état des connaissances

II.1 Le P dans le sol. Illustré par le cycle du P

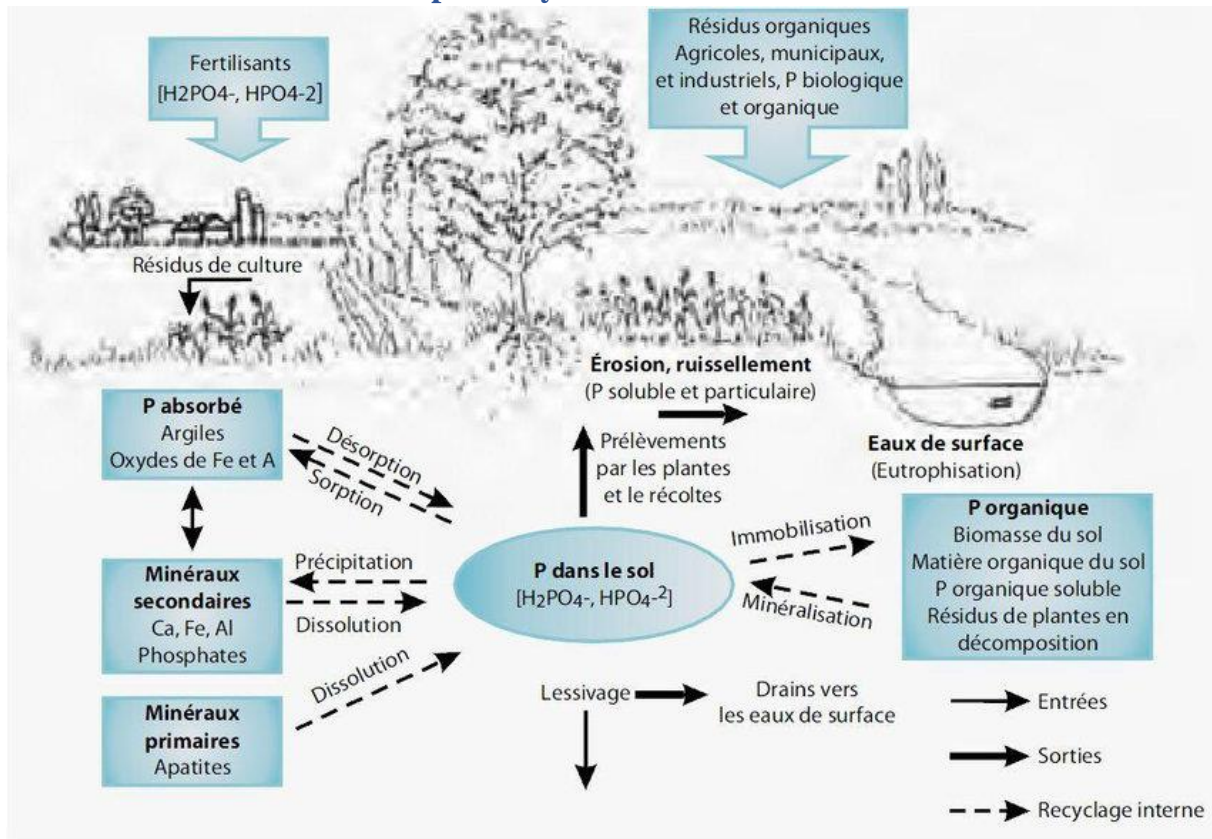


Figure 1 : Schéma du cycle du phosphore dans le sol et l'eau (Ghanimi, 2014)

Dans les milieux naturels, le phosphore contenu dans le sol provient principalement de la dégradation des roches mères. Il est également alimenté par des dépôts d'origine aérienne, aquatique ou terrestre. En sol cultivé, il se trouve majoritairement accumulé dans les couches superficielles du fait des apports de fertilisants qui sont généralement supérieurs aux exportations par les récoltes (grains, résidus). Il existe donc un gradient décroissant vertical. Par son activité l'humain rajoute à ce cycle une entrée, les fertilisants et une sortie, les exportations pour consommation. Plusieurs paramètres comme la nature du sol, la température ou le pH ou le type de P (organique/minéral), jouent un rôle dans ce processus (Dubus, 1997) et contrôlent la dynamique du phosphore au sein du système. Le P est un élément se liant facilement aux constituants minéraux du sol et est de ce fait très peu mobile. Dans le sol, le P issu des sources agricoles (fertilisants, résidus de cultures...), sources industrielles ou organiques (Figure 1), commence une transformation dont la durée varie selon le type de réactions, pouvant aller de quelques secondes à quelques années (Fardeau 1993). Il se retrouve dans le sol soit sous forme organique, soit sous forme inorganique (Figure 1).

Qu'il soit apporté via une source externe ou qu'il soit déjà présent dans le sol, le P se trouve dans 3 compartiments différents qui participent à la capture et au relargage du P à plus ou moins long terme. Le compartiment biologique, comportant des organismes vivants ou en décomposition, capture le P par augmentation de biomasse (immobilisation). Ce dernier est renouvelé par l'activité microbienne du sol sous l'effet des processus de minéralisation et d'organisation. Il est important de préciser que la réaction d'adsorption du P peut s'observer

avec les complexes organométalliques (Lévesque 1969) (Gerke, 1992) de la matière organique du sol. Dans ce cas, la minéralisation d'un tel composé est plus rapide qu'un complexe minéral de P, comme avec le fer ou l'aluminium par exemple. On parle ici de P organique.

Le compartiment du P minéral est composé de trois sous-groupes. Deux concernent le P associé aux minéraux secondaires et un concerne celui associé aux argiles et oxydes de fer. La durée que prend le phénomène de « capture » (adsorption/précipitation) ou de « relargage » (solubilisation) dépend de l'élément avec lequel le P se liera ainsi que de conditions physico-chimiques (pH). Dans le cas des argiles et des oxydes de fer on parle de sorption/désorption. Dans celui des minéraux secondaires on parle de précipitation/dissolution. Par leurs natures chimiques, ces complexes subissent une désorption/dissolution plus ou moins difficile/rapide. Le dernier compartiment concerne le P contenu des minéraux primaires (apatites), il contribue à l'alimentation des cultures via des processus de dissolution.

L'ensemble des compartiments cités, « relarguent » progressivement un P soluble ($\text{HPO}_4^{2-} / \text{H}_2\text{PO}_4^-$) dans le compartiment du P en solution dans le sol. C'est ici que les plantes prélèvent le P dit biodisponible. Ce compartiment peut être qualifié de réservoir central qui « fournit et prélève » les autres compartiments (Fardeau 1993).

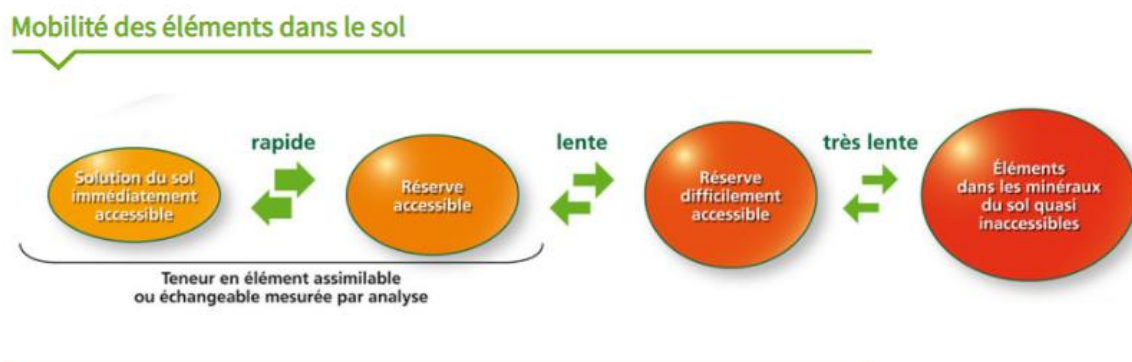


Figure 2 : Schéma des différents compartiments de P dans le sol (UNIFA)

II.2 Le phosphore et le végétal

Rôle

Le phosphore, avec l'azote et le potassium, fait partie des éléments nutritifs indispensables à la croissance des végétaux. Sans être exhaustif, il joue un rôle dans une série de voies métaboliques et dans des voies de biosynthèse et de dégradation. Le P occupe aussi un rôle structural dans les macromolécules, en effet il est le squelette de l'ADN/ARN (Lambert, 1979) en rentrant dans la composition des acides nucléiques, des protides et des lipides (phosphoprotéines/phospholipides) (Hopkins, 2007). En conséquence il est d'importance dans la multiplication cellulaire des méristèmes (racines), la respiration cellulaire, le transfert d'énergie (ADP/ATP) et la photosynthèse (en synergie avec l'azote). Le P fait partie des éléments minéraux les plus limitants pour les plantes (Ramaekers et al. 2010) et intervient dans tous les processus de croissance.

Chez les légumineuses le P joue un rôle crucial dans la nodulation. En effet la symbiose utilise de grandes quantités de P pour, les membranes phospholipidiques où le besoin en énergie est élevé. Selon une étude (Vadez et al. 1999) les nodules peuvent comporter jusqu'à trois fois plus de P que les racines ou le reste de la plante ; l'insertion de légumineuses en tant que culture dans une rotation doit être réfléchi en conséquence et prévue via une fertilisation en P.

Le P est principalement absorbé pendant la croissance végétative. Par la suite, lors de la floraison, il est relocalisé vers « les organes puits » comme les graines et les fruits (Zapata et Roy 2004). Comme dit précédemment, le P agit en synergie avec l'azote. De ce fait la quantité de P absorbé augmente avec celle de l'azote. Durant les premières phases de croissance les végétaux prélèvent peu de P.

Les carences en P et leurs symptômes sur les plantes - conséquences sur la production

Les carences en P se manifestent par plusieurs symptômes comme, le rougissement de la pointe des vieilles feuilles, et leur dessèchement. Il se peut aussi, qu'il y ait un enracinement faible, un ralentissement de la croissance ou bien un retard lors de la phase reproductive. Dans le cas d'un couvert comportant des légumineuses, le manque de phosphore peut se traduire par une baisse des nodulations et donc une diminution de la fixation de l'N. Autrement dit lorsqu'elles sont utilisées en couvert, une diminution des services agronomique attendus.

Selon la famille de plantes considérées, l'impact des symptômes n'est pas de même intensité. L'exigence d'une culture face à un élément est sa sensibilité à la carence en un élément via l'impact sur sa production, le besoin étant la quantité qu'une plante absorbe en conditions non limitantes).

	P ₂ O ₅	K ₂ O
Exigence élevée	Betterave, Colza, Luzerne, Pomme de terre	Betterave, Pomme de terre
Exigence moyenne	Blé dur, Maïs ensilage, Orge, Pois, Ray-grass, Sorgho, Blé sur blé	Colza, Luzerne, Maïs ensilage, Maïs grain, Pois, Ray-grass, Soja, Tournesol
Exigence faible	Avoine, Blé tendre, Maïs grain, Soja, Tournesol	Avoine, Blé dur, Sorgho, Blé tendre, Orge

Le tableau se limite aux principales cultures présentes dans ces essais. Par défaut, les cultures légumières sont assimilées à des cultures exigeantes et les autres cultures à une exigence moyenne.

Figure 3 : Exigence des cultures pour le phosphore et le potassium (COMIFER).

L'impact d'une déficience en P sur le rendement dépend de l'exigence de la culture et de la quantité de P dans le sol (Degan et Le Souder, Arvalis). Ainsi, une situation où la culture est exigeante et le sol est pauvre, les rendements peuvent diminuer de 17 à 30%. Pour un rendement moyen en France (« Soja - Les espèces cultivées - Cultures & utilisation - Terres Univia ») du soja, lorsque seul le grain est exporté, la parcelle peut perdre entre 17 et 19 kg de P/ha. Selon les estimations des rendements moyens en blé tendre faites par AGRESTE en 2021 (« Grandes cultures. Des productions de céréales d'hiver en forte progression | Agreste, la statistique agricole »), une parcelle pourrait perdre jusqu'à 30 kg de P/ha. Pour un blé bio et selon le (Jouany et Valé 2017) communiqué de 2021 d'Arvalis (Thomas et al. 2021), une parcelle en blé bio pourrait exporter 19 kg de P/ha.

II.3 Les outils de gestion du P dans les systèmes de culture

Analyse de plantes

Les analyses de plantes offrent des perspectives intéressantes pour développer des outils d'aide à la décision pour le raisonnement de la fertilisation. Ces outils aident à optimiser la fertilisation en permettant de faire un diagnostic, en calibrant des doses d'apports suffisantes et en optimisant les dates d'apports.

Le diagnostic de l'état de nutrition d'une culture tire sa logique du principe que la teneur en un élément dans un végétal dépend de la concentration de cet élément dans le sol. De là, le diagnostic témoigne du niveau d'absorption de la plante (excessif ou limitant) en cet élément (Jouany et Valé 2017).

Le rendement dépend de plusieurs facteurs, dont le bon déroulement des réactions métaboliques au cours de la croissance. Si les conditions nutritives sont limitantes, le rendement en sera impacté. Il y a donc une relation entre la concentration (teneur) en un élément donné dans un végétal et le rendement obtenu à la récolte (Figure 4). La courbe de réponse des rendements à des concentrations croissantes en un élément dans les tissus d'un végétal, issue de cette relation, montre trois zones distinctes. La première montre que quand les concentrations du végétal sont faibles, la croissance est réduite. Une augmentation de ces concentrations dans cette zone de déficience, donc de la disponibilité en l'élément dans le sol, induit une augmentation du rendement (Jouany et Valé 2017). Ces auteurs ont montré que les conditions d'alimentation optimales pour le végétal seront atteintes quand une augmentation de la disponibilité en l'élément considéré n'induit pas une augmentation du rendement (Figure 4), mais seulement des teneurs. Enfin la troisième zone apparaît quand une augmentation de la teneur peut entraîner une baisse des rendements, témoignant d'un effet de toxicité. Le point de transition entre la première et la deuxième zone est la teneur critique, autrement dit la teneur minimale qui permet la croissance/le rendement maximal(e) (Jouany et Valé 2017).

Lorsque ce principe est utilisé en tant qu'outil de diagnostic sur l'état de nutrition d'une culture en élément donné, la teneur mesurée dans la plante est comparée avec la teneur critique de référence issue de la courbe de réponse. L'écart mesuré permet de faire état d'un excès ou d'une carence. Et dans ce dernier cas, de pouvoir la corriger via un apport pendant le cycle de croissance.

La principale limite de cet outil réside dans l'unicité de la teneur critique (norme), qui ne prend pas en compte l'âge du couvert qui joue sur l'évolution de la teneur via le phénomène de dilution au cours de la croissance (Jouany et Valé 2017). La méthode (DRIS) permet d'améliorer le diagnostic via l'utilisation des ratios stœchiométriques (N :P, N : K). Elle reste cependant complexe à mettre en place (Jouany et Valé 2017). L'indice de nutrition, lui, prend en compte l'évolution du couvert en mettant les teneurs en relation avec l'accumulation de biomasse aérienne et en proposant des valeurs de références variant avec l'âge de la culture ainsi que la teneur des autres éléments (Jouany et Valé 2017).

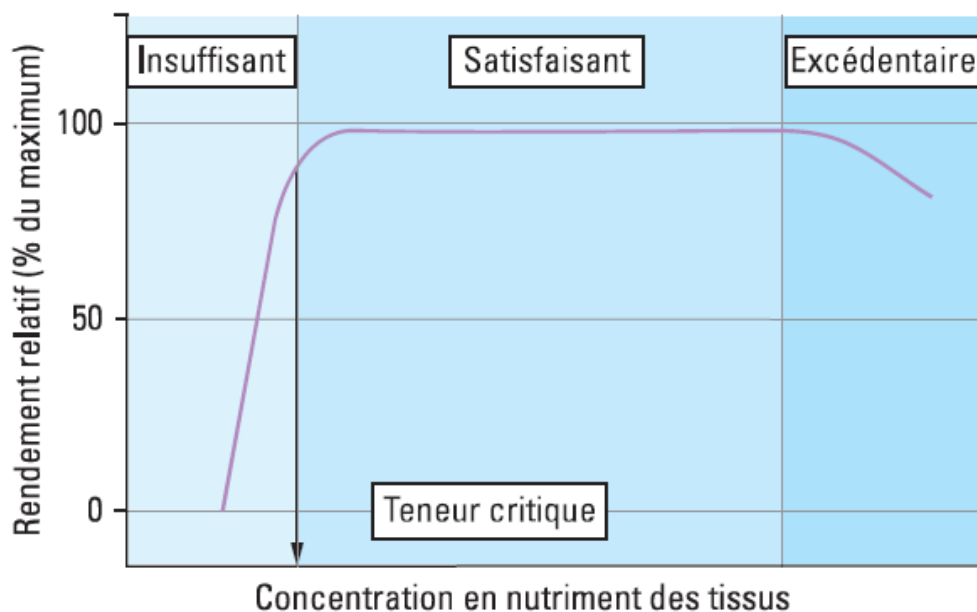


Figure 4 : Relation entre la croissance, exprimée par le rendement relatif, et la concentration en éléments (Jouany et Valé, 2017).

Analyse de sols (Olsen)

Les méthodes de mesure du Phosphore du sol en AB et en agriculture conventionnelle

Il existe plusieurs méthodes d'analyses afin de mesurer le phosphore du sol disponible pour les cultures, toutes normalisées par l'AFNOR. La méthode Dyer, utilise un extractant très agressif, capable de décomplexer les ions phosphates de l'aluminium, calcium, fer ou des composés organiques. Cette méthode est plutôt réservée aux sols acides. La méthode Joret-Hébert, dont l'extractant est un peu moins agressif est applicable aux sols neutres ou calcaires. Enfin il y a la méthode Olsen, qualifiée de méthode douce par l'activité de son extractant. La méthode Olsen est valide pour une large gamme de pH et fournit la meilleure relation avec les résultats des essais de l'étude parmi les deux autres méthodes. C'est donc cette méthode qui permet de mesurer au plus proche le P disponible.

Limite de la méthode P_Olsen

Les limites de la méthode résident d'abord dans le manque de reproductibilité des résultats d'un laboratoire à un autre. De plus la durée de vie de son réactif est courte. En effet il doit souvent être changé, ce qui rend l'analyse plus onéreuse que les autres. Une autre limite majeure de la méthode réside dans la validité de son application aux systèmes agricoles à bas intrants. En effet comme il a été démontré dans une étude (Morel et al., 2006) il y a une baisse de la biodisponibilité dans les exploitations biologiques sans élevage. Il est judicieux d'interroger la validité des outils utilisés en relation avec les modes de production. Bien que le P soit présent sous forme minérale et organique, les méthodes de mesures actuelles privilégient le compartiment minéral et les processus inhérents. Dans un système en agriculture biologique à bas intrants (pas d'engrais minéraux) il est possible que le compartiment organique et les processus associés puissent jouer un rôle majeur dans la fertilité phosphatée. C'est donc cela qui remet en cause l'applicabilité de la méthode Olsen en AB.

II.4 Gestion de la nutrition minérale dans les systèmes AB (spécificités et enjeux sur le P) et leviers disponibles

Le règlement UE 2018/848 (applicable à compter du 1^{er} janvier 2022), relate que la production biologique est un système global de gestion et de production alimentaire qui émane d'une demande sociétale de consommer biologique et qui engage le producteur comme le consommateur dans la protection de l'environnement, du bien-être animal et au développement rural/local. Selon la Fao en 2015 il y avait 1 014 000 ha, alors qu'en 2019 il y'en avait 1 678 000. Soit 65% d'augmentation. Il est donc de mise, pour assurer la pérennité des systèmes biologiques et de la santé de l'environnement, d'étudier les stratégies adaptées aux réglementations et aux problématiques propres à ce type d'agrosystèmes

II.4.1 Principes de la gestion

L'AB est un des modes de production qui associe des pratiques environnementales optimales, le respect de la biodiversité, la préservation des ressources naturelles et l'assurance élevée du bien-être animal (INAO 2016). Ce type de production n'a pas recours aux OGM et limite l'utilisation des intrants à des produits d'origines naturelles (sauf dérogations particulières). De plus il se veut favoriser le recyclage des matières organiques ainsi que les rotations et la lutte biologique. Cette approche agroécologique de l'agriculture veut développer l'entente des acteurs sur les territoires en organisant les systèmes agricoles à l'échelle locale (valorisation des déchets, optimisation des ressources...).

De façon plus détaillée, l'AB, voit le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols, comme un objectif. Parmi les éléments charnières de la gestion de la fertilité il y a le recours à la fertilisation. A la différence de l'agriculture conventionnelle, la fertilisation ne se veut qu'un complément de la fertilité du milieu et ne s'avère pas systématiquement nécessaire pour assurer les objectifs de rendement fixés. Ce bas niveau de fertilisation doit cependant permettre la récolte d'une production dont la qualité ouvre des débouchés intéressants pour l'agriculteur. De ce fait la fertilisation est en premier lieu raisonnée par rapport à la succession des cultures et ensuite par rapport aux engrais et amendements pour agir sur les trois composantes de la fertilité (physique, chimique et biologique) (Cadillon, Leclerc, et Fourrié 2015). Cette gestion est réfléchi à toute les échelles du système et ce pour différentes périodes/échelles de temps (court, moyen et long terme).

Cahier des charges et réglementations

Ces principes de l'agriculture biologique se traduisent par des actions précises et encadrées par des réglementations Européennes et Françaises. En France chaque agriculteur engagé en AB doit renseigner son activité à l'agence bio et doit établir une convention via un organisme certificateur agréé par l'INAO et accrédité par le COFRAC. Ces derniers vérifient le respect des règlements Européens, ainsi que le cahier des charges Français relatif au mode de production d'élevage biologique et complétant la disposition du règlement (CE) N°889/2008 et du règlement (CE) N° 834/2007).

L'article 12 du CE 889/2008, précise que l'utilisation d'engrais ou amendements n'est autorisée que si l'objectif de rendement n'est pas rempli, après avoir eu recours aux pratiques de travail du sol et aux pratiques culturales (légumineuses, rotations, engrais vert) censées améliorer/maintenir le niveau de fertilité.

De cette façon tous les produits destinés à la fertilisation (engrais) ou au maintien de la santé du sol (amendement) sont encadrés par la réglementation. Le détail des produits utilisables et des traitements nécessaires avant leurs utilisations sont résumés dans l'annexe I du (CE) n° 889/2008. Les engrais organiques sont décrits dans la norme Afnor «*NF U 42-001 engrais - dénominations et spécifications*», et les amendements organiques dans la norme «*NF U 44-051 - Amendements organiques - Dénominations spécifications et marquage 2006*».

Pour les effluents d'élevage conventionnels, leur utilisation est autorisée, si elle est conforme aux règlements explicités par l'annexe II A du *Règlement (CEE) 2092/91* 1991. Un effluent d'élevage est considéré comme industriel si les animaux sont conduits en caillebotis, en cages ou grilles intégrales et ne dépassant pas les seuils décrit par le règlement précédent. Également, les effluents ayant subi un compostage obligatoire ou autres traitements ont été interdit en 2005. Depuis janvier les fientes de volailles et lisier de porcs issus d'élevages industriels sont interdits à l'achat. Les stocks actuels peuvent être utilisés jusqu'en 2022, puis en 2023, leurs utilisations seront soumises à des dérogations. Le règlement pour la protection des eaux, limite l'utilisation d'effluents d'élevage à un maximum de 170 kg/ha d'azote.

Les seules ressources en P minérales, naturelles et autorisées en AB sont les roches phosphatées dont l'utilisation se limite aux sols dont le pH est bas. Si après l'ensemble des pratiques citées précédemment, le niveau de nutrition des cultures est toujours insuffisant, alors l'agriculteur peut, exceptionnellement avoir recours à des engrais minéraux. Lesquels sont stipulés dans l'annexe II A du règlement CEE 2092/91. L'ensemble des engrais et amendements utilisables en AB sont résumés dans l'annexe 2 de ce document.

En avril 2021 l'Afaïa, communiquait leurs craintes face aux augmentations des prix des engrais et amendements en AB. Actuellement la disponibilité et la quantité des ressources phosphatées utilisables en bio se voient largement limitées du fait de l'évolution de la réglementation sur les effluents d'élevages industriels. Rayant une partie des producteurs de matière organiques utilisables en AB sur le territoire Français. De plus les prix du pétrole et du transport ont augmenté, amenant de nouvelles pressions sur les agriculteurs qui «*récupèrent*» sur les produits de ventes et rendant les produits d'importations (bois, tourbes) plus onéreux. Toujours en avril, selon le ministère de l'agriculture français, les prix des engrais et des amendements sont en hausse pour le cinquième mois consécutif. Depuis Avril 2020 c'est 4,8% d'augmentation globale.

II.4.2 Les leviers disponibles en AB pour gérer la fertilité (notamment en P)

Comme pour l'agriculture conventionnelle, la gestion de la fertilisation est réfléchi principalement par rapport à l'azote, considéré comme le premier élément limitant. Cependant en AB la fertilisation ne permet pas les mêmes objectifs de rendements. De plus la nature des intrants apportés ne permet pas d'avoir un coefficient d'utilisation de l'azote aussi important en AB qu'il est en agriculture conventionnelle. Du moins dans les engrais commerciaux accessibles à la majorité des agriculteurs en AB.

Pour cela une conduite en AB nécessite en premier lieu d'avoir, encore plus qu'en conventionnel, une réflexion sur la succession des cultures et à l'intégration de couverts en fonction des précédents, du type de sol et du climat. L'AB utilise de ce fait beaucoup les légumineuses dans cet objectif de maintien de la fertilité azotée. En deuxième lieu, la fertilisation n'est effectuée que pour atteindre l'objectif de rendement et donc pas nécessairement systématique. Le choix des précédents (rotation) et les engrais verts sont considérés en AB comme les pratiques permettant d'apporter le plus efficacement et le plus économiquement des quantités d'éléments nécessaires aux cultures suivantes (Cadillon, Leclerc, et Fourrié 2015) (ITAB). Enfin la fertilisation est raisonnée selon des pratiques diverses pouvant améliorer l'état structural du sol, comme le déchaumage et/ou le travail du sol.

Les couverts

En AB les couverts sont utilisés durant l'interculture afin de rendre différents services agronomiques et environnementaux. En tout premier lieu, les couverts permettent, par leurs intégrations au sol et leurs actions sur l'activité biologique, de participer à la fabrication d'humus (Constantin et al. 2017). Cette activité biologique est augmentée par restitution des résidus. Les couverts limitent aussi l'érosion en hiver, par effet mécanique et permettent également de structurer le sol. Un couvert peut rendre une multitude de services, en été il peut jouer un rôle d'ombrage, tandis qu'en automne il peut permettre de réduire la perte en éléments par lessivage. Ceux le plus fréquemment recherchés sont de limiter les pertes et améliorer l'autonomie en nutriments et notamment en P (ou autres éléments). D'autres services peuvent être attendus en complémentarité de celui de l'engrais vert comme, favoriser l'activité biologique, réduire les pressions biotiques (ravageurs/adventices) et abiotique (structuration du sol) (Alletto et al. 2020; Charles et al. 2017).

Tous les couverts n'utilisent pas la même source de P (Hallama et al. 2019). Il est donc important d'associer des cultures ayant des stratégies d'acquisitions différentes (Hallama et al. 2019). L'efficacité d'un couvert dans une stratégie de fertilisation en P réside dans ses teneurs en P mais aussi dans sa capacité à accumuler de la biomasse. De ce fait, même des espèces peu accumulatrices peuvent être de bons couverts si le gain de biomasse est élevé, car plus cette dernière est élevée plus la quantité de P prélevée l'est aussi. D'après un article (Ulén 1997) les pertes de P dans les agro-systèmes se font à 75% sous forme particulaire. L'utilisation d'un couvert pourrait permettre une réduction de 40% de ces pertes (Kleinman et al. 2005 ; Aronsson et al. 2016).

D'autres études montrent que cette capacité à améliorer l'état de nutrition dépend des espèces, du stade de la récolte et de la quantité de biomasse produite

Des auteurs ont montré que la Phacélie permet de d'augmenter l'absorption en P des cultures suivantes grâce à sa capacité à prélever du P dans des compartiments où le P est difficilement solubilisable (Bachmann et Eichler-Löbermann 2010 ; Pavinato et al. 2017). D'après l'étude d'Hallama citée précédemment, l'absorption de P par le couvert sera d'autant plus significative que le sol est riche en P disponible.

Les CIMS : Couverts intermédiaires multiples services

L'association de différentes familles ou espèces au sein d'un même couvert, permet d'apporter une diversité de services. Pour exemple, les moutardes / brassicacées blanches sont appréciées pour leur pivot permettant le prélèvement du P en profondeur, augmentant la proportion de P labile dans le sol (Conyers et Moody 2009). Ainsi leur capacité à rendre du P disponible par acidification de la rhizosphère, via la libération d'H⁺ ou d'OH⁻ (Hallama et al. 2019). Associée à une légumineuse, le couvert cumule plusieurs services dont celui de la Vesce Pourpre capable de prélever de l'azote atmosphérique facilitant donc la nutrition de la culture associée et le piégeage de l'N pour les cultures suivantes. Mais aussi, de structurer le sol ainsi que d'augmenter la zone de prélèvements des nutriments en profondeur. Les couverts sont souvent faits de sorte qu'une espèce ait un développement rapide (Poacées, crucifères) et l'autre ait un développement plus long (légumineuses). Les CIMS permettent aussi la diversification des rotations et l'entretien de la biodiversité (Graf et al. 2016). Ce qui est important pour créer des conditions favorables à l'activité biologique du sol (habitats et nourriture).

D'une manière générale l'efficacité d'une CIMS, réside dans sa capacité à occuper l'espace et à produire de la biomasse rapidement (Amossé, Jeuffroy, et David 2013 ; Cordeau et Moreau 2017). Comme vu précédemment les légumineuses (annuelles et pluriannuelles) permettent d'apporter de l'azote au sol via la fixation symbiotique. Ainsi cette pratique permet d'insérer de l'azote en plus dans le système et peuvent contribuer à équilibrer les bilans en N. Cependant l'efficacité de cette pratique dépend largement de la synchronie entre la mise à disposition de l'azote et la dynamique des besoins pour les cultures suivantes en cet élément (Crews et Mark 2005). Il est à noter aussi que la performance des légumineuses à remplir ce service varie fortement (Charles et al. 2017). L'utilisation de telles familles végétales peut se faire autant dans la rotation (culture de rente), qu'en interculture ou en engrais vert.

Cependant il est important de prendre en compte les potentiels effets néfastes du mauvais emploi des couverts. Un document de (Constantin et al. 2017) montre que la compétition sur l'eau est à prendre en compte. Enfin le retour trop fréquent des légumineuses dans une rotation peut engendrer des problèmes sanitaires, à causes du maintien de pathogènes (comme des champignons ou des nématodes). L'étude de Hallama et al. 2019 rapporte que les poacées, les brassicacées et les légumineuses possèdent de bonnes qualités dans le stockage et la mise à disposition en P pour les cultures suivantes, du fait de leurs capacités à gagner de la biomasse. Cependant l'efficacité limitée des poacées réside dans sa faible concentration en P dans la biomasse. Enfin des sols trop pauvres en éléments réduisent l'efficacité théorique des couverts. Mais c'est sur ce type de sols que la réponse de la culture suivante est le plus visible.

La fertilisation

Les engrais utilisables en AB ont été cités précédemment. Pour l'azote il faut noter que les engrais organiques ont un CAU (coefficient apparent d'utilisation de l'azote) plus faible que les engrais minéraux (Bouthier et al. 2009). C'est-à-dire que leurs minéralisations seront plus lentes, et de ce fait leurs participations à la nutrition de la culture seront plus limitées sur un temps court. Or les aspects économiques, les engrais organiques ont un prix d'achat élevé par rapport aux engrais de synthèses utilisés en agriculture conventionnelle, d'autant plus que l'augmentation du rendement engendrée par leur utilisation est assez faible et variable (Leclerc 2009). De plus le prix des engrais organiques étant relativement élevé (comme vu précédemment), le coût de leurs utilisations doit au minimum être compensé par les gains issus du rendement. Les agriculteurs en AB, sont encore plus amenés à faire des concessions/compromis, entre économie, lutte contre les maladies et maintien de la fertilité.

La réflexion sur les rotations

Dans une rotation, les cultures exigeantes en un élément sont placées après une culture moins exigeante ou un couvert capable d'augmenter la quantité/biodisponibilité de cet élément. Cependant il est aussi nécessaire de réfléchir la rotation en amont afin de rationaliser l'ordre d'implantation des cultures selon le risque de favoriser le développement de pathogènes/adventices lorsqu'une culture revient trop souvent (légumineuse et problèmes sanitaires) et selon les services attendus pour les couverts.

Conclusion générale sur la gestion de la fertilité en système AB sans élevage

Tout d'abord il semble nécessaire de rappeler que la logique de fertilisation s'organise surtout autour de l'azote, premier facteur limitant. Cependant, il reste important de raisonner la fertilité des sols en P et K, surtout dans des systèmes biologiques sans élevage. L'ITAB et le COMIFER rappellent, que si la gestion de l'azote peut s'effectuer via l'introduction de légumineuses, cela reste différent pour d'autres éléments, notamment le phosphore (P) et le potassium (K). En effet, il est nécessaire de surveiller l'évolution de la fertilité en P et K afin de pouvoir anticiper des baisses qui pourraient être préjudiciables pour la production.

Enfin en AB et concernant le P, il est nécessaire d'amener des éléments de réponse à trois grandes questions, en confrontant un essai système analytique (Auzeville) à un essai système expérimental (la Hourre). Les deux premières étant toutes deux au sujet d'outils de diagnostics :

Est-ce que la méthode Olsen qui mesure le P disponible pour les plantes est adaptée pour le diagnostic de la fertilité du sol dans les systèmes AB ?

Pour répondre à cette question, l'évolution de cet indicateur sur le domaine de la Hourre (AB) a été suivie entre 2002 à 2021. Les stocks de P à l'hectare ont été calculés via des mesures de densités apparentes (dont une réalisée durant mon stage) et les valeurs de P_{Olsen}. L'évolution de l'indicateur Olsen et des variables qui en découlent seront comparées à celles observées en agriculture conventionnelle, permettant ainsi de repérer des différences entre ces modes de production. Une mise en relation avec des indicateurs relatifs aux cultures (rendements, INP) doit témoigner de la fiabilité de l'indicateur Olsen à représenter l'état de fertilité phosphatée des sols en AB.

Enfin la relation entre le P Olsen et l'indicateur bilan fumure – exportation doit permettre de voir comment l'offre en P du sol évolue en fonction de la fertilisation et des exportations.

Est-ce que l'approche de diagnostic basée sur l'analyse de plantes et le calcul d'un indice de nutrition phosphaté pour le soja est un outil fiable pour faire un diagnostic de la fertilité en P pour les légumineuses en AB ?

Pour répondre à cette question, j'ai suivi la réponse du soja au gradient de P des sols de l'essai longue durée d'INRAE à Auzeville afin de construire la courbe de dilution (ou courbe critique). Dans un deuxième temps, la validité de la courbe critique est testée sur le dispositif longue durée du CREABIO.

Et la deuxième concerne la validité des leviers utilisés pendant l'expérimentation :

Est-ce que l'emploi d'un couvert de cultures intermédiaires multi services (CIMS) de Moutarde et de Vesce est un engrais vert performant dans le maintien, voire l'amélioration de l'offre en P ?

Pour répondre à ce questionnement, la mesure des biomasses et teneurs ont été réalisées sur les deux cultures intermédiaires juste avant leurs destructions. La quantité de P absorbée selon le gradient de P du sol a donc pu être estimée. Pour juger de leurs efficacités, ces quantités ont été comparées aux quantités de P apportées par la fertilisation à la Hourre.

Le travail s'appuie sur deux dispositifs de longue durée. L'essai analytique longue durée (essai P) de l'INRAE, témoigne de l'impact agronomique de 3 niveaux de fertilisation en P sur un sol cultivé depuis 1969. Ce dispositif permet d'amener des références sur l'impact des traitements phosphatés quant à l'effet des ITK sur le système sol-plante, l'évolution des paramètres pédologiques ainsi que l'impact sur les rendements/ la qualité de différentes cultures conduites en conventionnel.

L'essai de la Hourre (CREABio), apporte des références sur la situation phosphatée d'une exploitation menée depuis 2001 en grande culture biologique sans élevage. Il est doté de deux grandes rotations aux situations topographiques différentes, une rotation de 4-5 ans sur sols superficiels de coteaux et une rotation courte de 2 ans sur sol profonds de vallée. Cet essai permet l'apport de références quant à l'impact des pratiques culturales appliquées à un système bas intrants sans élevage, sur la fertilité phosphatée des sols et sur les rendements des cultures.

III Matériels et méthodes

III.1 L'essai analytique longue durée d'Auzeville-tolosan

III.1.1 Contextualisation

Ce dispositif a été mis en place en 1969 par le centre de recherche de INRAe d'Auzeville afin d'étudier la réponse au P des cultures annuelles (Colomb 2007). Il se trouve au Sud-Est de Toulouse (N 43° 31' 49'' ; E 1° 30' 20'') à une altitude de 146m. Le champ de l'essai longue durée recouvre 4032 m² découpés en 4 blocs de répétitions de 3 traitements (P1 : 11 kg/Ha, P2 : 22 kg/Ha et P4 : 33 kg/Ha) et un contrôle P0 qui ne reçoit pas de P. Eux-mêmes sont partagés en trois bandes (A, B et C) dont l'historique n'est pas le même. L'essai comporte donc au total 48 parcelles (Figure 5). La taille de chacune des parcelles est de 6m de largeur pour 12m de longueur. La disposition des différents traitements P suit une répartition aléatoire (Figure 5).

Le P a été appliqué via du superphosphate à 25%. Les épandages se font généralement en début d'autonome et avant le labour pour les cultures d'hiver ou à la fin de l'hiver/début printemps pour les cultures d'été. L'objectif de cet essai étant porté sur le P, l'azote et le potassium sont donc non limitants.

N ↙

Régime P	P0	P2	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P0	P2
Bande C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	P0	P2	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P0	P2
Bande B	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	P0	P2	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P4	P1	P2	P0	P1	P4	P0	P2
Bande A	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	Bloc I				Bloc II				Bloc III				Bloc IV			

Figure 5: Plan de l'essai longue durée d'Auzeville-Tolosane. Le dispositif respecte un plan d'expérience en bloc de façon à se disposer perpendiculairement au gradient de CaCO₃ et de Ph. (Colomb et al.2007). Les bandes A, B et C sont les parcelles de bordure. Les différents traitements sont P0, P1, P2 et P4. (P1: 11 kg/ha, P2: 22 kg/ha et P4: 33 kg/ha), Les numéros de 1 à 48 sont les numéros de microparcelles.

III.1.2 Caractéristiques pédo climatiques

Sur l'essai longue durée de Auzeville, les sols sont des sols alluvionnaires profonds de types Hapludalf (selon la classification USDA) ou luvisol (selon la classification du référentiel pédologique français). Le régime de température est mésique et le régime d'humidité est udique (Colomb 2007). Le champ est à proximité de la rivière Hers qui a participé à la formation du sol grâce à des dépôts récents. La texture du sol est de type argileux à argile et peut s'apprécier par le triangle des textures par le tableau suivant.

Tableau 1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des 25 premiers cm des sols de l'essai de longue durée d'Auzeville à l'automne 1968 (Colomb et Al, 2007).

Soil properties	Units	Minimum	Mean	Maximum
Clay content	g/kg	204	258	302
Fine silt	g/kg	147	168	192
Coarse silt	g/kg	141	167	190
Fine sand	g/kg	170	198	220
Coarse sand	g/kg	84	164	278
CEC	cmol(+)/kg	10.4	15.6	18
CaCO ₃	g/kg	0	17.4	73
pH (1:10 soil/ water ratio)	–	6.6	7.79	8.4
Total carbon	g/100 g	0.82	0.9	0.97
Total nitrogen	g/100 g	0.101	0.119	0.134
C/N	g/g	6.9	7.6	8.1
Total P	mg/kg	402	546	690
Organic P	mg/kg	129	159	197
P Olsen	mg/kg	4.4	6.2	9.2

On observe que la concentration de CaCO₃ et le pH des horizons AP dépendent de l'épaisseur de la couche de l'horizon calcaire, variant de 40cm à 120cm. La disposition des parcelles a été réfléchi afin que les différentes répétitions des traitements soient réparties de façon égale sur les zones calcaires et non-calcaires. L'eau disponible dans le sol est de l'ordre de 150mm par mètre de profondeur (Colomb 2007).

En ce qui concerne le climat (Figure 6), des pics de pluviométrie aux alentours de 70mm s'observent durant les mois de janvier, avril, mai et novembre. Les températures moyennes respectives sont de 6°C, 13°C, 16°C et 10°C. Les mois de février, juillet, août et septembre sont les plus secs, avec environ 15 mm en 4 semaines. Les mois de juillet, août, et septembre sont les plus chauds avec une température moyenne de 22°C.

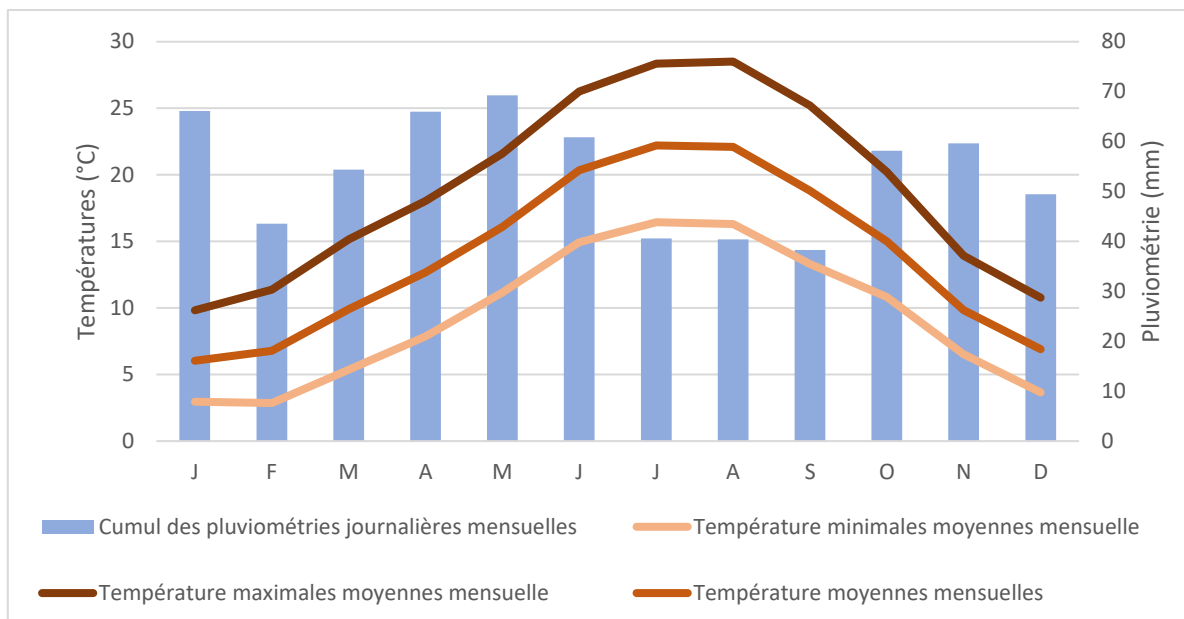


Figure 6 : Diagramme ombrothermique d'Auzeville-Tolosane des température, minimum, moyen, maximum et des pluviométries moyennes sur 20 ans (CLIMATIK plateforme INRAe)

III.1.3 Rotations et Itinéraires techniques

A Auzeville, le mode de production suit le cahier des charges de l'agriculture conventionnelle. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume les cultures et cultivars utilisés durant l'expérimentation et permet d'apprécier les niveaux d'azote appliqués. Pour les cultures d'hivers (le blé), les dates de semis varient de la mi-octobre à la mi-décembre et dépendent de la date de récolte du précédent ainsi que des conditions météorologiques. Sur le dispositif d'Auzeville, les résidus subissent un déchaumage, puis sont incorporés au sol après la récolte. Il n'y'a aucune application de matière organique et ce depuis le début de l'essai longue durée. Le potassium n'est pas un facteur limitant dans ce système de cultures (Jouany et al. 1996), de facto un apport de 33 kg de K par ha sous forme de KCl a été appliqué tous les ans afin de compenser les pertes par exportations. Les adventices sont contrôlées grâce à l'application d'herbicides, le travail du sol ou la succession des cultures.

Les analyses Olsen de sols de 2016 réalisées sur les couches de sol 0-30cm et 30-60cm, différencient les sols en fonction du traitement appliqué sur les parcelles. Ces résultats, ont permis durant l'étude, d'analyser la réponse au P des couverts et du Soja. La mesure du P du sol selon la méthode Olsen (P_Olsen) a été initialement calibrée pour les sols de nature calcaire. Son spectre d'application étant large, la méthode peut être utilisée pour une vaste gamme de sols. Elle fait partie des méthodes dont l'extractant est le moins agressif. De ce fait elle ne mesure que le P dissout (P inorganique) et celui adsorbé au complexe argilo-humique (P échangeable). La procédure est décrite dans la norme NF ISO 11 2363 ou dans le document (Olsen 1954).

Tableau 2 : Tableau des successions culturales, des apports d'eau/d'azote ainsi que les indicateurs de stress annuels de l'essai d'Auzeville depuis 1969. Source : (Colomb 2007).

Crop number	Year	Crop name	Cultivar	N input (kg/ha)	Irrigation (mm)	Water stress indices	Signif.	Y_{max} (kg/ha)	GPC _{max} (%DM)
1	1969	Wheat	ET. de CHOISY	160	0	9.9	S	3,610	0.41
2	1970	Maize	INRA 400	200	0	5.3	NS	6,930	0.28
3	1971	Maize	INRA 400	200	0	8.5	S	6,650	0.27
4	1972	Sunflower	INRA 6501	40	120	8.5	S	3,600	0.61
5	1973	Soybean	AMSOY	0	0	7.5	NS	3,150	0.86
6	1974	Sorghum	INRA 450	40	0	8.9	S	6,028	0.42
7	1975	Wheat	TOP	140	0	9.8	S	4,742	0.37
8	1976	Fababean	HYB S45-48B	0	0	8.4	S	2,552	0.79
9	1977	Wheat	TOP	50	0	9.9	S	5,045	0.53
10	1978	Sorghum	NK121	100	0	6.5	S	6,468	0.60
11	1979	Wheat	TOP	180	0	9.8	S	3,698	0.41
12	1980	Sorghum	NK121	200	0	7.7	S	6,340	0.69
13	1981	Fababean	TALO	0	0	9.8	S	4,268	0.64
14	1982	Wheat	TOP	120	0	8.5	S	4,840	0.36
15	1983	Rape	JET NEUF	105	0	9.7	S	3,422	0.33
16	1984	Sorghum	NK121	150	0	5.6	S	6,425	0.33
17	1985	Sunflower	TOPFLOR	0	0	7.5	NS	3,455	0.67
18	1986	Wheat	GALA	133	0	9.5	S	5,755	0.38
19	1987	Pea	FRISSON	0	0	-	S	2,600	0.49
20	1987	Maize	LG11	120	240	9.9	S	6,722	0.28
21	1988	Sunflower	PHARAON	0	0	8.6	NS	2,932	0.68
22	1989	Soybean	SPOT	0	120	3.8	S	2,438	0.82
23	1990	Wheat	VIZIR	80	0	7.7	S	4,178	0.40
24	1991	Maize	SABRINA	160	185	8.8	S	8,120	0.33
25	1992	Maize	FURIO	175	60	8.7	S	7,368	0.27
26	1993	Wheat	SOISSONS	150	0	9.8	S	6,925	0.36
27	1994	Sunflower	SELECT	60	65	6.6	S	2,711	0.73
28	1995	Maize	VOLGA	180	100	9.5	S	10,615	0.25
29	1996	Maize	VOLGA	180	140	9.9	S	9,970	0.23
30	1997	Wheat	NEODUR	220	0	8.7	S	5,191	0.45
31	1998	Maize	VOLGA	200	190	9.9	S	11,023	0.24
32	1999	Maize	VOLGA	220	230	9.9	S	8,395	0.29
33	2000	Sunflower	ALBENA	60	0	6.3	S	3,080	0.83
34	2001	Wheat	SOISSONS	140	0	9.9	S	5,159	0.41
35	2002	Soybean	DEKABIG	0	90	7.7	S	4,804	0.49
36	2003	Wheat	PROVENZAL	180	30	7.6	S	5,364	0.42

Water stress indices: left digit (flowering period); right digit (ripening period). See text (Section 2.4) for ranking details. Signif.: (S) yield in P0 treatment differs significantly to Y_{max} ; (NS) no significant difference. Y_{max} : maximum yield observed in both the P2 and P4 treatments. GPC_{max}: maximum grain phosphorus concentration observed in the P4 treatment.

III.1.4 Les dispositifs d'études en 2021

III.1.4.1 Réponse d'un couvert (Vesce-Moutarde) au gradient de P

Le couvert a été semé le 15 novembre 2020 grâce à un semoir combiné de chez Khun, à hauteur de 0,18 kg/ha de semence pour la Vesce pourpre et 0,07 kg/ha de semence pour la Moutarde blanche. Le 16 novembre 2020, il y'a eu passage d'un rouleau plombeur. Le couvert a été fauché le 20 avril 2021, soit 5 mois d'interculture. Le précédent était un sorgho semé le 25 mai 2020 et récolté le 20/10/2020.

Cette expérimentation a permis de mettre en évidence la réponse du couvert au gradient de P présent sur le dispositif de longue durée d'Auzeville. Le suivi a été effectué de la levée à la fauche séparément pour les deux fractions (Vesce et Moutarde) et cela sur plusieurs variables : la biomasse produite à la destruction du couvert et la teneur en N, P, K et S.

Protocole de mesure de la biomasse

Les 32 parcelles (bandes B et C) ont été suivi pour cette expérimentation (Figure 5). L'emplacement du prélèvement est choisi selon sa capacité à représenter le reste de la parcelle.

Le prélèvement a été effectué avec un cadre de 70cm de largeur sur 70cm de longueur, soit 0.49m² de surface de prélèvement. A l'aide d'une épinette et d'un sécateur, le couvert a été prélevé et ce à ras du sol. Après quoi un tri est effectué afin de séparer la vesce de la moutarde et d'éliminer les adventices/contaminants. Une fois les prélèvements effectués les échantillons sont mis à l'étuve pendant 2 jours à 80°C puis pesés. Les mesures ont été réalisées avec une balance au 100^{ème} de grammes. Les teneurs sont mesurées sur chaque échantillon de biomasse prélevée.

III.1.4.2 Réponse du soja au gradient de P : Construction de la courbe critique

Le soja de la variété ES pallador, a été semé le 6 mai 2021 après un sorgho, faute d'une levée satisfaisante, qui d'après l'équipe technique, le problème de levée peut aussi être dû à une présence accrue de résidus de cultures sur le champ. Le Soja a donc été ressemé le 1^{er} juin 2021, juste après le passage d'un broyeur et d'une houe rotative. Le soja a été implanté avec un espace inter-rang de 50cm et à raison d'une densité de 425 000 graines par hectare (soit 42 ,5 graines /m²), grâce à un semoir de type combiné Khun à 6 rangs. Un traitement phytosanitaire à base de S-Metolastar a été effectué le 08 mai 2021. 35 mm d'eau ont été apportés à l'essai le 26 juillet 2021.

Cette expérimentation visait à suivre la dynamique de P dans la biomasse au cours de la croissance depuis la levée jusqu'à la floraison. Plus précisément il s'agissait, pour chaque date de prélèvement, de construire la relation entre la teneur en P du soja et la biomasse produite pour l'ensemble des données mesurées (32 mesures par date), d'identifier pour chaque date la teneur minimale en P qui permet d'obtenir la croissance maximum.

Cette expérimentation vise à suivre la dynamique de la teneur en P du soja depuis la levée jusqu'à la phase de remplissage des gousses (R5) et ce dans un spectre large de teneurs en P du sol. L'échelle phénologique choisie est celle proposée par le ministère de l'agriculture et de la pêche du Canada (Annexe 5). Le suivi a été réalisé sur les parcelles des bandes B et C de l'essai, soit 32 parcelles (Figure 5). On a réalisé 11 prélèvements entre le 28 juin et le 11 août de la biomasse aérienne sur lesquels on a mesuré la matière sèche produite et les teneurs en N et en P. L'objectif ici est de voir comment varie la biomasse en fonction des teneurs en P du soja et de déterminer la teneur critique, c'est-à-dire la teneur minimum à partir de laquelle une augmentation de la disponibilité en P n'entraînera pas d'augmentation de biomasse, mais seulement de la teneur.

Protocole de mesures au cours du cycle de croissance

Parallèlement au présent suivi, l'INRAe mesure le rendement machine qui, lui, à la différence du rendement que nous calculons, comprends les pertes dues à la moissonneuse batteuse. Etant donné que la parcelle fait 6m de large et que la machine récolte sur 1m83, un couloir central de 2m a été réservé à cet effet et est donc exclu des zones éligibles aux prélèvements/dénombrements. De la même façon l'effet de bordure a été limité en excluant deux couloirs de 1 m de chaque côté de la parcelle. Seuls les rangs les plus proches du couloir central sont assujetties aux mesures (Figure 7).

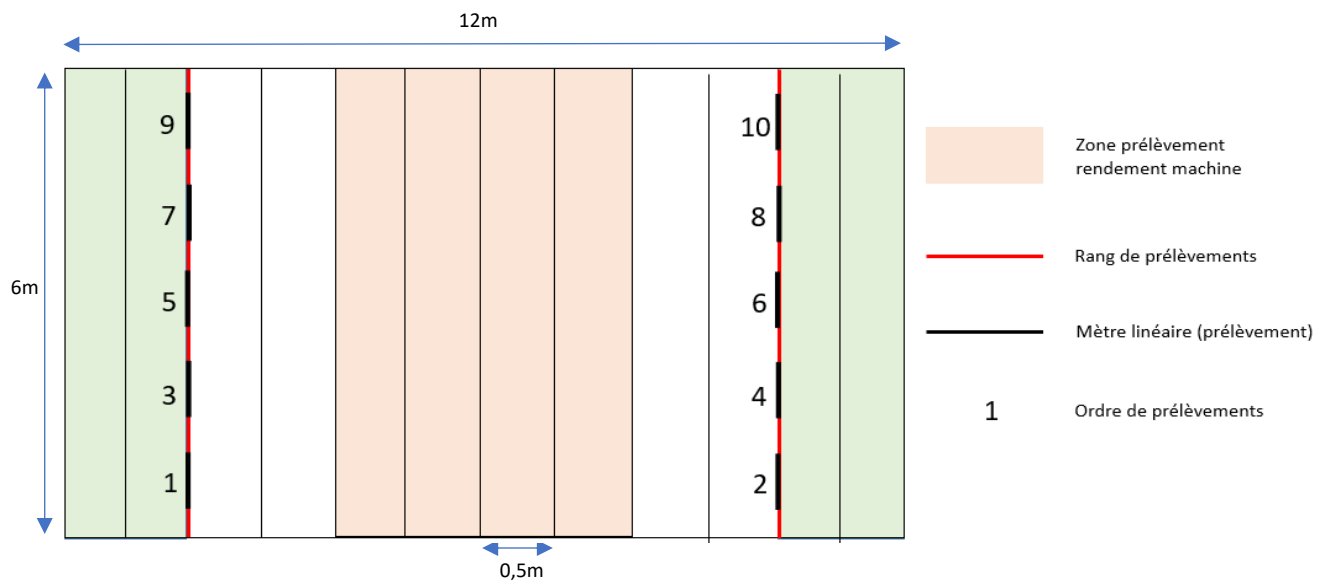


Figure 7 : Schéma descriptif de la méthodologie de suivi sur le Soja. Il y'a eu 11 dates de prélèvements : 1 en juin, le 28. Il y'a eu 8 prélèvements en juillet, effectués le 5, 8, 12, 15, 19, 22, 26, 29. Et 2 en août, effectués le 5 et 11.

Les 11 prélèvements ont été effectués tous les 3-4 jours et ce pendant 1 mois et demi. La méthode de prélèvement qui a été choisie est celle du mètre linéaire. Les emplacements des 10 premiers prélèvements ont été placés au préalable des mesures (

Figure 7). L'emplacement du 11^{ème} prélèvement, a été décidé au moment du prélèvement. Il se situe la ligne des prélèvements impairs, aux endroits où il y avait au minimum un rang de Soja continu de 1 m.

Protocole 2 : Le dénombrement

La mesure du nombre de pieds par mètre linéaire a permis de suivre la densité de plants en fonction du traitement et comparer la biomasse prélevée au nombre de plants récoltés pour analyse. Pour cela le mètre linéaire est posé sur une zone que l'expérimentateur jugeait représentative du reste de la parcelle. Les rangs étant espacés de 50 cm, la surface de mesure est de 0.5 m². Les emplacements sur lesquels se sont effectués les dénombrements ont été déterminés à l'avance et sont identiques à ceux des prélèvements. Chaque emplacement correspond au prélèvement d'une date donnée (

Figure 7).

III. 2 L'essai système longue durée de la Hourre

III.2.1 Contextualisation

Le site de l'expérimentation longue durée est situé au Sud-Est de la ville d'Auch (43°38'29 N 0°36'16 'E), dont les terres appartiennent à la fondation Ludovic Lapeyrère. Le domaine est

géré par le LEGTA (lycée d'Enseignement Général et technologique Agricole) qui administre et gère l'exploitation agricole. Le CREABio, lui, assure le suivi des zones de références situés sur les parcelles du domaine.

Le but de ce suivi étant d'étudier la durabilité des pratiques en AB, vis-à-vis de la fertilité chimique, N, P et K, et de la gestion de la flore adventice sur le long terme. L'entièreté du site a été converti en AB en 2000. Il comporte actuellement 50,5 Ha de SAU. Le terrain est vallonné et repose donc sur un système de coteaux d'orientation Est-Ouest dont les pentes peuvent être moyennes à fortes. On observe des variations d'altitude allant de 150m à 239m.

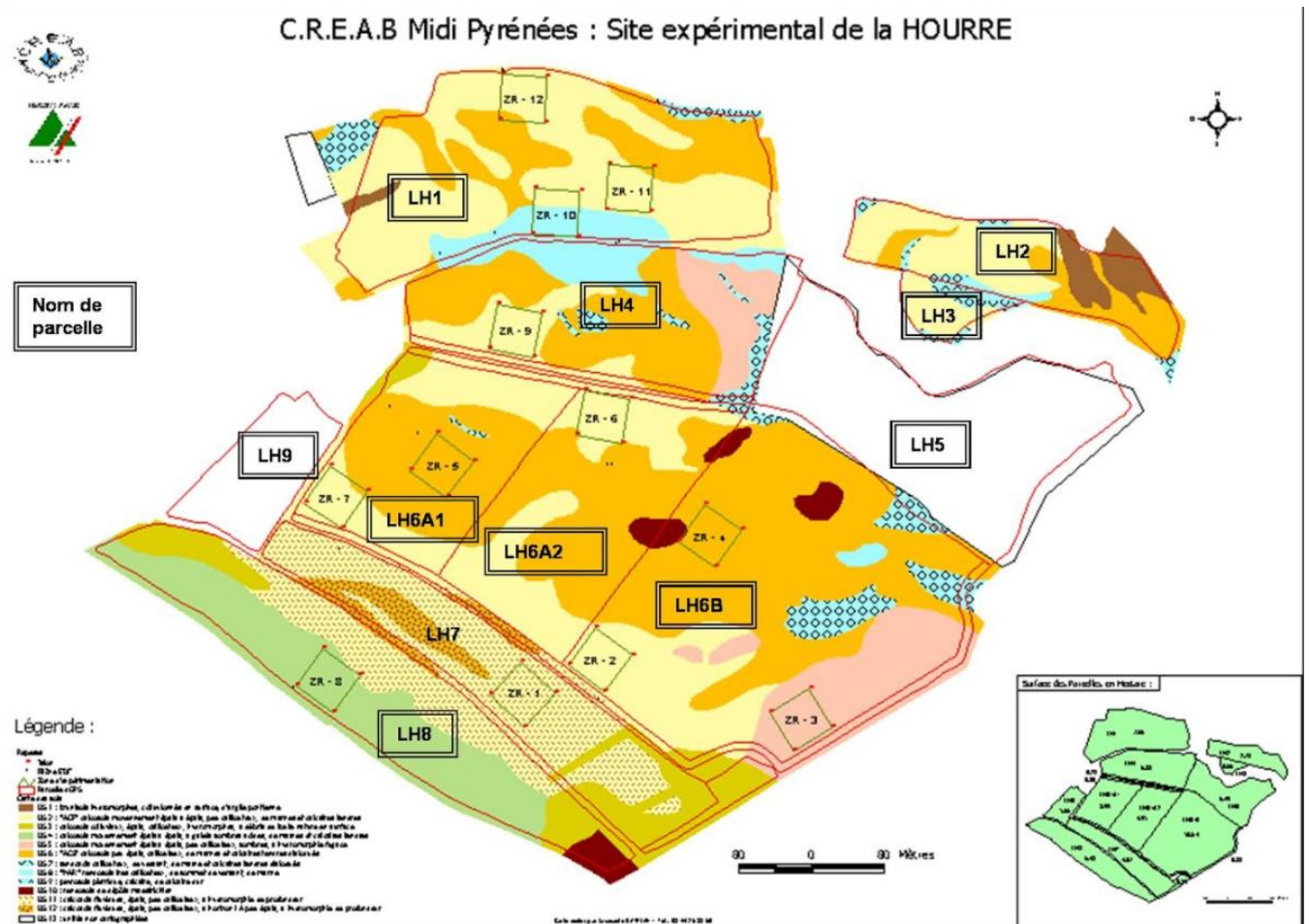


Figure 8 : Plan de répartition des zones de références (ZR) de l'essai de la Hourre

III. 2.2 Caractéristiques pédo climatiques

Selon l'étude pédologique réalisée par la CACG (Compagnie d'aménagement des Coteaux de Gascogne), les sols de la Hourre sont de nature argilo-calcaire. Les sols des différentes ZR se différencient entre eux principalement par leurs épaisseurs, leurs teneurs en éléments grossiers ainsi que la présence d'horizons plus argileux en profondeur. Cette campagne pédologique a montré aussi une teneur en calcaire relativement élevée et un pH basique allant de 8,2 à 8,7.

Tableau 3 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de la Hourre (Campagne 2002).

Propriétés du sol	Unités	dates de mesures	Maximum	Minimum	Moyenne
C	g/kg	2017	16,3	3,01	9,27
N	g/kg	2017	1,9	0,606	1,20
C/N	g/kg	2017	8,88	4,97	7,58
MO	g/kg	2017	28,2	5,21	16,02
P2O5_Olsen	g/kg	2017	0,025	0,007	0,01
P2O5_H2SO4 extractible	g/kg	2017	0,966	0,613	0,77
P2O5_H2SO4_ap_calcination	g/kg	2017	1,51	0,92	1,25
Porg	g/kg	2017	0,67	0,243	0,48
K_cobaltihexammine	cmol+/kg	2017	0,389	0,12	0,23
Argile	g/kg	2002	430	237	325,92
Limon	g/kg	2002	408	217	287,21
Sable	g/kg	2002	160	33	81,83
PHE	g/kg	2002	8,7	8,2	8,44
CACO3	g/kg	2002	435	129	295,88

L'ensemble des ZR possède un sol de type argileux. Sur l'année, le domaine reçoit en moyenne, 700 mm de d'eau (Figure 9). Les mois de janvier et mai sont les mois les plus humides, avec une pluviométrie comprise entre 70-75mm. Les températures moyennes sont respectivement de 6 et 16°C. Tandis que juillet et septembre sont les mois les plus secs, avec respectivement, une pluviométrie de 48 et 41mm. Les températures moyennes maximales sont enregistrées pour les mois de juin, juillet, août et oscillent entre 20-22°C.

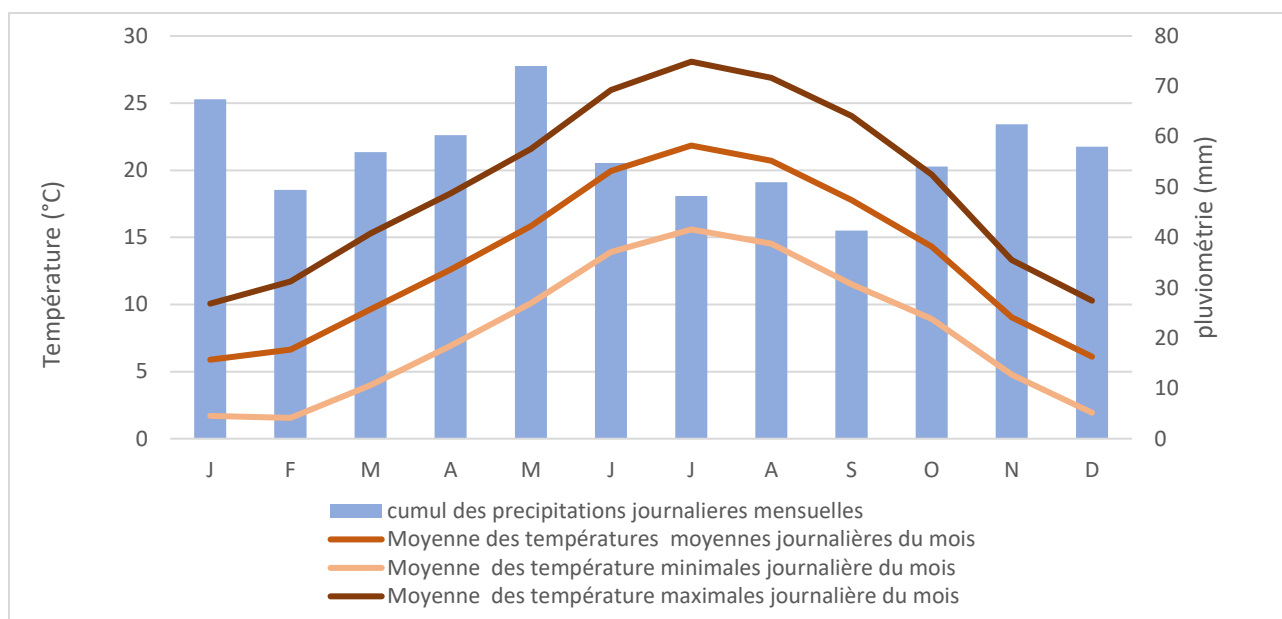


Figure 9 : Diagramme ombrothermique du domaine de la Hourre de 2000 à 2020

III.2.3 Rotations et ITK

A la Hourre, le mode de production suit le cahier des charges de l'agriculture biologique. L'exploitation ne possède pas d'élevage, les apports d'intrants sont exogènes. Les engrais utilisés sont des produits organiques, souvent coûteux et dont le CAU est faible comparé à celui des engrais de synthèses. De ce fait ils sont réservés aux cultures exigeantes et/ou pour lesquelles il peut y avoir des exigences de qualité comme le blé tendre d'hiver. Les fertilisants organiques autorisés dans les systèmes AB sont des plumes hydrolysées, des fientes de volailles ou des protéines animales transformées.

Les rotations et les cultures sont résumées dans le tableau suivant. Il y a deux types de rotations sur l'exploitation. Une rotation courte dite « productive », (2 ans à 3 ans), est placée sur les parcelles de fonds de vallée (LH 7 et LH 8), elle combine une céréale à paille (Blé d'hiver ou Orge d'hiver) de la féverole et du soja. Elle concerne la ZR 1 et 8. Et une rotation longue, dite « autonome » incluant des couverts et cultures associées. Elle concerne tout le reste des ZR. Les apports y sont moindres que sur les parcelles productives. L'exploitation n'a pas recours à l'irrigation, ce qui impacte grandement le choix des cultures d'été et le choix de leurs emplacements. Ainsi des cultures comme le Tournesol ou le Sorgho sont pratiquées sur des parcelles dont la réserve utile est faible. Tandis que le soja, lui, est implanté sur les parcelles aux capacités hydriques plus élevées (Sol plus profond).

Tableau 4 : Successions culturales et quantité de N ajouté annuellement sur le domaine de la Hourre depuis 2001

année	ROTATIONS LONGUES								ROTATIONS COURTES					
	ZR 10	ZR 11	ZR 12	ZR 9		ZR 5	ZR 7	ZR 6	ZR 2	ZR 3	ZR 4	ZR 1	ZR 8	
	LH1	LH4		LH6A1		LH6A2		LH6B		LH7		LH 8		
cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	cultures	N input (kg/ha)	
2001-2002	FEV	42	TOU		Orge	40	TV		BtH	80	BtH	80	SOI	
2002-2003	OgH	38,5	TV		FEV		OgH	39	TOU		SOI		BtH	96
2003-2004	TOU		BtH	80	BtH	80	FEV		FEV		BtH	40	SOI	
2004-2005	FEV		FEV		TOU		TOU + engrais vert		BtH + engrais vert	85	SOI		BtH	93
2005-2006	BtH + engrais vert	80	OgH + engrais vert	40	FEV		LENT		TOU		BtH	80	SOI	
2006-2007	TOU		TOU + engrais verts		BtH + engrais verts	33	BtH	33,1	FEV		SOI		BtH	61
2007-2008	FEV		TV		PH		TOU		BtH + engrais vert	33	BtH	37	SOI	
2008-2009	BtH + engrais vert		BtH		O P	32	BtH		TOU		SOI		BtH	64
2009-2010	TV		OgH		TOU		PP	90	FEV + PP + SOR		BtH	90	SOI	
2010-2011	TOU		LUZ		FEV		BtH + TV	67	OgH + TV	30	SOI		BtH	82
2011-2012	OgH	37	LUZ		Blé	92	SOR		SOR + TOU		BtH	92	SOI	
2012-2013	FEV		BtH+TV	88	TOU + SOR		FEV	53	LUZ + OgH	53	SOI		BtH	88
2013-2014	BtH	100	TOU+SOR		FEV		TOU		LUZ + FEV		BtH	100	SOI	
2014-2015	TOU		LENT		Oth + TV	40	OgH+TV	40	BtH + TV	80	SOI		FEV	
2015-2016	LENT		Oth		FEV		BtH + FEV		SOI		SAR		BtH	
2016-2017	OgH + TV		LIN		SAR		SAR		FEV		BtH + TV		SOI	

BtH : blé tendre d'hiver FEV : féverole LENT : lentille LIN : lin LUZ : luzerne OgH : orge d'hiver OP : orge de printemps
PH : Pois d'hiver PP : pois de printemps TOU : tournesol TV : trèfle violet SAR : sarrasin SOI : soja SOR : sorgho

III.2.4 Précisions d'éléments de l'itinéraire technique

Un système de production agricole en biologique nécessite de prévoir plusieurs alternatives aux pressions biotiques et abiotiques, autres que celles utilisées en agriculture conventionnelle. Afin de réduire la pression des adventices par exemple, le domaine de la Hourre effectue des semis tardifs d'automne. De plus la disposition des cultures d'hiver et de printemps est réfléchi pour les alterner un maximum, quand cela n'est pas possible, c'est un travail léger du sol (faux semis, labour de surface) qui viendra diminuer la pression des adventices. Lorsque leurs pressions deviennent difficilement gérables, il est possible de placer la parcelle en prairie temporaire durant 3 ans. Le dernier recours est un désherbage mécanique à l'aide d'outils comme la herse étrille ou la houe rotative.

La pression des maladies et des ravageurs peut être réduite grâce à la mise en place de rotations longues et diversifiées, ainsi que la sélection de variétés dites résistantes/tolérantes. Concernant la dynamique des éléments nutritifs dans le système, l'utilisation de cultures intermédiaires permet de limiter la lixiviation et surtout de se substituer dans une certaine mesure à la fertilisation.

III.2.5 Les dispositifs d'études en 2021

III.2.5.1 Mesure de la densité apparente des sols des zones de références

Cette mesure est nécessaire à l'estimation du stock de P disponible (évalué par la méthode Olsen) pour les différentes parcelles. En effet, la densité apparente (g/m³), informe sur la

quantité de sol par unité de volume. En considérant une profondeur de sol égale à celle parcourue par les racines, il est possible d'estimer la masse de sol à l'hectare, disponible pour les plantes. Il est aussi possible, grâce aux calculs des bilans de fumure moins les exportations, de dresser l'état de la dynamique du P dans une exploitation en grandes cultures conduite en biologique. Enfin, les résultats pourront être comparés à ceux de l'essai analytique d'Auzeville et attester ou non de la validité de l'outil P_Olsen pour qualifier l'état phosphaté d'une parcelle en agriculture biologique. La méthode d'analyse sélectionnée est celle des cylindres (Baize 2018). La terre prélevée a été pesée fraîche et sèche. Le séchage a été réalisé durant 48h à 105°C. Il a été choisi d'effectuer une seule mesure par zone de référence (ZR), sous couvert de l'hypothèse que l'échelle de travail ne nécessite pas de quantifier l'incertitude autour de la mesure par ZR.

L'expérimentation débute par la création d'une fosse dont l'emplacement est choisi par l'expérimentateur selon sa représentativité de la ZR : via l'apparence du couvert et l'apparence de l'état de surface du sol (couleur, texture et topographie). Les cylindres utilisés ont un volume de 192,4 cm³ (soit 7cm de diamètre et 5cm de hauteur). Ils ont été posés à l'horizontale sur la façade de la fosse. Sauf pour le premier qui a été posé à la verticale pour apprécier la masse volumique de la couche superficielle.

Chaque horizon a été mesuré deux fois, soit un total de 6 prélèvements par fosse (Figure 10). Le choix des zones de prélèvements des horizons se fait par soucis de représentativité. Mais aussi par soucis de faisabilité car il faut éviter de sélectionner une zone trop pourvue en éléments grossiers (> à 2mm), au risque premièrement de fausser la mesure (compression du volume) et deuxièmement de casser le matériel.

Les échantillons ont été pesés avant passage à l'étuve afin de connaître le taux d'humidité, pouvant jouer fortement sur la masse volumique du sol des sols argileux (Bruand et al. 1996). Ensuite, la terre et son contenant ont été placés à l'étuve pendant 48h à 105°C. Une fois le séchage terminé, une deuxième pesée a été réalisée, cette fois ci pour en mesurer la masse sèche.

Afin d'exclure les cailloux du calcul de la densité apparente de terre fine, les échantillons ont été trempés pendant 12h puis passés au tamis de 2 mm pour ne récupérer que les éléments grossiers. Après un nouveau passage à l'étuve à 105°C la fraction >2mm a été à nouveau pesée. La densité apparente a pu donc être calculée en soustrayant la fraction >2mm de la pesée en sec totale et en rapportant au volume prélevé (formule n°7 P.36).



Figure 10 : Photo descriptive du prélèvement de sol pour la mesure des densités apparentes.

III.2.5.2 Analyses de la composition minérale des plantes

L'analyse des teneurs a été, à la fois effectuée sur le couvert de Vesce-Moutarde et sur le soja. Juste après mesure des biomasses, une partie du prélèvement a été utilisé et soumis à quelques étapes de préparation. Après séchage et pesée les échantillons sont broyés pour analyse minérale. Cette sous-partie se divise en deux étapes : le broyage grossier (1cm) et le broyage fin(1mm). Ils sont nécessaires afin d'assurer une représentativité de la teneur totale en éléments de la partie aérienne. En effet ils permettent d'homogénéiser l'échantillon et d'augmenter la surface de contact avec les réactifs. Enfin il est nécessaire de sécher les échantillons à 70°C au moins 12 h avant broyage.

Des micros pesées sont ensuite faites sur chaque échantillon. Pour la mesure, une balance de la marque Sartorius précise au 1000^{ème} de gramme a été utilisée. L'échantillon prélevé sur les broyats fins de vesce et de moutarde doit être comprise entre 50ug et 60ug. La masse est relevée, puis il y a ajout de 50 à 60 ug de tungstène, censé améliorer la combustion du soufre. Enfin le prélèvement de l'ordre d'une centaine de ug est placé dans une feuille d'aluminium puis compressé afin d'éliminer l'air et éviter le phénomène de ré-humidification qui viendrait alourdir l'échantillon et donc fausser les mesures des teneurs.

III.2.5.3 Mesure des teneurs en éléments CNPS

La méthode d'analyse des teneurs minérales est identique pour les végétaux prélevés sur les deux expérimentations. Les précédents échantillons sont placés dans un analyseur élémentaire, dont le nom du modèle est « vario EL cubo » de chez ELEMENTAR. Cette analyse a pour but de soumettre les échantillons à différents paliers de fortes chaleurs. Les températures montent jusqu'à 1800°C et les échantillons sont placés sous atmosphère d'oxygène et d'hélium. Les gaz de combustion et l'humidité sont les paramètres de sortie qui sont mesurés par la machine. Les

résultats sont exprimés en pourcentages. La teneur en P est analysée selon la méthode du dosage au vert de malachite. Le protocole suit la norme ISO 6878:2004.

III.3 Analyses des données

III.3.1 Traitements des données

III.3.1.1 Biomasses et teneurs du couvert de Vesce et de Moutarde et du Soja

La mesure de la biomasse a été effectuée sur une surface S, valant 0,49m² pour les couverts et 0,5 m² pour le Soja. Par convention, la biomasse est rapportée à l’Hectare. Pour convertir la quantité de biomasse (kg) mesurée sur 0.49m² en tonne de biomasse par Hectare, le calcul suivant a été appliqué :

$$\text{Biomasse à l'ha} = \left(\frac{\text{biomasse cadre}}{10^6} \right) * S \quad (1)$$

La quantité d’éléments prélevés par un couvert / Soja se calcule à partir des résultats de la biomasse (kg/ha) et des résultats des analyses de teneurs (%). Afin de connaître la capacité d’un couvert / du Soja à prélever des éléments (kg/Ha), il a été fait comme suit :

$$\text{Quantité de P prélevé} = \text{teneur en P} * \text{biomasse} \quad (2)$$

III.3.1.2 Calcul des bilans annuels de P (fumures – exportations)

La deuxième partie des actions réalisées durant mon stage ont servi à calculer les bilans de fumures via les exportations en éléments par les plantes et les apports par fertilisation. Via Excel, la base de données d’indicateurs sols a été construite grâce à des études menées sur la Hourre. J’ai également utilisé une base de données d’indicateurs relatifs aux plantes (Tableau 5). Ce bilan est un moyen de connaître l’état de fertilité d’une parcelle en un élément donné via les apports par fertilisation et les exports par la récolte en ce dernier.

La réalisation des bilans de fumure moins les exportations nécessite plusieurs informations, comme, les apports d’éléments via la fertilisation, l’itinéraire technique, les exportations d’éléments de la parcelle et la composition des différentes parties de la culture. Pour cela j’ai mis à jour et compilé des bases de données sols et plantes issues de précédentes campagnes de mesure entre 2002 et 2020. L’ensemble des données rassemblées dans la base m’a permis de calculer les bilans fumures moins exportations (Bilan F-E) par ZR de 2000 à 2017.

Les apports concernent tout élément mis sur la parcelle apportant une fraction minérale au sol dans l’objectif d’en gérer sa fertilité.

Tableau 5 : données de plantes pour la Hourre

Variables mesurées	Méthodes de mesures	Fréquences
PMG	Pesée sur 1000 grains	Chaque récolte
Teneur en P aérien	Colorimétrie (vert de malachite)	
Teneurs en N, K et S aérien de la matière sèche	Spectrophotométrie à flux continu	Epis 1cm, floraison et maturité
Biomasse sèche (branche, feuille)	Pesée (balance précise au 100ème de g)	Epis 1cm, floraison et maturité / Avant maturité pour les couverts
N optimal		Epis 1cm, floraison et maturité
P, K, N et S absorbé	Calcul à partie des teneurs	Epis 1cm, floraison et maturité

Les engrais utilisés à la Hourre sont, comme dit précédemment, des farines de plumes, fientes de volailles et protéines animales transformées (PAT).

L'équipe du CREABio a commandé des analyses en éléments des différents engrais utilisés (données laboratoire) pour les comparer aux valeurs commerciales (données étiquette). Pour le calcul des apports, seule la valeur « laboratoire » a été prise en compte. Afin de connaître la quantité de P apporté à l'hectare il suffit de procéder comme suit :

$$\text{Apports} = \text{teneurs en P de l'engrais} * \text{dose apportée} \quad (4)$$

Les teneurs sont exprimées en pourcentages et la dose en kg/Ha. L'apport est donc, lui, exprimé en kg/ha en P.

Les exportations concernent toutes parties des plantes exportées pour des raisons de production (le grain) ou bien même sanitaires (destruction d'une parcelle infectée).

$$\text{Exports} = \text{Teneur en P de la partie exportée} * \text{Biomasse de la partie exportée} \quad (5)$$

Les teneurs en un élément sont exprimées en pourcentages. La biomasse est quant à elle mesurée en kg/ha. De ce fait les exports témoignent de la quantité exportée en un élément par la récolte et ce par hectare.

$$\text{Bilan F} - \text{E} = \text{apports (F)} - \text{Exportations (E)} \quad (6)$$

Ce bilan (kg/ha) a été calculé sur la période de 2002 à 2017 et fait état de l'évolution de la fertilité des sols conduits en agriculture biologique à la Hourre.

Tableau 6 : engrais utilisés. Avec la valeur nutritive commerciale et la valeur nutritive analysée en laboratoire.

Nom commercial	Nature	N-P-K étiquette (%)	N-P-K labo (%)
Biovi	plumes	10-1-1	
Dynater	Plumes	10-0-0	
Orgaliz F	Plumes	13-0-0	13,3-0,42-0,18
Orgaliz	PAT	9-12-0	8,2-5,24-0,49
Orgaliz B	PAT	9-12-0	7,8-5,68-0,48
Patenkali		0-0-30	
Ormendis	PAT+Fientes	7-4-2	7,35-1,99-1,71
Orgaliz K+	PAT	10-4-0	
Orga'vio	PAT	10-4-0	
ORGA'VIO	engrais	7 - 4 - 2	
VIO +	PAT	11-6-0	9,66-3,52-0,63
2 produits	plumes	10-0-0 & 13-0-0	13,9-0,33-0
BIO FUMUS	Compost déchets verts 10 mois	70% MS (0,1%N ; 0,06%P ; 0,15%K)	
Dynater S	Plumes	10-0-0	10,5-?-?
Potazos N13	Plumes	13-0-0	12,83-?-?
BIO FUMUS	Compost déchets verts 10 mois	70% MS (0,1%N ; 0,06%P ; 0,15%K)	

III.3.1.3 Le calcul de la densité apparente

Une fois la pesée de la masse de sol (g) réalisée, la mesure de la densité apparente (g/cm³), veut que l'on rapporte cette valeur au volume du cylindre (192 cm³).

$$\text{Densité apparente} = \frac{\text{Masse sèche de terre fine}}{\text{volume de prélèvement}} \quad (7)$$

L'humidité massique a été calculé selon la formule de l'humidité massique à savoir :

$$\text{Humidité massique} = \frac{\text{masse fraîche} - \text{masse sèche}}{\text{masse fraîche}} \quad (8)$$

L'humidité massique est un pourcentage de la masse fraîche (g) par rapport à la masse sèche (g).

III.3.1.4 Le calcul de la quantité de P du sol par hectare

Pour estimer la quantité de P à l'hectare (g/ha), je me suis basé sur la valeur de P_{Olsen} (g/kg). Cet indicateur témoigne d'une quantité de P par unité massique de sol. C'est la mesure des densités apparentes (g/cm³), qui a permis de connaître la quantité de sol par unité de volume.

$$\text{Quantité de } \frac{P}{\text{ha}} = P_{\text{Olsen}} \times \text{densité apparente} \times 10^{-3} \times \text{volume de sol par hectare} \quad (9)$$

La mesure du P_{Olsen} (g/kg) s'est faite sur les couches de sol 0-15 cm, 15-30 cm et 30-45 cm, permettant d'apprécier la quantité par unité de volume sur ces trois « horizons ». La quantité de P par hectare (kg/ha) est donc sa quantité par volume (g/cm³) multiplié par le volume de sol par hectare (cm³/ha) et ce pour chaque couche de sol (1500 m³). Le stock total de P représente la quantité totale de P présent dans les trois horizons (0-15 cm, 15-30 cm et 30-45 cm), elle est exprimée en kg/ha.

III.3.1.5 Construction de la courbe critique du phosphore du soja

Pour chaque date de prélèvement, on construit la relation entre la teneur en P du soja et la biomasse mesurée afin d'identifier la teneur minimale en P qui permet d'obtenir la croissance maximum à l'aide du formalisme présenté par (Justes et al., 1997). Sur les 11 prélèvements, 6 ont été soumis à des analyses de teneurs. Ces résultats ont permis de construire la courbe de dilution, ou courbe critique, du P pour le soja qui est de la forme : P (%) = f(Biomasse). La relation obtenue permettra de calculer la valeur de P critique pour un niveau de biomasse de soja donné.

La teneur critique obtenue par l'équation de la courbe critique pour une biomasse donnée, permettra de calculer l'indice de nutrition phosphaté (INP) du soja à un stade donné de la culture. INP mesure l'écart entre la teneur mesurée (%) et la teneur critique (%) minimale nécessaire à une croissance normale de la plante à un stade donné « Les indices de nutrition - UNIFA ».

$$\text{INP} = 100 \times \frac{\text{teneur en P mesurée}}{\text{teneur en P critique}} \quad (10)$$

Si l'INP est < 100, cela signifie que la culture est en dessous de la teneur optimale, en dessous de 80 il est recommandé d'effectuer un apport en P car sa disponibilité est estimée insuffisante. Au-dessus de 100, l'INP indique une consommation de luxe, traduisant une offre en P du sol en excès selon les besoins de la plante (UNIFA).

III.3.2 Analyse de données

La construction des bases de données sols et plantes a été réalisée grâce à l'outil de Microsoft : Excel.

Le traitement statistique des données a été réalisé avec STATGRAPHICS centurion 19. Les tests utilisés sont l'ANOVA et la comparaison des moyennes par les étendues multiples, tous deux issus de la statistique de Fischer. Chaque jeu de données de l'essai d'Auzeville ont été analysés selon ce même procédé.

L'ANOVA : Analysis of variance à un facteur

Ce test permet de vérifier si la dose de P apportée avait un effet significatif sur les variables qui sont mesurées (biomasse, teneurs en CNPS, quantité de P et N exportées). L'ANOVA est un test statistique basé sur les lois de FISCHER, il permet de mettre en relation une variable quantitative avec une variable qualitative. Durant l'étude, l'ANOVA est utilisée pour déterminer s'il y'a un effet du traitement en P sur le dénombrement, la biomasse, les teneurs et les quantités de P prélevées par le couvert et le soja. L'hypothèse nulle de ce test considère qu'il n'existe pas de différences significatives entre les moyennes, alors que l'hypothèse alternative, considère que les groupes sont différents car il existe une différence significative entre les moyennes. Plus le résultat est élevé plus l'écart entre moyennes l'est aussi, donc plus les groupes sont différents.

$$F = \frac{\text{Variation entre moyennes d'échantillonnages}}{\text{Variations des moyennes à l'intérieur des échantillons}}$$

Ce test requiert des conditions préalables qui sont l'indépendance, la normalité et l'homoscédasticité.

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

-La normalité : La variable étudiée doit respecter une loi normale.

-Homoscédasticité : Les échantillons comparés doivent avoir la même variance. Autrement dit, le facteur étudié ne doit agir que sur la moyenne de la variable mesurée et non sa variance.

Les parcelles présentes à Auzeville ou à la Hourre sont indépendantes les unes des autres, autrement dit les échantillons le sont aussi.

Test des étendues multiples : Test LSD de Fischer

Ce test est dit, post-hoc, c'est-à-dire qu'il est effectué a posteriori de la préparation des données et qu'il ne présuppose pas d'hypothèses expérimentales. Le test des étendues de multiples réalisé s'appuie sur le test de la différence significative minimale issu de la loi de Fischer.

Dans le cas de cette étude le test LSD de Fischer a permis d'identifier quels traitements provoquent un effet sur les variables significativement différent d'un autre.

IV– Résultats

IV.1 Réponse du couvert Vesce-Moutarde au gradient de P

IV.1.1 Biomasse

Tableau 7 : Réponse d'un couvert de Vesce et Moutarde à un gradient de P selon 3 paramètres : biomasses moyennes, teneurs en N, P et S moyennes et quantités de N, P, S immobilisées. Les valeurs marquées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (P-value<0,05).

		P0	P1	P2	P4
Biomasse (t/Ha)	Vesce (n=8)	0,55 ± 0,13 a	1,33 ± 0,28 b	1,36 ± 0,61 b	1,89 ± 0,59 c
	Moutarde (n<8)	0,52 (NA)	0,52 (NA)	0,84 (NA)	0,63 (NA)
	Total (n=8)	0,74 ± 0,26 a	1,59 ± 0,24 b	1,88 ± 0,57 bc	2,29 ± 0,46 c
P (%)	Vesce (n=8)	0,16 ± 0,02 a	0,20 ± 0,03 ab	0,24 ± 0,04 b	0,23 ± 0,04 b
	Moutarde (n<8)	0,19 (NA)	0,23 (NA)	0,25 (NA)	0,32 (NA)
N (%)	Vesce (n=8)	2,56 ± 0,19 a	2,50 ± 0,14 a	2,40 ± 0,22 a	2,38 ± 0,18 a
	Moutarde (n<8)	1,98 (NA)	1,83 (NA)	1,80 (NA)	1,80 (NA)
S (%)	Vesce (n=8)	0,19 ± 0,03 b	0,14 ± 0,01 a	0,14 ± 0,01 a	0,13 ± 0,01 a
	Moutarde (n<8)	0,47 (NA)	0,49 (NA)	0,45 (NA)	0,51 (NA)
P (kg/ha)	Vesce (n=8)	0,90 ± 0,23 a	2,65 ± 0,44 b	3,04 ± 0,96 b	4,31 ± 1,05 c
	Moutarde (n<8)	0,99 (NA)	1,24 (NA)	2,02 (NA)	1,97 (NA)
	Total (n=8)	1,28 ± 0,52 a	3,27 ± 0,83 b	4,31 ± 1,23 b	5,54 ± 1,58 c
N (kg/ha)	Vesce (n=8)	13,91 ± 2,93 a	33,20 ± 6 b	32,16 ± 13,52 b	44,80 ± 12,90 c
	Moutarde (n<8)	10,40 (NA)	9,57 (NA)	15,40 (NA)	10,97 (NA)
	Total (n=8)	17,81 ± 4,82 a	37,99 ± 5,38 b	41,79 ± 13,65 b	51,65 ± 10,47 c
S (kg/ha)	Vesce (n=8)	1,02 ± 0,24 a	1,83 ± 0,32 b	1,84 ± 0,81 b	2,45 ± 0,71 c
	Moutarde (n<8)	2,45 (NA)	2,62 (NA)	3,66 (NA)	3,15 (NA)
	Total (n=8)	1,94 ± 1,15 a	3,14 ± 1,42 ab	4,12 ± 2,23 b	4,41 ± 1,80 b

L'analyse statistique n'a pas été possible pour la fraction moutarde parce que la biomasse était absente sur certaines parcelles de l'essai, le nombre d'effectifs est donc variable et rend impossible la comparaison des moyennes ; en comparaison on a pu mesurer la biomasse de la vesce sur l'ensemble des parcelles des 4 traitements, et ainsi avoir 8 répétitions pour chaque traitement.

Biomasse de la vesce

Pour la biomasse de la vesce, on observe qu'il existe une différence significative entre les différents traitements (P-value<0,05). Les différences significatives s'observent entre P0 et P1, P2 et P4. Seul P1 et P2 sont statistiquement similaires.

Ainsi la Vesce en P0 a produit en moyenne 0,55 t/ha. Tandis que la vesce en P1 et P2 a respectivement produit 1,33 et 1,36 t/ha. C'est en P4 que la biomasse est la plus élevée, avec 1,89t/ha (Tableau 7)

Biomasse de la moutarde

La biomasse de moutarde produite sur P0 et P1 est similaire, avec respectivement, 0,53 et 0,52 t/ha. Alors qu'en P4 il y a eu production de 0,63 t/ha. C'est en P2 que la biomasse est la plus élevée avec 0,84 t/ha.

Biomasse totale

Il y'a bien une différence significative entre traitement. La réponse de la biomasse d'un couvert de Vesce et de Moutarde se différencie significativement entre une parcelle avec absence de traitement (P0) et une parcelle en P1, P2 et P4.

IV.1.2 Teneurs minérales (NPS) et quantités restituées

Les teneurs en C, bien qu'analysées, ne feront pas l'objet de description dans les résultats, car elles sont constantes malgré les traitements.

Teneurs de la Vesce

Les résultats montrent qu'il n'y'a pas de différence significative entre les traitements pour les teneurs en N mais montrent que cette différence existe pour le P et le S.

Concernant le P, il existe une différence significative entre P0 et P4, P2. Mais pas entre P0 et P1. Alors que pour le S, c'est entre P0 et P1, P2, P4 que la différence est significative. En effet la teneur moyenne en S de 0,19% en P0, de 0,14%, en P1 de 0,14% en P2 et de 0,13% en P4. Pour le P les teneurs moyennes sont de 1,66% pour P0, 2% pour P1, 2,38 % pour P2 et 2,35 % pour P4. Les teneurs en N sont relativement stables, ainsi la vesce en P0, P1, P2 et P4 a des teneurs et respectivement de 2,56, 2,50, 2,40 et 2,38% de N (Tableau 7).

Teneurs de la Moutarde

Le P présente des teneurs différentes selon les traitements. En P0, P1, P2 et P4 se sont respectivement des teneurs de 1,9%, 2,38%, 2,51% et 3,17% qui sont mesurées pour la moutarde. L'azote est comme pour la Vesce, assez stable. En effet pour P0, P1, P2 et P4 les teneurs sont respectivement de 1,98, 1,83, 1,8 et 1,8 % pour l'azote. En raison d'un jeu de données aux effectifs variables, il n'a pas été possible d'identifier si les effets présentés sont significatifs et liés/corrélés aux traitements (comme pour la biomasse).

Quantités de nutriments dans la vesce

Le phosphore

Les traitements ont un impact sur les quantités de P prélevé par la Vesce. En effet il existe une différence significative, entre le traitement P0 (groupe a), et les traitements P1, P2 (groupe b) et P4 (groupe c). (Tableau 7).

Pour le traitement P0, le prélèvement de 0,90 kg/ha, tandis qu'en P1, il est de 2,7 kg/ha de phosphore. La quantité de P prélevé la plus importante est sur le traitement P4 avec 4,31 kg/ha, alors qu'en P2 la quantité de P prélevée est de 3 kg/ha (Tableau 7).

L'Azote

On observe une différence significative entre les traitements. L'étude montre plus particulièrement une différence sur la capacité de la Vesce à accéder à de l'azote sur les traitements P0 et P4, avec un prélèvement en P4 plus élevé qu'en P0. A savoir que le traitement P4 a induit un prélèvement de N de 45kg/ha, tandis qu'en P0 la quantité est plus faible avec 14 kg/ha de N prélevé. En revanche, il n'existe pas, de différence statistiquement notable entre P1 et P2. Pour les traitements P1, P2 on a mesuré un prélèvement moyen d'azote, respectivement, 33 et 32 kg/ha.

Le soufre

Il existe une différence significative entre les quantités de S prélevés par la Vesce sur les différents traitements ($P < 0,05$). En effet, il est à noter que le traitement P0 est significativement différent des traitements P1, P2 et P4. Comme pour l'azote, les traitements P1 et P2 induisent un prélèvement de soufre statistiquement similaire.

Les deux extrêmes sont P0 et P4 avec respectivement, 1 et 2,45 kg/ha de soufre prélevé. Les traitements P1 et P2, statistiquement similaires, permettent respectivement de prélever 1,83 et 1,84 kg/ha de Soufre.

Quantités de nutriments dans la Moutarde

Le phosphore

La quantité moyenne de P prélevée par la moutarde est de 0,99 kg/ha, 1,24 kg/ha, 2 kg/ha et 1,97 kg/ha respectivement pour les traitements P0, P1, P2 et P4 (Tableau 7).

L'Azote

La quantité moyenne de N prélevée par la moutarde est de 10,4, 9,57, 15,4 et 11 kg/ha respectivement pour les traitements P0, P1, P2 et P4.

Le soufre

La quantité moyenne de S prélevée par la moutarde est de 2,45, 2,62, 3,67 et 3,2 kg/ha, respectivement pour les traitements P0, P1, P2 et P4.

Quantités totales aériennes de nutriments dans le couvert (NPS)

Le phosphore

Il y a une différence significative entre les variables (traitements). Le test des étendues multiples donne trois groupes, a, b et c (Tableau 7), différenciant P0 de P1, P2 et P4. Il n'existe pas de différences entre P1 et P2.

La quantité de P prélevée par le couvert de Vesce et de Moutarde diffère selon les traitements phosphatés appliqués à la parcelle. En effet, sur 8 échantillons, la moyenne obtenue pour le traitement P0 est de 1,28 kg/ha de P prélevé. Sur le traitement P1 la moyenne est de 3,27 kg/ha. Sur le traitement P2 les quantités d'éléments prélevées sont de 4,31 kg/ha de phosphore. Alors que le traitement P4 a permis le prélèvement de 5,5 kg/ha.

L'azote

Avec une P-value inférieure à 0,05, l'ANOVA montre qu'il y a bien une différence significative entre les différents traitements. Le test LSD de Fischer apporte des précisions, en effet la quantité d'N prélevée en P0 est significativement plus faible que celles de P1, P2 et P4.

En P0 on a mesuré un prélèvement moyen de 17,8 kg/ha d'azote. En P1 induit chez le couvert une immobilisation de 37,99 kg/ha d'azote. Le couvert en traitement P2 a absorbé 41,79 kg/ha d'azote alors que sur le traitement P4 le couvert a prélevé 51.65 kg/ha.

Le soufre

La P-value de l'ANOVA est inférieure à 0,05, indiquant donc l'existence d'une différence statistiquement significative sur la quantité de S prélevé selon les traitements. La statistique de Fischer a aussi permis de savoir que P0 se différencie de P2 et P4 mais pas de P1. Il n'y a pas non plus de différences entre P1 et P2. Pour un traitement P0 le couvert a prélevé 1,94 kg/ha de soufre. Le traitement P1, lui, induit un prélèvement de 3,14 kg/ha de soufre. Le traitement P2 a induit un prélèvement de 4,12 kg/ha de soufre et celui fertilisé par le traitement P4 en a prélevé 4,41 kg/ha.

IV.2 Réponse du soja au gradient de P

IV.2.1 Dynamique d'accumulation de biomasse : Biomasse = f(temps)

Les moyennes de biomasses produites par le soja et par traitements montrent des tendances générales identiques pour les différents traitements. Sauf à la 10^{ème} date de prélèvement (soit le 05/08/2021) pour P0 et P4 où une baisse du gain de biomasse s'observe. L'évolution générale entre le stade végétatif et les stades R5, montre un début de tendance exponentielle, c'est-à-dire que plus le temps avance, plus la croissance, le gain de biomasse, est rapide.

Les analyses statistiques montrent pour les prélèvements 1, 4, 5, 6, 8 et 10, qu'il n'existe pas de différence significative. Cependant il en existe pour le reste des prélèvements. Ce qui semble se confirmer graphiquement. Il est possible de constater de légères différences d'évolution, comme pour le prélèvement n°7 entre P0 et P4 par exemple (Figure 11).

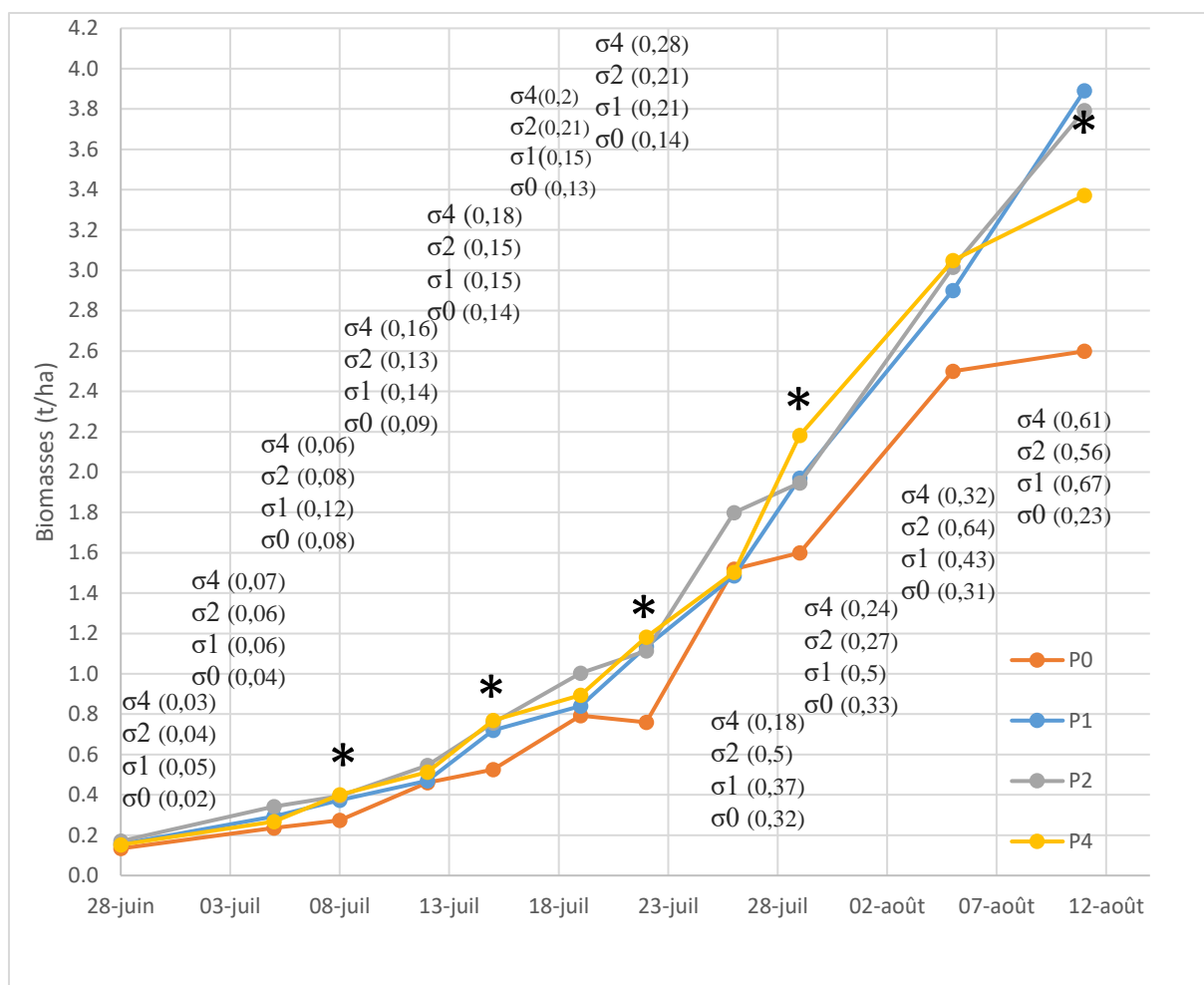


Figure 11 : Dynamique d'accumulation de la biomasse par le Soja entre le 28/06/2021 et le 11/08/2021 selon le type de traitements. Les astérisques correspondent aux dates où ils existent un effet significatif des traitements. Les écarts-types sont donnés à chaque date pour les 4 traitements. Ils sont notés σ sur la figure, σ_0 pour l'écart-type de P0, σ_1 pour l'écart-type de P1, σ_2 pour l'écart-type de P2 et σ_4 pour l'écart-type de P4.

De façon plus détaillée, durant toute l'expérience, P0 était le traitement sur lequel la biomasse était la plus faible. P2 et P1 restent proches dans leurs évolutions respectives tout au long de l'expérimentation. Avec une tendance en P1, à produire légèrement plus de biomasse. Cependant il est observable pour les dates 2, 4, 6, 8 et 9 que la production de biomasse est plus élevée chez P4. Cependant c'est sur le traitement P1 que la vitesse de croissance de la biomasse semble le plus régulière.

A la fin de l'expérimentation, les traitements P1, P2 et P4 ont une biomasse proche, avec respectivement, 3,89, 3,79 et 3,37 t/ha. Alors qu'en P0, la biomasse atteint 2,6 t/ha (Figure 11).

IV.2.2 Dilution du P au cours de la biomasse : Concentration en P=f(temps)

Il existe, pour les 5 dates, une différence significative sur les teneurs en P du soja induit par les différents traitements. L'existence de différences significatives des teneurs du soja pour un même traitement sur l'intervalle de temps de l'expérience, a aussi été testé. Il en ressort qu'il existe une différence significative sur les teneurs entre le début de l'expérience et la fin, pour les traitements P1, P2 et P4. Statistiquement il n'y a pas de différence sur les teneurs du soja pour P0 entre le début et la fin de l'expérience.

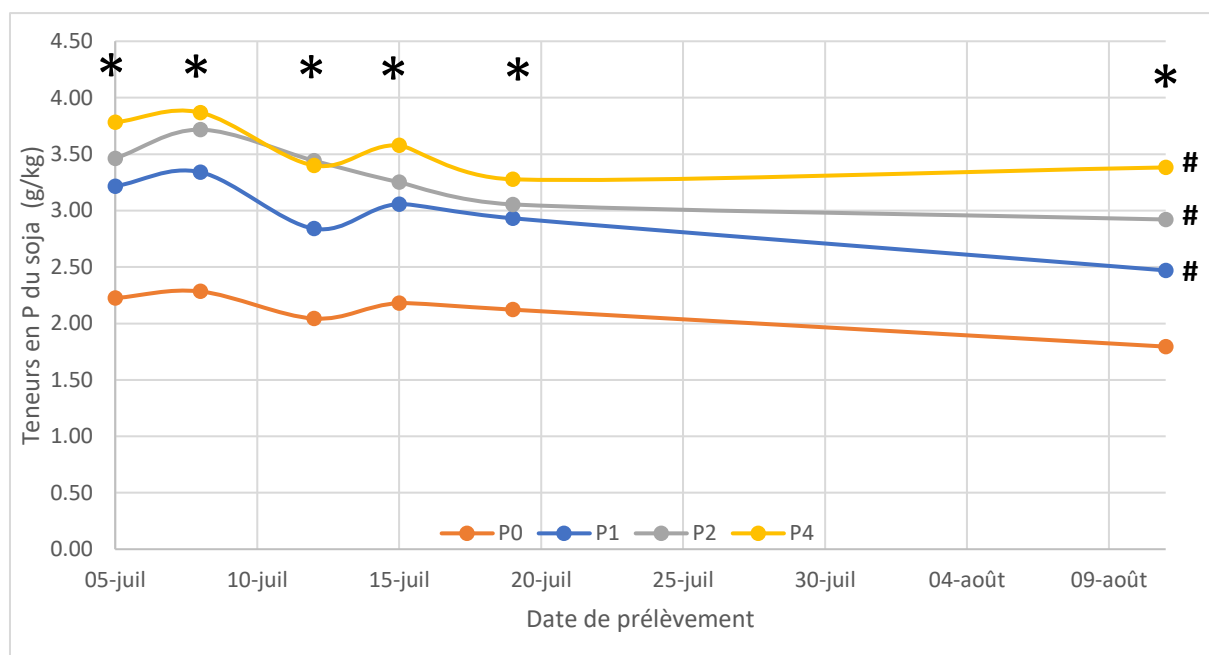


Figure 12 : Dynamique d'évolution des teneurs en P du Soja entre le 05/07/2021 (2^{ème} prélèvement) et le 11/08/2021 (11^{ème} prélèvement) selon le type de traitements phosphatés. Les # indiquent un traitement pour lequel les teneurs sont significativement différentes au cours de l'expérience (ANOVA). Tandis que les astérisques témoignent d'une différence entre traitement pour une date donnée.

Les évolutions des teneurs en P du soja de chaque traitement prennent une tendance commune. En effet les teneurs au 05/07/2021 sont plus faibles que celle mesurées le 08/07/2021, pour P0, P1 et P4. C'est d'ailleurs à cette date qu'elles atteignent un maximum. Il y'a donc une augmentation des teneurs jusqu'au prélèvement 3, puis une baisse de ces dernières, atteignant un minima au 12/07/2021. Les teneurs vont légèrement augmenter entre le 12/07/2021 et le 15/07/2021, sauf en P2. Pour ensuite diminuer entre le 15/07/2021 et le 19/07/2021. Entre le 2^{ème} et le 6^{ème} prélèvement, il y'a donc eu une baisse générale des teneurs, qui a débuté dès le 08/07/2021 (3^{ème} prélèvement). De ce fait les teneurs mesurées au début sont plus élevées que celles mesurées au 19/07/2021, sauf P0, pour qui le minima se trouve au 4^{ème} prélèvement (12/07/2021).

Aussi, sur la totalité de la période, une distinction nette s'observe entre les différents traitements. En effet P4, reste le traitement où les plus hautes teneurs s'observent. Suivi de près par les teneurs obtenues sur P2. Cependant les courbes de l'évolution des teneurs de P4 et P2 sont légèrement différentes comme dit plus haut. La courbe obtenue pour P1, suit la même évolution que celle de P4 et P0. Au 05/07/2021, sur P4, P2 et P1 les teneurs sont respectivement

de 3,78 %, 3,46% et 3,22%. Elles n'augmentent que très peu jusqu'au 08/07/2021 en atteignant, 3,87%, 3,46% et 3,34% (Figure 12). Jusqu'au 19/07/2021, les teneurs en P du soja en P2 diminuent pour atteindre 3,05%. Alors qu'en P4 et P1 les teneurs augmentent entre le 12/07/2021 et le 15/07/2021 pour atteindre respectivement 3,58% et 3,06%. Elles atteindront finalement, le 19/07/2021, 3,28% et 2,93%. L'évolution en P0 suit aussi celles observées en P4 et P1, mais pour des valeurs en teneurs nettement plus faibles.

Il est possible d'observer un groupe se dissociant graphiquement de P0 (Figure 12), celui de P1, P2 et P4. Autrement dit la parcelle non fertilisée et le groupe des parcelles fertilisées. L'écart entre P0 et P1, P2, P4 est plus élevé que l'écart mesuré entre P1, P2 et P4 confondus.

IV.2.3 Dynamique du prélèvement de P : $P \text{ prélevé} = f(\text{temps})$

Pour l'ensemble des dates, il existe une différence significative ($P\text{-value} < 0.05$) entre traitements par rapport à la capacité du Soja à prélever du P. De façon générale trois tendances s'observent dans la dynamique de prélèvement du P. Celle empruntée par les teneurs du soja des traitements P1 et P4, où il y'a des baisses/augmentations dans la vitesse de prélèvement du P par le soja. Donnant ainsi aux courbes une allure en « dents de scies » (Figure 13). Chez les deux courbes, les mêmes variations s'observent aux mêmes dates. Celle suivi par le soja en P2, dont la vitesse de prélèvement du P ne cesse d'augmenter jusque le 19/07/2021, s'approchant de l'allure d'une fonction linéaire croissante. En effet, entre le 5 juillet et le 19 juillet, il y'a eu un cumul de 316 °/j et un gain en P de 1860 g/ha C'est donc un gain en P de 6 g/° J/ha. Enfin, celle suivi par le soja en P0, qui dans son évolution (augmentation linéaire) semble similaire à P2, à la différence qu'entre le 05/07/2021 et le 19/07/2021 le gain en P/ °J/ha a été de 3,65. Il est à noter que l'évolution de la vitesse de prélèvement en P entre le 08/06/2021 et le 12/06/2021 stagne, pour un gain en P de 0,56 g/° J/ha pour P4 et 0,19 g/°J/ha pour P1 (Figure 13).

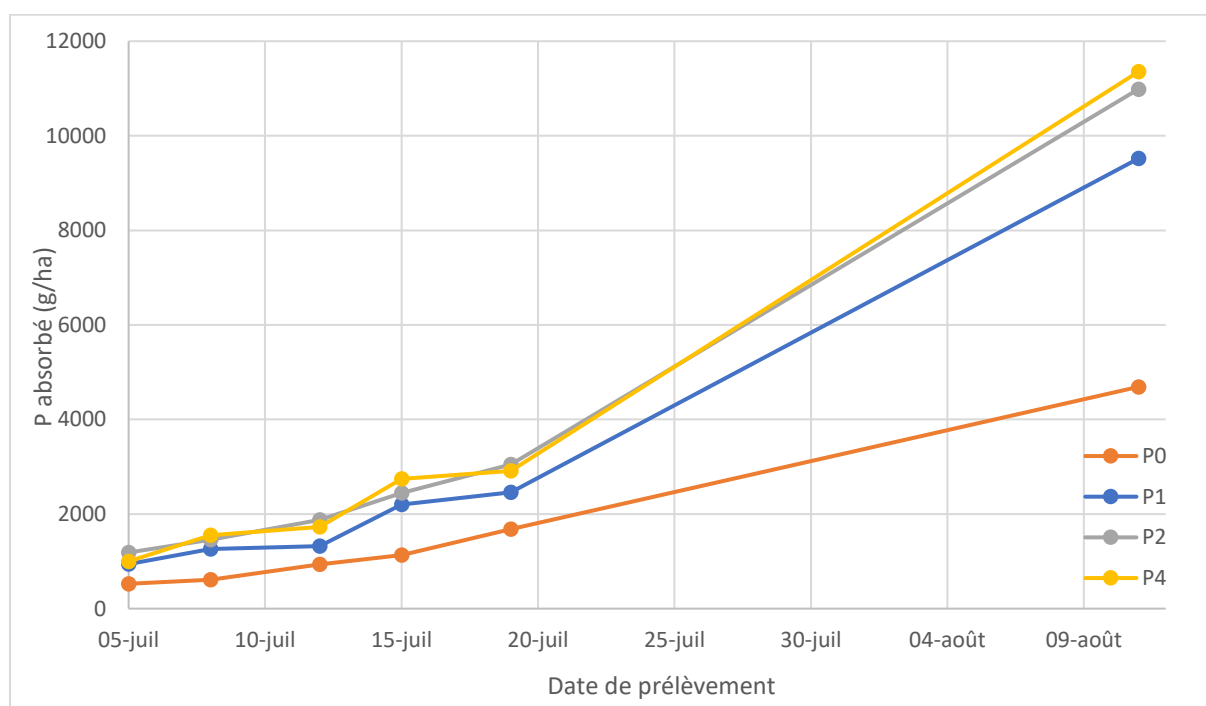


Figure 13 : Dynamique des quantités de P absorbées par le Soja entre le 05/07/2021 et le 19/07/2021, selon le type de fertilisation phosphatée. Les stades phénologiques étaient par ordre chronologiques de dates de prélèvements, V2, V3, V4, V5 et V7.

Toujours pour P1 et P4, les quantités en P absorbées augmentent et atteignent une vitesse maximale entre le 12/06/2021 et le 15/06/2021 pour un gain de 3,19 g/° J pour P4 et 2,78 g/°J pour P1. (Figure 13).

Selon, maintenant, les quantités de P prélevé, en P1, P2 et P4 se distinguent nettement de P0. En effet le 05/07/2021, soit 2 mois après son semis, le soja en P0 avait prélevé 526 g/ha. Alors qu'en P4 et P2, le soja avait déjà respectivement prélevé 1000 g/ha et 1186 g/ha de P. Il est à noter que les quantités de P prélevées citées précédemment seront atteintes pour un soja en P0, seulement aux alentours du 15/07/2021, soit 10 jours de plus. Aussi, au 19/07/2021, le soja cultivé en P0 à induit un prélèvement de 1681 g/ha de P. En comparaison, la quantité de P prélevé par un soja cultivé en P4 atteint environ 1700 g/ha aux alentours du 12/07/2021. Le traitement P0 se différencie donc bien des traitements P1, P2 et P4. Enfin, le gradient de fertilisation ne suit pas forcément le gradient de quantités prélevées. En effet, au 05/07/2021, 12/07/2021 et au 19/07/2021, les quantités prélevées par un soja en P4 étaient plus faibles que celles prélevées en P2 (Figure 13), comme relaté par Jouany et Valé (2017). Cependant, entre le 05/07/2021 et 19/07/2021, c'est en P0 que le pourcentage d'augmentation des quantités prélevées est le plus élevé.

IV.2.4 Construction de la courbe de dilution du P

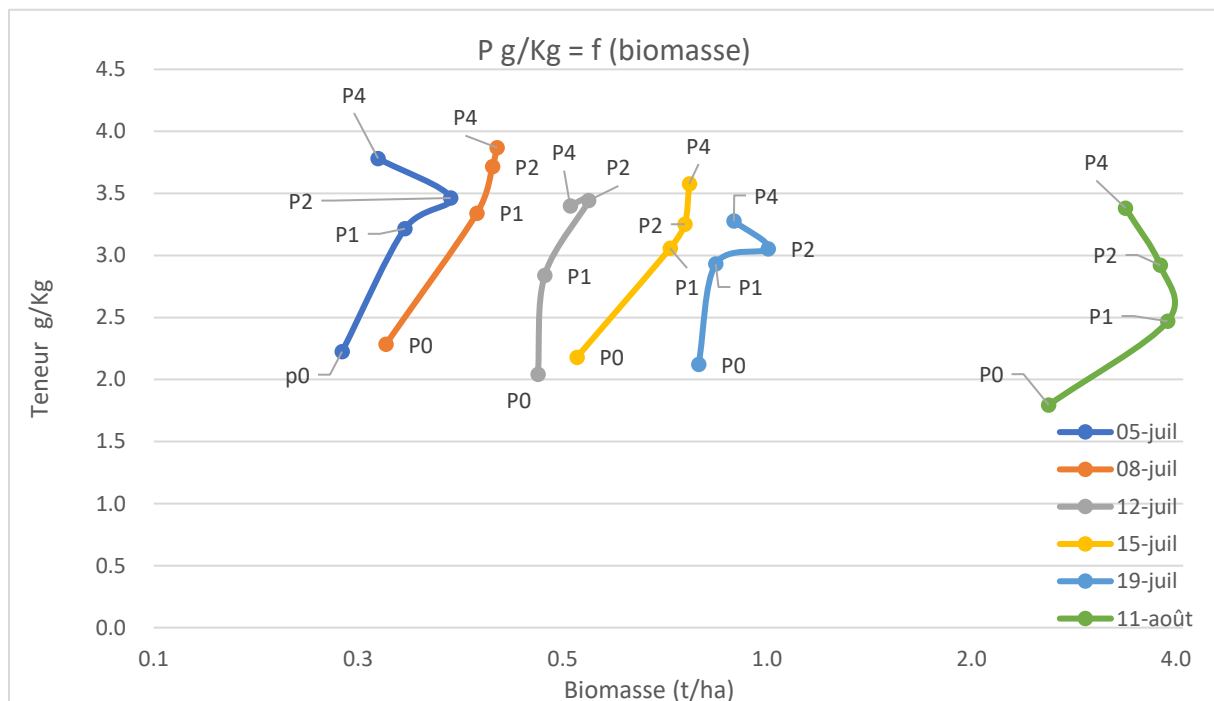


Figure 14 : Relation entre les teneurs en P du soja (essai P) et les biomasses à 6 dates de prélèvements entre le 05/07/2021 et le 11/08/2021. Les mesures de teneurs ont été effectuée sur les prélèvements 2, 3, 4, 5, 6 et 11 qui ont respectivement eu lieu le : 05/07/2021, 08/07/2021, 12/07/2021, 15/07/2021, 19/07/2021 et 11/08/2021. Par soucis de représentation graphique l'axe des abscisses est construit selon une échelle logarithmique.

Pour chaque date de mesure on met en relation, les teneurs en P du soja avec la quantité de biomasse produite pour chaque traitement.

D'une façon très générale, à chaque date, il est possible d'observer un point d'inflexion en P2 (sauf en P1 au 11^{ème} prélèvement), correspondant à la teneur minimum qui permet la croissance maximum, au-delà l'augmentation des apports en P n'entraîne pas une augmentation de la biomasse, mais seulement une augmentation de la teneur en P.

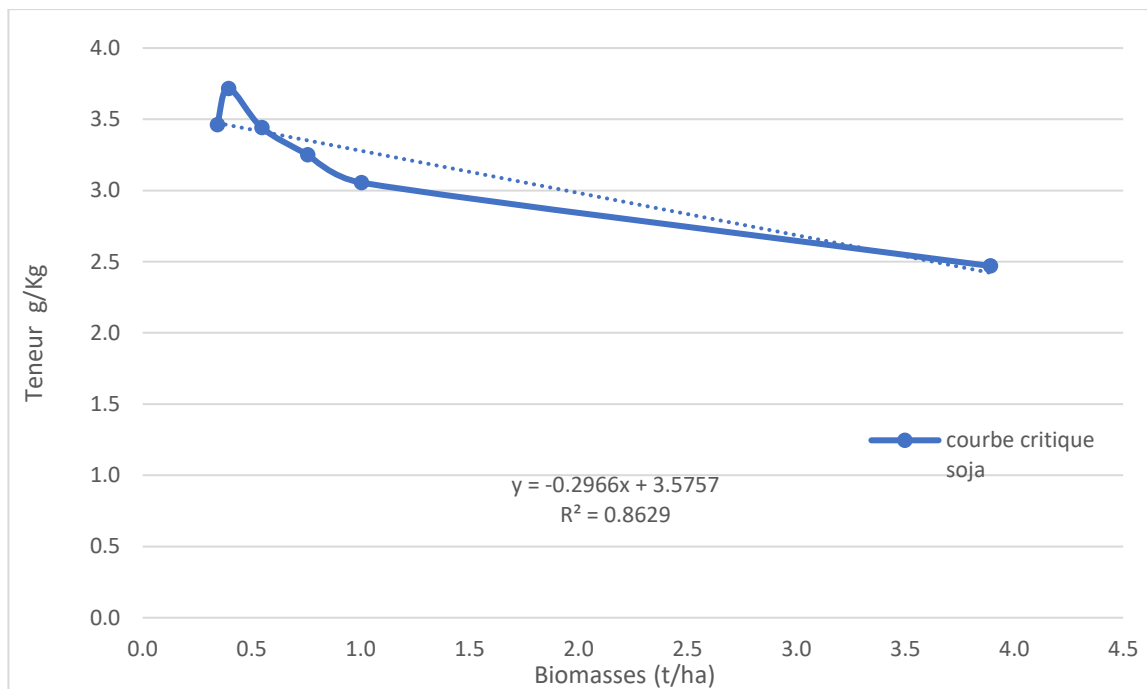


Figure 15 : Courbe critique du P sur Soja cultivé à Auzeville selon un gradient de P en 2021.

Au cours du temps cette teneur critique diminue pendant que la biomasse augmente. Les mesures montrent donc bien un phénomène de dilution, qui pour le soja à Auzeville, suit une évolution donnée par l'équation suivante :

$$Y = -0,2966 \times (x) + 3,5757$$

La teneur critique pour une biomasse donnée, autrement dit pour un stade phénologique donné, est donnée par l'équation en remplaçant x par la biomasse mesurée au champ. C'est cette teneur critique fonction de la biomasse qui sera utilisée pour calculer l'INP du soja.

IV. 3 Dynamique des bilans de P (F-E) sur le dispositif système de La Hourre

IV.3.1 Bilans cumulés de P (F-E) de 2000 à 2017

Tableau 8 : Dynamique du P sur les zones de références du domaine de la Hourre. Les trois premières colonnes du tableau témoignent des termes du bilan F-E de 1999 à 2017. Elles rapportent les valeurs des apports cumulés, des exports cumulés et des bilans cumulés. Tous exprimés en kg/ha. Les quatre dernières colonnes, elles, présentent les stocks de P à l'hectare de 2002 à 2017. Aussi exprimés en kg/ha. F et E correspondent respectivement aux apports et aux exports, exprimés en kg/ha. Les stocks de P, (kg/ha), ont été calculés via P_Olsen et la densité apparente (équation 9). Les mesures concernant les bilans (F et E) prennent en compte les apports et les exports de 1999 à 2002 et sont calculés sur les 45 premiers cm de sol. Tandis que les valeurs relatives aux stocks (P_Olsen) rapportent les mesures effectuées de 2002 à 2017.

Zones de références	F : apports	E : exports	F-E	Stock P 2002	Stock P 2007	Stock P 2012	Stock P 2017
ZR 1	164,3	182,5	-18,2	200,2	153	154,9	124,8
ZR 2	90,8	192,2	-101,4	161,1	134,2	107,8	99,9
ZR 3	50,7	145,2	-94,5	191,4	151,9	123,9	126,5
ZR 4	90,8	110,2	-19,4	109,4	76,1	78,3	78,8
ZR 5	88,6	119,7	-31,2	141,7	83,4	88,2	85,5
ZR 6	135,3	182,9	-47,6	225,7	184,6	143,0	134,5
ZR 7	88,6	169,7	-81,1	166,5	139,9	108,9	100,6
ZR 8	122,5	143,7	-21,2	213	205,2	168,8	152,7
ZR 9	33,3	128,2	-94,9	111,5	61,8	69,3	60,1
ZR 10	52,5	96,7	-44,2	162,6	176,3	89,1	111,4
ZR 11	52,5	153,5	-101,0	210,6	185,9	145	162,1
ZR 12	52,5	162,3	-109,8	146,4	97,8	104,7	106,7

Apport de P (F)

Les apports en P oscillent entre 1,8 et 9,1 kg/ha/an selon les parcelles (Tableau 8). Les parcelles qui reçoivent le moins de P sont les parcelles ZR 3, 9, 10, 11 et 12. Sur la ZR 3 ce sont 2,8 kg /ha/an de P qui sont appliqués en cumulés depuis 1999. Pour les ZR 10, 11 et 12, il y a 2,9 kg/ha/an de P éendus. Les parcelles recevant le plus P sont la ZR 1, ZR 6 et 8, avec respectivement 9,1, 7,5 et 6,8 kg de P apportés /ha/an. Les ZR 1 et 8 font partie des parcelles LH7 et LH8, placées en fond de vallée et possèdent les réserves utiles les plus élevées du domaine.

Tandis que le reste des parcelles sont situées en côteaux, les rotations y sont longues et les apports moindres. Par exemple la ZR 9 est la parcelle recevant le moins de P, avec 1,8 kg/ha/an (Figure 16).

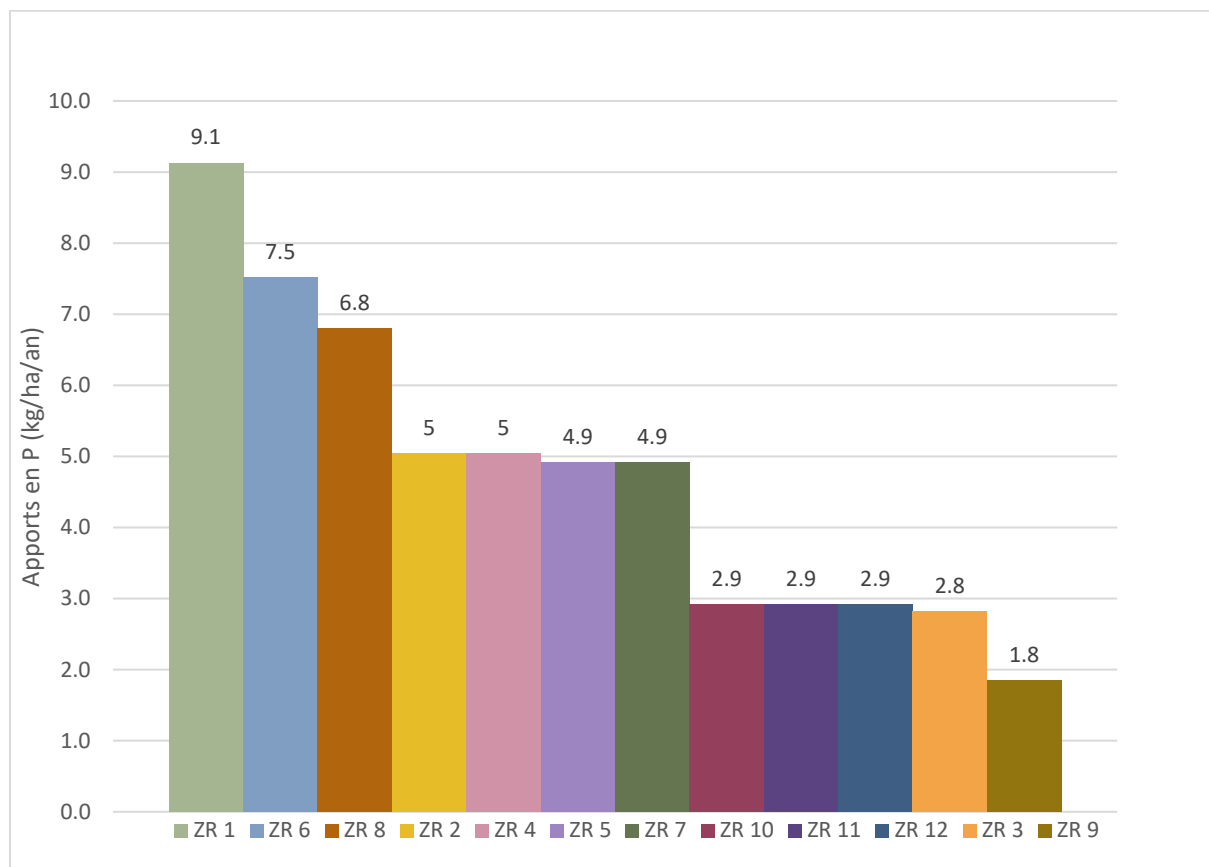


Figure 16 : Apports moyens annuels décroissants sur 18 années de culture par zone de référence.

Exportations de P (E)

Les exportations annuelles moyennes de P peuvent varier de 5,4 kg/ha/an à 10,7 kg /ha/an (Tableau 8). La ZR 1 et 2 et 6 sont les parcelles dont les exports sont le plus élevés, avec respectivement 10,7 et 10,1 et 10,6 kg de P/ha/an. Contrairement à la ZR 1, la ZR 2 ne fait pas partie des zones de référence dont l'apport est le plus élevé. La ZR 8, bien que faisant partie des parcelles où l'on observe le plus d'exports de P, diffère de la ZR1. En effet les exports y sont moins importants et atteignent 8 kg de P/ha/an.

La ZR 10, quant à elle, est la parcelle où les quantités exportées sont les plus faibles. La ZR 9 ayant été une des parcelles où il y'avait le moins d'apports, figurent maintenant parmi les parcelles où l'on trouve une grande quantité de P exporté.

De manière générale les rotations longues pouvant être qualifiées d'autonome ont des quantités de P exportés faisant parties des plus élevées (Figure 6), comme la ZR 1. Cependant le même effet n'est pas autant évident pour la ZR 8. Enfin les rotations courtes ont généralement des quantités d'exports moindres, sauf dans certains cas où l'on peut s'attendre à des bilan F-E très bas.

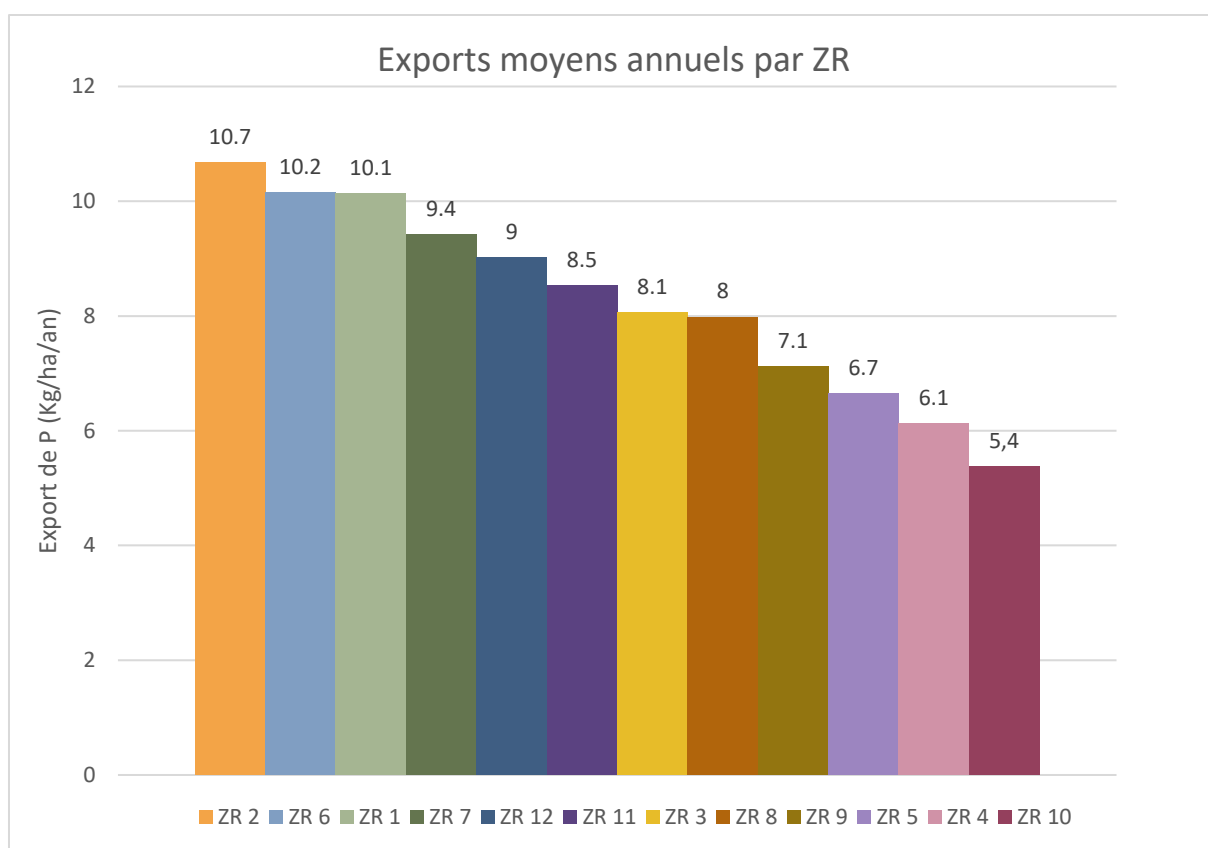


Figure 17 : Exports moyens annuels décroissants sur 18 ans de culture par zones de références.

Bilan F-E de P

Sur 18 ans le bilan F-E moyen cumulé de l'ensemble du domaine est de -64 kg/ha de P par an. Les bilans F-E vont de -110 kg/ha à -19,4 kg/ha de phosphore (Tableau 8).

Dans le détail, on voit que certaines parcelles sont très déficitaires comme la ZR 2, 3, 9, 11 et 12, avec respectivement un bilan F-E de -6,10, -5,43, -5,61, -5,27 et 5,25 kg/ha/an (Figure 18). Alors que d'autres parcelles ont un bilan F-E moins déficitaire comme la ZR 1, 4, 5 et 8. Avec -1 kg de P/ha/an pour la ZR 1, -1,08 kg de P/ha pour la ZR 4, -1,10 kg de P/ha/an pour la ZR 5 et -1,73 kg/ha/an pour la ZR 8.

Les deux ZR en rotation courtes (1 et 8) sont les zones cultivées où l'on observe les bilans les moins déficitaires. En effet l'objectif de la fertilisation ici est de compenser les exportations par le grain pour maintenir le bilan au plus proche du 0.

Cependant la ZR 4 et 5 font aussi parties des zones avec le bilan le moins déficitaire (Figure 18). Ces deux ZR sont aussi celles où la différence entre apports et exports est la plus faible. Il y a dans la rotation des ZR 4 et 5 peu de couverts. Les apports viennent compenser les exports.

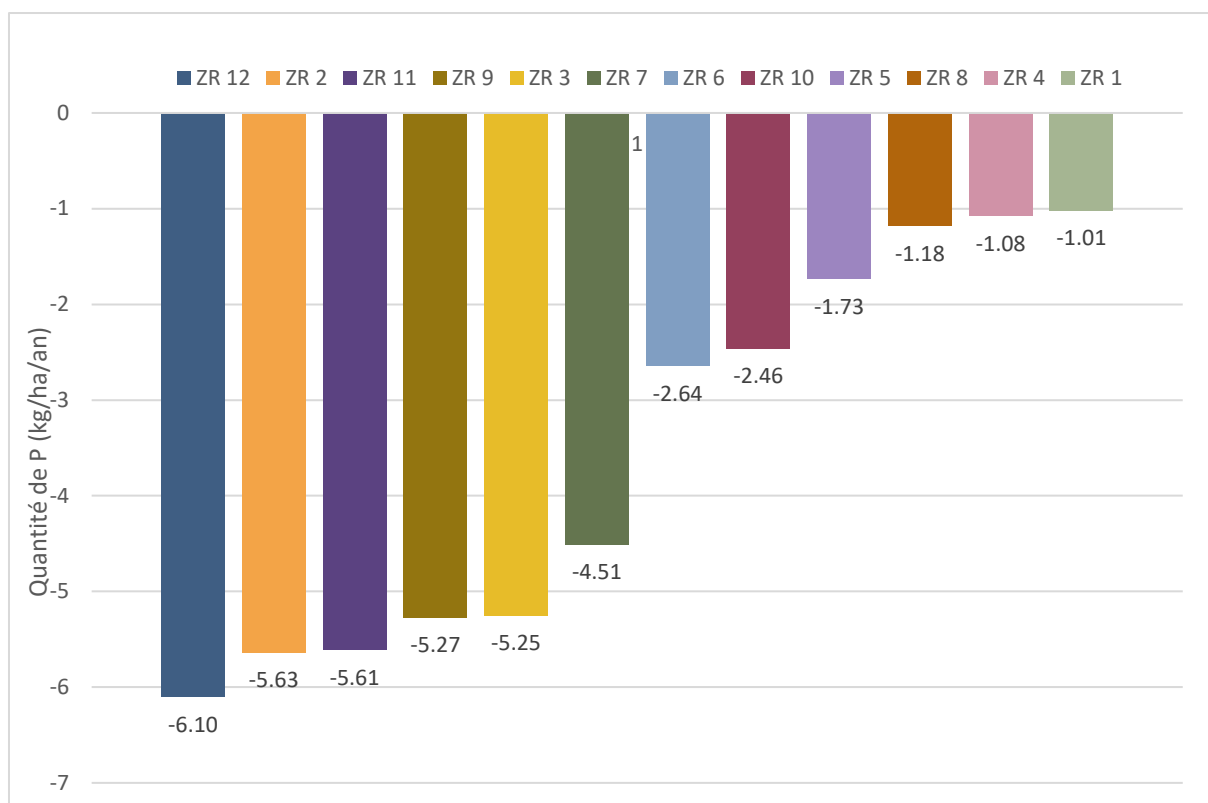


Figure 18 : Moyennes annuelles des bilans F-E par zone de référence.

IV.3.2 Dynamique du P Olsen en relation avec les bilans de P à la parcelle

Dynamique des bilans

L'évolution globale du stock de P_Olsen sur le domaine va vers une diminution (Figure 19). L'ensemble des zones de références à l'issue de 2017, ont un bilan négatif. Nonobstant, toutes les ZR n'ont pas dans le détail, la même dynamique. Jusqu'en 2004 les dynamiques de diminutions du bilan F-E restent similaires pour l'ensemble du domaine. C'est à partir de 2005 que l'on commence à voir apparaître une différence de comportement du bilan de P. En effet il est possible de repérer trois grands groupes, discriminés selon le niveau de leurs bilan F-E en 2017.

Les ZR 1, 4 et 8, à l'issue de 2017, ont un stock faiblement négatif par rapports aux autres ZR de la Hourre, avoisinant les -20 kg/ha de P. Les ZR 5, 6 et 10 ont aussi un stock faiblement négatif, cependant légèrement plus élevé que les ZR précédentes. Car, en effet en 2017, il y'a diminution d'environ -40 kg/ha de P. Les ZR 2, 3, 7, 9, 11 et 12 ont, elles cependant une dynamique bien différente que les deux premiers groupes. En premier lieu, leurs bilans en 2017, sont largement plus négatifs, avec environ une diminution de 80 à 100 kg/ha de P (Figure 19). En deuxième lieu, le troisième groupe ne voit que rarement, son bilan augmenter, contrairement aux deux premiers groupes, qui dès 2005, bénéficient d'apports capables de faire remonter le bilan F-E.

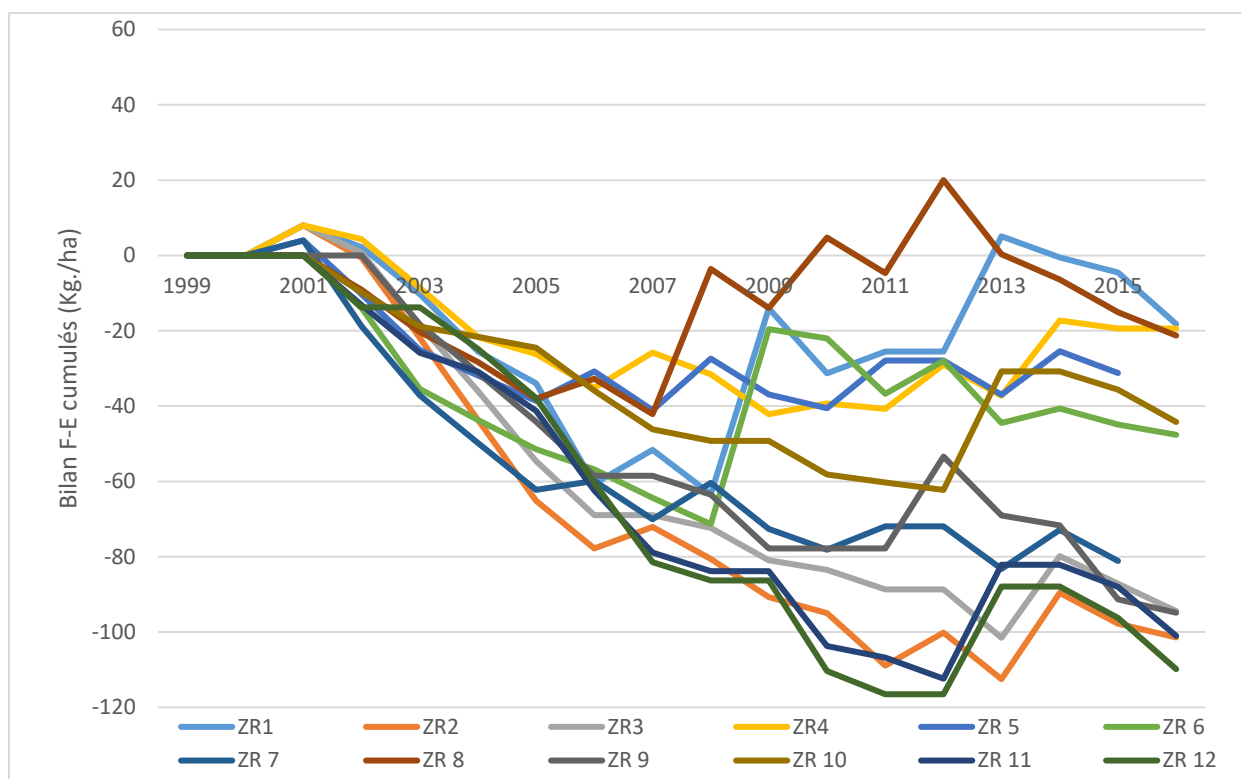


Figure 19 : Dynamique des bilans cumulés F-E en P pour chaque ZR de 1999 à 2017.

Il y a donc deux allures repérables, la première où le bilan F-E baisse drastiquement et la deuxième où le bilan baisse lentement. Au-delà de cette classification il y a un autre critère de différenciation : le constat que certaines zones de référence peuvent avoir temporairement un bilan positif. Deux ZR sont dans ce cas, la ZR 1 et 8. Tandis que d'autres ZR ont un bilan qui ne cesse de diminuer. Comme la ZR2 avec un bilan des plus négatifs. Enfin certaines ZR dites « autonomes » voient temporairement leurs bilans augmenter, ou se rapprocher de la neutralité, comme pour la ZR 4 et 5.

Dynamique du stock de P (kg/ha) dans le temps

A l'issue de l'année 2017, il est possible de distinguer trois groupes, les ZR avec un stock important (>150 kg/ha), moyen (entre 100 et 150 kg/ha) et faible (<100 kg/ha). Ainsi les ZR 8 et 11 peuvent être classées dans le groupe aux stocks de P important avec respectivement 153 et 162 kg/ha de P (Figure 20). Vient ensuite les ZR 1, 3, 6, 7, 10 et 12 pouvant être rangées dans le groupe aux stocks de P moyens. En effet sur ces 6 ZR, le stock moyen de P est de 117 kg/ha, avec un maximum à 134,5 kg/ha et un minimum à 100,6 kg/ha (Figure 20). Les ZR 2, 4, 5, et 9 ont un stock modéré, avec une moyenne de 81 kg/ha de P, avec un minimum à 60,1 kg/ha et un maximum à 99,9 kg/ha (Figure 20).

De façon générale les stocks de P des parcelles en 2002 sont plus élevés que ceux observés en 2017. Il y a donc eu une diminution des quantités de P du sol entre 2002 et 2017, sauf pour la ZR 10, 11, et 12 où les stocks de P en 2017 sont plus élevés que ceux en 2002. La ZR 1, de type parcelle productive, voit son stock de P baisser de 2002 à 2007.

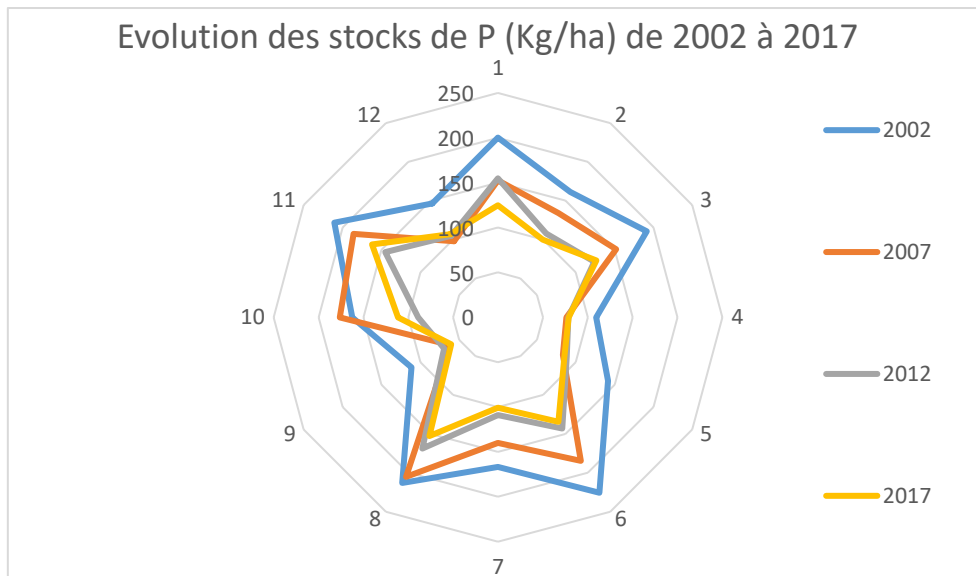


Figure 20 : Schéma de l'évolution des stocks de P (kg/ha) pour chaque ZR, de 2002 à 2017.

Puis entre 2007 et 2012 la diminution du stock stagne aux alentours de 150 kg/ha de P. Enfin entre 2012 et 2017 le stock diminue passant de 155 à 125 kg de P /ha (Figure 20). La ZR 8, aussi classée comme parcelle productive, semble suivre le même schéma, à l'exception que la stagnation est moins visible et qu'elle se déroule entre 2012 et 2017.

La plus grande diminution s'observe sur la ZR 9. Cependant la ZR 9, a précédemment été identifiée comme la parcelle recevant le moins d'apports et ayant un niveau d'exports moyen. Les parcelles ayant subi le moins de pertes sont les parcelles 8, 11 et 12. On peut même constater que la parcelle 11, voit son stock de 2017 plus élevé que celui de 2012.

Relation indicateur bilan F-E et stocks de P avec l'indicateur P_Olsen

Sur les deux ZR plus les bilans F-E deviennent négatifs, plus les stocks en P du sol s'appauvrissent. Cependant, les stocks initiaux ne sont pas les mêmes. De plus la vitesse de diminution des stocks et des bilans n'est pas non plus la même entre deux dates.

Entre 2002 et 2007, des bilans négatifs ont entraînés une baisse des stocks de P dans le sol. Sur la ZR 1 une exportation de 68 kg/ha de P aura entraîné une diminution des stocks de P de 48 kg/ha. La ZR 2 voit son bilan diminuer de 86 kg/ha, entraînant une baisse des stocks de P de 27 kg/ha (Figure 21). Cependant entre 2007 et 2012, les dynamiques diffèrent. Pour la ZR 1 le bilan F-E augmente de 35 kg/ha mais le stock de P lui, n'augmente pas et stagne. Sur la ZR 2 une diminution des bilans de 29 kg/ha entraîne une baisse des stocks de 16 kg/ha de P.

Enfin entre 2012 et 2017, les deux ZR reprennent une dynamique similaire, une augmentation des bilans n'entraînent pas une augmentation des stocks comme on pouvait s'y attendre ; à la place on observe une baisse des stocks de P.

Cependant il subsiste une petite différence dans leurs comportements, en l'état que pour la ZR 1 le bilan F-E augmente de 7 kg/ha, mais les stocks de P chutent de 30 kg/ha. Alors que sur la ZR 2, les bilans augmentent de 8 kg/ha entraînant une baisse de 8 kg/ha des stocks de P (Figure 21). On observe des dynamiques similaires chez les autres ZR (Annexe 1), bien que certains comportements diffèrent légèrement.

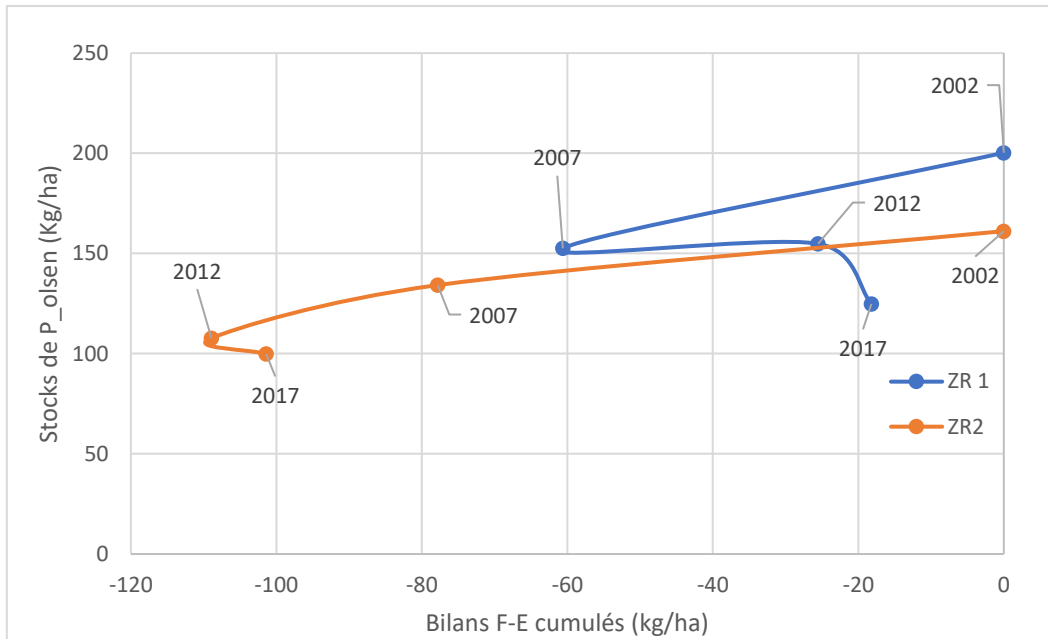


Figure 21 : Relation entre le bilan F-E et le stock de P sur la ZR 1 « productive » et la ZR 2 « autonome ». Sur cette figure il est possible d’apprécier les stocks de P en fonction des bilan F-E, de 2002 à 2017. Les quantités en ordonnée et en abscisse sont exprimées en kg/ha. Seules deux ZR sont représentés ci-dessus, il est possible d’observer les relations indicateurs bilans pour les autre ZR en annexe.

Comme la ZR 10 et 11, où les stocks de P augmentent sur une période. Ou bien la ZR 8, où les bilans peuvent diminuer sans entrainer une baisse des stocks de P (Annexe 5). Cependant, sur le long terme l’évolution de l’ensemble des ZR tend vers une baisse des stocks de P, ces ZR ne feront donc pas l’objet de présentation dans les résultats.

V-Discussion

V.1 L'utilisation des outils de diagnostic de fertilité en AC est-elle pertinente en AB ?

V.1.1 P_Olsen est-il un indicateur fiable dans l'évaluation de la fertilité des sols en AB ?

Le COMIFER classe les sols français selon leurs niveaux en P selon trois groupes. Des valeurs en P_olsen inférieures à 0,01 ppm de P correspondent à des sols pauvres en P. Un sol dont les valeurs sont comprises entre 0,01 et 0,018 ppm, sera un sol correct vis-à-vis de l'offre en P pour les cultures. Enfin un sol dont les teneurs sont supérieures à 0,035 ppm est un sol riche. En systèmes bas intrants, la gamme de valeurs seuil selon l'exigence de quelques grandes cultures (maïs, blé, sorgho, soja ou tournesol) se situe entre 0,007 et 0,01 ppm. Pour le soja, le seuil se situe à 0,008 ppm (Colomb 2007).

Les données recueillies sur les valeurs de P_Olsen à la Hourre permettent de catégoriser les ZR selon leur niveaux en P du sol. En 2002, l'ensemble des ZR possédaient un sol dont l'offre en P était correcte. Ainsi en 2017, après 18 années de culture en AB, la totalité des ZR, selon la classification du COMIFER, ont un sol correct vis-à-vis de l'offre en P. De façon globale les valeurs de P_olsen, témoignant du P disponible dans le sol, baissent pour l'ensemble des ZR. Les ZR 2, 4, 5 7 et 10 sont proches du seuil des sols pauvres. La ZR 9 est, elle en situation de carence selon le COMIFER. Le reste de ZR ont une valeur de P_Olsen suffisante/correcte. Il y a donc sur le système Biologique de la Hourre, une importance à surveiller l'évolution du niveau de P disponible dans le sol. Surtout pour les parcelles proches du seuil limite.

En 15 ans les valeurs de P_Olsen chutent se rapprochant de plus en plus des valeurs seuils décrites par Colomb et al. (2007). Le niveau de fertilité en P des sols de la Hourre peut être associé au niveau de fertilité en P du sol d'un traitement P1 voire P0 de l'essai de longue durée d'Auzeville.

A Auzeville (agriculture conventionnelle), les niveaux de P_Olsen (mesurés en 2016) varient selon le traitement : plus la dose de fertilisant P est élevée, plus la quantité de P disponible pour les cultures (P Olsen) dans le sol est élevée. De ce fait il y a un gradient de P, explorant les trois catégories fixées par le COMIFER. Ainsi les sols des traitements P0 et en P1 avec respectivement une valeur de 0.006 et 0.013 ppm de sol sont des sols pauvres. Les sols du traitement P2, ont une teneur en P Olsen correcte selon leur offre en P (0,023 ppm). Et en P4 les sols sont considérés comme très riches (0,055 ppm).

L'outil P_Olsen réussit bien à témoigner du gradient de fertilisation apportée par traitements sur le dispositif d'Auzeville. Sur ce dispositif le traitement P2, correspond à un niveau de fertilisation censé compenser deux fois les exports et le traitement P1 lui est censé tout juste les compenser.

Sur le dispositif de la Hourre, conduit en AB, l'outil Olsen montre aussi une certaine cohérence. En effet, les ZR à rotations courtes ayant des niveaux de P_Olsen corrects sont aussi les ZR où les apports sont plus élevés que sur le reste des parcelles. Les ZR à rotations longues sur lesquelles les bilans F-E sont fortement négatifs, ont des valeurs de P_Olsen proches des seuils

énoncés par le COMIFER. Cependant, certains cas comme les ZR 9, 10 et 11, montrent des niveaux de P_Olsen corrects alors que les bilans F-E sur ces dernières sont les plus négatifs du domaine. Sur ces mêmes parcelles, il y a une utilisation de couverts intermédiaires et de cultures associées plus fréquente. Cela pourrait donc mettre en évidence l'importance de l'utilisation de ce type de leviers en AB.

V.1.2 Le suivi des stocks via l'outil P-olsen (et densité apparente) dans le temps permet-il de représenter correctement l'évolution de la fertilité des sols ?

La relation obtenue entre P Olsen (kg/ha) et les bilans cumulés F-E, Figure 28 montre que la variation de P Olsen (kg/ha) est proportionnelle au bilan cumulé. De manière générale moins les exports par les cultures sont compensés par les apports, plus le stock de P diminue. Nos résultats confirment que la dynamique observée en système conventionnel par (Morel *et al* 2006) s'observe en AB. De plus, lorsque les balances apports/exports sont très négatives, un apport, même conséquent en P, ralentit la vitesse de diminution sans entraîner cependant, une hausse de P_Olsen (P disponible) Figure 28 . Des résultats semblables sont observés en systèmes conventionnels sur des sols carbonatés sur lesquels Morel et al (2018) n'observent pas d'augmentation de P Olsen lorsque le bilan augmente, comme on pourrait s'y attendre. L'hypothèse avancée est celle d'une solubilité plus faible du P apporté par les matières organiques par rapport à celle du sol et/ou réduite en présence de CaCO₃. Ce résultat questionne la valeur fertilisante des engrais organiques en milieu carbonaté lorsque ces engrais sont issus de produits résiduaux organiques.

Les dynamiques observées dans cette étude rejoignent celles des sols arables de France en général. C'est-à-dire une baisse progressive des stocks de P disponible dans le sol. De plus les bilans annuels montrent des valeurs proches de ceux de la littérature pour des exploitations biologiques (Cooper et al. 2018; Kolbe 2015). Ces auteurs mesurent des exportations de l'ordre de 5kg de P/ha/an pour des exploitations céréalières en Lorraine conduites en AB. D'autres constatent des déficits pour des systèmes bas intrants et des faibles stocks de P, pouvant varier de 7 à 16 kg de P/ha/an (Cooper et al. 2018).

L'ensemble des résultats obtenus sur le dispositif de La Hourre démontre qu'en AB, la dynamique de P_Olsen, est proche de celles observées en Agriculture conventionnelle. L'estimation des stocks par l'outil P_Olsen semble donc montrer une certaine pertinence à représenter des phénomènes visibles autant en AB qu'en agriculture conventionnelle (dilution, baisse des stocks en P). De plus il permet de pointer des tendances/notions connues, comme des seuils de réponse plus bas en AB ou bien des niveaux de fertilité et/ou stocks plus bas en AB qu'en agriculture conventionnelle.

En revanche les résultats actuels de l'étude ne permettent de montrer l'effet de l'activité biologique sur une potentielle mise à disposition plus rapide de P dans la solution du sol. Le phosphore contenu dans la biosphère et celui consommé par les organismes du sol, finit par retourner à la terre sous forme organique. Il y a dans le sol une réserve de ce phosphore organique, dont son évolution et sa participation à la nutrition des plantes est encore mal connu. Des connaissances manquent surtout sur la probabilité d'un P adsorbé à rejoindre le compartiment de P dans la solution du sol ou d'un P soluble à être adsorbé. Dans une étude,

Oberson et al. 2010 ont montré que les sols suisses menés en AB avaient un compartiment du P microbien plus élevé que celui des sols en agriculture conventionnelle. Il reste donc des connaissances à acquérir sur ces dynamiques afin de comprendre l'impact d'une gestion en biologique sur l'offre en P disponible.

V.1.3 Existe-t-il une différence dans les seuils de réponse des cultures entre l'AB et l'agriculture conventionnelle ?

Les rendements en AB sont plus faibles qu'en AC pour des niveaux de P similaires. Par exemple la ZR 1 comparable à P2, sur le plan de l'offre en P du sol, induit des rendements plus faibles qu'en P2. De plus on constate qu'une disponibilité accrue en P du sol n'entraîne pas forcément une augmentation de la biomasse à la Hourre (Figure 22). De plus ce niveau seuil de réponse est plus bas qu'en agriculture conventionnelle, les réponses des cultures semblent différentes entre ces deux systèmes de production. Laissant donc penser, que la source des rendements plus bas en AB réside dans les contraintes dues à cette conduite agricole, entraînant des pressions plus fortes qu'en agriculture conventionnelle (adventices, maladies, carence et temps pour les corriger, ravageurs, azote...). Ou bien la capacité des plantes à prélever le P ou autres éléments (azote) en présence de sols peu profonds ou pauvres en matière organique.

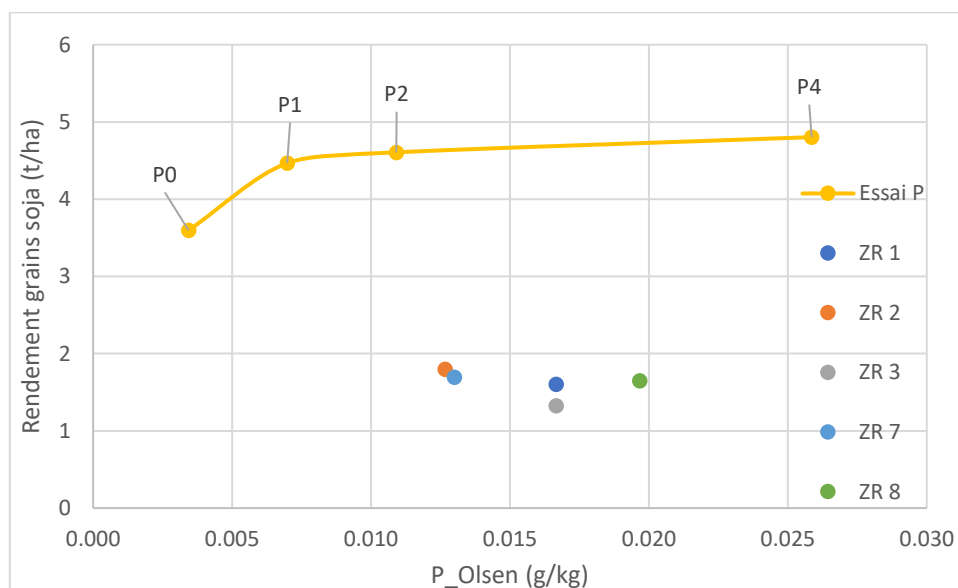


Figure 22 : Relation P-Olsen et le rendement grain soja sur la Hourre et Auzeville. La valeur de P-Olsen pour Auzeville sont les valeurs des couches (0-30 et 30-60 cm) mesurées en 2002. Pour la Hourre la valeur de Olsen par ZR est la moyenne sur 0-15, 15-30 et 30-45 cm pour l'année 2017. Les rendements du soja ont été mesurés en 2002 pour l'essai P. Et à la Hourre en 2015 pour la ZR 1, en 2016 pour la ZR 2 et 3, en 2019 pour la ZR 7 et en 2017 pour la ZR 8.

Sur l'essai P et sur la Hourre il est possible d'observer, une teneur seuil en P du sol au-delà de laquelle le rendement n'augmente plus. Bien que le dispositif de la Hourre, ne permet pas de voir les rendements du soja en AB pour des teneurs en P du sol inférieures à 0,013 g/kg, les valeurs dont l'on dispose semblent se situer en plein sur un plateau de rendement maximum. De ce fait il semble que le seuil de réponse du soja cultivé en AB à la Hourre est plus bas que sur le soja cultivé en conventionnel à Auzeville. Plusieurs raisons dans ce cas précis pourraient expliquer les rendements plus faibles à la Hourre, l'absence d'irrigation ou des niveaux de

fertilisations plus bas pouvant diminuer la croissance. Ou bien un enracinement plus limité, jouant sur le prélèvement en nutriments et le rendement. D'autres causes comme des maladies impactant le métabolisme (croissance, absorption), pourraient aussi en être à l'origine.

Cependant elles sont à considérer comme pistes secondaires car en AB les maladies/adventices sont moins présentes qu'en conventionnel du fait de faible niveau de N ainsi qu'au travail de sélection génétique sur les tolérances/résistances.

Finalement, la différence de rendement visible entre l'essai P et l'essai de la Hourre ne semble pas venir de l'offre en P du sol, car pour des mêmes niveaux de P disponible les rendements sont plus bas à la Hourre. Le manque d'eau ou le manque d'N pourraient influencer sur la croissance du soja et sur les quantités d'éléments prélevés (également en P). L'indice de nutrition pourrait permettre de connaître quel élément est le plus limitant entre le P et l'N.

V.1.4 L'indice de nutrition phosphaté (INP) est-il un outil de qualité dans le diagnostic de l'état nutritionnel des légumineuses en AB : Le cas du Soja?

La courbe critique pour le Soja sont-elles similaires pour les autres cultures ?

Il n'existe pas actuellement de courbe critique du P pour le soja permettant de calculer les indices de nutrition phosphatée pour cette culture. Nous avons montré que la teneur critique, c'est-à-dire la teneur minimum en P au-delà de laquelle une augmentation de la quantité de P disponible, n'entraîne pas une augmentation du rendement, s'observe pour le traitement P2 ou P1, selon les dates (Figure 14, Figure 15). Ceci correspond à des teneurs du soja en P comprises entre 0,3 et 0,35 %. Une étude menée au Niger, a permis de délimiter une zone de teneurs critiques pour laquelle une majorité des exploitations ont atteint le rendement maximum. Cette zone est atteinte lorsque les teneurs foliaires sont comprises entre 0,25 et 0,35 % du poids sec (Pal *et al.* 1989).

Nos résultats confirment que la teneur critique diminue avec la croissance et l'accumulation de biomasse. Ce phénomène de dilution est semblable à celui observé par Debaeke *et al.* (2012) sur N pour le tournesol. L'évolution de la biomasse est bien, inverse, à celle des teneurs critiques. Il y a donc, comme pour les courbes critiques des grandes cultures (Debaeke *et al.* 2012) une baisse de la valeur critique lorsque la biomasse augmente (annexe 6). De plus cette vitesse de diminution est plus rapide au début de la croissance du soja qu'à la fin.

La définition d'une courbe critique pour le Soja semble donc pertinente dans la mesure où, premièrement, elle est capable de représenter un phénomène physiologique connu pour d'autres cultures. Et deuxièmement car l'évolution des teneurs suit une allure similaire à celles suivies par des cultures où les courbes de dilution ont été avérées.

L'indice de nutrition phosphatée est-il capable de représenter l'état de nutrition de la plante ?

L'INP semble avoir un sens d'évolution similaire à celui du gradient de P à Auzeville. Plus le rendement est élevé, plus l'INP l'est aussi, jusqu'à une certaine teneur dans le végétal. Autrement dit à Auzeville, plus l'INP est élevé, plus l'offre en P disponible du sol l'est aussi (figure ci-dessous). A savoir que, dans les systèmes moins fertilisés, la quantité de P disponible est plus basse, se traduisant bien par des biomasses et des teneurs plus faibles, comme en ZR 2 par exemple. L'INP appliqué au soja permet bien de représenter les phénomènes expliqués par Jouany et Valé (2017) pour les grandes cultures, étant donné que la teneur en un élément d'un végétal dépend de la concentration en cet élément dans le sol et que le rendement dépend de ces teneurs (courbe de réponse aux teneurs croissantes).

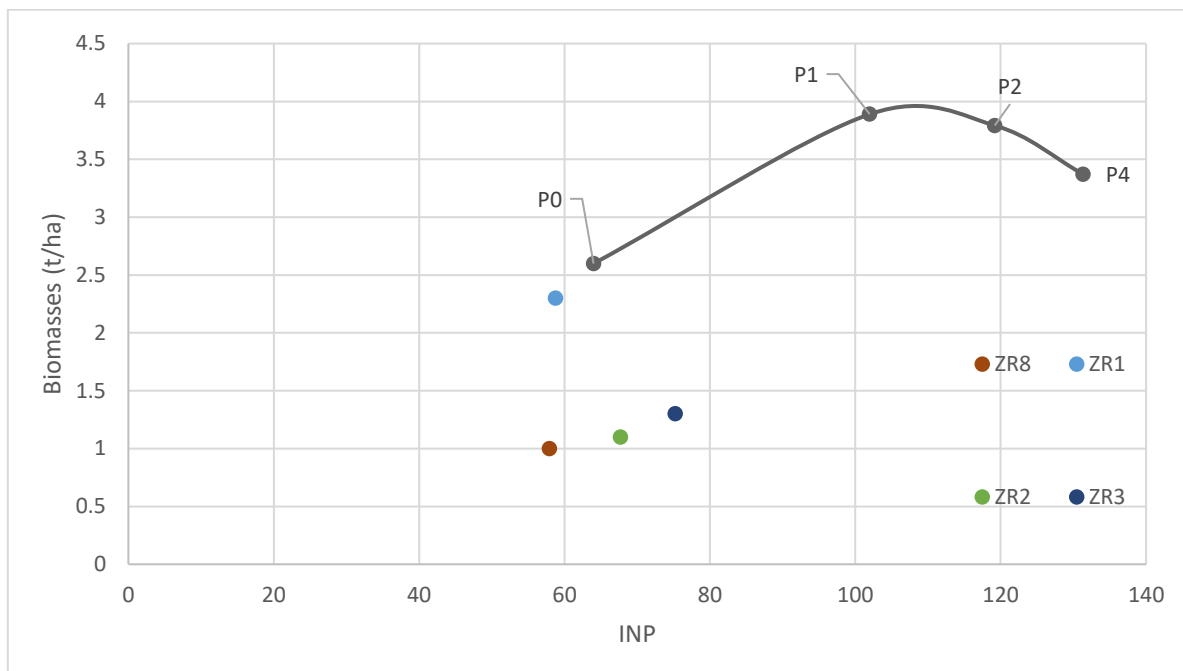


Figure 23 : Relation entre L'INP et la biomasse du Soja mesurée au stade R6-R7, en 2021 à Auzeville, en 2015 pour la ZR 1, en 2016 pour la ZR 2 et 3, en 2017 pour la ZR 8 à La Hourre.

L'INP, reflète donc la valeur de P absorbé par la plante. Or l'hypothèse faite est que la plante aura une consommation de luxe du P s'il est disponible à des niveaux élevés dans le sol. Nos résultats démontrent que INP rend bien compte de cette consommation sur le traitement P1, P2 et P4 à Auzeville avec $INP > 100$. Dans la mesure où les exports sont compensés dès le niveau P1, cela semble cohérent, que l'INP en P1, P2 et P4 soit > 100 .

Par ailleurs, la courbe permet d'identifier un niveau seuil de l'INP qui correspond à la valeur de 80, mesurée entre le traitement P1 et P2, soit entre des apports de 11 kg/ha et 22 kg/ha. Au-delà de ce seuil, une augmentation de la nutrition en P du soja, ne se traduit pas par une augmentation de la biomasse.

L'INP à la Hourre témoigne que le soja pour toutes les ZR est en situation de stress phosphaté (< 80). La ZR 1, la ZR3 et les parcelles en P2 ont un niveau de P_{Olsen} similaire. Il devrait donc y être observé le même INP. Sur le système AB de la Hourre, pour un même niveau de P_{Olsen} du sol, l'INP et les biomasses sont plus faibles que celles mesurées sur le dispositif d'Auzeville en agriculture conventionnelle.

Cela suggère encore une fois l'existence de facteurs limitant la croissance, autres que le P (Azote, irrigation, travail du sol) dans les systèmes bas intrants. Limitant donc aussi le prélèvement en nutriments. Spécifiquement à la Hourre, il existerait une pression de ces facteurs limitants moins élevée sur un système à rotations courtes (ZR 1 et 8) dît « productif », que sur le reste des ZR dîtes « autonomes ». Ce qui appuie dans ce cas l'hypothèse de l'N limitant, car les ZR à rotations courtes reçoivent des niveaux de fertilisation azoté plus élevés que le reste des ZR (Tableau 4Figure 16).

L'indicateur de nutrition azoté (INN) est plus faible que l'INP pour les ZR 2 et 3. Ce qui signifie que sur ces ZR le stress azoté est plus fort, plaçant l'N comme facteur limitant. Cependant d'autres facteurs limitants peuvent jouer sur le développement de la culture, comme avec la ZR 8 où une contrainte d'enracinement est fortement probable dû à la faible profondeur du sol. Enfin sur la ZR 1 il n'y a pas de stress azoté fort, expliquant cette biomasse plus élevée que le reste des ZR contenant du soja.

Il est aussi possible que les cultures en AB à la Hourre aient une adaptation au stress P, n'impactant pas les niveaux de rendements mais la biomasse totale produite. Cependant le rendement grain n'est pas encore connu pour le soja de l'essai d'Auzeville, la comparaison de la biomasse totale et la biomasse des grains entre la Hourre et Auzeville n'est donc pas possible, ne permettant pas de conclure quant à une capacité du soja de la Hourre à s'adapter au bas niveau de P dans le sol. Cela ne permet pas totalement de confirmer que l'INP appliqué sur des cultures en AB puisse bien représenter le niveau de stress des cultures au vu de leurs seuils de réponse probablement différents.

Finalement par hiérarchisation des facteurs limitants, il semble que l'azote soit l'éléments le plus limitant, par exemple pour les ZR 2, 3 et 8 où un INN respectivement de 0,35, 0,30 et 0,5(Figure 24). Deuxièmement, pour les ZR 1, 2 et 3, l'indicateur de nutrition montre un stress vis-à-vis du P. Enfin pour la ZR 8, le sol est peu profond, pouvant être un facteur limitant le volume de sol parcouru par les racines et donc limitant la capacité des plantes à prélever de l'N ou du P. Il y a donc un ensemble de stress impactant la nutrition du soja visible à la Hourre et non visible à Auzeville.

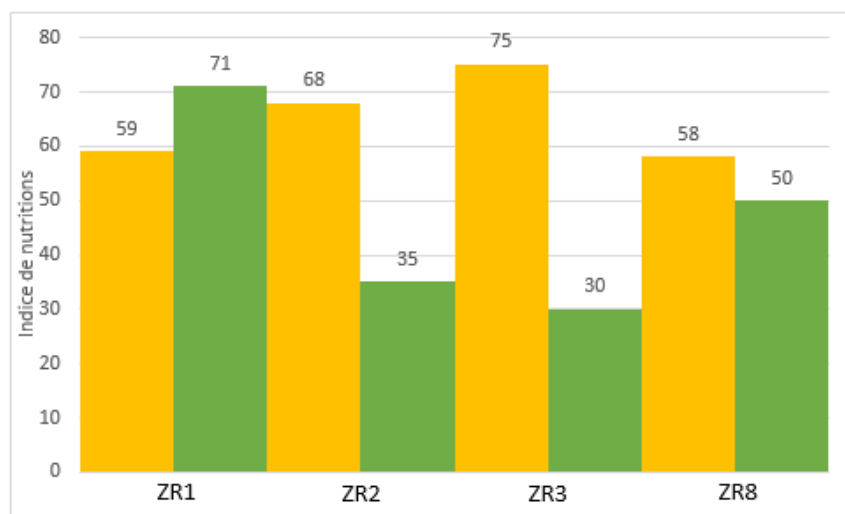


Figure 24 : INP et INN pour 4 Zones de Références du domaine de la Hourre. L'INP est représenté en jaune et l'INN est représenté en vert.

V.2 Quel-est l'impact d'un couvert de Moutarde et de Vesce sur la fertilité d'une parcelle ?

Les résultats de l'essai d'Auzeville ont permis de montrer que les couverts ont une réponse différente selon la quantité de P du sol. En effet plus le sol est riche en P plus la biomasse et les quantités d'éléments prélevés sont élevées (Tableau 7).

On constate que les quantités de P prélevées par le couvert en P1, P2 et P4 peuvent être équivalentes à la moitié des quantités moyennes de P apportées annuellement à la Hourre par les engrais sur des parcelles productives comme la ZR 1 par exemple. Dans le cas des autres parcelles les quantités de P prélevées par le couvert peut représenter la totalité (ZR 2, 5 et 12 par exemple) ou plus du double (comme en ZR 9) du P apporté par les engrais.

Ces résultats sur l'essai P suggèrent que l'incorporation de CIMS dans les rotations est un levier efficace pour compenser les exportations et améliorer la fertilité P du sol en système bas intrants. Nos résultats sont semblables à ceux obtenus sur les fermes biologiques de Lorraine, où l'utilisation de couverts pourraient compenser les pertes moyennes annuelles chiffrées à 5 kg de P/ha/an (Cooper et al. 2017).

Sur cette expérimentation, le couvert à la Hourre (AB) n'adopte pas le même comportement que le couvert d'Auzeville, pour une des trois ZR prises en compte. La conduite du couvert de trèfle violet semble plus efficace que la conduite de la CIMS de Vesce Pourpre et de Moutarde blanche pour la ZR 11. En effet pour un même niveau de P_{Olsen} les quantités prélevées sont nettement supérieures à la Hourre sur la ZR 11 avec le trèfle violet (Figure 25). Elles sont cependant similaires pour les ZR 9 et 10 (Figure 25). La durée d'implantation des couverts est plus courte sur l'essai d'Auzeville, 156 jours contre 359 jours pour la ZR 9. Or, l'efficacité d'un couvert sur le prélèvement en éléments dépend du gain de biomasse et de la quantité de l'élément prélevé.

Sous l'hypothèse de la non-présence de facteur limitant, plus la durée d'implantation du couvert sera longue, plus son efficacité sera élevée donc plus il prélèvera l'élément en question. Il n'est pas possible de réaliser cette démarche pour les ZR 10 et 11 car la base de données n'indique pas de date de semis. Mais nous pouvons supposer également une durée d'implantation du couvert similaire à celle en ZR 9. La différence de résultats entre la ZR 9, 10 et la ZR11 provient donc probablement d'un effet de variabilité propre à l'expérimentation (profondeur du sol, quantité d'éléments dans le sol...). En effet les ZR 10 et 11 se trouvent sur la même parcelle (LH1), recevant donc les mêmes ITK et les mêmes niveaux de fertilisations (Figure 8). La ZR 9, elle, reçoit le moins d'apport et fait partie des ZR aux bilans des plus négatifs. Tandis que la ZR 10 repose sur un sol peu profond. Ces caractéristiques propres au domaine de la Hourre peuvent probablement expliquer les niveaux de prélèvements en P plus bas qu'en ZR 11.

Outre la différence d'espèce (trèfle violet / Vesce pourpre) il est à noter que la moutarde s'est mal développée sur l'essai. De plus la compétition sur les ressources entre la Vesce et la Moutarde peut avoir joué un rôle sur leurs croissances et donc leurs capacités à prélever du P.

Finalement, le couvert de trèfle violet permet d'immobiliser des quantités de P similaires, voire supérieures à celles immobilisées sur l'essai P en traitement P1, pour une durée d'implantation cependant plus longue.

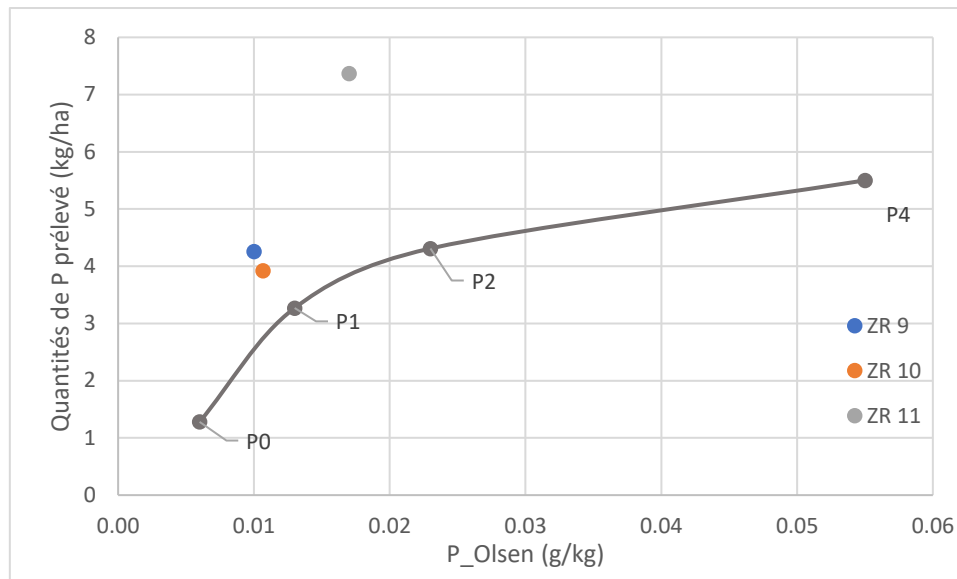


Figure 25 : relation entre P_Olsen (g/kg) et les quantités prélevées en P par le couvert (kg/ha), à la Hourre et à Auzeville. La mesure de P_Olsen a été réalisée en 2016 pour Auzeville et 2012 pour la Hourre. Les rendements biomasses aériennes et les teneurs qui ont permis de calculer le P prélevé ont été mesurés en 2021 pour un couvert de vesce pourpre-moutarde blanche à Auzeville. A la Hourre ils ont été mesurés en 2008 pour la ZR 9 et en 2010 pour la ZR 10 et 11 pour un couvert de trèfle violet.

V.3 De quelle manière le mode de gestion AB impacte la fertilité en P au niveau de l'exploitation ?

L'effet du mode de gestion sur les bilans

Dans la partie résultat, il a été vu l'impact des systèmes de production sur le bilan F-E. Ces systèmes ont un objectif de production et de rendement, tous deux liés à la conduite (AB ici) et au niveau de productivité des parcelles (profondeur sol, quantité de MO, stocks de P...). Ces objectifs de production et niveaux de fertilité calibrent la rotation et la fertilisation puisqu'ils calibrent les exports. Comme précisé précédemment, la diminution du stock de P du sol est proportionnelle aux bilans F-E. Les résultats suggèrent qu'un système où la logique est de compenser au maximum les exports et/ou préparer le sol pour des cultures exigeantes, est un système où l'on observe les quantités de P disponible les plus élevées (Tableau 8). Et inversement, les ZR où les exports sont élevés et peu compensés sont les ZR avec les stocks de P les plus faibles, comme la ZR 9. Cependant les ZR 11 et 12 font partie des ZR où les exports sont les plus forts, pourtant les stocks de P sur ces ZR ne sont pas les plus faibles.

Les ZR dont les stocks en P sont les plus faibles sont aussi les ZR où les exports font partie des plus élevés et ne sont pas assez compensés (Tableau 8). Cependant il existe quelques exceptions comme la ZR 11 et 12 où les bilans F-E font partis des plus négatifs mais dont le stock de P disponible à l'ha ne fait pas parti des plus bas. Ces mêmes ZR font également partis des ZR dont le stock en P du sol était le plus élevées initialement.

Les ZR 2, 3 et 4 comportent dans leurs rotations beaucoup d'associations de grandes cultures et/ou d'engrais verts. Les exportations y sont très élevées par rapport à d'autres ZR. LA ZR 9, qui elle aussi voit des quantités élevées de P exportées. Sur cette ZR la rotation est similaire à

celle observée sur les ZR 2, 3 et 4 mais il n'y a pas d'associations de grandes cultures. Les engrais verts y sont également plus rares. Ensuite d'autres ZR ont des exports assez importants comme la 1, 6, 8, 11 ou 12, mais n'ont pas un stock de P nécessairement bas. Parmi ces ZR certaines ont des rotations courtes et d'autres ont des rotations longue (Figure 17).

Dans les rotations courtes il n'y a pas d'utilisation d'engrais verts ou de cultures associées. Comparé aux ZR 2, 6, 11 ou 12 où il y a utilisation plus ou moins modéré d'engrais et de cultures associées.

Il est à noter qu'en général les ZR avec les stocks de P le plus bas en 2017 sont aussi les ZR dont le stock de P initial (2002) était le plus bas. Cependant il est possible de constater que les ZR où les exports sont élevés sont celles aux bilans F-E et/ou stocks de P les plus bas. Il y a donc un impact du type de cultures et du genre de rotations sur les quantités d'éléments exportés. La construction d'une rotation prenant en compte le niveau d'exigences des prochaines cultures ou bien l'utilisation d'engrais vert/cultures associées permet de limiter les pertes de P disponible (ZR 2, 3, 11 et 12).

Actuellement sur la Hourre, la fertilisation est un levier assez efficace pour compenser les pertes par exportations de phosphore et permet de relever le niveau de fertilité de sols initialement faible en P et où les niveaux d'exportations sont élevés dus aux types de cultures.

De plus, la rotation – très liée à la logique de fertilisation – impacte aussi les dynamiques du P. Les parcelles aux bilans les plus négatifs sont souvent celles où les exports sont les plus élevés et/ou les moins compensés par la fertilisation (Figure 19, Figure 18 et Figure 17). Sur ces parcelles les exports doivent donc être compensés par une légère hausse des quantités d'engrais sinon les stocks de P disponible vont diminuer plus rapidement que sur des parcelles où les pertes sont compensées. Surtout qu'en 2017, déjà six étaient proches d'un niveau de P_{olsen} faible selon les exigences des cultures (Colomb et al., 2007) ou des valeurs seuils fixées par le COMIFER.

La figure 26 montre le bilan F-E de la ZR 2, appartenant aux systèmes où les bilans baissent rapidement et fortement. Sur ce type de rotation le bilan peut être positif temporairement, bien qu'il diminue dès les premières années de cultures. Sur les six apports (2002, 2006, 2009, 2012, 2014, 2016) seuls 4 d'entre eux ont permis de compenser la totalité des pertes dues à l'export ces mêmes années. En revanche, ils n'ont pas permis de relever le bilan F-E déjà fortement négatif. Ce type de parcelle reçoit peu d'intrants. Sur la question du P, il semble que les itinéraires techniques choisis puissent conduire à terme à un niveau de P du sol très bas.

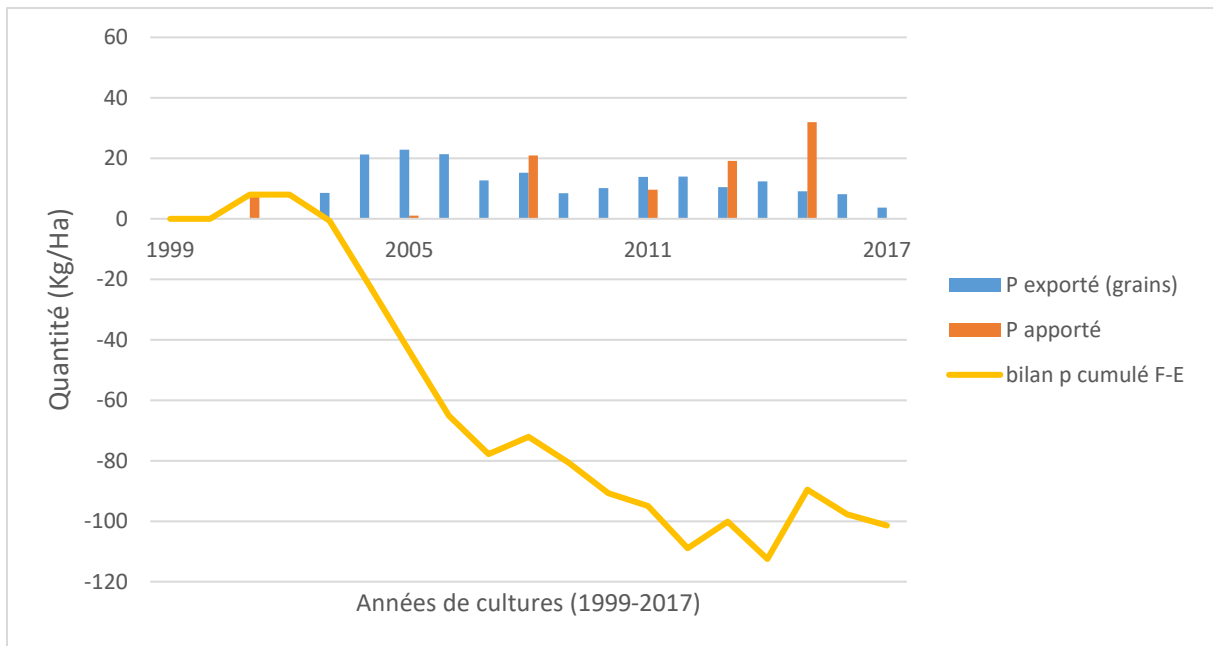


Figure 26 : Evolution des apports, exports et bilan F-E de 1999 à 2017 pour la ZR 2.

La figure 27 témoigne du bilan F-E de la ZR 1, dont la rotation est courte. Le schéma que le bilan suit lors des premières années (1999-2007) est similaire à celui de la ZR 2. Cependant sur les six apports (2002, 2006, 2008, 2010, 2012 et 2014), 5 ont permis une large compensation des pertes annuelles. Le suivi du bilan F-E met en lumière que sur ce type de parcelle, les apports permettent, sur le long terme, de compenser les pertes dues aux exports. Le bilan est toujours négatif mais se rapproche de la neutralité. Cependant l'utilisation d'engrais y est aussi nettement plus élevée. En effet, la moyenne annuelle calculée (Figure 16) précédemment montre que la ZR 1 reçoit quasiment le double des apports reçus en ZR 2 (9,1 kg contre 5 kg de P pour la ZR2).

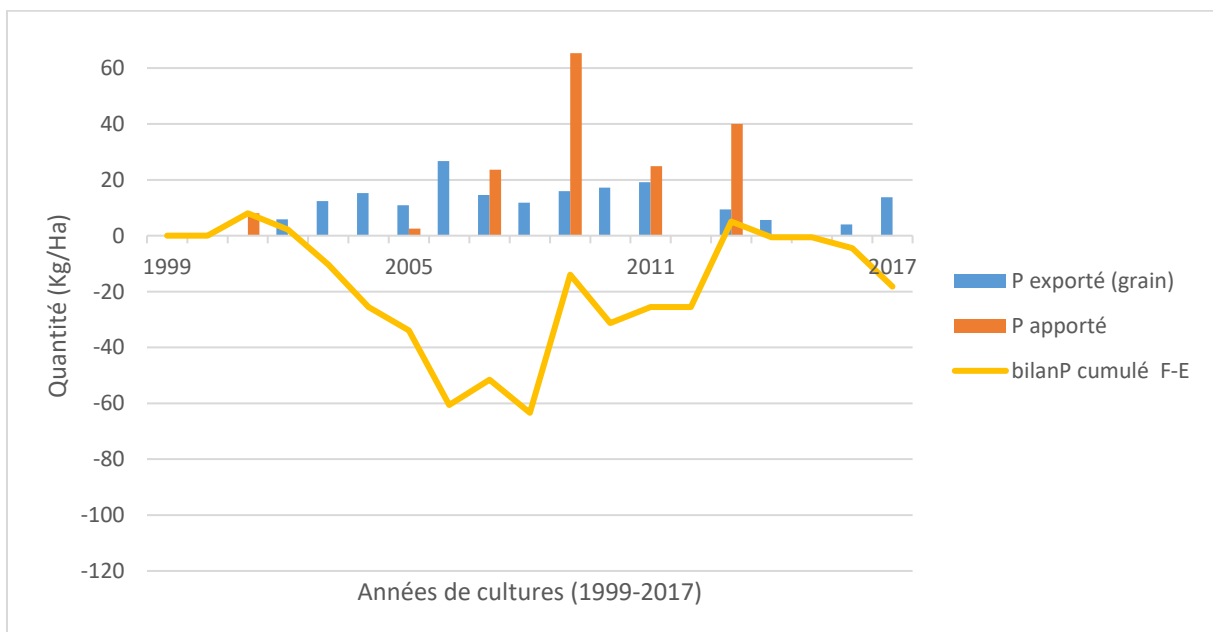


Figure 27 : Evolution des apports, des exports et des bilan F-E de 1999 à 2017 pour la ZR 1.

Les bilans F-E, hormis pour les ZR 1 et 8 ne sont jamais positifs. Bien que leurs dynamiques de diminution soient légèrement différentes, les exports sont difficilement compensés par les apports. En revanche il semble être possible de limiter l'effet de diminution, comme l'on peut le voir avec les deux ZR « productives » (1 et 8). Et également du côté des parcelles « autonomes », certaines ZR voient leurs bilans augmenter, voir même se rapprocher de la neutralité comme la ZR 4 et 5. En regardant les historiques de fertilisation, il est possible de constater que les dates d'apports reçus pour la ZR 4 et 5 correspondent avec les dates où les bilans augmentent.

Le plan de fertilisation appliqué à ces parcelles permet d'avoir des bilans F-E les plus stables dans le temps, parmi les parcelles dites « autonomes ». Cependant cela n'entraîne pas toujours une augmentation du P disponible comme il est constaté (Figure 28).

Pour terminer les pertes des systèmes de la Hourre sont similaires aux pertes recensées par la littérature (Paragraphe II.2, AGRESTE 2021) confortant l'idée que l'outil bilan F-E combiné à P_Olsen est un bon indicateur pour les acteurs du monde agricole dans la prévision de l'impact d'une culture sur le statut phosphaté du sol.

Sur la ZR 1 la diminution des stocks entre 2002 et 2017 de P est mise en évidence par la baisse du niveau de P_Olsen du sol (g/kg). Il est aussi possible de constater sur cette figure que les apports en 2009 et 2010 n'ont pas permis de rehausser le niveau de P_Olsen du sol, même si c'est également sur cette période que les exports sont les plus élevés. En revanche les apports appliqués en 2010 et 2014, semblent stabiliser la diminution de P_Olsen sur la période 2006-2011. Ce qui n'est pas le cas pour la période 2011-2017 (Figure 28).

La ZR 2, pris précédemment comme exemple d'une parcelle « autonome », suit aussi, au niveau de la dynamique des stocks de P, la même évolution que vue précédemment. C'est-à-dire une diminution des stocks entre chaque période de mesures. Cependant les évolutions sont différentes, Les diminutions se font par pallier en ZR1 alors qu'en ZR 2 la diminution est continue mais plus faible.



Figure 28 : Relation entre Olsen et les bilans selon les systèmes de production des ZR 1, 2, 4 et 5.

De plus le comportement de la diminution entre 2 périodes et après un apport/export est différent. En effet l'apport effectué en 2009 ne semble pas avoir d'impact sur le niveau de P_Olsen du sol de la ZR 2, puisqu'il ne stabilise pas la perte de P_Olsen bien qu'il fasse partie des plus conséquents. Comme sur la ZR 1 en 2010 où l'apport, trois fois plus conséquent qu'en ZR 2, permet tout juste de stabiliser les pertes de P disponible sur la période donnée (2006-2011) mais ne permet pas de ralentir les pertes sur période suivante (2011-2016). Cela est probablement due à un niveau de fertilisation tout juste capable de compenser les exportations (ce que témoignent les bilans).

Il est aussi à noter que les exports ont diminué entre 2009 et 2017 par rapport à la période 2002-2009, pouvant aussi être à l'origine de la non-diminution de la pente de perte de P_Olsen entre 2007 et 2012.

Selon les bilans F-E, la fertilisation participe à compenser les exports dans certains systèmes (objectif de rendements). Sur un système « productif » la gestion de la fertilisation permet non pas d'améliorer la fertilité sur le long terme mais de ralentir les pertes dues aux exports, à l'érosion et au phénomène biologiques/pédologiques.

L'effet des couverts/associations sur P_Olsen

Compte tenu de la multiplicité de facteurs pouvant influencer sur la minéralisation de la matière organique, l'emploi seul des bilans F-E, ne permet pas de montrer l'impact de l'apport en P disponible offert par les couverts. L'historique cultural (engrais verts/association), avec les quantités de P_olsen est un indicateur de l'effet de ces pratiques. L'utilisation des cultures associées (légumineuses et grandes cultures) comme en ZR 4, ou de couverts comme en ZR 4 et 5 (Figure 28) a probablement participé au maintien de la fertilité. En effet sur ces deux ZR, la mise en place de ces pratiques date de 2007. Cette date coïncide au moment où les valeurs de P_Olsen stagne, voir augmentent légèrement pour la ZR 5. Bien que la disponibilité en P soit la plus faible en ZR 4 et 5, le recours aux associations et aux engrais verts montre un intérêt dans le maintien de la disponibilité en P du sol. Qui plus est, à des taux à la limite des seuils des exigences des grandes cultures comme le soja (Colomb et al., 2007). Il serait judicieux d'augmenter la fertilisation apportée sur ces parcelles.

Pour synthétiser, le premier élément déterminant dans la fertilité est la nature du sol, qui pourra être compensé par un apport. En second lieu vient le type de rotations et les cultures utilisées. La réflexion autour de la construction de la rotation est un levier efficace pour limiter les diminutions de P disponible et amener des quantités de P pouvant diminuer les apports. Si la rotation engendre de trop grandes pertes de P, l'utilisation de la fertilisation est un levier efficace pour compenser les pertes par exportations, ou relever les faibles niveaux de P du sol.

V.4 Limites

Cette étude vise à juger de la validité d'outils de diagnostic et de leviers pour gérer la fertilité phosphatée en AB. Connaissant le cahier des charges de l'AB, les engrais sont de types organiques et les rotations peuvent être assez longue face aux rotations généralement observées en agriculture conventionnelle. De plus la gestion du sol est effectuée afin de maintenir l'activité biologique de ce dernier. Il y a donc dans ce genre de système, une logique visant à boucler les cycles des éléments.

Ces dynamiques et processus décrivent la complexité du cycle du P, et l'actuelle incapacité (manque de références) à diagnostiquer de façon fidèle et réelle la quantité totale de P du sol disponible pour les cultures à un moment donné. La méthode Olsen, comme les autres, ne prend pas en compte la contribution possible du P organique à l'alimentation des cultures. Il est donc probable que cette méthode sous-estime la quantité de P réellement disponible pour les plantes (Cooper, Reed, Hörtenhuber, et al. 2018).

Bien qu'il soit possible de démontrer la cohérence de l'emploi d'un outil comme P Olsen en AB, il reste difficilement possible de conclure quant à sa capacité à représenter/mesurer tout le P du sol, ou du moins tout le P potentiellement disponible pour la plante (et ce toutes réserves confondues).

L'outil INP : indice de nutrition phosphatée

L'expérimentation mise en place a permis de construire la courbe de dilution du soja ES Pallador et donc de déterminer un indice de nutrition phosphatée (INP). Dans le cadre de ce projet, les outils étudiés vont être utilisés en AB, or la courbe de dilution a été obtenue pour un soja irrigué et conduit en agriculture conventionnelle.

Il a été vu que pour des mêmes niveaux de P_Olsen du sol, les indices de nutrition et les teneurs en P du soja étaient plus faibles à la Hourre (AB) en comparaison avec Auzeville (Agriculture conventionnelle). Le fait que les deux indicateurs varient dans le même sens indique que le problème ne vient pas de la fourniture en P du sol ou d'une cause génétique, mais plus d'un facteur ayant ralenti le gain de biomasse et/ou le prélèvement en d'autres éléments (comme l'azote). Ce qui plus est, indique une certaine cohérence de l'outil P-Olsen (paragraphe V.1.4) L'hypothèse des facteurs limitants (eau, azote, enracinement) semble donc la plus pertinente au vu des résultats montrés.

Il est donc légitime de remettre en question l'applicabilité de cette courbe de dilution à du soja ayant eu des conduites culturales différentes (régimes d'irrigations différents, bioagresseurs, etc). De plus en AB, des facteurs limitants comme l'irrigation peuvent modifier le seuil de réponse de la culture.

VI Conclusion

VI.1 La gestion de la fertilité phosphatée en AB par des outils et leviers utilisés en agriculture conventionnelle

Ce mémoire avait pour objectif d'apporter des données de références et des pistes de réflexion sur la gestion de la fertilité phosphatée des systèmes AB en grandes cultures. Question apportée par le projet Phosphobio, qui identifie le P comme un élément clef des systèmes en AB. Le projet a notamment pour ambition de tester la validité d'outils et de leviers utilisés en agriculture conventionnelle en AB. Cette étude a servi à répondre à cette problématique via le test de deux outils de diagnostic de la fertilité (P_Olsen et INP) et d'un levier (CIMS). Les principales avancées que devaient permettre cette étude était la construction de la courbe critique en P pour le soja et le test de l'outil d'indice de nutrition phosphatée (INP). Actuellement très peu de références existent sur la définition d'une teneur critique pour le soja et plus largement pour les légumineuses. L'obtention de telles références sont attendues pour construire des outils d'aide à la décision sur la gestion de la fertilité. D'autres attentes étaient de diagnostiquer l'état de fertilité phosphatée de sols conduits en AB. Ainsi que d'étudier la réponse de couverts à un gradient de P, dans le but de fournir des références quant à l'utilisation de leviers à la fertilité.

Pour ce faire deux essais de longues durées ont permis d'observer l'impact de différentes conduites agricoles dans le temps et donc d'acquérir des données de références. L'essai longue durée d'Auzeville (essaiP) comporte 4 itinéraires de fertilisation appliqués depuis 1969. Et l'essai longue durée de la Hourre, conduit en AB depuis 2000, permettant d'apporter des références sur l'impact des systèmes de cultures sur des paramètres pédologiques, cultureux ou économiques. Durant cette étude, un travail de comparaison a été appliqué afin de tenter d'appliquer certaines références de l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique.

La courbe critique et l'INP du soja

Actuellement, les résultats issus de l'essai P ont permis de montrer qu'il existait une réponse du soja à différentes concentrations en P du sol. La mesure des teneurs de l'appareil végétal aérien à différents stades de croissance ont permis de définir la courbe critique du soja et d'en tirer une équation. Cependant l'application de l'outil INP, basée sur cette équation, ne semble pas applicable à d'autres contextes. En effet les réponses du soja de l'essai P et de la Hourre sont différents. L'azote et l'irrigation ont pu être identifiés comme des facteurs limitant le rendement. Afin que l'outil INP puisse être utilisé par des agriculteurs, la courbe critique du soja doit être testée sur des contextes propres à l'AB.

Les niveaux de fertilité d'un système agricole conduit en AB et levier pour les améliorer

L'utilisation de l'outil de diagnostic sol, P_Olsen, sur le domaine de la Hourre a permis de montrer l'existence d'un gradient de P variant de 0,009 ppm à 0,02 ppm, au bout de 20 années de cultures en bio. C'est donc une indication, que le risque lié à un problème de fertilité phosphatée est faible. L'azote et l'irrigation limite plus le rendement que le P le fait. Cependant quelques parcelles ont des quantités de P disponibles dans le sol proche des seuils limites fixés par le COMIFER. Il y'a donc une attention à porter sur le long terme vis-à-vis du P. Il est

nécessaire de prendre en considération l'importance de compenser les exports, soit par la fertilisation ou l'utilisation de leviers comme les CIMS pour maintenir des niveaux corrects de P disponible dans le sol. D'autant plus qu'ils sont capables d'immobiliser des quantités de P intéressant vis à vis des exports moyens sur le domaine de la Hourre.

Il reste cependant important d'obtenir des références plus larges sur les comportements de ces leviers dans d'autres contextes en AB.

Pour synthétiser, les outils et les leviers utilisés dans le diagnostic et l'amélioration de la fertilité en P nécessitent d'être étudiés dans divers systèmes conduits en AB (niveaux de fertilité) et dans divers contextes pédoclimatiques.

VI.2 Perspectives

Les outils et les leviers

La poursuite de projets comme phosphobio est nécessaire dans le souci de produire des outils de diagnostic et/ou d'aide à la décision valides pour des contextes pédologiques et agronomiques les plus larges possibles. Des études doivent continuer d'être menées sur des sols, des climats et des itinéraires techniques différents. Dans le cas de l'outil Olsen, sa mise en relation avec les INP ou les biomasses devra être suivie sur d'autres types de sol, avec d'autres types d'engrais et avec des rotations différentes. Concernant l'outil de diagnostic nutritionnel INP soja, les teneurs critiques qui ont permis de le construire devraient être mesurées en présence de facteurs limitants comme l'azote ou l'irrigation, afin d'étalonner/adapter l'outil à des contextes bas-intrants. De plus cela permettrait de confirmer et/ou infirmer les hypothèses tirées dans ce rapport, étant donné que le seuil de réponse du soja n'est pas le même en conventionnel qu'en AB à cause de facteurs limitants. En effet si des facteurs limitent la croissance, il est préférable de recommander des doses d'apport relatifs à ce niveau de croissance.

Du côté des couverts et des leviers, seuls des dispositifs de longue durée peuvent permettre de mettre en évidence l'impact de la présence régulière de couverts ou de rotations sur la fertilité P (et K) des sols. De plus une mesure plus régulière du P disponible dans le sol après utilisation de couverts permettrait d'apprécier leurs efficacités réelles sur la nutrition des cultures. Dans les grandes lignes, il y a à gagner, dans la connaissance des effets des amendements/engrais sur les propriétés du sol. Également pour connaître leur dynamique de minéralisation et de circulation au sein des réservoirs du sol et de calculer les doses d'apport économiquement rentables (Leclerc, 2009).

De plus la répétition d'expérimentations sur différents sites pourrait être un moyen de s'assurer de la reproductibilité des résultats sur le territoire français en conditions pédoclimatiques différentes. Il est important de continuer à produire des références sur la validité des outils et l'impact des leviers en AB pour des contextes pédoclimatiques différents.

Le parallèle entre agriculture conventionnelle et l'AB

Dans ce rapport la baisse des fertilités phosphatées des sols sur un système biologique a été montrée comme inquiétante. De plus les quantités de P disponible sont plus faibles dans ce

genre de système qu'en système conventionnel, ce qui se voit également sur les cultures (comme le soja avec un INP faible sur les ZR). Cependant au vu du stress azoté, le stress en P n'est pas le facteur le plus limitant des rendements. A la Hourre les systèmes dont l'objectif de rendement est élevé, au vu de leurs potentiels productifs, reçoivent le plus d'engrais. Sur ces systèmes, les baisses de fertilité sont plus lentes.

A l'image de ce système productif, l'agriculture conventionnelle, pourrait être confrontée aux problèmes liés à l'érosion de la fertilité phosphatée après l'AB ou d'autres systèmes agricoles à bas intrants. De ce fait des études comme phosphobio peuvent être précurseurs face aux potentiels problématiques futures (comme l'érosion de la fertilité phosphatée) et leurs résultats pourraient être utilisés à d'autres cadres comme l'agriculture conventionnelle.

La problématique et l'actualité

Les nouvelles réglementations et les pressions sur les ressources en P en AB poussent à utiliser de nouvelles ressources fertilisantes ainsi qu'à maximiser leurs efficacités. Il est donc urgent de mener des études sur de nouvelles matières utilisables à l'échelle d'un territoire en AB. Les déchets de la pisciculture pourraient être une piste. Ainsi que sur les transformations nécessaires à apporter (exemple déchets ménagers) pour augmenter leurs efficacités. Il serait intéressant par la suite de référencer les capacités fertilisantes de ces matières sur la mise à disposition de P pour les plantes, via par exemple un dispositif de suivi des réponses de cultures avec et sans utilisation de ces nouvelles matières fertilisantes. Ainsi qu'avec ou sans ces transformations.

Les conséquences de concurrence sur la ressource en P pourraient faire l'œuvre de politiques agricoles visant à subventionner l'achat d'engrais autorisés en AB, généralement plus coûteux. Cette mesure serait d'autant plus judicieuse lors de la transition de modes de cultures vers des systèmes localement plus auto-suffisants.

Cela émet plusieurs questionnements sur la durabilité des systèmes biologiques. Les acteurs du monde agricole ainsi que du territoire doivent réfléchir et agir ensemble sur des échelles les plus localisées possibles. Les différents types d'exploitations et acteurs au sein d'un territoire gagneraient à fonctionner de paires, afin de mieux valoriser leurs déchets de cultures ou leurs effluents d'élevages. Des réseaux et/ou plateforme de mise en relation faciles d'utilisation pourraient être développés afin de faciliter les échanges entre offreurs et demandeurs.

Enfin la baisse de la fertilité en P des sols d'un territoire, la concurrence économique (raréfaction, hausse des prix) et la complexification des échanges internationaux semblent montrer la nécessité de trouver des leviers à la fertilité poussant à rendre le P du sol plus disponible.

La portée des résultats dans un contexte tropical et/ou de pays en développement.

En région tropicales et arides le P est aussi une problématique. En effet, les sols généralement plus acides accentuent le phénomène de solubilisation et donc aussi de précipitations/lixiviation en rendant ces sols bien souvent déficitaires (Hocking *et al.*, 2000, Keerthisinghe *et al.*, 2001). Les contextes de ce genre de régions peuvent dans certains cas se traduire par des manques de moyens financiers, des manques de moyens techniques (comme des laboratoires de mesures)

ou bien des accès aux formations compliqués. De plus, des régions touchées par la pauvreté peuvent se traduire par une présence accrue de systèmes « bas intrants » au vu des faibles quantités d'engrais apportés ou au vu de l'impasse sur la fertilisation. En effet dans certaines régions le manque de ressources (économiques ou matérielles) pousse les agriculteurs à minimiser les apports ou utiliser des roches phosphatées broyées. L'applicabilité des enseignements apportés par phosphobio (outils et leviers) pourrait être étudiée dans un contexte pédoclimatique propre aux pays du « Sud ». Le manque de moyens techniques/économiques pousse à revoir les outils utilisés, en effet des mesures comme P_Olsen demande au moins un laboratoire d'analyse. L'étude de mesures plus rapides et moins coûteuses seraient un moyen permettant d'optimiser le conseil et l'autogestion des petits producteurs.

La recherche de couverts adaptés à ces pédoclimats puis la démocratisation de leurs utilisations auprès des agriculteurs pourrait-être à lui-même, un levier sur l'amélioration de la fertilité phosphatée des sols de ces régions.

Bibliographie :

- Alletto L., Seassau C., Justes E., Tribouillois H., Couédel A., Ait-Kaci-Ahmed N.** 2020. Quels couverts pour quels services ? (34) Webinaire IRD Occitanie : grandes cultures. Les journées IRD. 22/10/2021, France.
- Amossé C., Jeuffroy MH., David.C.** 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability . *Field Crops Research* 145 (avril): 78-87.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.010>.
- Aronsson H., Hansen E., Thomsen I., Jian L., Øgaard A., Kankanen H., Ulén B.** 2016. The ability of cover crops to reduce nitrogen and phosphorus losses from arable land in southern Scandinavia and Finland. *Journal of Soil and Water Conservation* 71 (janvier): 41-55.
<https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.41>
- ARVALIS, institut du végétal.** 2021. Les résultats 2021 des variétés blé tendre en Rhône-Alpes / Arc Méditerranéen. [11/08/2021]. <https://www.arvalis-infos.fr/varietes-de-ble-dur-les-premiers-resultats-2021-@/view-35496-arvarticle.html>.
- Bachmann S., Eichler-Löbermann B.** 2010. Soil Phosphorus Pools as Affected by Application of Poultry Litter Ash in Combination with Catch Crop Cultivation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41 (9): 1098-1111.
<https://doi.org/10.1080/00103621003687182>.
- Baize D.** 2018. Chapitre 14 : Le phosphore. IN: Denis Baize. *Guide des analyses en pédologie. 3ème édition revue et augmentée.* QUAE. 145-152. (Savoir Faire,3)
https://www.researchgate.net/publication/329268511_Guide_des_analyses_en_pedologie_3eme_edition_revue_et_augmentee_326_pages
- Bouthier A., Robert T., Parnaudeau V. Nicolardot B., Morvan T.** 2009. Valeur fertilisante azotée des produits résiduaux organiques (PRO) : mieux prendre en compte la dynamique de la fourniture d'azote. (20) Journée technique grandes cultures biologiques ITAB-Arvalis. 23/03/2009, France.
<http://itab.asso.fr/downloads/actes%20suite/jtgc09-2-pro-bouthier.pdf>.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R.** 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : Importance de la densité apparente. *Etude et gestion des sols, association française pour l'étude des sols.* 31 (1) : 27-40.
<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/77739/filename/Ary-Bruand-1996-EtudeGestionSols.PDF>.
- Cadillon A., Blaise L., Fourrié L.** 2015. Fertiliser en agriculture biologique : les attentes des acteurs, ITAB.
- Charles R., Wendling M., Büchi L., Casagrande M., Celette F., Fontaine L., Jouany C.** 2017. Les CIMS pour améliorer la productivité en Agriculture Biologique dans les systèmes de culture assolés. *Innovations agronomiques* 62 (2017) : 131-141.
<https://doi.org/10.15454/1.517407968140441E12>.
- Colomb B.** 2007. Apport d'un essai de longue durée pour la gestion à long terme du phosphore dans les systèmes de culture à bas niveaux d'intrants du sud de la France. 1-9. Rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre du COMIFER et du GEMAS. 8^{ème} édition, Blois, France, 20-21/11/2007.
<https://comifer.asso.fr/fr/evenements/15-rencontres/27-edition-2007.html>
- COMIFER.** 1995 : Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Paris 16^{ème}, France : Comifer, 37 p.
<https://comifer.asso.fr/images/fichiers/Fertilisation-phosphatee-et-potassique.pdf>.
- Constantin J., Beaudoin N., Meyer N., Crignon R., Tribouillois H., Mary B., Justes E.** 2017. Concilier la réduction de la lixiviation nitrique, la restitution d'azote à la culture suivante et la gestion de

- l'eau avec les cultures intermédiaires. *Innovations agronomiques*, **62** (2017) : 1-12.
DOI : <https://10.15454/1.517407043672525E12>.
- Conyers, M.K., Moody P.W.** 2009. Conceptual Framework for Improving the P Efficiency of Organic Farming without Inputs of Soluble P Fertiliser. *Crop & Pasture Science* **60** (2) : 100-104.
<https://doi.org/10.1071/CP06327>.
- Cooper J., Reed E., Hörtenhuber S., Lindenthal T.** 2018. Disponibilité du phosphore dans de nombreuses exploitations gérées biologiquement en Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **110** (2) 227-239.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-017-9894-2>.
- Cordeau S., Moreau D.** 2017. Gestion des adventices au moyen des cultures intermédiaires multi-services : potentiels et limites. *Innovations Agronomiques* **62** (2017) : 87-100.
<https://doi.org/10.15454/1.5174075019109001E12>.
- Crews T.E., Mark B.** 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based on agroecosystems?. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **72** (2005) : 101-120.
<https://doi.org/10.1007/s10705-004-6480-1>.
- David Pilbeam, Barker A.** 2015. Chapitre 3 : Phosphorus In: Hopkins B.G. Handbook of plant nutrition. New-York : Taylor and Francis group, 65-127.
https://www.researchgate.net/publication/326942698_Handbook_of_plant_nutrition.
- Debaeke P., Van Oosterom E.J., Justes E., Champolivier L., Merrien A., Aguirrezabalf L.A.N., Gonzalez-Dugo V., Massignam R.M., Montemurro F.** 2012. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops Research* **136** : 76-84.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.024>.
- Degan F., Le Souder C.** 2021. Fertilisation phosphatée et potassique : les bases du raisonnement ». [12/05/2021].
<https://www.arvalis-infos.fr/le-raisonnement-de-la-fertilisation-p-k-repose-sur-quatre-criteres-@/view-240-arvarticle.html>.
- Dubus I.** 1997 La rétention du phosphore dans les sols : principes d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. Nouméa, Nouvelle-Calédonie : Centre ORSTOM, 18-20. (Novembre 1997- III3).
https://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_7/carton01/010013918.pdf.
- FAO.** 2004. Chapitre 1 : introduction. In: **Roy R.N., Zapata F.** *Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable (FAO)*. FAO, 174 p. (Bulletins Fao : engrais et nutrition végétale, 13).
<https://www.fao.org/3/y5053f/y5053f05.htm#bm0>.
- Fardeau J.C.,** 1993. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomy* **13** (4): 317-331.
https://www.agronomy-journal.org/articles/agro/abs/1993/04/Agronomie_0249-5627_1993_13_4_ART0009/Agronomie_0249-5627_1993_13_4_ART0009.html.
- Fontaine L.** 2019. InnovAB - Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée. *Innovations Agronomiques*, **71**, 295-309.
- Gerke J.,** 1992. Phosphate, aluminium et fer dans la solution de sol de trois sols différents en relation avec des concentrations variables d'acide citrique. *Journal of plant nutrition and soil science*, **155** (4) : 339-343.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jpln.19921550417>.
- Graf, Jenny R.M., Chevillat V., Weidmann G., Hagist D., PFIFFNER L.** 2016. « La biodiversité sur l'exploitation agricole - Guide pratique ».
- Hallama M., Pekrun C., Lambers H., Kandeler E.** 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and soil* **434** (1-2) : 7-45.

- https://www.researchgate.net/publication/328562230_Hidden_miners_-_the_roles_of_cover_crops_and_soil_microorganisms_in_phosphorus_cycling_through_agroecosystems.
- INAO.** 2016. Plaquette de l'Agriculture Biologique. INAO. 2016. [27/05/21] <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQQ/Agriculture-Biologique>.
- Jouany C., Colomb B., Bosc M.** 1996. Effets à long terme de la fertilisation potassique sur les rendements et l'état de fertilité des sols calcaires du sud-ouest de la France. *European Journal of Agronomy*, **5** (1996) : 287-294. https://www.researchgate.net/publication/233791493_Long-term_effects_of_potassium_fertilization_on_yields_and_fertility_status_of_calcareous_soils_of_south-west_France.
- Jouany C., Valé M.** 2017. Diagnostic d'état nutritionnel des cultures : Principes et méthodes basés sur l'analyse de plante. In: **Colomb B., COMIFER.** *Guide de la fertilisation raisonnée*. Paris, France : Editions France Agricole, 270-280. (Agri-Production, n°2). https://www.researchgate.net/publication/320194418_Diagnostic_d%27etat_nutritionnel_des_cultures_Principes_et_methodes_bases_sur_l%27analyse_de_plante.
- Justes E., Jeuffroy M.H., Mary B.** 1997. « Chapitre 4 : Wheat, Barley and Durum Wheat ». In : **Lemaire G.** *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin, Allemagne : Springer, 73-91. https://www.researchgate.net/publication/283785158_Wheat_Barley_and_Durum_Wheat.
- Kleinman P., Salon P., Sharpley A.N., Saporito L.S.** 2005. « Effect of Cover Crops Established at Time of Corn Planting on Phosphorus Runoff from Soils before and after Dairy Manure Application. *Journal of soil and water conservation*, **60** (6), : 311-322. https://www.researchgate.net/publication/43275189_Effect_of_cover_crops_established_at_time_of_corn_planting_on_phosphorus_runoff_from_soils_before_and_after_dairy_manure_application.
- Leclerc B.** 2009. la question des engrais organiques azotés en grandes cultures biologiques. 79 p. Journée techniques grandes cultures biologique. 23/03/2009, Paris 14ème, France. <http://itab.asso.fr/downloads/actes%20suite/actes-gc09.pdf>.
- UNIFA.** 2021. Les indices de nutrition : l'indice de nutrition d'une culture pour l'azote, le phosphore ou le potassium (iNN, iNP, iNK) permet d'évaluer la qualité de la nutrition pour ces éléments et de l'ajuster par des apports. [27/04/2021]. <https://fertilisation-edu.fr/nutrition-des-plantes/le-diagnostic-de-nutrition/les-indices-de-nutrition.html>.
- Lévesque M.** 1969. Characterization of model and soil organic matter metal-phosphate complexes. *Canadian Journal of soil science*. **49** (3) : 365-373. <https://doi.org/10.4141/csjss69-050>.
- Morel C., Le Clech B.** 2006. Gare à la baisse de biodisponibilité du phosphore. *AlterAgri*. **79** (septembre-octobre 2006) : 21-23. https://www.researchgate.net/publication/286787412_Gare_a_la_baisse_de_biodisponibilite_du_phosphore.
- Morel C., Houot S., Michaud A., Montenach D., Mollier A.** 2018. Multiannual dynamics of P-ions in solution in two French cropped soils after repeated applications of organic wastes products. In : 6th symposium on Phosphorus in Soils and Plants, Leuven, Belgium 10-14.
- Oberson A., Tagmann H., Langmeier M., Dubois D., Mäder P., Frossard E.** 2010. Fresh and residual phosphorus uptake by regrass from soils with different fertilization histories. *Plant soil*, **334** (2010) : 391-407. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11104-010-0390-6>.
- Olsen S.R.** 1954. Estimation du phosphore disponible dans les sols par extraction avec du bicarbonate de sodium. *Revue scientifique de la Colorado Agricultural experiment Station*, **418** (2013) ; 18-19. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300436954>.

- Pal U.R., Olufajo O.O., Nnadi L.A., Singh L.** 1989. Response of soya bean (*Glycine max* (L.) Merr.) to phosphorus, potassium and molybdenum applications. *The Journal of Agricultural Science*, **112** (1989) : 131-136.
<https://10.1017/S0021859600084185>.
- Pavinato P., Rodrigues M., Soltangheisi A., Sartor L.R.** 2017. Effects of Cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. *Agronomy Journal* **109** (3) : 1039-1047.
https://www.researchgate.net/publication/314523553_Effects_of_Cover_Crops_and_Phosphorus_Sources_on_Maize_Yield_Phosphorus_Uptake_and_Phosphorus_Use_Efficiency
- Pellerin S.** 2003. Gestion de la fertilité phospho-potassique en agriculture biologique : questions posées et premiers résultats. *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture de France*, **89** (1), 30–34.
- Ramaekers L., Remans R., Idupulapati M.R., Blair W., Vanderleyden J.** 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field crops research*, **117** (2) : 169-176.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429010000596>
- Scholz R.W., Wellmer F.W.** 2019. Although there is no Physical Short-Term Scarcity of Phosphorus, its Resource Efficiency Should be Improved. *Journal of Industrial Ecology* **23** : 313–318.
- Terres Univia .** 2021. « Soja - Les espèces cultivées - Cultures & utilisation
<https://www.terresunivia.fr/cultures-utilisation/les-especes-cultivees/soja..>
- Ulén B.** 1997. Nutrient Losses by Surface Run-off from Soils with Winter Cover Crops and Spring-Ploughed Soils in the South of Sweden. *Soil and Tillage Research* **44** (3): 165-77.
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00051-2).
- Vadez V., Lasso J.H., Beck D.P., Drevon J.J.** 1999. Variability of N₂-fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under P deficiency is related to P use efficiency. *Euphytica*, **106** (1999) : 231-242.
<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1003512519558>.
- Van Vuuren D. P., Bouwman A. F., Beusen A. H. W.** 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion Global Environmental Change. **20**, (3) : 428-434

Tables des annexes :

Annexe 1 : Résumé du projet Phosphobio et présentation des 5 actions.

Annexe 2 : Fertilisants organiques utilisables en AB selon le règlement (CE) n° 889/2008

Annexe 3 : Stades phénologiques du soja – ministère de l'Agriculture et de la pêche Québec

Annexe 4 : Exemples de tables des exports / apports et bilans F-E construites durant mon stage

Annexe 5 : Relation entre le bilan F-E et le stock de P sur le reste des ZR de la Hourre.

Annexe 6 : Courbe de dilution pour quelques grandes cultures – Philippe Debaeke 2012

Annexe 7 : INN et INP pour le Soja de la Hourre

Annexe 8 : Ensemble de services potentiellement rendus par les couverts

Annexe 9 : P_{Olsen} sur l'essai P en 2016. Mesures effectuées sur les 30 premiers cm du sol.

Annexe 10 : Schéma organisationnel de prélèvements

Annexes :

Annexe 1 : Résumé du projet Phosphobio et présentation des 5 actions.

Appel à projets d'innovation et de partenariat 2020 Dossier finalisé Organisme chef de file : ARVALIS Institut du végétal Date de début de projet : 01/10/2020 Durée : 42 mois (maximum 42 mois) N° de thème : 1 N° de(s) la manifestation(s) d'intérêt initiale(s) : Manifestation d'intérêt n° 1114643 IMPERATIF : Le présent dossier doit compter au maximum 25 pages (hors pièces jointes), sans photo et être adressé en un seul fichier PDF contenant toutes les pièces jointes.

TITRE (concis, précis) : Le Phosphore comme élément clé de la fertilité des sols en Agriculture Biologique : conception d'outils de diagnostic et évaluation de leviers d'action pour l'améliorer et la gérer durablement

BREF RESUME : (10 lignes au maximum) La fertilité des sols est un déterminant clé de la productivité des cultures. En Agriculture Biologique (AB), le maintien d'une disponibilité suffisante en éléments minéraux et notamment en phosphore (P) pour les cultures est un enjeu crucial et la gestion de cet élément nécessite plus d'anticipation qu'en agriculture conventionnelle (AC) où les engrais de synthèse sont autorisés. Dans les années à venir, du fait de l'épuisement des ressources minières en P et du développement soutenu de l'AB, une compétition est à prévoir entre, d'un côté, des besoins croissants en P pour maintenir la fertilité des sols et de l'autre, une offre en engrais phosphatés utilisables en AB qui devrait rester stable voire pourrait diminuer. En réponse à cet enjeu majeur, le projet PhosphoBio vise à (i) élaborer un observatoire national de la fertilité des sols en AB ; (ii) caractériser la réponse des cultures biologiques au statut P des sols ; (iii) évaluer l'effet des pratiques agricoles et du développement de l'AB sur ce statut P et (iv) adapter au contexte de l'AB des outils et référentiels pour le diagnostic de la fertilité P des sols et pour en prévoir l'évolution. MOTS CLES : (5 au maximum) Phosphore – Fertilité – Agriculture Biologique - Diagnostic - Durabilité ORGANISME CHEF DE FILE : Nom : Arvalis Institut du Végétal Adresse : 3, Rue Joseph et Marie Hackin, 75116 PARIS Téléphone : 01 44 31 10 00 Mail (où sera adressée la décision du ministre) : g.vericel@arvalis.fr CHEF DE PROJET : Nom et prénom : Véricel Grégory Organisme employeur : ARVALIS Institut du végétal Adresse : Station inter-instituts - 6 chemin de la côte vieille - 31450 BAZIEGE Téléphone : 05 62 71 79 13 Mail : g.vericel@arvalis.fr Le chef de projet pilote-t-il d'autres projets financés par le CASDAR et si oui, lesquels ? NON

I- PRESENTATION GENERALE DU PROJET I.1. Objectifs poursuivis Les objectifs de ce projet sont (i) de faire un état des lieux de la fertilité des sols en systèmes de grandes cultures et polyculture-élevage en AB à l'échelle nationale avec un focus particulier sur le P, (ii) de quantifier la réponse du rendement des cultures conduites en AB au statut P des sols, (iii) de prévoir l'évolution du statut P des sols en fonction des pratiques des agriculteurs à l'échelle de la parcelle et, dans le contexte actuel d'expansion de l'AB, à l'échelle d'un territoire et (iv) de doter agriculteurs et conseillers d'outils, de méthodes de diagnostic et de référentiels leur permettant de mieux anticiper les problèmes de fertilité des sols conduits en AB. Ces travaux, conduits prioritairement en AB seront re-mobilisables pour

les systèmes bas intrants conventionnels. I.2. Les enjeux et la motivation des demandeurs

Longtemps considéré en AB comme une préoccupation secondaire par rapport aux questions de nutrition azotée et de gestion des adventices, le phosphore (P) est de plus en plus identifié comme un facteur limitant. A l'échelle mondiale, environ 70% des terres cultivées, aussi bien en sols acides qu'en sols calcaires, sont concernées par un niveau de P déficitaire, faisant des recherches sur cet élément un enjeu majeur dans le domaine de la nutrition des plantes (Scholz et al., 2019). La demande sociétale croissante pour des produits issus de l'AB (+16% de croissance du marché français entre 2017 et 2018) incite de plus en plus d'agriculteurs à se convertir à ce mode de production (Agence Bio, 2019). Face à cet engouement et compte tenu de la raréfaction des sources de P pour fertiliser les sols (épuisement des gisements miniers de roches sédimentaires phosphatées (Van Vuuren et al., 2010), et de la forte concurrence pour les engrais organiques amenée à s'amplifier avec l'arrêt de l'utilisation en AB de fientes de volailles et de lisiers de porcs d'origine industrielle à partir de 2021 (ITAB, 2019), il pourrait devenir de plus en plus difficile de compenser les flux de P sortants (P des grains voire des pailles exporté à la récolte), provoquant ainsi une érosion de la fertilité des sols à moyen ou long terme (Fontaine et al., 2019). Disposer d'outils d'évaluation, de diagnostic et de pronostic relatifs au statut P des sols et des cultures conduits en AB représente donc un enjeu majeur pour assurer la durabilité de ce mode de production. De nombreux acteurs de la recherche et du développement agricole souhaitent aujourd'hui se doter d'un observatoire national de la fertilité des sols en AB pour en évaluer l'état actuel, en suivre les évolutions et en mesurer l'impact sur le rendement des cultures. Par ailleurs, les grandes cultures conduites en AB semblent parfois peu sensibles aux faibles teneurs de P des sols : alors que ces teneurs sont souvent plus faibles qu'en AC, elles n'affectent pas ou peu le rendement. Parmi les hypothèses envisagées pour expliquer cette absence de réponse, il y a le fait que les seuils de réponse, basés sur l'analyse de terre et utilisés actuellement pour le diagnostic, ont été obtenus en système conventionnel conduits avec des niveaux de nutrition azotée non limitants et sont généralement sécuritaires par excès. Dans ces conditions, la demande en P des cultures se trouve largement supérieure à ce qu'elle est en système AB où les apports de N sont significativement inférieurs et où des besoins en P des couverts peuvent plus facilement être satisfaits par une offre du sol moindre. Dès lors, il est légitime de s'interroger sur la pertinence d'utiliser ces référentiels dans le contexte de l'AB pour lequel leur validité n'a pas été démontrée (Fontaine et al., 2019). Une autre hypothèse explicative serait que l'AB préserve le fonctionnement biologique des sols, ce qui assurerait une meilleure disponibilité du P pour les plantes et leur permettrait de mieux tolérer de faibles teneurs en P des sols que les cultures conduites en AC. Il paraît important de vérifier ces deux hypothèses qui soulignent que les mécanismes régissant la disponibilité du P des sols conduits en AB sont encore mal connus. Ces hypothèses suggèrent également qu'un diagnostic basé sur la seule analyse de terre est insuffisant voire peu adapté au raisonnement de la fertilisation P en AB. A ce titre, d'autres indicateurs comme les indices de nutrition des plantes, qui rendent compte des éléments absorbés par les cultures, semblent être une piste intéressante d'autant plus qu'ils pourraient permettre de hiérarchiser la contribution relative des éléments P, N et K à la productivité des cultures (Jouany et Valé, 2017). Par ailleurs, dans un contexte de développement de l'AB, il est important de fournir aux agriculteurs et à leurs conseillers des outils permettant de juger de l'impact des pratiques culturales sur le statut P de leurs sols, et sur sa biodisponibilité pour les plantes. La gestion de la fertilité P en AB nécessite davantage d'anticipation qu'en AC où, une carence peut être assez rapidement corrigée par l'utilisation d'engrais phosphatés de synthèse qui contiennent du phosphore en très grande partie

biodisponible. De ce fait, il est primordial d'améliorer le diagnostic avant même de proposer des solutions ou des leviers d'actions pour agir sur la fertilité P des sols. La réalisation de bilans d'entrées et de sorties de P dans les systèmes AB est essentielle pour estimer la vitesse de stockage ou de déstockage de cet élément et décider de la fréquence des apports d'engrais et de leur quantité, à condition pour cela de disposer de références adaptées à l'AB (notamment au sujet de la valeur fertilisante des engrais organiques). D'autres leviers comme l'utilisation de cultures intermédiaires qui pourraient jouer un rôle « d'ascenseur à P » en remobilisant du P dans les horizons de sols profonds et en le restituant en surface sous une forme soluble plus accessible aux cultures suivantes semblent intéressants (Hallama et al. 2019) mais leurs effets réels restent encore peu chiffrés. PhosphoBio se propose d'acquérir de nouvelles références sur cet impact. Face à une compétition probable pour l'accès aux sources de P utilisables en AB qui sont limitées (effluents d'élevage qui sont cependant peu accessibles aux systèmes céréaliers, engrais organiques du commerce hors fientes de volailles et lisiers de porcs issus d'élevages industriels dont l'utilisation en AB va être exclue à partir de 2021 et engrais à base de roches phosphatées issues de ressources minières non renouvelables mais dont le P est très peu soluble), un raisonnement des pratiques à l'échelle du système de culture n'est pas suffisant. Il est également primordial de connaître les gisements de ressources en P utilisables en AB disponibles à l'échelle de territoires et d'étudier la manière optimale de les redistribuer afin de les valoriser le mieux possible tout en tenant compte de l'évolution de la demande (croissance des surfaces conduites en AB) et de l'offre (prise en compte de nouveaux gisements qui pourraient être mobilisés en AB comme, par exemple, les digestats de méthanisation ou les composts de déchets verts). De ce fait, le contexte de développement de l'AB rend primordial l'exploration de scénarios d'expansion de ce mode de production à l'échelle de territoires agricoles afin d'étudier les phénomènes de compétition pour l'accès aux ressources fertilisantes que cela peut générer et de cerner leurs effets sur le statut P des sols, afin d'anticiper les problèmes de fertilité qui risquent de se poser au monde agricole à l'avenir. En ce sens, le projet PhosphoBio répond aux objectifs du thème 1 de l'AAP CASDAR 2020 puisqu'il participe au développement de systèmes de production en rupture basés sur les principes de l'agroécologie en œuvrant : i) à la réduction de l'usage des intrants (notamment herbicides et engrais de synthèse) puisque le projet s'inscrit dans un contexte d'AB ; ii) au développement des cultures intermédiaires et des plantes de service en quantifiant l'impact de ces différents leviers sur la disponibilité en P des sols et en analysant leur intérêt pour le maintien de la fertilité des sols ; iii) à la modification et à la conception des pratiques, des systèmes, des filières qui permettront de maintenir, voire d'améliorer la compétitivité du secteur (en particulier pour les filières AB) en identifiant les scénarios de changement de pratiques les plus favorables à la préservation de la fertilité des sols dans les territoires. Ce projet s'inscrit également en partie dans le thème 2 de cet AAP par sa contribution à la transition agroécologique des exploitations. En effet, il vise à développer et mettre à disposition des agriculteurs et de leurs conseillers : - de nouveaux outils de diagnostic qui les aideront à monter en compétence dans la gestion de la fertilité des sols ; - des outils simples pour renforcer l'autonomie des exploitations agricoles en permettant de mieux tirer profit de la valeur fertilisante des effluents d'élevage tout en ménageant la fertilité des systèmes à long terme.

I.3. Présentation des actions

Le projet s'organise autour de quatre actions scientifiques et une action de coordination. L'Action 1, Caractérisation de l'état actuel de fertilité des sols en systèmes de grandes cultures et polyculture élevage biologiques, a pour objectif de constituer un observatoire de la fertilité des sols en AB qui permettra de vérifier si la baisse de fertilité des sols suspectée en AB est bien avérée. Pour cela, un réseau d'environ

200 parcelles conduites en AB, réparties sur le territoire français, issues d'exploitations de grandes cultures et de polycultureélevage sera constitué. Sur chaque parcelle, des échantillons de terre seront prélevés de manière à réaliser une caractérisation physico-chimique complète des sols. Ceci permettra également de constituer une échantillothèque mobilisable pour des projets ultérieurs. Les pratiques (rotations, fertilisations, travail du sol) et les rendements, seront également enregistrés à partir d'enquêtes individuelles. Des bilans Importations - Exportations de P sur les parcelles de cet observatoire ainsi qu'une analyse des relations entre pratiques et statut P des sols seront réalisés. L'Action 2, Estimation de l'effet du statut phosphaté des sols sur la productivité des cultures et mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité P en AB, a pour objectif d'analyser les relations entre la disponibilité en P des sols en AB, la productivité des cultures et des indicateurs de nutrition afin de construire des outils de diagnostic. Pour cela, des courbes de réponse du rendement des cultures au statut P des sols conduits en AB seront construites en conduisant des essais spécifiques sur des parcelles choisies au sein de l'observatoire. Elles seront ensuite comparées aux courbes de réponse obtenues pour les cultures conduites en AC à l'issue du projet CASDAR RIP (2007-2009) qui avait mobilisé des essais P de longue durée français. Les indices de nutrition INN, INP, INK et INS, basés sur l'analyse de végétaux (Salette et al. 1991, Jouany et Valé, 2017), seront mis en œuvre et serviront à identifier et hiérarchiser sur ces parcelles les facteurs nutritionnels limitant la productivité des cultures en AB. L'Action 3, Prévision de l'évolution du statut P des sols en fonction des pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle et des territoires, a pour objectif d'évaluer l'impact des pratiques culturales (fertilisation, couverts, travail du sol) sur le statut P des sols en AB à l'échelle de la succession culturale. Pour cela, les essais analytiques de longue durée disponibles (apports de PRO, insertion de couverts, apports d'engrais riches en P, ...) seront mobilisés, en complément d'essais annuels spécifiques mis en place au cours du projet. L'ensemble permettra de produire des références quant à l'effet des leviers agronomiques mobilisables en AB pour améliorer la disponibilité en P des sols. Cette action établira aussi des références adaptées aux systèmes AB pour la réalisation de bilans Importations - Exportations de P sur les parcelles de l'observatoire (Action 1) afin d'identifier, en fonction des pratiques, des situations de stockage / déstockage d'éléments. Enfin, différents scénarios d'expansion de l'AB seront explorés dans le cadre d'une thèse de doctorat afin d'estimer leurs effets sur la compétition pour les ressources fertilisantes et leurs conséquences sur le statut P des sols à l'échelle de territoires agricoles dans le contexte français. Pour cela, une modélisation spatialement explicite des entrées et sorties de P des sols dans les systèmes en AB et de leurs effets sur la fertilité P des sols sera réalisée, en tenant compte de l'effet des pratiques culturales sur le statut P des sols et de l'état de disponibilité de P des sols en AB (Action 1). En s'appuyant sur les résultats de l'Action 2, les conséquences en termes de rendement des cultures seront également estimées. L'Action 4, Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels, vise à rendre accessible les résultats du projet aux agriculteurs, à leurs conseillers et aux étudiants, en les intégrant dans une démarche de conseil constituée d'un diagnostic de la fertilité chimique du sol et d'un pronostic de leviers à mettre à œuvre. Pour cela une « calculatrice Fertilisation – Exportations » sera développée et mise en ligne en accès gratuit afin de calculer des bilans P à l'échelle de la rotation et identifier des pratiques conduisant au stockage ou au déstockage de P. De plus, un guide de diagnostic de la fertilité chimique en AB sera élaboré à partir des résultats de ce projet. Ces deux outils développés en AB pourront également être remobilisés dans d'autres contextes et notamment dans des systèmes « bas intrants ». Enfin, les acquis du projet seront mis à disposition des étudiants par des actions spécifiques d'enseignement. L'Action 0,

concernant l'animation transversale et la coordination du projet permettra d'atteindre les objectifs fixés et d'assurer la cohérence du projet grâce à une communication efficace entre l'ensemble des partenaires.

I.4 Partenariats

I.4.1. Partenaires retenus

Les partenaires destinataires de financements CASDAR sont les suivants : Arvalis-Institut du végétal (chef de file du projet), INRAE (représenté par les UMR ISPA à Bordeaux et AGIR à Toulouse), le laboratoire d'analyse de sols et de végétaux Auréa AgroSciences, le Centre de Recherche et d'Expérimentation en Agriculture Biologique (CREABio), la Chambre d'agriculture de Région Île de France (CAR ÎdF), la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire (CRA PL) et l'établissement d'enseignement supérieur Bordeaux Sciences Agro. D'autres partenaires techniques, non financés par le CASDAR seront néanmoins associés au projet : Ainsi, la Chambre d'agriculture de l'Aveyron, deux lycées agricoles – l'EPL de Saint Affrique (12) et l'EPLEFPA de Chartres (28) - et Terres Inovia viendront en appui notamment pour identifier des parcelles conduites en AB susceptibles d'intégrer l'observatoire de la fertilité des sols (Action 1) ce qui permettra de renforcer un maillage national. Dans un souci d'approche à l'échelle du système de culture, Terres Inovia sera également membre du comité de pilotage du projet. Enfin, l'Unité Expérimentale de l'INRAE d'Auzeville, partenaire qui n'est pas financé, mettra à disposition du projet PhosphoBio son dispositif de longue durée P. I.4.2.

I.4.2. Préciser les modalités retenues pour le partenariat

Le partenariat se caractérise par sa très forte complémentarité en termes de compétences techniques (enquêtes de pratiques agricoles, expérimentation, analyse de terre et de végétaux, modélisation, formation, conseil agricole) et d'échelles de travail (de la plante au territoire en passant par la parcelle agricole). Il intègre des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens provenant d'instituts techniques et de recherche, d'organismes de conseil, de laboratoire d'analyses et du développement, et des enseignants de l'enseignement technique et supérieur. Le partenariat sera rendu opérationnel par la constitution d'un comité technique chargé de la coordination et de la mise en œuvre opérationnelle des différentes actions du projet et d'un comité de pilotage ouvert à des experts externes qui pourront donner leur avis sur les orientations à donner au projet, qui se réuniront chaque année. De plus, ce projet a été labellisé par le RMT BOUCLAGE : Recyclage, Fertilisation et Impacts environnementaux (dont ARVALIS Institut du végétal, INRAE, Auréa AgroSciences, la Chambre d'agriculture des Pays de la Loire et l'EPLEFPA de Chartres sont membres) : des représentants du RMT participeront aux réunions du comité de pilotage du projet, renforçant ainsi les interactions avec ce groupe de travail tout au long du projet (Cf. Annexe 5).

I.4.3. Evolution du partenariat

Les partenaires destinataires de financement CASDAR dans la version actuelle du projet sont les mêmes que lors de la manifestation d'intérêt. De nouveaux partenaires techniques ont toutefois fait part de leur intérêt pour participer au projet PhosphoBio sans prétendre à un financement CASDAR. C'est le cas de la Chambre d'agriculture d'Aveyron et du lycée agricole La Cazotte à Saint-Affrique (12), tous deux membres de la plateforme AgroEcoLab, qui apporteront leur contribution à l'identification de parcelles lors de la construction de l'observatoire de la fertilité des sols (Action 1) et au test de la méthode de diagnostic de fertilité adaptée à l'AB (Tâche 4.2). Ils joueront également un rôle important dans la diffusion des résultats du projet auprès des agriculteurs de leurs réseaux. La plateforme AgroEcoLab, portée par la Chambre d'agriculture d'Aveyron et hébergée sur la ferme du lycée Agricole La Cazotte, regroupe plusieurs partenaires dont l'INRAE de Toulouse dans le but d'accompagner les éleveurs du territoire Sud Aveyron dans une approche agroécologique afin d'améliorer les performances de leurs systèmes. La problématique de la gestion de la fertilité des sols notamment vis-à-vis du P figure parmi les enjeux prioritaires identifiées par cette structure et pour lesquels des actions













seront financées grâce au budget dont elle dispose. A l'inverse, dans un souci de recentrer le terrain d'études sur un nombre plus restreint de territoires, le Lycée Agricole du Valentin (26) et les chambres régionales d'agriculture de Bourgogne-Franche-Comté, Auvergne-Rhône-Alpes, pressentis comme partenaires non financés du projet, ne prendront finalement pas part au partenariat. I.4.4. Inscription éventuelle de ce projet au sein d'un projet plus vaste présenté dans un autre appel à projet. Le projet PhosphoBio ne s'inscrit pas à proprement parler dans un autre projet. Toutefois, des liens avec le projet FranceAgriMer Ref Diag PK (déposé par Bordeaux Sciences Agro) pourront être envisagés si ce dernier est accepté. Ce projet est complémentaire au projet PhosphoBio dans le sens où il vise à rénover le référentiel d'interprétation des analyses de terre utilisé pour le diagnostic de la fertilité PK des sols en fonction du niveau d'exigence des cultures. Une fois ce nouveau référentiel validé, il pourrait ainsi être testé sur des parcelles de l'observatoire du projet PhosphoBio et venir enrichir les outils et références mobilisés dans la construction d'une méthode de diagnostic de fertilité (Tâche 4.2). De plus, les travaux d'évaluation de l'impact de différents scénarios d'expansion de l'AB sur les flux de P et sur le rendement des cultures (tâche 3.3) seront conduits dans le cadre d'une thèse dirigée par Bordeaux Sciences Agro et INRAE Bordeaux qui pourra s'appuyer sur les résultats des autres actions du projet. Le financement de cette thèse ne bénéficiera pas directement de l'aide apportée par le CASDAR puisque le financement est déjà entièrement sécurisé (50% INRAE et 50% Arvalis). Enfin, PhosphoBio pourra constituer un socle pour des investigations futures sur d'autres thématiques importantes pour la durabilité des systèmes en AB telles que la fertilité physique et la fertilité biologique des sols. A ce titre, les projets CASDAR MicroBioTerre (porté par Arvalis) et ADEME AGRO-ECO SOL (porté par Auréa AgroSciences) pourront fournir des indicateurs de microbiologie des sols mobilisables dans de nouveaux projets à venir. Ceux-ci pourraient alors s'adosser sur l'observatoire de la fertilité des sols dont la caractérisation initiale des parcelles (Action 1 du projet PhosphoBio) serait mise à leur disposition, permettant ainsi d'assurer sa pérennité.

Annexe 2 : Fertilisants organiques utilisables en AB selon le règlement (CE) n° 889/2008

Tableau 1 : Les fertilisants organiques listés dans l'annexe I du règlement (CE) n° 889/2008³ :

Dénomination	Description, exigences en matière de composition, conditions d'emploi
Produits composés ou produits contenant uniquement les matières reprises dans la liste ci-dessous : Fumier	Produit constitué par le mélange d'excréments d'animaux et de matière végétale (litière) Provenance d'élevages industriels interdite
Fumier séché et fiente de volaille déshydratée	Provenance d'élevages industriels interdite
Compost d'excréments d'animaux solides, y compris les fientes de volaille et les fumiers compostés	Provenance d'élevages industriels interdite
Excréments d'animaux liquides	Utilisation après fermentation contrôlée et/ou dilution appropriée Provenance d'élevages industriels interdite
Déchets ménagers compostés ou fermentés	Produit obtenu à partir de déchets ménagers triés à la source, soumis à un compostage ou une fermentation anaérobie en vue de la production de biogaz ⁴ suivie d'un compostage. Uniquement déchets ménagers végétaux et animaux. Doit être produit dans un système de collecte fermé et contrôlé, accepté par l'Etat membre. Teneurs maximales en mg/kg de matière sèche : cadmium : 0,7 ; cuivre : 70 ; nickel : 25 ; plomb : 45 ; zinc : 200 ; mercure : 0,4 ; chrome (total) : 70 ; chrome (VI) : 0.
Tourbe	Utilisation limitée à l'horticulture (maraîchage, floriculture, arboriculture, pépinière)
Compost de champignonnières	La composition initiale du substrat doit être limitée à des produits de la présente annexe.
Déjection de vers (lombricompost) et d'insectes	
Guano	
Mélange composté ou fermenté de matières végétales	Produit obtenu à partir de mélanges de matières végétales, soumis à un compostage ou une fermentation anaérobie en vue de la production de biogaz
Produits ou sous-produits d'origine animale mentionnés ci-dessous : Farine de sang Poudre de sabot Poudre de corne Poudre d'os ou poudre d'os dégelatinisé Farine de poisson Farine de viande Farines de plume, de poils et chiquettes Laine Fouurrure Poils Produits laitiers	Teneur maximale de la matière sèche en chrome (VI), en mg/kg : 0
Produits et sous-produits organiques d'origine végétale pour engrais	Par exemple : farine de tourteau d'oléagineux, coque de cacao, radicules de malt
Algues et produits d'algues	Obtenus directement par : i) des procédés physiques, notamment par déshydratation, congélation et broyage ; ii) extraction à l'eau, ou avec des solutions aqueuses acides et/ou basiques ; iii) fermentation.
Sciures et copeaux de bois	Bois non traités chimiquement après abattage
Ecorces compostées	Bois non traités chimiquement après abattage

Guide sur les stades de croissance du soja

VE Levée	VC Feuille unifoliée	V1 Feuille trifoliée	V2 à V12	R1 Début de la floraison	R2 Pleine floraison
Apparition des cotylédons à la surface du sol.	Premières feuilles unifoliées déroulées.	Premières feuilles trifoliées déroulées.	Deuxième feuille trifoliée déroulée, troisième feuille trifoliée déroulée, etc.	Présence d’au moins une fleur épanouie (mauve ou blanche) à n’importe quel nœud.	Présence d’une fleur épanouie à l’un des deux nœuds supérieurs de la tige principale.
					
R3 Premières gousses	R4 Remplissage des gousses	R5 Premières graines	R6 Grossissement des graines	R7 Début - période de maturité	R8 Pleine maturité
Présence de gousses d’environ 6 mm de long à l’un des quatre nœuds supérieurs de la tige principale.	Présence de gousses d’environ 20 mm de long à l’un des quatre nœuds supérieurs de la tige principale.	Présence de graines d’environ 3 mm dans une gousse à l’un des quatre nœuds supérieurs de la tige principale.	Des graines vertes remplissent la cavité d’une gousse à l’un des quatre nœuds supérieurs de la tige principale.	La plupart des gousses sont jaunes et au moins une gousse de la tige principale a atteint sa couleur à maturité (brun roux).	95 % des gousses ont atteint leur couleur à maturité (brun roux).
					

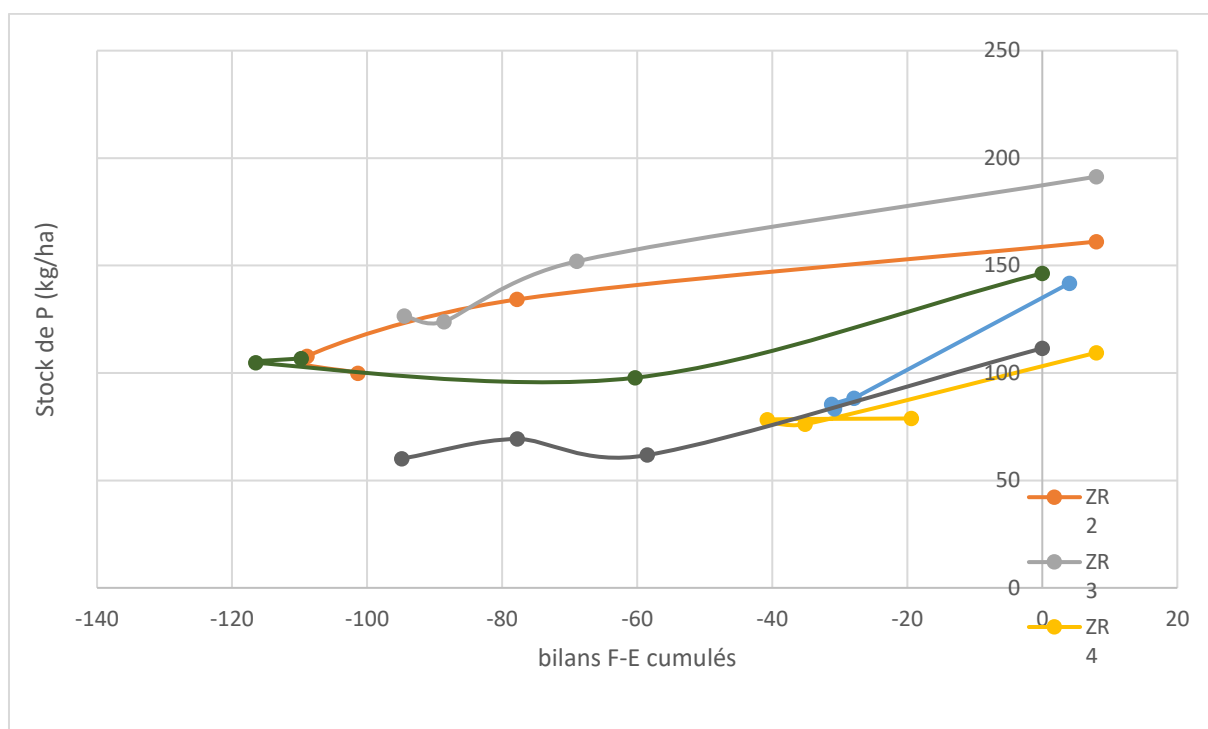
Document traduit et adapté par le ministère de l’Agriculture, des Pêches et de l’Alimentation du Québec avec l’autorisation de Manitoba Pulse & Soybean Growers (mai 2017).

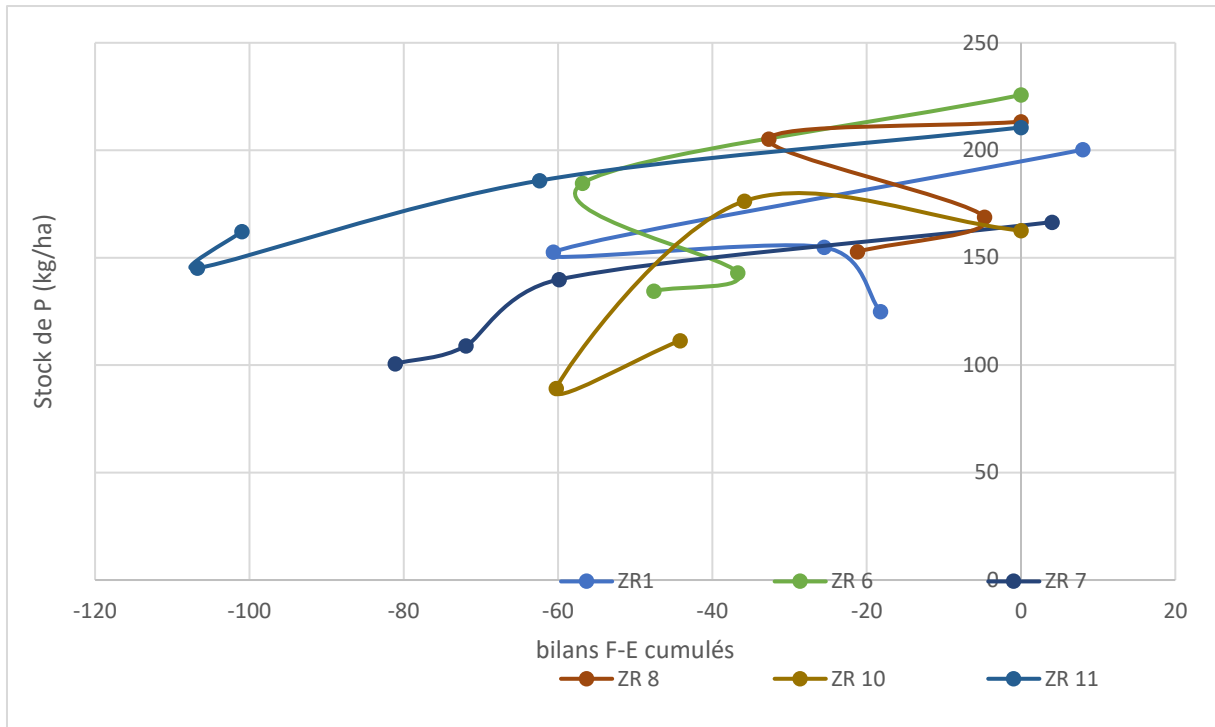
Annexe 4 : Exemples de tables des exports / apports et bilans F-E construites durant mon stage

identifiants				export					
ZR	NOC	Cycle	Culture	Date	Maturité	maturité (colone ou "DM" remplacer par 0)	Maturité	P exporté	tot p exporté
				Recolte ZR	grain	grain	grain	grain	par zr
				jj/mm/aa	p%DM	p%DM	DM kg/ha	Kg/Ha	Kg/Ha
ZR01	1	1999/2000	TOU			0,00		0,00	
ZR01	2	2000/2001	SOJ			0,00		0,00	
ZR01	3	2001/2002	BTH+TV	02/07/02	DM	0,00	5036,40	0,00	
ZR01	4	2002/2003	SOJ	16/09/03	0,59	0,59	989,90	5,84	
ZR01	5	2003/2004	ORH	24/06/04	0,37	0,37	3361,40	12,44	
ZR01	6	2004/2005	SOJ	12/10/05	0,63	0,63	2420,90	15,25	
ZR01	7	2005/2006	BTH	30/06/06	0,36	0,36	3024,80	10,89	
ZR01	8	2006/2007	SOJ	27/09/07	0,61	0,61	4381,10	26,72	
ZR01	9	2007/2008	BTH	03/07/08	0,32	0,32	4539,70	14,53	
ZR01	10	2008/2009	SOJ	02/10/09	0,51	0,51	2317,10	11,82	
ZR01	11	2009/2010	BTH	06/07/10	0,38	0,38	4198,10	15,95	
ZR01	12	2010/2011	SOJ	22/09/11	0,61	0,61	2826,30	17,24	
ZR01	13	2011/2012	BTH	02/07/12	0,46	0,46	4146,03	19,13	
ZR01	14	2012/2013	SOJ (non semé)			0,00		0,00	
ZR01	15	2013/2014	BTH+TV	16/07/2014	0,44	0,44	2121,84	9,40	

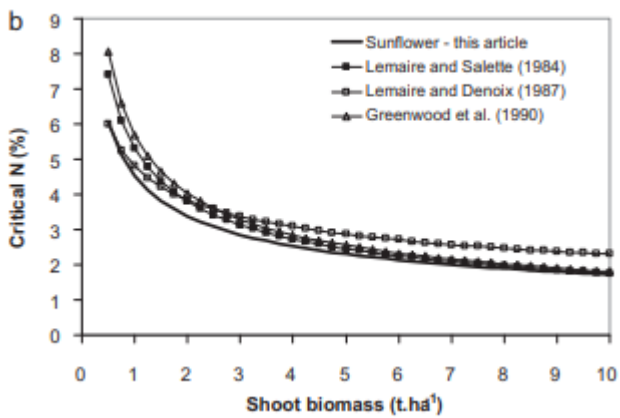
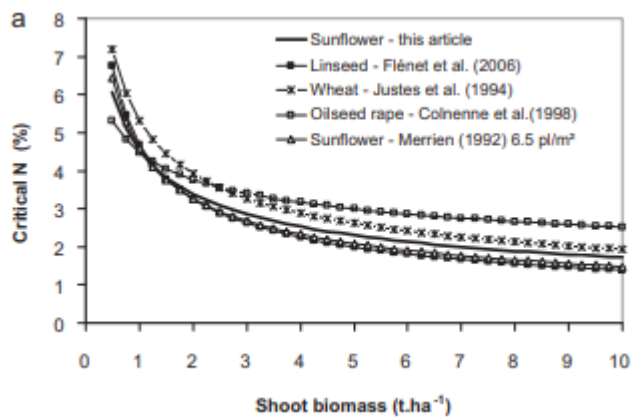
apport									colone de vérification entre différence colone L-J vs calcul en colone P	bilan		
Fertilisant	fertilisant	Fertilisant	Fertilisant	Fertilisant	Fertilisant	Fertilisant	tot p apporté	total par zr		bilan annuel F-E	cumulé	total / ZR
Qté P tot kg/ha	Date 1er apport jj/mm/aa	Qté 1er apport kg/ha	Qté 1er apport P tot kg/ha	Date 2ème apport jj/mm/aa	Qté 2ème apport kg/ha	Qté 2ème apport P tot kg/ha	qté 1 er + 2ème apport en N Kg/Ha	Qté P tot kg/ha				
										0,00	0,00	
										0,00	0,00	
8,0	06/03/2002	400	4	29/03/2002	400	4	8			8,00	8,00	
0,0	04/03/2004	400	0				0			-5,84	2,16	
							0			-12,44	-10,28	
2,5	31/03/2006	300	1,26	10/05/2006	300	1,26	2,52			-15,25	-25,53	
							0			-8,37	-33,90	
							0			-26,72	-60,62	
23,6	03/04/2008	450	23,58				23,58			9,05	-51,57	
							0			-11,82	-63,39	
65,3	24/02/2010	700	39,76	07/04/2010	450	25,56	65,32			49,37	-14,02	
0,0	03/05/2011	150	0				0			-17,24	-31,26	
24,9	05/03/2012	1250	24,875				24,875			5,74	-25,52	
							0			0,00	-25,52	
40,0	20/03/2014	1000	40				40			30,60	5,08	

Annexe 5 : Relation entre le bilan F-E et le stock de P sur le reste des ZR de la Hourre. Sur cette figure il est possible d'apprécier les stocks de P en fonction des bilan F-E, de 2002 à 2017. Les quantités en ordonnée et en abscisse sont exprimées en kg/ha





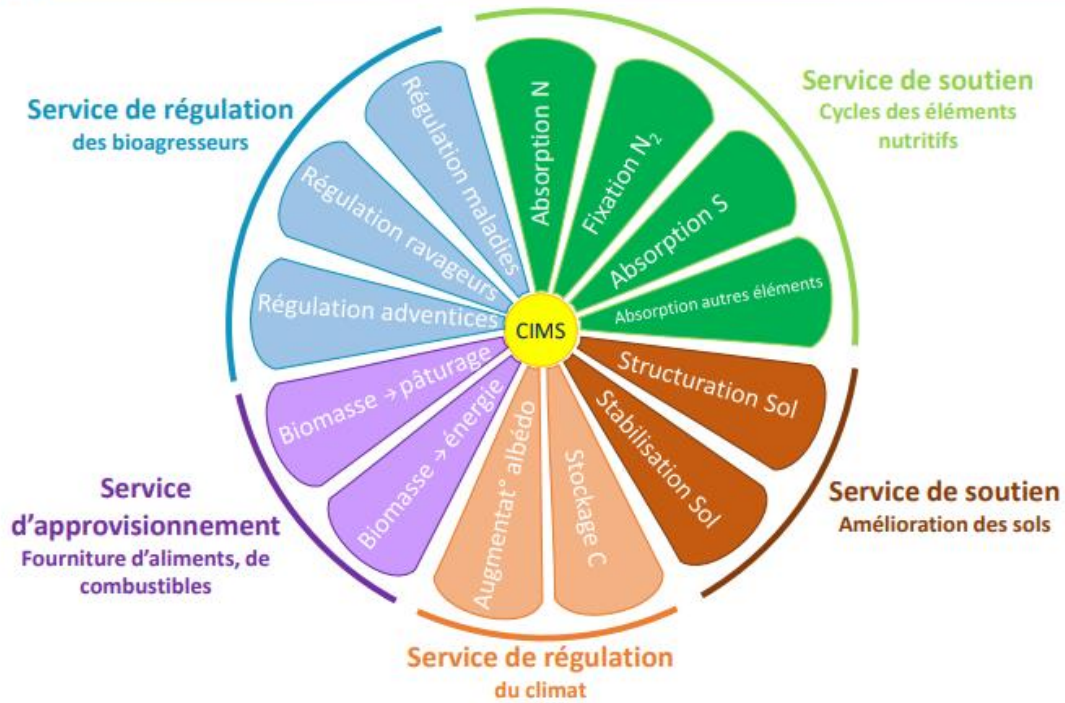
Annexe 6 : Courbe de dilution pour quelques grandes cultures – Philippe Debaeke 2012



Annexe 7 : INN et INP pour le Soja de la Hourre

identifiants									
ZR	NOC	Cycle	Culture	Nopt	INN	Popt Duru	Popt Ziadi	INP Duru	INP Ziadi
				Floraison	Floraison	Floraison	Floraison	Floraison	Floraison
				%		%			
ZR01	16	2014/2015	SOJ	3,90	0,71	0,33	0,43	0,51	0,39
ZR02	17	2015/2016	SOJ	4,92	0,35	0,26	0,33	0,83	0,66
ZR03	17	2015/2016	SOJ	4,64	0,30	0,24	0,30	1,02	0,82
ZR08	18	2016/2017	SOJ	5,07	0,50	0,31	0,40	0,61	0,47

Bouquets de services attendus des CIMS



22 octobre 2020

Webinaire IRD en Occitanie : Grandes Cultures

Annexe 9 : P_Olsen sur l'essai P en 2016. Mesures effectuées sur les 30 premiers cm du sol.

parcelle	traitements	P_olsen 0-30 (g/Kg)	rdt total vesce + moutard
01	0	0,007	0,44
06	0	0,006	0,64
12	0	0,004	0,82
15	0	0,006	1,26
17	0	0,004	0,56
22	0	0,006	0,65
28	0	0,010	0,64
31	0	0,007	0,96
04	1	0,016	1,29
07	1	0,014	1,79
10	1	0,010	1,75
13	1	0,010	1,75
20	1	0,015	1,44
23	1	0,014	1,68
26	1	0,013	1,22
29	1	0,013	1,83
02	2	0,029	2,21
05	2	0,034	1,15
11	2	0,013	2,78
16	2	0,015	1,79
18	2	0,029	2,03
21	2	0,027	2,39
27	2	0,019	1,40
32	2	0,018	1,30
03	4	0,065	2,69
08	4	0,065	1,50
09	4	0,049	2,80
14	4	0,033	2,25
19	4	0,069	1,99
24	4	0,059	2,86
25	4	0,061	2,06
30	4	0,038	2,14

Annexe 10 : Schéma organisationnel de prélèvements

