



ISARA-Lyon
23, rue Jean Baldassini
69364 LYON CEDEX 07

Parc Naturel Régional du Verdon
Domaine du Valx
04360 Moustiers Sainte Marie

La Qualité des sols sur le plateau de Valensole :

Étude de l'impact de pratiques agricoles sur la qualité du sol en parcelle de
lavandin

Mémoire de fin d'études
45^{ème} promotion (2012-2017)
27 septembre 2017

Enseignant responsable :
ROUME Anthony

CHIGNIER-RIBOULON Maxime
Elève ingénieur ISARA-Lyon

Directeur de Mémoire :
PUYBERTHIER Perrine

Ce document ayant été réalisé par des Elèves-ingénieurs de l'ISARA-Lyon dans le cadre d'une convention avec le Parc Naturel Régional du Verdon, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine ISARA-Lyon.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 1 |
| 1) Etat des connaissances | 4 |
| 1.1) Sol et services écosystémiques | 4 |
| 1.2) La qualité du sol, une définition multifonctionnelle | 5 |
| 1.3) Les indicateurs de la qualité du sol | 7 |
| 1.3.1) Les indicateurs physiques..... | 7 |
| 1.3.2) Les indicateurs chimiques | 7 |
| 1.3.3) Les indicateurs biologiques | 9 |
| 1.3.3.1) Les microorganismes..... | 10 |
| 1.3.3.2) Les nématodes | 11 |
| 1.3.4) La matière organique : un élément à l'interface des trois composantes de la qualité du sol | 12 |
| 1.4) Les impacts des pratiques agricoles sur la qualité du sol..... | 13 |
| 1.4.1) L'enherbement | 14 |
| 1.4.2) La diversité des assolements et la longueur des rotations | 14 |
| 1.4.3) Le travail du sol..... | 15 |
| 1.4.4) L'apport d'amendements organiques | 16 |
| 1.5) Influence des pratiques agricoles et de la qualité du sol sur l'état sanitaire d'une culture | 16 |
| 2) Matériels et méthodes | 18 |
| 2.1) Site de l'étude..... | 18 |
| 2.1.1) Présentation générale | 18 |
| 2.1.1.1) Le climat | 18 |
| 2.1.1.2) Les types de sol d'un point de vue pédologique..... | 19 |
| 2.1.2) Présentation du réseau Sol de REGAIN | 20 |
| 2.1.3) Présentation des parcelles étudiées | 20 |
| 2.2) Méthode : une démarche en 6 phases..... | 21 |
| 2.2.1) Phase 1 : État des lieux de la qualité des sols..... | 21 |
| 2.2.1.1) Les lots d'analyses et le test bêche | 21 |
| 2.2.1.2) Localisation de la zone de prélèvement sur la parcelle | 22 |
| 2.2.1.3) La méthode d'échantillonnage..... | 23 |
| 2.2.1.4) Prélèvements, conditionnements et envoi des échantillons de sol..... | 24 |
| 2.2.2) Phase 2 : Enquête technique sur les pratiques agricoles | 25 |
| 2.2.3) Phase 3 : Mesure de l'état sanitaire des plantiers de lavandin..... | 25 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.4) | Phase 4 : Sélection d'indicateurs et préparation d'un tableau de codage..... | 26 |
| 2.2.4.1) | Sélection des indicateurs de sol | 26 |
| 2.2.4.2) | Sélection de pratiques agricoles | 27 |
| 2.2.4.3) | Préparation d'un tableau de codage..... | 27 |
| 2.2.5) | Phase 5 : Analyse des données, traitements statistiques | 30 |
| 2.2.5.1) | Analyse multivariée effectuée pour répondre à la question 1 | 31 |
| 2.2.5.2) | Analyse multivariée effectuée pour répondre à la question 2 | 32 |
| 3) | Résultats de l'étude..... | 33 |
| 3.1) | Analyse univariée : description générale du jeu de données | 33 |
| 3.2) | Analyse bivariée : aperçu des relations entre indicateurs de sol et regroupement de variables | 35 |
| 3.3) | Analyse multivariée | 36 |
| 3.3.1) | Résultats liés à la question 1 : Quels sont les liens entre les types de sols et les indicateurs de sol ?..... | 36 |
| 3.3.1.1) | Classification des types de sol..... | 36 |
| 3.3.1.2) | Aperçu général de l'organisation des indicateurs dynamiques par rapport aux groupes de sol via l'utilisation de plans factoriels..... | 39 |
| 3.3.1.3) | Effet des différents groupes de sol sur les indicateurs dynamiques du sol..... | 40 |
| 3.3.2) | Résultats liés à la question 2 : Quels sont les liens entre pratiques agricoles et les indicateurs de sol ?..... | 44 |
| 3.3.2.1) | Classification en groupe de pratiques..... | 44 |
| 3.3.2.2) | Aperçu général de l'organisation des indicateurs dynamiques par rapport aux groupes de pratiques via l'utilisation de plans factoriels..... | 49 |
| 3.3.2.3) | Effet des différents groupes de pratiques sur les indicateurs dynamiques du sol .. | 49 |
| 3.3.3) | Résultats liés à la question 3 : Quels sont les liens entre pratiques agricoles et les indicateurs de sol ?..... | 54 |
| 4) | Discussion..... | 54 |
| 5) | Conclusion | 57 |
| 5.1) | Conclusion de l'étude..... | 57 |
| 5.2) | Bilan personnel..... | 58 |
| 6) | Qualité de vie au travail et Management | 59 |
| | Bibliographie | 61 |
| | Liste des tableaux et figures..... | 68 |
| | ANNEXES..... | 70 |
| | Annexe 1 : tableau présentant la liste des indicateurs inhérents et dynamiques considérés et les abréviations associées..... | 1 |

| | |
|--|----|
| Annexe 2 : Carte de la région des Alpes-de-Haute-Provence avec la localisation du plateau de Valensole (Ramseyer et al., 2011) | 2 |
| Annexe 3 : photographie aérienne du plateau de Valensole avec le réseau de parcelles étudié (source : Géoportail)..... | 2 |
| Annexe 4 : photographies de différents sols étudiés sur le plateau de Valensole | 3 |
| Annexe 5 : schéma chronologique de la méthodologie employée dans cette étude..... | 4 |
| Annexe 6 : Tableau d'interprétation des résultats du test bêche..... | 5 |
| Annexe 7 : schémas des scénarios de prélèvements envisagés lors de l'étude | 5 |
| Annexe 8 : schémas du dispositif d'échantillonnage retenu en configuration enherbée et non enherbée | 6 |
| Annexe 9 : schéma du dispositif d'échantillonnage en cas d'enherbement inter-rang fin (environ 50 cm)..... | 6 |
| Annexe 10 : guide d'entretien directif utilisé lors des enquêtes des 22 agriculteurs du réseau | 7 |
| Annexe 11 : Exemple d'une fiche d'ITK d'une culture de blé de 2015, complétée suite à un entretien..... | 16 |
| Annexe 12 : photos de lavandins âgés de 2 ans (il ne s'agit pas de plantiers) à 3 stades sanitaires différents | 17 |
| Annexe 13 : tableau de synthèse des pratiques agricoles exercées sur les 34 parcelles. Les encadrés rouges mettent en évidence les pratiques sélectionnées pour la typologie..... | 18 |
| Annexe 14 : tableau avec le nom des variables liées aux pratiques agricoles sélectionnées et leur signification | 21 |
| Annexe 15 : tableau avec les modalités de chaque variable et leur signification..... | 21 |
| Annexe 16 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68. | 22 |
| Annexe 17 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68. | 23 |
| Annexe 18 : tableau des 34 parcelles et leur groupe de sol et de pratiques associées..... | 24 |
| Annexe 19 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68. | 25 |
| Annexe 20 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68. | 26 |
| Annexe 21 : tableau des résultats des mesures de l'état sanitaire des plantiers | 27 |

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement ma maîtresse de stage Perrine Puyberthier pour son enthousiasme, sa disponibilité, son encadrement et l'expérience qu'elle m'a apportée tout au long de ce stage.

Un grand merci à toutes les personnes travaillant au Parc Naturel du Verdon pour leur accueil et leur bonne humeur.

Je remercie chaleureusement Claire Marsden, Sébastien Jézel, Olivier Aznar pour leurs conseils en analyses statistiques et sur le logiciel R qui m'aura donné du fil à retordre. Merci pour vos temps d'échanges.

Je remercie également tous les agriculteurs du projet pour le temps consacré à mes entretiens et leurs sympathies.

Mes remerciements vont également à Cécile Villenave et Xavier Salducci pour leurs aides sur les analyses de sol. Et puis un franc merci à Jean-Claude Lacassin, Nora Dermech, Coralie Welsh, Guillaume, pour leurs expertises et l'entraide apportée sur le terrain.

Merci également aux membres du CRIEPPAM pour m'avoir fait découvrir leur lieu de travail, leurs expérimentations sur le lavandin, et pour leur disponibilité à mes questions. Merci à Victor Galland pour son aide dans la réalisation des entretiens.

Un merci à ma voisine de bureau Elodie Gahon pour sa bonne humeur, sa gentillesse et ses conseils.

Et puis au delà du stage je tenais à faire un clin d'oeil à mes fidèles amis Matuz, Benji, Claude, Adri, Elo, Sarah, Cyril, Bruno, Marion, Robin, Lolo, Marjo, ainsi que Camille B, Jéjé, Dodo, Roxy, Xavier et Daphnouch, et mes camarades de promotion.

Je n'oublie pas non plus de remercier Camille G. pour son aide précieuse et les merveilleux moments passés à ses côtés durant ce stage, à la découverte du Verdon.

Et puis un immense merci à ma famille : mon père, pour son suivi régulier, ma mère, mon frère, ma sœur, et Momo pour leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements tout au long de ce stage.

Pour finir, je voudrais apporter mon soutien à Laurence pour les épreuves difficiles qu'elle surmonte et qui m'ont beaucoup affectées.

Tables des abréviations

AbondanceN : Abondance totale des nématodes

AB : Agriculture biologique

ACP : Analyse en Composantes Principales

ACM : Analyse des Correspondances Multiples

Azote total : Ntotal

BM : Biomasse microbienne

Ca : Calcium

CEC : Capacité d'échange cationique

Cmin : Vitesse de minéralisation du carbone

Corg : Carbone organique total

DM : Désherbage mécanique

DM + DC : Désherbage mécanique et chimique

EI : Indice d'enrichissement

ITK : Itinéraire technique

K : Potassium

Mg : Magnésium

Na : Sodium

Nmin : Vitesse de minéralisation de l'azote

MO : Matière organique

MOV : Matière organique vivante

MOS : Les matières organiques du sol

Shannon : indice de Shannon

SI : indice de structure

TCS : Techniques culturales simplifiées

TSL : Techniques sans labour

Introduction

Le Plateau de Valensole, situé dans le département des Alpes de Haute-Provence, est un territoire rural agricole aux multiples enjeux. Une des principales cultures du plateau est le lavandin¹. Avec 7300 hectares en 2009 et plus de 59,4% de la production nationale (Agreste, 2010), le département est le premier producteur de lavandins (figure 1, p. 3). Cette plante à parfum, en majorité commercialisée sous forme d'huile essentielle, est une source d'activité économique locale, aussi bien agricole que touristique.

Néanmoins, le territoire rencontre aujourd'hui des problèmes majeurs tels que la pollution des eaux par les nitrates et les produits phytosanitaires, la diminution de la fertilité des sols et leur plus grande sensibilité à l'érosion, le dépérissement de la culture du lavandin, ou encore la variabilité des prix des produits agricoles. De fait, désormais les 15 communes du plateau de Valensole sont classées en zone vulnérable nitrate². Cette nouvelle réalité implique de nouvelles règles en matière de pratiques agricoles (couverture végétale, période d'épandage, ...).

Face à ce constat, trois acteurs du territoire (le Parc naturel régional du Verdon, la Chambre d'Agriculture des Alpes de Haute-Provence et la Société du Canal de Provence) et la chaire d'entreprise AgroSYS, de Montpellier SupAgro, ont lancé un projet agro-écologique nommé REGAIN. L'objectif de REGAIN est d'initier une dynamique territoriale et d'accompagner les agriculteurs du plateau vers des agrosystèmes plus durables. Le projet REGAIN comprend cinq volets : la qualité des sols, la fertilisation des céréales à paille, les techniques d'irrigation, les infrastructures agroécologiques, et la conservation des plantes à parfum aromatiques et médicinales. Le volet portant sur la qualité des sols est animé et piloté par le Parc naturel régional du Verdon.

Le sol occupe une place centrale dans un système agricole. Les fonctions variées et multiples qu'il assure, et les services écosystémiques qu'il procure (cycle des éléments nutritifs, régulation du climat, purification de l'eau, etc.) sont particulièrement importants dans le cadre d'une agriculture plus économe en intrants et tendant vers la transition agroécologique. Ainsi est né en 2016 un projet porté par le Parc naturel régional du Verdon en collaboration avec quatre partenaires : la Société du Canal de Provence (SCP), le Centre Régional Interprofessionnel d'Expérimentation en Plantes à Parfum (CRIEPPAM), la Chambre d'Agriculture des Alpes de Haute-Provence, et l'UMR Eco et Sols de Montpellier. Ce projet, qui s'étale sur 3 ans, de 2017 à 2019, porte sur la qualité des sols en parcelle de lavandin.

¹ Le lavandin est un hybride issu du croisement de deux espèces de lavande : la lavande aspic *Lavandula latifolia* et la lavande vraie *Lavandula angustifolia*.

² Depuis 1991, une directive européenne impose aux Etats membres de définir des « zones vulnérables nitrates » lorsqu'une pollution des eaux est avérée ou susceptible de le devenir par les nitrates d'origine agricole. Elles sont déterminées à partir des campagnes de surveillance de la concentration en nitrates des eaux douces de surface et souterraines.

Le lavandin est une culture pérenne présente depuis des décennies sur le plateau de Valensole en raison de son adaptation au climat méditerranéen et de sa bonne rentabilité. Aujourd'hui, elle fait face à la fois à des problèmes sanitaires et de rendements. En effet, elle est confrontée, d'une part, à la pression du phytoplasme du Stolbur, un parasite véhiculé par la cicadelle *Hyalestes obsoletus*, provoquant des dépérissements forts sur les plants de lavandin depuis une dizaine d'années. D'autre part, elle se retrouve soumise à une détérioration de la qualité des sols, dont l'érosion et les rotations courtes avec le blé (céréale cultivée également depuis des années) semblent être en grande partie responsables. A cela s'ajoute la pression du dérèglement climatique, ainsi que les changements règlementaires et politiques. C'est ainsi que le plateau est placé en zone vulnérable nitrate depuis 2017, à la suite des dégradations de la qualité des eaux. Or, qualité de l'eau et qualité du sol sont liées. En améliorant la qualité du sol, on participe à l'amélioration de la qualité de l'eau.

Dès lors, cette étude vise à parfaire nos connaissances sur la qualité des sols sur des parcelles plantées en lavandin ; puis à observer l'évolution de cette qualité au cours des prochaines années (de 2017 à 2019). Aujourd'hui, aucune recherche ne semble avoir évalué la qualité du sol sur des parcelles de lavandin. Le but de cette étude est alors de réaliser un premier état des lieux de la qualité du sol grâce aux indicateurs physico-chimiques et biologiques, mais aussi d'évaluer les effets de certaines pratiques agricoles sur la qualité des sols, afin d'encourager les agriculteurs à réfléchir et adapter leurs pratiques pour parvenir à un système plus durable environnementalement, mais aussi économiquement. Ce travail a également pour objectif de tenter d'appréhender le lien entre la qualité du sol et le dépérissement du lavandin. En effet, cette maladie entraîne des mortalités précoces du lavandin, dont la durée de vie peut passer d'une dizaine d'années à seulement trois ans dans les cas extrêmes. L'impact économique est important et la production française a été divisée par 3 depuis 2004 (Anova-plus, 2017).

En résumé, l'objectif de ce travail est de répondre à la problématique suivante : **quels liens existe-t-il entre pratiques agricoles, qualité des sols et état sanitaire de la culture du lavandin ?**

Face à la diversité des parcelles étudiées en terme de type de sol et de pratiques, une typologie de sol et une typologie de pratiques ont été nécessaires. Ces classifications devaient permettre de répondre aux questions suivantes :

- Question 1 : Quels sont les liens entre les types de sols et les indicateurs de sols ?
- Hypothèse 1 : Les groupes de sols formés, aux propriétés inhérentes différentes, ont un impact différent sur la variation d'indicateurs dynamiques de la qualité du sol.
- Question 2 : Quels sont les liens entre les pratiques agricoles et les indicateurs de sol ?
- Hypothèse 2 : Les groupes de pratiques formés ont une influence sur les indicateurs dynamiques de la qualité du sol

- Question 3 : Quels sont les liens entre pratiques agricoles, qualité du sol et état sanitaire du lavandin ?
- Hypothèse 3 : Les groupes de sols et de pratiques ont une influence sur l'état sanitaire du lavandin

Dans la présente étude, ne pourront être traitées que les questions 1 et 2, la question 3 ne pouvant être traitée qu'à partir de la deuxième année du lavandin. En effet, les parcelles étudiées sont des plantiers, c'est-à-dire des parcelles de lavandin récentes, plantées durant l'hiver 2016-2017.

Dans ce projet, la dimension pédagogique représente un aspect tout aussi important que la dimension scientifique. Outre le fait de mesurer et évaluer la qualité du sol des parcelles, il est important d'amener à la prise de conscience de l'état des sols et de mettre en avant les pratiques qui tendent à en améliorer la qualité, pour inciter les agriculteurs à adopter des pratiques plus agro-écologiques, dans leur intérêt.

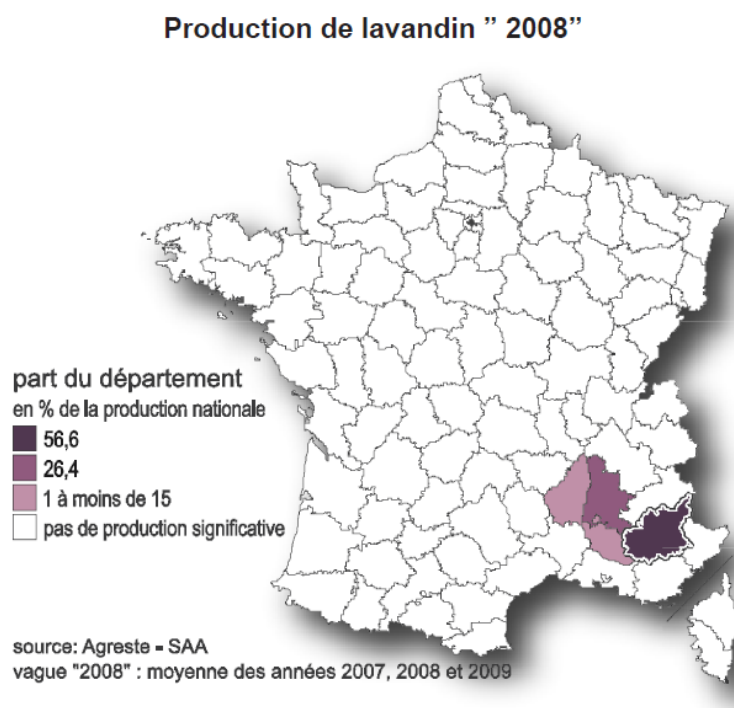


Figure 1 : Production de lavandin en 2008 en % de la production nationale par département (Agreste, 2010)

La première partie de ce rapport présente une synthèse de l'état des connaissances sur le sujet. Puis dans une seconde partie, la méthodologie mise en œuvre est abordée pour répondre aux objectifs et à la problématique de cette étude. Enfin, dans une 3^{ème} partie, les résultats seront exposés et discutés.

1) Etat des connaissances

Le sol est au cœur du système d'exploitation. Ce n'est pas un simple support mais il est à la base de la productivité et de nombreux services écosystémiques. Un sol de bonne qualité permet le plus souvent d'obtenir de meilleurs rendements et de minimiser les risques de maladies. Or rendements et problèmes sanitaires sont des éléments qui touchent de plus en plus le plateau de Valensole, en particulier la culture du lavandin. Les sols sont affaiblis (Bornand et Dosso, 2015), ce qui soulève des questions sur leur qualité et sur les bonnes pratiques de leur gestion.

La qualité du sol est un élément majeur de l'agriculture durable. Bien que l'expression qualité du sol soit relativement nouvelle, il est maintenant reconnu que la qualité des sols varie et qu'elle est modifiée, entre autres, par sa gestion et les pratiques agricoles. Dès lors, la qualité du sol est devenue un outil fondamental dans l'évaluation de la durabilité d'un système de culture.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le concept de qualité de sol, les moyens de l'évaluer, et de mettre en évidence l'impact de certaines pratiques agricoles sur la qualité du sol, identifiées par de nombreux travaux scientifiques. Enfin cette partie traite également du lien entre état du sol, « bonnes » pratiques agricoles, et santé des cultures.

1.1) Sol et services écosystémiques

Un service écosystémique est un service rendu « gratuitement » à l'homme par un écosystème (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). On distingue quatre grandes catégories de services écosystémiques (Millenium Ecoystem Assessment, 2005) :

- les services de support
- les services d'approvisionnement
- les services de régulation
- les services culturels

Le sol rend de nombreux services écosystémiques dans ces différentes catégories (Walter C et al., 2015).

Il est un support pour la production des autres services de l'écosystème. Il sert de soutien à la production primaire, aux cycles biochimiques (cycle du carbone, cycle de l'eau, cycle des nutriments, etc.), et de fondement pour les infrastructures humaines. (figure 2 p. 5).

Il permet l'approvisionnement en nourriture, en fibres, en matières et énergie issues du pétrole, et même en matériaux de construction pour les infrastructures. C'est également un réservoir de ressources génétiques. En effet, le sol présente une biodiversité riche, que l'on connaît peu.

Il participe à la régulation de l'écoulement de l'eau durant les crues, les inondations, les phénomènes d'érosion (la première cause de dégradation des sols) et agit sur la qualité de cette eau grâce à son

pouvoir épurateur. C'est aussi un acteur important pour l'équilibre du climat avec, entre autres, la séquestration du carbone. Il agit également sur l'érosion éolienne, le traitement des déchets, *etc.*

Il témoigne des héritages culturels (archéologie, paléontologie, etc.) et il façonne les paysages et les territoires.



Figure 2 : les services rendus par les sols, par FAO, CC by FAO, sur <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/284478/>

1.2) La qualité du sol, une définition multifonctionnelle

Il existe une grande variété de définitions de la qualité des sols. En effet, le sol est un milieu complexe, encore peu connu et difficile à évaluer. La tendance actuelle est d'utiliser la notion de qualité des sols plutôt que celle de fertilité, qui n'en est qu'une composante. La fertilité est associée à la notion de production et est définie par « la facilité avec laquelle la racine peut, en quantités suffisantes, bénéficier dans le sol des différents facteurs de la croissance végétale : chaleur, eau, éléments minéraux, substances organiques de croissance » (Morel, 1989).

La qualité des sols, elle, fait référence à toutes les fonctions d'un sol, qu'il soit anthropisé ou non. La notion de qualité des sols varie, d'une part, en fonction de la discipline (agronomie, urbanisme, environnement, ...) et, d'autre part, en fonction des individus. Ainsi, il y a autant de notions de qualité d'un sol qu'il y a d'utilisateurs de ce sol. Au final, au sein d'une même discipline comme l'agronomie, agriculteurs et agronomes donnent un sens différent à la qualité des sols. De même, certains agriculteurs perçoivent la qualité des sols comme un moyen d'augmenter leur productivité, et d'autres comme un moyen d'avoir un système de production durable.

Les premières définitions semblent dater de 1990 (Karlen et al., 1997). La qualité des sols était alors presque exclusivement reliée soit à la notion de production, soit, par certains auteurs, à la notion d'environnement. C'est en 1994 que Doran et Parkin (1994) intègrent dans leur définition les deux termes : environnement et production. Même si de nouvelles définitions, plus exhaustives au fil des ans, ont émergé, la définition de Doran et Parkin reste l'une des plus citées. Pour ces auteurs, la qualité est « **la capacité d'un sol à fonctionner dans les limites d'un écosystème donné pour soutenir la productivité biologique, maintenir la qualité de l'environnement et favoriser la santé végétale et animale.** » Puis, certains auteurs et scientifiques ont complété cette définition en apportant des perspectives et des éléments nouveaux comme la notion de durabilité (Doran et Zeiss, 2000), le concept de résilience (Martin, 1999) ou l'idée de services écosystémiques (Dominati et al., 2010). Aujourd'hui, le sol n'est plus vu comme un simple support mais comme un système complexe qui remplit de nombreux services écosystémiques. De plus, les notions de biologie des sols et de qualité biologique du sol, souvent négligées auparavant, suscitent un intérêt grandissant dans l'appréciation de la qualité du sol. Avec l'amélioration des connaissances sur les trois composantes de la qualité des sols (physique, chimique et biologique) et leurs interactions, la qualité du sol est de mieux en mieux évaluée.

L'une des difficultés rencontrées pour définir la qualité des sols réside dans leur diversité en raison de leurs caractéristiques propres, qui diffèrent d'un lieu à un autre (structure, texture, pente, exposition, teneur en macroéléments et micronutriments, etc.). A ces caractéristiques déjà nombreuses s'ajoute le climat, lui aussi variable, engendrant des contextes extrêmement différents, d'où l'adaptation de la définition en fonction des situations données.

Pour de nombreux scientifiques, la qualité d'un sol est composée de deux éléments distincts mais reliés (Goebel et al., 1997 ; Salomé et al., 2014), la « qualité inhérente » et la « qualité dynamique » :

- La qualité inhérente. C'est l'ensemble des propriétés internes du sol. Autrement dit, c'est l'aptitude du sol à fonctionner de façon naturelle. Il s'agit des traits caractéristiques du sol difficilement modifiables à l'échelle humaine, comme sa texture.
- La qualité dynamique. Elle est, à l'inverse, plus modulable et dépend de la façon dont est géré et utilisé le sol par l'homme (pratiques agricoles, gestion de l'exploitation, ...). Ainsi la teneur en matière organique ou encore la structure du sol sont des propriétés du sol plus facilement changeables dans le temps (Larson et Pierce, 1994). Evaluer la qualité dynamique fait partie des mesures essentielles pour estimer les impacts négatifs et positifs de pratiques agricoles et de gestions du sol et peut amener à des changements de pratiques.

1.3) Les indicateurs de la qualité du sol

La caractérisation de la qualité du sol nécessite d'évaluer différents paramètres du sol (Bispo et al., 2012 ; Dominati et al., 2010 ; Karlen et al., 1997). Toutefois, ces paramètres peuvent être mesurés, avec une sélection d'indicateurs appropriés. Face à la complexité du sol et à ses nombreuses interactions et réactions, pas un mais une multitude d'indicateurs doivent être sélectionnés pour définir au mieux cette qualité. Ces indicateurs sont le plus souvent liés à une fonction spécifique (Larson et Pierce, 1994), non mesurable directement. Pour être pertinent, un indicateur doit remplir les traits suivants : être facile à mesurer, sensible aux changements, fiable, vérifiable, peu onéreux, reproductible (Doran et Parkin, 1996). L'indicateur doit être également interprétable, ce qui nécessite l'utilisation de référentiels d'interprétation avec des valeurs seuils de référence (Briat et Job, 2017).

L'évaluation de la qualité du sol se focalise sur ses propriétés dynamiques et leurs évolutions par rapport aux caractéristiques inhérentes du sol. Ainsi, il est intéressant de suivre les indicateurs liés à la qualité dynamique, plus sensibles et réactifs aux modifications de pratiques agricoles et de gestion du sol.

Trois types d'indicateurs sont distingués (dans la qualité de sols) : les indicateurs physiques, les indicateurs chimiques et les indicateurs biologiques. Ces derniers ont longtemps été négligés mais sont aujourd'hui mieux pris en compte (Ranjard, 2016).

Dans cette étude, il a été décidé de prendre en considération les indicateurs dynamiques et inhérents proposés par Salomé et al. (2014) et par Salducci (2007) qui constituent une base pour apprécier la qualité des sols. Ces indicateurs sont visualisables en annexe 1.

1.3.1) Les indicateurs physiques

Les indicateurs physiques de la qualité des sols renseignent en particulier sur la structure du sol et sa perméabilité. Ils sont liés à la porosité du sol et à l'agencement des particules solides du sol (USDA Natural Resources Conservation Service, 1996). Les indicateurs physiques les plus souvent évalués sont, entre autres, la capacité de rétention d'eau (renseignant sur la disponibilité en eau dans le sol), la stabilité des agrégats, la densité apparente ou encore la texture (Schoenholtz et al., 2000).

Cette étude s'intéressera à la texture, propriété inhérente du sol (Salomé et al., 2014)

- La texture est très stable dans le temps ; elle est par conséquent difficilement modifiable, hormis dans le cas de forte érosion. La texture est définie par le triangle des textures et dépend de la composition en limons, argiles et sables (USDA Natural Resource Conservation Service, 1996).

1.3.2) Les indicateurs chimiques

Les propriétés et les éléments chimiques du sol sont responsables de multiples réactions et processus dans le sol. Les indicateurs chimiques renseignent sur le pH du sol, la disponibilité des nutriments

échangeables ou assimilables par la plante, le niveau de contamination du sol par les métaux lourds, etc. (USDA, 1996). Ils permettent d'avoir des informations générales sur l'équilibre de la solution du sol et les conditions chimiques qui affectent la relation « sol-plante » (Karlen et al., 1997). Les indicateurs chimiques souvent évalués sont : la CEC (Capacité d'Echange Cationique), le pH, la concentration en macroéléments (P, K, ...) et micronutriments (fer, zinc, ...), la concentration en éléments contaminants du sol, comme les métaux lourds.

Cette étude s'intéressera au pH, au calcaire total et actif, à la CEC, au rapport C/N, au carbone organique et à l'azote total, ainsi qu'aux bases échangeables K (potassium), Mg (magnésium), Ca (calcium), Na (sodium).

- Le pH. Il renseigne sur le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol. Il affecte la disponibilité, et l'absorption des nutriments du sol. En effet, à un pH trop acide (<6) ou trop basique (>8) certains éléments minéraux sont moins assimilables, c'est le cas du fer, moins assimilable dans un milieu basique. De surcroît, il a un impact sur l'activité biologique (l'activité microbienne, par exemple), la croissance des plantes et d'autres processus chimiques et physiques du sol (Shoeholtz, 2000).
- La CEC. la Capacité d'Echange Cationique est la capacité du sol à retenir les cations du sol et à les échanger. Elle fait donc référence à l'aptitude du sol à fournir ou retenir les éléments nutritifs nécessaires pour les cultures (Larson et Pierce, 1994). Elle dépend de la quantité et du type d'argile (kaolinite, illite, montmorillonite) et de la matière organique (MO) présente. Par exemple, la CEC est faible pour les argiles de type kaolinite mais élevée pour des argiles de type montmorillonite. La teneur et la qualité en argile varient peu, la CEC évolue essentiellement en fonction de la MO (Brown et Lemon, 2017). En effet, plus la teneur en MO est élevée plus la CEC est grande.
- Le calcaire total et actif. Le calcaire total est une propriété inhérente, stable, du sol, peu modifiable hormis avec des chaulages répétés (Salomé et al., 2015). Il correspond au carbonate de calcium contenu dans le sol. Sa fourniture en ions calciums (Ca^{2+}) permet la constitution des complexes argilo humiques³. Ces derniers ont des rôles importants dans la stabilité et la structure du sol. Cependant, lorsque le calcaire est en quantité trop importante, la CEC peut se retrouver saturée d'ions Ca^{2+} , et influencer négativement la nutrition minérale des plantes. Le calcaire actif, fraction fine du calcaire total, libérant plus facilement du calcium, renseigne lui sur les éventuels risques de chlorose ferrique (carence en fer).

³ Complexe formé de MO, d'argile et d'ions calciums. Chargé négativement, il permet la fixation de cations libres dans la solution du sol.

- Le carbone organique total (Corg). Il s'agit du carbone contenu dans la matière organique du sol (USDA, 1996 ; Gregoriche et al., 1994). Il renseigne ainsi sur toutes les fonctions associées à la MO : fertilité biologique, physique et chimique.
- L'azote total. Il s'agit de l'azote organique et minéral contenu dans le sol.
- Le C/N. Il renseigne sur la dynamique de la MO, c'est-à-dire l'aptitude de la MO à se dégrader plus ou moins rapidement dans le sol et sur sa capacité en fourniture d'azote au sol. Un C/N élevé indique une bonne assimilation de la MO par les microorganismes, ceux-ci se nourrissant essentiellement de carbone.
- Les bases échangeables K, Mg, Ca, Na : leurs mesures renseignent sur la teneur de cations nutritifs disponibles pour la plante.

1.3.3) Les indicateurs biologiques

Les indicateurs biologiques ont été souvent négligés par le passé, car ils sont plus difficilement mesurables ou quantifiables. Ils suscitent aujourd'hui un plus grand intérêt et une plus grande reconnaissance (Olivier et al., 2013 ; Ranjard, 2016 ; Riches et al., 2013). En effet, l'activité biologique du sol conduit de nombreux processus et représente une dimension clé dans l'évaluation de la qualité d'un sol (Bispo et al., 2012). Cette activité biologique joue un rôle important sur la structuration des sols, sur la dynamique des matières organiques, sur la biodisponibilité des nutriments pour la culture. Elle intervient également dans le cycle de l'azote et du carbone (Chaussod, 1996). Par ailleurs, les organismes du sol sont sensibles aux différents stress et modifications subits par le sol (variation de température, degré de compaction du sol, etc.) et sont par conséquent de bons indicateurs du fonctionnement général du sol. Chaussod (1996) définit la notion de qualité biologique des sols, par la « diversité, l'abondance et l'activité des organismes vivants qui concourent au fonctionnement du sol ».

Il existe une grande diversité d'organismes du sol. Ces organismes sont généralement classés en fonction de leur taille (Blanchart, 2012) ; on distingue alors quatre groupes (figure 3 p.10) : les microorganismes, la microfaune, la mésofaune et la macrofaune.

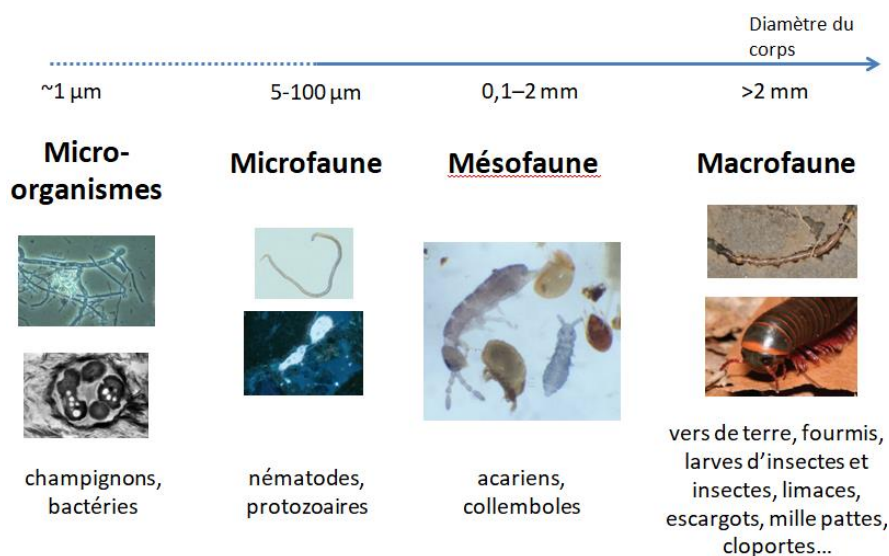


Figure 3 : classification des organismes du sol selon leur taille (Marsden, 2017a)

1.3.3.1) Les microorganismes

Les microorganismes regroupent majoritairement les bactéries et les champignons. Ces acteurs importants participent à la dégradation de la matière organique et à la minéralisation du carbone organique en CO₂ (Chaussod, 1996). Ils produisent également des substances organiques résiduelles, qui peuvent se retrouver stabilisées dans le sol par les interactions qu'elles forment avec les particules minérales et notamment les argiles (complexe argilo-humique). Leur rôle majeur dans la dégradation de la matière organique et leurs implications dans divers cycles (cycle du carbone, cycle de l'azote, ...) en font des indicateurs clés de la qualité du sol (Bouchez et al., 2006).

Plusieurs indicateurs sont couramment utilisés comme la vitesse de minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne, le rapport biomasse microbienne sur carbone organique total (BM/Corg) ou encore la diversité microbienne (Barrios et al., 2006)

Cette étude s'intéressera à la biomasse microbienne, au ratio BM/Corg, à la quantité d'azote et de carbone minéralisé (Cmin et Nmin), présentés ci-dessous :

- La biomasse microbienne (BM) : il s'agit de la quantité de carbone microbien du sol. Elle est comprise dans la MO totale. D'un point de vue agronomique la biomasse microbienne est un indicateur de la dynamique de la MO, sensible et fiable, qui réagit rapidement aux modifications du milieu (Gregoriche et al., 1994). La concentration en biomasse microbienne est liée aux pratiques agricoles, au type de sol et de culture.
- Le ratio BM/Corg total : il s'agit du rapport de la biomasse microbienne sur la quantité totale de carbone organique du sol. Il renseigne sur la disponibilité en substrat pour les microorganismes (Salomé et al., 2015). Plus ce ratio est élevé, plus l'environnement physico-chimique et la qualité de la MO sont bénéfiques à l'augmentation de la BM (Martin et al., 1999). Tout comme la BM, cet indicateur est sensible aux perturbations du sol.

- Le carbone minéralisable (Cmin) : il s'agit de la « quantité de carbone minéralisé après 28 jours » (Salducci, 2007). C'est un indicateur de la réserve en MO aisément accessible par la microfaune et la macrofaune du sol.
- L'azote minéralisable (Nmin) : il s'agit de la « quantité d'azote minéralisé après 28 jours » (Salducci, 2007). C'est un indicateur de la capacité du sol à minéraliser l'azote du sol.

1.3.3.2) Les nématodes

Les nématodes font partie de la microfaune (figure 3 p. 10) et l'ensemble des nématodes constituent la nématofaune. Ce sont des indicateurs pertinents en raison de leur caractère ubiquiste, de la diversité des groupes trophiques, de leur abondance et de leur sensibilité aux perturbations du milieu (Villénave et al., 2009). Ils jouent un rôle majeur dans la chaîne trophique et sont pour la plupart impliqués dans les processus de minéralisation de la matière organique (Coll et al., 2013). On les distingue selon leur mode alimentaire. Les nématodes phytophages nous renseignent sur la couverture végétale et éventuellement sur le risque de perte de production végétale (figure 4 p. 11). Les nématodes microbivores, c'est à dire les bactérivores et fongivores renseignent sur le compartiment microbien, le dynamisme de la MO et le recyclage des éléments nutritifs. La troisième catégorie est constituée des omnivores et des carnivores. Ce sont des groupes sensibles aux perturbations physico-chimiques du sol, car ils mettent beaucoup plus de temps à se multiplier et à s'installer. Leur présence et leur abondance sont essentiellement liées à la stabilité du milieu (Villénave et al., 2004 ; Coll et al., 2013).

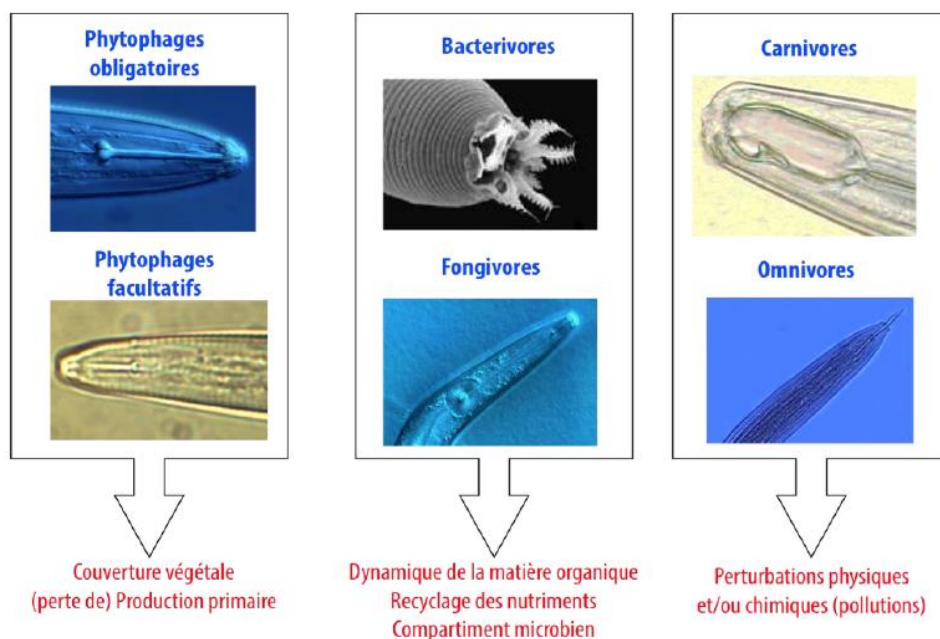


Figure 4 : les principaux types de nématodes et leurs indications (Villénave, 2017a)

Les indicateurs en lien avec les nématodes sont détaillés dans le tableau 1 page 12.

Tableau 1 : indicateurs nématofauniques et leurs fonctions associées.

| indicateurs | intérêts |
|--|--|
| Abondance totale des nématodes (AbondanceN) | Il permet de rendre compte de la quantité totale des nématodes. Il regroupe l'ensemble des groupes trophiques. |
| Abondance des nématodes omnivores + carnivores | Cet indicateur renseigne sur la stabilité du milieu, ces nématodes étant sensibles aux modifications de leur milieu. |
| Abondance des nématodes fongivores | Ils renseignent sur le dynamisme de la MO, le recyclage des éléments nutritifs et la taille du compartiment microbien. |
| Abondance de nématodes bactérivores | |
| Abondance des nématodes phytophages | Il s'agit des nématodes liés à la rhizosphère. Cela informe sur le niveau de couverture végétale. |
| Indice d'enrichissement ⁴ (EI) | Il fournit une indication sur la disponibilité et le flux des nutriments. Plus l'EI est élevé plus les éléments nutritifs sont disponibles |
| Indice de structure (SI) | Il fournit des informations sur la stabilité du milieu. Plus le SI augmente plus le milieu est stable et le réseau trophique complexe. |
| Indice de Shannon ⁵ | Il informe sur la diversité nématologique. Plus l'indice est élevé, plus la diversité des nématodes est élevée |

1.3.4) La matière organique : un élément à l'interface des trois composantes de la qualité du sol

Les matières organiques du sol (MOS) constituent un pilier de la qualité des sols en jouant sur les trois composantes de la fertilité des sols. Cet ensemble hétérogène est essentiellement composé de carbone, source alimentaire principale des organismes vivants du sol (Marsden, 2017a). Ses principaux rôles sont résumés sur la figure 5 page 13. Ces MOS sont constituées de différents pools aux fonctions différentes. Trois compartiments sont le plus souvent distingués (Chaussod et Nouaim, 2011) : la MO vivante (MOV), la MO libre et la MO liée. La MO vivante correspond à la biomasse microbienne. Elle représente environ 5% de la MO totale. La MO libre (ou MO labile) et la MO liée (ou MO stable) constituent la MO morte. Ces dernières sont distinguées en fonction de leur granulométrie (Salducci, 2007), et sont caractérisées par une qualité et des fonctionnalités différentes.

La MO libre ou fraîche, a une granulométrie supérieure à 50 µm et est grandement impliquée dans la fertilité biologique et la nutrition des végétaux. Sa dégradation est rapide (entre 10 et 15 ans). La MO stable ou liée a une granulométrie inférieure à 50 µm. Elle constitue environ 80 à 90% de la MO totale. Comme son nom l'indique, elle est particulièrement stable, sa dégradation est donc lente (supérieure à 50 ans). Elle possède un rôle majeur dans la structuration, la stabilité, la capacité de rétention d'eau du sol, et interagit avec le complexe argilo-humique.

⁴ L'EI et le SI sont des indices calculés à partir de l'abondance relative des différentes communautés de nématodes. Pour en savoir plus sur la construction de ces indicateurs, consulter la publication de Ferry et al. (2001) ou Villenave et al. (2009)

⁵ L'indice de Shannon calcule le niveau de diversité taxonomique dans un milieu donné. Cet indice tient compte à la fois du nombre total d'espèces et de l'abondance des différentes espèces présentes.

L'analyse de la MO et de ses différents compartiments permet une meilleure appréciation de la qualité de la MO du sol. Leurs dynamiques d'évolution différentes en font des indicateurs intéressants à prendre en compte dans cette étude.

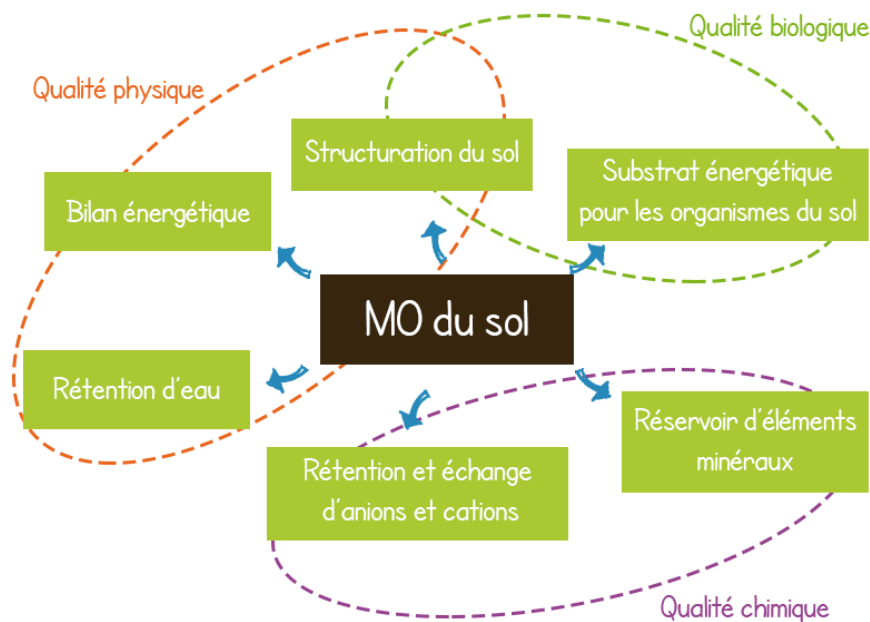


Figure 5 : les fonctions de la MO du sol (Marsden, 2017b)

1.4) Les impacts des pratiques agricoles sur la qualité du sol

Préserver le sol est un enjeu majeur dans le cadre d'une agriculture durable. Sa qualité dépend en partie des pratiques agricoles exercées qui peuvent altérer certaines propriétés du sol. (Riches et al., 2013).

L'impact d'une pratique précise sur la qualité du sol est parfois difficile à définir. La plupart des études présentent d'autres pratiques de gestion agissant comme covariables qui influent sur les résultats d'une pratique agricole étudiée. Par exemple, l'étude de l'impact du travail du sol sur la qualité du sol sera influencée en partie par le type de rotation culturale exercée.

Quatre pratiques agricoles et leurs impacts sur le sol sont abordés dans cette partie :

- L'enherbement : pratique qui se développe en viticulture et qui connaît ses débuts en lavandiculture.
- La diversité des assolements et la longueur des rotations
- Le travail du sol
- L'apport d'amendements organiques

1.4.1) L'enherbement

L'enherbement est une pratique agricole qui se développe de plus en plus en viticulture, et qui tend à se développer en lavandiculture⁶. Elle permet de résoudre certains problèmes agro-environnementaux et présente des aspects bénéfiques sur la qualité des sols (Lopez, 2016 ; Agreste, 2012). En revanche l'enherbement inter-rang est plus développé dans les zones hors climat méditerranéen, où elle permet en viticulture de limiter l'excès de vigueur de la vigne (pour une meilleure maturation.) en exerçant une concurrence sur celle-ci. En climat méditerranéen son développement reste assez faible puisque l'inquiétude d'une concurrence hydrique avec la culture principale reste forte. Cette crainte est encore plus forte en parcelle non irriguée (Lopez et al., 2016 ; Celette et al., 2009)

Du point de vue de la qualité des sols, l'enherbement permettrait tout d'abord une amélioration de la structure du sol et de sa portance (Goulet et al., 2004 ; Agreste, 2012). Certains auteurs démontrent même, sur des parcelles viticoles, que la compétition « enherbement-vigne » permet au bout de quelques années un enracinement plus profond des vignes sous le rang et l'inter-rang, les couches superficielles étant occupées par les racines de l'enherbement sur l'inter-rang (Celette et al., 2008, 2009). Cet enracinement en profondeur permettrait d'améliorer l'absorption de l'eau dans les zones profondes.

Ensuite, un autre trait important de l'enherbement est son effet limitant de l'érosion et son pouvoir fertilisant, avec une augmentation du carbone organique du sol (Blavet et al., 2009). Enfin l'enherbement favorise le maintien d'une biodiversité, grâce aux auxiliaires de culture et aux organismes du sol (Agreste, 2012) qui participent à l'équilibre de l'écosystème.

1.4.2) La diversité des assolements et la longueur des rotations

La rotation culturale tient une place importante dans un système de culture. La simplification des rotations et l'intensification de l'agriculture ont entraîné d'importantes dégradations des sols et une réduction de la biodiversité. Or, une plus grande biodiversité est reconnue pour augmenter la stabilité d'un écosystème, augmenter la productivité ou encore favoriser la disponibilité des éléments nutritifs (Hooper et al., 2005). Un assolement diversifié présenterait de nombreux bénéfices.

Tout d'abord, il consoliderait les communautés biologiques des sols en augmentant l'activité et la diversité des microorganismes bénéfiques (Tiemann et al., 2015). Mcdaniel et al. (2014) rapportent également une augmentation moyenne de la biomasse microbienne de l'ordre de 20%. Ensuite, une diversité élevée des cultures présenterait des conséquences positives sur la matière organique avec notamment un accroissement du stock de celle-ci (Macdaniel et al., 2014 ; Tiemann et al., 2015). Dès lors, une meilleure agrégation du sol et une augmentation de l'azote total et du carbone organique ont aussi été constatés (Abawi et Widmer, 2000).

⁶ En raison d'un manque de références bibliographiques étudiant l'impact de l'enherbement sur la qualité du sol en parcelle de lavandin, les références citées dans cette partie concernent essentiellement une autre culture pérenne, la vigne.

La rotation peut jouer également différents rôles sur la qualité du sol en fonction du type de culture. Ainsi, les légumineuses sont connues pour augmenter la quantité d'azote disponible dans le sol ou pour leurs activités structurantes (Dayegamiye et al., 2013).

Toutefois, la longueur des rotations, la diversité des cultures, entraînent des effets différents sur le sol, qu'il est difficile de résumer. De plus, les pratiques culturales comme l'apport d'intrants ou encore le travail du sol viennent souvent interférer dans les résultats proposés par les études scientifiques. Il n'est alors pas toujours évident de se faire une idée précise de l'effet unique de la rotation sur la qualité du sol (Singer et Bauer, 2009).

1.4.3) Le travail du sol

Le travail du sol regroupe des pratiques diverses, du labour au semis direct en passant par les TCS (Techniques Culturales Simplifiées). Les outils (dents, disques, etc.) et la profondeur de travail sont multiples et entraînent des impacts différents sur les propriétés du sol.

Karlen et al. (1994) ont étudié pendant 12 ans l'effet de différents travaux du sol sur la qualité de sol limoneux en monoculture de maïs. Ils rapportent que l'absence de travail du sol (semis direct) améliorerait les caractéristiques physico-chimiques et biologiques du sol. Le sol présenterait un plus haut taux de carbone total, une plus grande activité et biomasse microbienne et des agrégats de sol plus stables que sur des sols travaillés à la charrue ou au chisel. Une diminution de l'érosion, des phénomènes de battance et une meilleure rétention d'eau ont également été mis en évidence.

En revanche, malgré un accroissement du stock de carbone et le développement de la biomasse microbienne, les TSL (Techniques Sans Labour), dont fait partie le semis direct, provoqueraient une détérioration de la fertilité physique⁷ (Peigné et al., 2009), en particulier sur des sols avec une activité structurale faible⁸ (sol limoneux, sableux). Ainsi, une porosité réduite, et un tassement du sol sur les horizons non travaillés ont été constatés (Rasmussen, 1999). Cela pose la question de l'effet temporel de l'activité biologique pour retrouver une structure adéquate. De plus, le travail superficiel ou l'absence de travail du sol entraînent une concentration de la MO et de ses composantes comme la BM surtout dans les premiers centimètres du sol (Mathew et al., 2012 ; Peigné et al., 2009).

Cette répartition de la BM décroît ensuite rapidement dans le sol, lorsque l'on s'éloigne de l'horizon travaillé et dépend de la profondeur d'enfouissement des résidus et du niveau de compaction du sol.

Contrairement aux TSL, le labour démontre une répartition plus homogène de la BM (Peigné et al., 2009). D'une manière générale, le labour est connu pour entraîner une réduction de la vie

⁷ Synonyme de la composante physique de la qualité du sol. Elle fait appel aux notions de structure, porosité, aération du sol, etc.

⁸ L'activité structurale ou l'aptitude à la fissuration du sol est « la capacité du sol à se fissurer sous l'effet des alternances humectation-dessiccation » (Peigné, 2014)

biologique. Il peut néanmoins être contrebalancé par la mise en place de rotations, d'engrais verts, ou encore une réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires (Bouthier et al., 2014).

Ensuite, du point de vue de la structure du sol, l'impact du labour varie en fonction de la teneur en eau du sol, du type de labour (labour plus ou moins profond) et du type de sol (Coulouma et al., 2006). En condition sèche, le labour a peu d'effet sur la compaction du sol et inversement en condition humide, en particulier sur la couche de sol située au-dessous de la couche labourée.

Enfin Coll et al. (2013) ont mis en avant l'impact négatif de travaux du sol répétés et profonds en agriculture biologique (AB) sur la communauté des nématodes carnivores et omnivores, très sensibles aux perturbations du milieu.

1.4.4) L'apport d'amendements organiques

Le maintien de matière organique dans le sol est un élément primordial pour le maintien d'une productivité sur le long terme. Un des moyens de restaurer une perte de MO est l'apport d'amendements organiques (Mursec, 2011 ; Huber et Schaub, 2011).

L'apport de MO présente de nombreux avantages. D'un point de vue physique, l'apport de MO améliore la porosité, la structure et la rétention en eau du sol (Guilbaut, 2006). D'un point de vue chimique, les principaux avantages de la MO sont un meilleur stockage et la fourniture d'éléments minéraux en améliorant la CEC, ainsi qu'une stabilisation du pH (Guilbaut, 2006 ; Huber et Schaub, 2011). Enfin d'un point de vue biologique, l'apport d'amendements organiques permet de nourrir de nombreux organismes du sol, en particulier les microorganismes, qui utilisent les nutriments libérés lentement par la MO comme source d'énergie pour accroître leur biomasse microbienne (Gomez et al., 2006). En revanche, des facteurs limitants comme la compaction du sol, empêchent un bon développement des microorganismes. En effet, la décomposition de la MO nécessite un contact avec l'air et l'eau, ce qui est réduit lorsque le sol est très compacté. (Guilbaut, 2006).

L'effet des amendements sur les propriétés du sol reste cependant conditionné par la quantité appliquée, le type et la composition de l'amendement, ainsi que le type de sol (Albiach et al., 2000 ; Fließback et al., 2007). Dès lors, les résultats divergent. Fließback et al. (2007) ont mis en évidence l'effet positif de fumier composté en AB comme une des pratiques limitant la diminution de la quantité de carbone total du sol.

1.5) Influence des pratiques agricoles et de la qualité du sol sur l'état sanitaire d'une culture

D'une manière générale, des pratiques qui améliorent ou préservent une bonne qualité des sols ont également un effet positif sur la réduction des maladies d'origine tellurique. D'après Abawi et Widmer (2000), la probabilité de maladies augmenterait lorsque le sol est dit « pauvre ». Ainsi, une mauvaise

structure, un faible taux de MO, par exemple, accentueraient ce risque. En revanche un sol avec une biodiversité plus riche entraînerait l'effet inverse. Les systèmes de pratiques qui améliorent la quantité et la diversité des communautés de microorganismes sembleraient étroitement liés à une diminution, voire parfois à une suppression de maladies touchant les cultures (Bonilla et al., 2012). En effet, une communauté plus diversifiée engendrerait des phénomènes d'interactions et de compétitions, réduisant la capacité d'agents pathogènes à infecter les cultures. Parmi les pratiques les plus citées, l'allongement des rotations, le faible travail du sol, l'apport d'amendement organique et la couverture végétale (Larkin, 2015).

Les rotations de cultures offrent de nombreux bénéfices pour la qualité des sols mais également dans la gestion des maladies. En effet, elles permettent de réduire le nombre de pathogènes et de maladies transmises par le sol par trois mécanismes principaux (Krupinsky et al., 2002) : soit en rompant le cycle du pathogène, soit en modifiant les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, soit en inhibant directement le pathogène par libération de substances toxiques à partir des racines, ou par stimulation de microorganismes spécifiques contre le pathogène. Les bienfaits de la rotation peuvent être d'autant plus renforcés que celle-ci est diversifiée. De fait, la diversification permettrait une augmentation de la biomasse, de la diversité et de l'activité des microorganismes (Larkin, 2015).

Ensuite, la réduction du travail du sol, en particulier dans les systèmes en agriculture de conservation, a également été décrite comme une pratique augmentant la diversité microbienne et diminuant la perte de MO, permettant ainsi de rendre les cultures moins vulnérables aux maladies (Bailey et Lazarovits, 2003 ; Larkin, 2015).

Concernant l'apport d'amendement organique, ses bénéfices sur la santé des sols et des cultures ont souvent été cités (Bailey, 2003, Noble, 2011). La diminution des apports d'engrais organiques remplacée par l'apport d'engrais chimiques a conduit à une altération entre autre de la structure du sol, associée de fait à une augmentation de l'incidence de nombreuses maladies et l'apparition de ravageurs (Noble, 2011). Bonilla et al (2012) ont démontré que l'amélioration de la qualité des sols via les amendements organiques a permis, à l'inverse, une amélioration de la santé végétale et la suppression d'agents pathogènes du sol.

Enfin, l'enherbement et les couvertures végétales, tout comme la rotation culturale, permettent d'augmenter la diversité d'espèces végétales, ce qui peut aider à une diversification des organismes du sol. Sur le dépérissement du lavandin, ses effets sont plutôt encourageants. Des études récentes ont montré une baisse de 10 à 15% du dépérissement avec la mise en place d'enherbements inter-rang (Zambujo, 2016). L'hypothèse que les cicadelles auraient plus de difficultés à circuler d'un plant de lavandin à un autre a été proposée comme premier facteur explicatif. Un autre facteur expliquant cette baisse pourrait être la hausse d'insectes auxiliaires, prédateurs de la cicadelle.

2) Matériels et méthodes

2.1) Site de l'étude

2.1.1) Présentation générale

L'étude se déroule sur le territoire du plateau de Valensole, situé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (annexe 2). Le plateau est délimité au Sud par la rivière du Verdon et le lac de Sainte-Croix, à l'ouest par la Durance, au nord par la vallée de l'Asse, et à l'est par le massif montagneux des Alpes. Le plateau regroupe 15 communes et s'étend sur 50 000 hectares, dont environ 20 000 de surface agricole utile (SAU). Son altitude varie de 350m à 800m selon un axe nord est/sud-ouest (Ramseyer et al., 2011).

2.1.1.1) Le climat

Le plateau est soumis à un climat méditerranéen et montagnard. Il est caractérisé par des étés chauds et secs, avec des moyennes estivales oscillant autour de 22°C et par des hivers relativement froids, soumis à des gels fréquents (Ramseyer et al., 2011).

La pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 710 mm par an, mais avec des variabilités inter-annuelles importantes. De plus, les pluies sur l'année se répartissent de manière irrégulière, avec une majorité de précipitation au printemps et à l'automne, et des déficits hydriques en été (figure 6 p. 18). Il existe également un différentiel de précipitation au sein même du plateau. De surcroît, la présence du mistral est souvent responsable d'un assèchement des terres en accélérant l'évapotranspiration du sol.

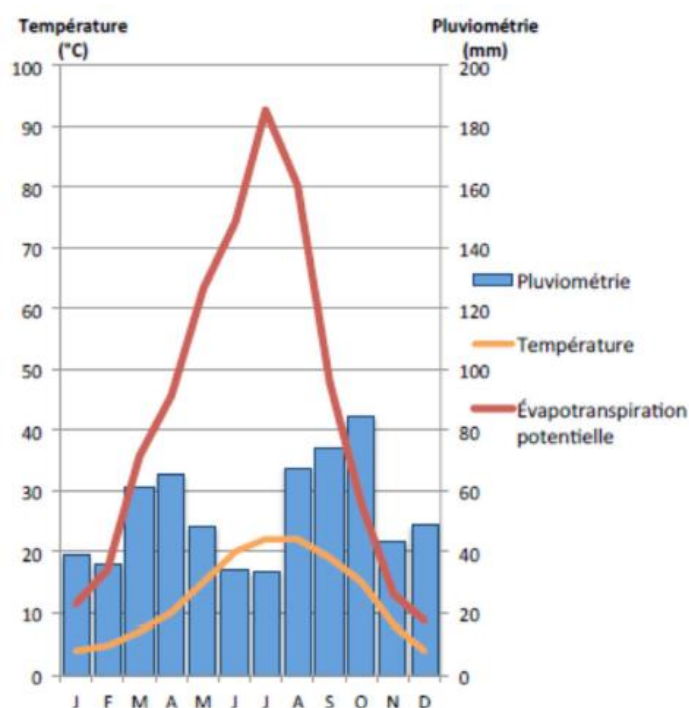


Figure 6 : diagramme ombro-thermique de Valensole (Ramseyer et al., 2011)

2.1.1.2) Les types de sol d'un point de vue pédologique

Le plateau de Valensole présente une diversité de types de sols, avec une concentration élevée en cailloux (forte pierrosité). Les sols majoritaires sont les fersialsols (ou sols fersiallitiques) présents sur les replats, et les calcosols, présents sur les replats et bordures du plateau (Bornand et Dosso, 2015). Le fersialsol est décarbonaté et caractérisé par sa couleur rouge et son caractère argileux. Initialement non calcaire, ces fersialsols se retrouvent très souvent calcifiés par l'utilisation des machines agricoles, qui émettent sur la parcelle les nombreuses pierres calcaires. Les labours trop profonds participent eux aussi à faire remonter le calcaire issu de la roche mère, calcifiant ainsi le sol (Bornand et al., 2012). Ces fersialsols se situent davantage dans les parties hautes du plateau, moins atteintes par les phénomènes érosifs. En effet, l'érosion anthropique ou naturelle a décapé ce type de sol pour laisser place à des calcosols. Ces derniers sont moins évolués, plus récents, et sont souvent issus sur le plateau des fersialsols. Ils sont très calcaires et friables.

On trouve parfois des sols en transition entre le fersialsol et le calcosol. Ils sont dits « calcosols fersiallitiques ». Le sol est alors parsemé de taches rouges (correspondant au fersialsol) et blanches (correspondant au calcosol). Ils sont nommés ainsi en raison de leur hétérogénéité, rendant difficile la dénomination en fersialsol ou calcosol. La figure 7 ci-dessous illustre une parcelle présentant ce type de sol.

Les parcelles étudiées concernent essentiellement des calcosols suivis par quelques fersialsols et deux fluviolsols. Ce dernier (fluviolsol) correspond aux sols alluviaux, présents en fond de vallée. Il s'agit de sol peu différencié, épais, et souvent fertile (Lacassin, 2017). Sur le plateau de Valensole ce type de sol est également calcaire.



Figure 7 : photographie aérienne de parcelles du plateau de Valensole, avec une parcelle centrale présentant un calcosol fersiallitique (source : Géoportail)

2.1.2) Présentation du réseau Sol de REGAIN

Dans cette étude, un réseau de 22 agriculteurs répartis sur le plateau de Valensole a été rassemblé. Ce réseau a été conçu en 2016 suite à une formation organisée dans le cadre de REGAIN sur le rôle central du sol et les liens avec la productivité et la durabilité du système. Cette formation mettait en avant les essais menés par le CRIEPPAM montrant des résultats encourageants dans la lutte contre le dépérissement du lavandin grâce aux couverts végétaux. Dans cette perspective, 22 agriculteurs volontaires et motivés, désirant en savoir plus sur leur sol, ont choisi une parcelle pour implanter des plantiers de lavandin⁹, initier des expérimentations (comme l'enherbement inter-rang) et suivre l'évolution de la qualité du sol, de leurs pratiques et de l'état sanitaire du lavandin de 2017 à 2019¹⁰.

Sur les 22 agriculteurs, 5 sont en agriculture biologique et 17 en système conventionnel.

Les 22 parcelles se situent à des localisations géographiques différentes (annexes 3). Celles-ci étant réparties sur tout le plateau, les variations inter-parcellaires sont grandes. La diversité des sols étudiés est illustrée en annexe 4.

2.1.3) Présentation des parcelles étudiées

Afin de comparer deux types de pratiques, certains agriculteurs ont fait le choix d'initier une expérimentation en prenant soin de laisser une zone témoin dans leur parcelle. Dans la zone témoin se déroulent les pratiques agricoles « habituelles » de l'agriculteur et dans le reste de la parcelle, la zone dite « expérimentale », l'agriculteur teste une nouvelle pratique. Par exemple, si un agriculteur décide de comparer l'impact de l'apport de MO sur son sol, il comparera deux zones sur sa parcelle : l'une recevant de la matière organique, et l'autre, le témoin, n'en recevant pas. De même, un agriculteur souhaitant étudier l'effet de l'enherbement inter-rang sur son sol mettra en place une zone témoin sans enherbement, comparée au reste de la parcelle enherbée. Au total dix agriculteurs ont décidé de mettre en place un témoin pour étudier l'impact d'une pratique différente sur leur sol (tableau 2 ci-dessous).

Tableau 2 : pratiques agricoles comparées et le nombre d'agriculteurs associés

| Pratiques comparées | Nombre d'agriculteurs associés |
|---|---------------------------------------|
| Partie avec apport de MO et partie sans apport de MO | 2 |
| Partie avec désherbage chimique et partie avec désherbage mécanique | 1 |
| Partie avec enherbement et partie sans enherbement inter-rang | 4 |

De plus, deux agriculteurs ont également procédé à une division de leur parcelle pour étudier non pas l'effet d'une pratique différente sur leur sol, mais l'effet d'une même pratique sur deux zones

⁹ Les 22 parcelles sont toutes des plantiers, c'est-à-dire des lavandins plantés durant l'hiver 2016. Cela permet d'avoir un état « 0 » initial, et ainsi de faciliter le suivi de l'évolution de la qualité du sol, afin de pouvoir mener des études comparatives. Ainsi la qualité du sol de cette année (2017) sera surtout représentative de l'historique parcellaire, plutôt que de la conduite du lavandin elle-même.

¹⁰ Le projet REGAIN SOL a été conçu pour suivre la qualité des sols sur 3 ans (de 2017 à 2019)

« contrastées » de leur parcelle. L'un a divisé sa parcelle en deux car la parcelle présentait deux sols très différents. Le deuxième a divisé sa parcelle en deux en raison d'un historique cultural différent au sein de la parcelle. *In fine*, avec les divisions de certaines parcelles, 34 parcelles sont suivies dans le réseau Sol de REGAIN.

2.2) Méthode : une démarche en 6 phases

Pour traiter la problématique, le travail s'est organisé en 6 grandes phases :

- Etat des lieux de la qualité des sols
- Enquête technique auprès des agriculteurs sur les pratiques culturales
- Mesure de l'état sanitaire du lavandin
- Assemblage des données et sélection d'indicateurs
- Traitement statistique des données recueillies
- Interprétation des résultats, perspectives

L'annexe 5 retrace les grandes étapes de la méthodologie employée dans cette étude.

2.2.1) Phase 1 : État des lieux de la qualité des sols

L'objectif de cette phase était de :

- Faire l'état « zéro » du sol, c'est-à-dire, connaître l'état initial en 2017 des sols des 34 parcelles du projet, afin de pouvoir suivre leurs évolutions les années suivantes (jusqu'en 2019) et mener des études comparatives entre les parcelles.
- Créer un premier référencement local, c'est-à-dire avoir les premières données sols sur des parcelles de plantiers de lavandin pour constituer une base de données.

Pour caractériser les sols de chaque parcelle, des analyses de sol physico-chimiques et biologiques ont été réalisées, ainsi que des tests bêches.

2.2.1.1) Les lots d'analyses et le test bêche

- Les lots d'analyses

Pour faire l'état des lieux du sol, il faut analyser le sol sur ses composantes physico-chimiques et biologiques. Ainsi des analyses de sol sont effectuées. Un lot d'analyse comprend :

- ✚ Un échantillon de sol sur la physico-chimie (analysé par le laboratoire Aurea)
- ✚ Un échantillon de sol sur l'activité biologique et les MO (analysé par le laboratoire Celestalab)
- ✚ Un échantillon de sol sur les nématodes (analysé par le laboratoire Elisol)

Sur chaque parcelle, un lot d'analyses a été effectué. Ainsi, au final, 34 lots d'analyses ont été réalisés.

- Le test bêche

Le test bêche permet d'évaluer facilement et rapidement la structure d'un sol sur les trente premiers centimètres, ainsi que l'activité biologique, notamment « macrofaunique » (les vers de terre par exemple). Les tests bêches ont été réalisés selon la méthode de l'ISARA-Lyon via le guide d'utilisation proposé par Peigné et al. (2016). Le diagnostic final propose une classification structurale du sol en cinq classes en fonction du degré de compaction du sol (annexe 6).

Au final, un test bêche par parcelle a été effectué, soit 34 tests bêches au total. Les tests bêches ont été réalisés près du rang de lavandin. Quelques tests bêches supplémentaires ont été réalisés sur le milieu de l'inter-rang lorsque celui-ci était enherbé. Mais les enherbements étant peu levés, aucun effet marquant de celui-ci sur l'état du sol ne pouvait être souligné. La seule différence avec le rang était la compaction parfois importante du sol due aux passages de roues.

Toutes les parcelles présentaient un sol de classe 1, c'est-à-dire une structure du sol ouverte, poreuse, et sans tassement. Le labour récent, nécessaire à la plantation du lavandin, explique ces bons résultats.

2.2.1.2) Localisation de la zone de prélèvement sur la parcelle

Les parcelles étudiées sont plus ou moins hétérogènes, tant sur le type de sol, la profondeur du sol, sa pente, etc. Pour définir la zone de prélèvement sur chaque parcelle, nous sommes partis du postulat suivant :

1. Chaque zone de prélèvement doit être éloignée du bord de la parcelle d'environ 10-15 mètres, pour éviter un « effet bordure » qui pourrait influencer les résultats.
2. Lorsque la parcelle présente une pente, la zone de prélèvement doit se situer au niveau du sommet de la pente, afin d'échantillonner une zone ne recevant aucun apport des parties supérieures (matière organique, éléments minéraux, etc.).
3. La zone doit être la plus homogène possible et représentative de la parcelle. Pour cela, le type de sol dominant orientera la zone de prélèvement (figure 8 p. 23).

L'appui de l'agriculteur sur la connaissance de sa parcelle nous a également permis de mieux situer la zone de prélèvement.

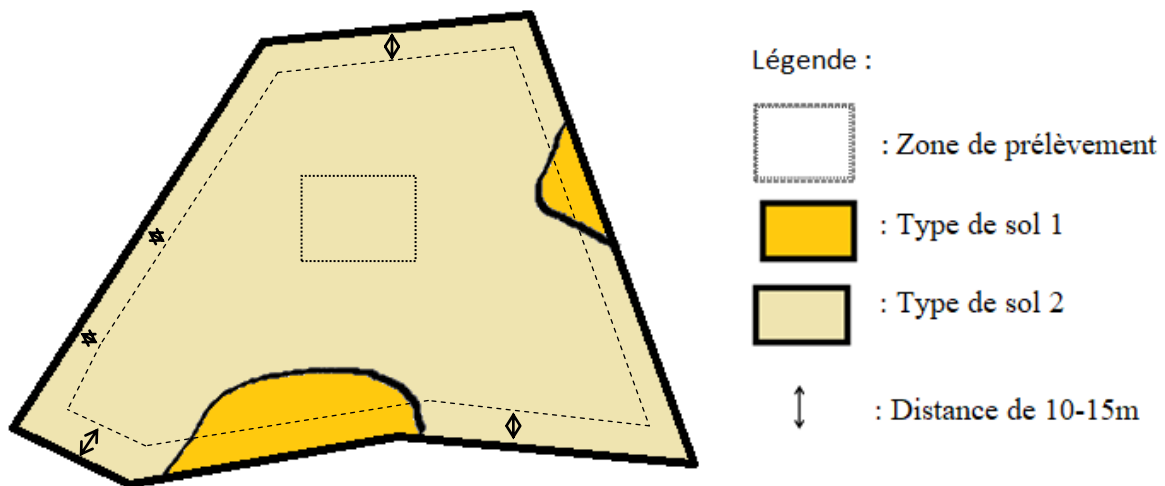


Figure 8 : schéma d'une parcelle agricole plane, mais hétérogène en terme de type de sol et localisation de la zone de prélèvement définie selon le postulat.

2.2.1.3) La méthode d'échantillonnage

Les prélèvements de sol ont été effectués à la tarière. Face à la diversité des pratiques des agriculteurs, la localisation des prélèvements de sol a été réfléchi avec les différents partenaires du projet. Le lavandin, à l'instar de la vigne, est cultivé en rang. Cela induit une complexité supplémentaire dans le prélèvement des échantillons de sol. En effet, le sol sous la ligne de plantation et celui de l'inter-rang peuvent différer au niveau de leurs caractéristiques physico-chimiques et biologiques, sous l'effet des pratiques. Ainsi, différents scénarii de prélèvements ont été proposés (annexe 7).

Le scénario 1 proposait de réaliser les prélèvements de sol uniquement sur le rang de lavandin, ce qui permettait d'avoir l'impact des pratiques sur le sol à proximité des plants de lavandin. De plus, les racines du lavandin sont supposées être plus présentes sur le rang que l'inter-rang (Coste, 2017a). Le sol prélevé près du rang est alors plus représentatif de ce qui entoure les racines du lavandin. Cependant, cela sous-estimait l'effet de l'enherbement situé au centre de l'inter-rang dans le cas où cette pratique était présente. Or l'enherbement inter-rang est la pratique la plus innovante actuellement en lavandin (Zambujo, 2016), particulièrement intéressante sur les problématiques d'érosion et de fertilité biologique du sol qui touchent les parcelles du plateau mais aussi et surtout sur la lutte contre le dépérissement. De surcroît, des profils culturaux réalisés en 2013 (Bel hadj hassen et al., 2013) démontrent qu'une colonisation des racines au niveau de l'inter-rang est possible, mettant en avant la capacité du lavandin à aller chercher ses ressources loin de sa base.

Le scénario 2 à l'inverse, proposait de faire des prélèvements de sol uniquement au centre de l'inter-rang. Mais cela surreprésentait l'effet de l'enherbement, dans le cas où cette pratique était présente, au détriment de l'effet de pratiques agricoles effectuées uniquement sur le rang.

Finally, scenario 3 was adopted, namely mixing the samplings on the row and the inter-row, in order to have an average representativeness of the soil quality on the plot. Certainly the mixture obtained did not correspond to an ecological reality, since we were mixing communities of organisms, in particular when the cover was present. However, the objective was to put in perspective the trends of the effect of a set of practices on the **global** quality of the soil, and not the effect of a particular practice on a portion of soil affected by this practice.

Finally, it would have been interesting to be able to differentiate well the characteristics of the covered and non-covered zones by carrying out a set of analyses only on the row, and a set of analyses only on the inter-row (annex 7, scenario 4). However, this scenario was not envisageable for budgetary reasons. In addition, the scientific question was not to know if there was a difference between the row and the inter-row but to understand how the soil evolved as a function of a set of past and current practices.

2.2.1.4) Prélèvements, conditionnements et envoi des échantillons de sol

Soil samplings were carried out at the same time as the tests-bêche, on the week of 27 March to 2 April.

For the physico-chemical analyses (Aurea), biological activity and MO (Celesta-lab), 16 samplings in the field were carried out to a depth of 20 cm. The 16 cores were distributed over four inter-rows successively, with four cores per inter-row. In each inter-row, the four cores were distributed in the following way: two cores close to the row and two cores in the center of the inter-row (annex 8). The 16 samplings were then homogenized to form a single representative sample. Then about 800g of soil were taken from this representative sample to form an analysis sample for Celesta-lab, and about 500g of soil were taken to form a sample for Aurea.

For the nematode analysis, 16 samplings were carried out in the same way as previously but to a depth of 0-15cm. The 16 cores were then homogenized to form a single representative sample. Then, about 600g of soil were taken from this sample to constitute a sample for the ELISOL laboratory.

| |
|---|
| <p><u>Cas particulier</u> : lorsqu'un agriculteur possédait sur sa parcelle un enherbement fin (50 cm environ), alors, pour ne pas surreprésenter la bande enherbée, 5 séries de 3 carottes ont été réalisées à la place (annexe 9)</p> |
|---|

Après la réalisation des prélèvements, les échantillons ont été conditionnés au réfrigérateur si nécessaire. Puis, ils ont été envoyés aux laboratoires d'analyses sous un délai de trois jours maximum après leur prélèvement, pour éviter une dégradation de la biologie du sol (mort de nématodes par exemple)..

2.2.2) Phase 2 : Enquête technique sur les pratiques agricoles

L'objectif de cette phase était de connaître les pratiques agricoles des 22 agriculteurs du réseau, en particulier l'historique des pratiques ayant eu lieu avant les prélèvements de sol sur le terrain. En effet, il s'agissait par la suite de mettre en évidence de façon tendancielle l'influence de certaines pratiques sur la qualité du sol, en sélectionnant les pratiques qui semblaient le plus expliquer une variation de la qualité du sol, et si possible d'établir des typologies d'agriculteurs. Les entretiens ont été enregistrés et leur durée moyenne était de 1h30.

Pour identifier les pratiques culturales, un guide d'entretien directif a été créé. Le guide d'entretien a été divisé en trois grandes parties : une partie sur les caractéristiques générales de la parcelle, une partie sur l'historique des pratiques et les itinéraires techniques, et une partie classée « autre ». Le guide d'entretien utilisé est disponible en annexe 10.

La partie sur les caractéristiques générales de la parcelle, comme son nom l'indique, permettait de renseigner les informations générales de la parcelle, comme sa superficie, la densité de plantation, le mode de conduite (agriculture biologique, conventionnelle, etc.), *etc.*

La partie sur l'historique des pratiques abordait les thématiques telles que la rotation, la fertilisation, les travaux de sol effectués récemment, *etc.* En parallèle, les itinéraires techniques (ITK) des cultures de 2012 à 2016 et le début d'ITK du lavandin ont été notés pour avoir une vision globale des pratiques exercées par culture. Un exemple d'une fiche ITK complétée est disponible en annexe 11.

Enfin, la partie classée « autre » permettait d'évoquer des questions plus diverses comme les périodes de pointe de travail dans l'année, la perception de la qualité du sol, les évolutions majeures des pratiques culturales des 15 dernières années, *etc.*

2.2.3) Phase 3 : Mesure de l'état sanitaire des plantiers de lavandin

L'objectif était d'obtenir un premier bilan de l'état sanitaire des cultures. Ces données serviront à répondre à la question 3¹¹ (énoncée en introduction) pour les années suivantes, celle-ci ne pouvant être traitée qu'à partir de lavandins de deuxième année. Pour cela, le taux de reprise des plantiers a été

¹¹ La question 3 a pour but d'examiner l'influence ou non des pratiques agricoles et de la qualité du sol sur le taux de mortalité des lavandins.

mesuré ; c'est-à-dire le nombre de plants morts, vivants, ou dans un état intermédiaire/de transition, suite à leur plantation en hiver 2016. Les mesures ont été faites début juin 2017.

Celles-ci ont été réalisées sur les 34 parcelles. Cinq cents plants ont été évalués sur chaque parcelle, sauf pour les parcelles très petites, comme certaines parcelles témoins. Dans ce cas, 250 plants étaient mesurés. Pour être le plus représentatif, chaque parcelle a été sillonnée le plus largement possible. Le transect dépendait de la forme de la parcelle mais se faisait le plus souvent en diagonale, ou en W (figure 9 ci-dessous), en évaluant 10-15 plants par rangs.

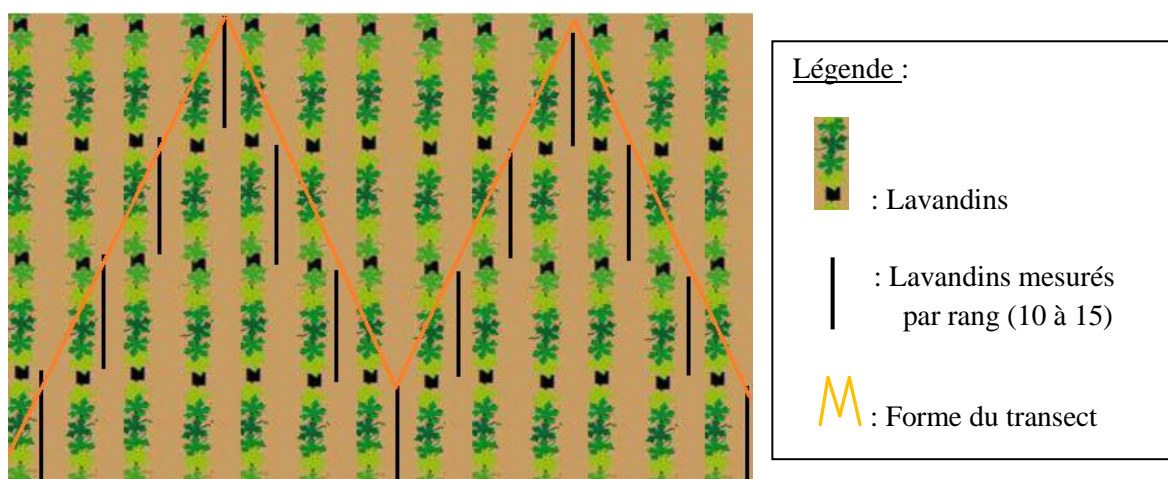


Figure 9 : Schéma d'une parcelle de lavandin et du transect suivi pour la mesure du taux de reprise

Pour chaque plant évalué une des trois classes suivantes a été attribuée :

- Classe 1 : le plant était en bon état, (annexe 12, photo n°1)
- Classe 2 : le plant était dit « douteux ». On parle de plants "douteux" lorsque le plant est en grande partie sec mais il y persiste quelques pousses vertes. (annexe 12, photo n°2). Ainsi, il est possible que le plant vienne à mourir ou à « repartir » (Coste, 2017b).
- Classe 3 : le plant était mort, il était gris et sec et s'arrachait très facilement. (annexe 12, photo n°3)

2.2.4) Phase 4 : Sélection d'indicateurs et préparation d'un tableau de codage

2.2.4.1) Sélection des indicateurs de sol

La quasi-totalité des indicateurs de sol ont été sélectionnés lorsque leur variabilité était suffisante et en fonction de la publication de Salomé et al. (2014). Cette publication proposait un ensemble d'indicateurs de sol pour apprécier la qualité des sols en particulier pour la viticulture méditerranéenne. Le lavandin étant une plante méditerranéenne et pérenne, il semblait pertinent d'utiliser les indicateurs qu'ils proposaient. D'autres indicateurs que sont le Cmin, le Nmin, la MO libre et la MO liée sont venus compléter la liste. En effet, ils s'avéraient être également des indicateurs pertinents (Marsden, 2017c, Salducci, 2017a). Le tableau en annexe 1 rappelle tous les indicateurs mesurés.

2.2.4.2) Sélection de pratiques agricoles

À partir des enquêtes techniques, les pratiques qui présentaient le plus de variabilité entre parcelles et dont l'effet pouvait être étudié, ont été sélectionnées. L'annexe 13 présente les résultats des enquêtes techniques, et les pratiques sélectionnées dans cette étude qui ont été utilisées pour la création des typologies de pratiques. En effet, la présence de pratiques diverses et variées au sein de chaque parcelle permettait difficilement d'étudier l'impact d'une pratique prise individuellement. Par conséquent, la réalisation d'une typologie de pratiques permettait de rassembler les groupes de parcelles avec un profil similaire, et d'étudier ainsi l'impact d'un ensemble de pratiques sur la qualité du sol plutôt que l'impact d'une pratique seule, difficilement interprétable.

2.2.4.3) Préparation d'un tableau de codage

Pour permettre la réalisation d'une typologie de pratiques, des dispositifs ont été préalablement mis en place à partir des pratiques sélectionnées afin d'associer les parcelles à différentes modalités de pratiques.

Ainsi, quatre groupes d'assolements ont été définis en fonction des successions culturales de 2012 à 2016 (les assolements sont visualisables en annexe 13):

- Le groupe avec dominance de blé dur : il s'agissait des parcelles dont la culture de blé prédominait sur les 5 années passées (2012-2016)
- Le groupe avec alternance pois/oléagineux/blé.
- Le groupe avec présence de cultures fourragères : il s'agissait des parcelles présentant une culture fourragère (exemple : sainfoin) entre 2012 et 2016. Toutes les parcelles en AB présentaient ce type de rotation. Seule une parcelle en conventionnelle présentait également ce type de rotation.
- Le groupe avec dominance de cultures pérennes : il s'agissait des parcelles avec présence d'une culture pérenne autre que les cultures fourragères dans la rotation, telle que la sauge ou le lavandin.

Le tableau 3 ci-dessous résume le nombre de parcelles présentes dans chacune des catégories.

Tableau 3 : dispositif mis en place en fonction des successions culturales

| Succession | Dominance de blé / céréales sur les 5 dernières années | Alternance pois/oléagineux/blé sur les 5 dernières années | Dominance de cultures fourragères sur les 5 dernières années | Dominance de cultures pérennes (lavandin, sauge, etc.) sur les 5 dernières années | TOTAL |
|-----------------|--|---|--|---|-------|
| Nb de parcelles | 18 | 5 | 8 | 3 | 34 |

Concernant l'IFT total cumulé de 2012 à 2017, trois groupes de parcelles ont été différenciés. Les parcelles dont l'IFT total cumulé était de 0, c'est-à-dire les parcelles ne recevant pas de produits phytosanitaires, constituaient le premier groupe. Ensuite, les parcelles dont l'IFT total cumulé était

compris entre 1 et 10 constituaient le deuxième groupe. Le seuil de 10 correspondant à la médiane de l'échantillon a été choisi pour permettre d'avoir des groupes équilibrés en termes d'effectifs. Il s'agissait ainsi majoritairement des parcelles ayant effectué un à deux apports de produit phytosanitaire par culture de 2012 à 2017, Enfin, les parcelles dont l'IFT total cumulé était supérieur à 10 constituaient le troisième groupe. Le tableau 4 ci-dessous résume le dispositif.

Tableau 4 : dispositif mis en place en fonction de l'IFT total cumulé de 2012 à 2017

| IFT total cumulé de 2012 à 2017 | IFT = 0 (parcelles en AB) | IFT entre 1 et 10 | IFT > 10 | TOTAL |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------|----------|-------|
| Nb parcelle | 7 | 12 | 15 | 34 |

Concernant le mode de désherbage après plantation du lavandin, quatre groupes de parcelles ont été construits. Le premier groupe rassemblait les parcelles dont le désherbage après plantation du lavandin et jusqu'à la date d'échantillonnage était uniquement chimique. Le groupe 2, lui, rassemblait les parcelles ayant effectué un désherbage mécanique après plantation. Le troisième, regroupait les parcelles ayant réalisé un désherbage mécanique et chimique après plantation. Enfin, le dernier groupe regroupait les parcelles n'ayant effectué aucun désherbage après plantation. Le tableau 5 ci-dessous résume le dispositif.

Tableau 5 : dispositif mis en place en fonction du mode de désherbage

| Mode de désherbage après plantation | Désherbage chimique seulement | Désherbage mécanique seulement | Désherbage mécanique + chimique | Aucun désherbage |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Nb parcelles | 12 | 7 | 11 | 4 |

En ce qui concerne le nombre de labours effectué entre 2011 et 2016, les parcelles se répartissaient selon le tableau 6 page 29. Deux groupes se distinguaient : celui comprenant les parcelles ayant réalisé quatre labours ou moins entre 2011 et 2016, et celui comprenant les parcelles ayant réalisé plus de quatre labours entre 2011 et 2016. Les deux groupes ont été créés par connaissance experte et par l'histogramme sur la figure 10 page 29. En effet, l'histogramme présentait une asymétrie de distribution négative. Ainsi, le premier groupe était constitué des parcelles où les labours étaient effectués systématiquement (chaque année) ou quasi systématiquement (5-6 labours en 6 ans). Le deuxième groupe par conséquent était constitué des parcelles où le nombre de labours était moyen à peu fréquent, soit inférieur à quatre.

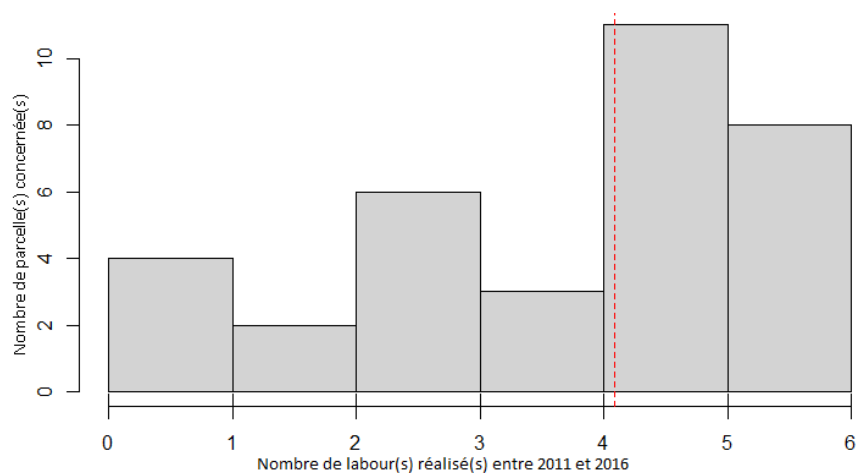


Figure 10 : histogramme, nombre de labours réalisés de 2011 à 2016 et le nombre de parcelles correspondant. La ligne pointillée rouge correspondant à la moyenne de l'échantillon

Tableau 6 : dispositif mis en place en fonction du nombre de labours de 2011 à 2016

| Nombre de labours entre 2011-2016 | inférieur ou égal à 4 | Labour > 4 |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|
| Nb parcelles | 15 | 19 |

Concernant l'apport de matière organique, une distinction a été faite entre les parcelles ayant apporté de la MO au moins une fois les trois dernières années (2015-2017), et celles n'en ayant pas apporté. Les parcelles se répartissaient selon le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : dispositif mis en place en fonction de l'apport de MO entre 2015 et 2017

| Apport de MO entre 2015 et 2017 | Apport de MO les 3 dernières années | Pas d'apport de MO les 3 dernières années |
|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| Nb parcelles | 10 | 24 |

Concernant le délai de retour du lavandin, deux groupes ont été définis. Les parcelles dont le délai de retour du lavandin était inférieur ou égal à 6 ans constituaient le premier groupe. Les parcelles dont le délai de retour du lavandin était supérieur à 6 constituaient le deuxième groupe. Le seuil de 6 a été choisi de façon assez théorique par manque de références techniques. Il s'avère que ce seuil est surévalué, le délai de retour minimum du lavandin étant, en raison du contexte économique, de 2 à 4 ans sur le plateau. Cependant, agronomiquement, ce délai devrait être au minimum doublé, d'où le seuil de 6, le lavandin ayant une durée de vie de 6 à 9 ans. Le tableau ci-dessous résume le dispositif.

Tableau 8 : dispositif mis en place en fonction du délai de retour du lavandin

| Délai de retour | Délai de retour ≤ 6 ans | Délai de retour > 6 ans |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Nb parcelles | 14 | 20 |

Concernant le sous solage, deux groupes ont été définis. Le premier regroupait les parcelles ayant effectué un sous-solage avant la plantation du lavandin. Le deuxième, à l'inverse, regroupait les parcelles avec absence de sous-solage.

Tableau 9 : dispositif mis en place en fonction du sous-solage

| Sous –solage avant plantation | Présence d'un sous-solage | Absence de sous-solage |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Nb parcelles | 12 | 22 |

Enfin, en ce qui concerne l'enherbement inter-rang, deux groupes ont été définis. Le premier regroupait les parcelles ayant mis en place un enherbement inter-rang. Le deuxième regroupait les parcelles sans enherbement.

Tableau 10 : dispositif mis en place en fonction de l'enherbement

| Enherbement inter-rang | Présence d'un enherbement | Absence d'un enherbement |
|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Nb parcelles | 9 | 25 |

Au final, l'ensemble des pratiques sélectionnées a permis d'obtenir un tableau de codage avec une série de variables qualitatives, prenant différentes modalités. Les tableaux des annexes 14 et 15 définissent les différentes variables et modalités utilisées.

2.2.5) Phase 5 : Analyse des données, traitements statistiques

L'objectif premier de l'étude était d'évaluer les effets de pratiques agricoles sur la qualité des sols (question 2). Cependant, l'échantillon de parcelles étudiées était un échantillon qualifié « d'opportunité », c'est-à-dire que les parcelles ont été choisies sur la base du volontariat. Ainsi, l'expérimentation se faisait de manière non contrôlée. De fait, les parcelles présentaient une grande variabilité de pratiques culturales et de type de sol. Aussi, plutôt que d'étudier l'impact de pratiques prises individuellement sur la variation des indicateurs dynamiques, il paraissait plus judicieux de réaliser une typologie de pratiques. De plus, pour répondre de manière pertinente à la question 2, il était également nécessaire d'évaluer au préalable l'influence des types de sols sur les propriétés dynamiques (question 1). En effet, des types de sols différents impliquent des caractéristiques inhérentes différentes. Or, ces indicateurs inhérents expliquent en partie la variabilité des indicateurs dynamiques (Salomé et al., 2015). Ainsi, la mise en évidence de l'effet de groupes de pratiques sur certaines qualités dynamiques pouvait être influencée par les types de sols, d'où la nécessité d'étudier séparément l'impact de ces derniers sur les indicateurs dynamiques. Pour ce faire, une typologie de sol a également été effectuée.

Ces classifications devaient permettre ainsi de répondre aux hypothèses 1 et 2 énoncées en introduction.

Pour répondre à ces hypothèses, le logiciel d'analyse statistique R a été utilisé.

Dans un premier temps, une analyse univariée a été réalisée sur les indicateurs de sol (dynamiques et inhérents) afin d'avoir une description générale du jeu de données. Puis, une analyse bivariée a été effectuée pour mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre indicateurs inhérents (par exemple entre le calcaire total et la teneur en argile), entre indicateurs inhérents et dynamiques (par exemple entre le carbone organique total et la teneur en argile), et entre indicateurs dynamiques (par exemple entre la BM et le Corg). Ensuite, des analyses multivariées ont été entreprises.

2.2.5.1) Analyse multivariée effectuée pour répondre à la question 1

- Création de la typologie de sol

Pour créer une typologie de sol, une ACP (Analyse en Composantes Principales) sur les indicateurs inhérents du sol a tout d'abord été réalisée afin d'identifier d'éventuels groupes de sols et d'observer les variables qui distinguaient le plus ces groupes. Les indicateurs inhérents comprenaient la teneur en limon, en argile, en sable, ainsi que la teneur en calcaire total et actif. Suite à cette ACP, une classification hiérarchique a été entreprise afin de classer les parcelles dans différents groupes de sols. Cette classification a été réalisée entre autres avec le package FactomineR et la fonction HCPC().

- Création d'une ACP sur les variables dynamiques

Suite à la classification des sols, une ACP sur les indicateurs biologiques et chimiques a été réalisée dans le but de visualiser si des variables dynamiques caractériseraient certains groupes de sols formés. Cette ACP a permis également d'observer les variables qui expliquaient le plus de variabilité entre parcelles.

- Etude des liens entre les groupes de sols et les indicateurs dynamiques : tests ANOVA et test non paramétriques

Afin de mettre en évidence des relations existantes ou non entre groupes de sols et indicateurs dynamiques, des tests ANOVA¹² à un facteur pour échantillons indépendants ont été entrepris entre les types de sols et chaque indicateur dynamique. L'objectif de ces ANOVA était de répondre à l'hypothèse 1 en mettant en évidence les effets significatifs ou non de groupes de sols sur les variables dynamiques de la qualité des sols.

En ce qui concerne les conditions d'application du test ANOVA, la normalité des distributions était contrôlée par le test de Shapiro-Wilk. Lorsque des écarts à la normalité étaient constatés, mais que la p-value se situait entre 0.05 et 0.01, le test ANOVA était maintenu. En effet, le test ANOVA reste robuste à des écarts modérés de la normalité. En revanche, si la p-value s'éloignait grandement de la

¹² Le test ANOVA est basé sur une analyse de variance et vise à comparer des moyennes intra-groupe ou inter-groupes

normalité, alors une normalisation était effectuée avec la fonction `Normalize()` du package « `QuantPsyc` » pour se rapprocher de la normalité. Si la normalisation ne suffisait pas, alors le test non paramétrique de Kruskal-Wallis était effectué, suivi du test de comparaisons de moyennes non paramétriques de Wilcoxon (ou Holm) en lieu et place de l'ANOVA. Quant à la condition d'homoscédasticité (égalité des variances) des résidus, celle-ci était contrôlée par le test de Levene. Le package « `car` » était nécessaire pour la réalisation du test. En cas d'hétéroscédasticité ($p\text{-value} < 0.05$) une normalisation était effectuée avec la fonction « `Normalize()` ». Si la normalisation ne suffisait pas, alors une correction de Welsh était appliquée pour réaliser le test ANOVA afin qu'une correction sur le degré de liberté soit appliquée. Puis la méthode de Holm, qui compare les modalités lorsque les variances sont inégales, était utilisée.

Enfin, lorsque les conditions de l'ANOVA étaient remplies (homoscédasticité, indépendance des observations, normalité des distributions), cas le plus fréquent, le test ANOVA était appliqué avec la fonction `aov()`. Si le test ANOVA était significatif ($p\text{-value} < 0.1$) alors le test de Tukey était appliqué pour déterminer les modalités qui différaient significativement entre elles.

2.2.5.2) Analyse multivariée effectuée pour répondre à la question 2

- Création de la typologie de pratiques

Pour créer une typologie de pratiques, une ACM (Analyse des Correspondances Multiples) a été effectuée afin d'identifier des groupes de pratiques. Pour ce faire, certaines variables quantitatives telles que l'IFT total cumulé et le nombre de labours de 2011 à 2016 ont été transformées en variables qualitatives en créant des classes (cf. partie 2.2.4.3), l'ACM n'acceptant que des variables qualitatives. Suite à cette ACM, une classification hiérarchique a été entreprise de la même manière que pour la typologie de sol, afin de créer des groupes de pratiques.

- Création d'une ACP sur les indicateurs dynamiques

De manière similaire à l'étude des types de sols, une ACP sur les indicateurs biologiques et chimiques a été réalisée après la création des groupes de pratiques dans le but de visualiser si des variables dynamiques caractériseraient certains groupes de pratiques.

- Etude des liens entre les groupes de pratiques et les indicateurs dynamiques : tests ANOVA et tests non paramétriques

Afin de mettre en évidence des relations existantes ou non entre groupes de pratiques et indicateurs dynamiques, des tests ANOVA à un facteur pour échantillons indépendants ont été entrepris de la même façon que pour l'étude des liens entre les groupes de sols et les indicateurs dynamiques.

3) Résultats de l'étude

Sur les graphiques et les tableaux qui vont suivre dans cette partie, ne pas confondre la proportion de nématodes bactériovores, fongivores, omnivores et carnivores, et phytophages, nommés respectivement « bactériovores », « fongivores », « omnivores », « phytophages », avec leur abondance, nommés respectivement « bactériovores2 », « fongivores2 », « omnivores2 », « phytophages2 ». Se référer à l'annexe 1 pour connaître les abréviations des indicateurs employés.

3.1) Analyse univariée : description générale du jeu de données

Le tableau 11 page 34 met en évidence les analyses statistiques descriptives des indicateurs du jeu de données.

Quelques points importants ressortent de cette première analyse. Tout d'abord d'un point de vue physico-chimique les parcelles présentent toutes un pH alcalin, supérieur à 8 (figure 11 ci-dessous). Ce pH basique est principalement dû à la teneur en calcaire. Celle-ci est cependant très hétérogène et varie de 1.5% à 68.4%, avec une moyenne élevée autour de 38%. Concernant le CEC, celle-ci présente une moyenne 13.16 de Cmol+/kg qui peut être qualifiée de « assez élevée » (Salducci, 2017a). Ainsi la capacité du sol des parcelles à retenir les éléments nutritifs (potassium, sodium, *etc.*) est satisfaisante en moyenne. Néanmoins ces sols se retrouvent essentiellement saturés en ions calcium, dus à la présence du calcaire. Cette présence de calcium présente l'avantage de favoriser l'agrégation et la stabilité des sols puisqu'il intervient dans la formation des complexes argilo-humiques. D'un point de vue biochimique la teneur moyenne des sols en MO est faible avec une moyenne de 2.2% (figure 11 ci-dessous). La MO souhaitable pour ces types de sols se situant autour de 3.1% (Salducci, 2017a). Suite à la description du jeu de données deux indicateurs de sol ont été retirés pour la suite des analyses :

- le pH, en raison de sa variabilité inter-parcellaire très faible
- le sodium échangeable. Ce dernier présente des risques de toxicité pour la culture lorsque sa concentration excède les 0.1g/kg, mais ici les teneurs en sodium sont très satisfaisantes (<0.03g/kg).

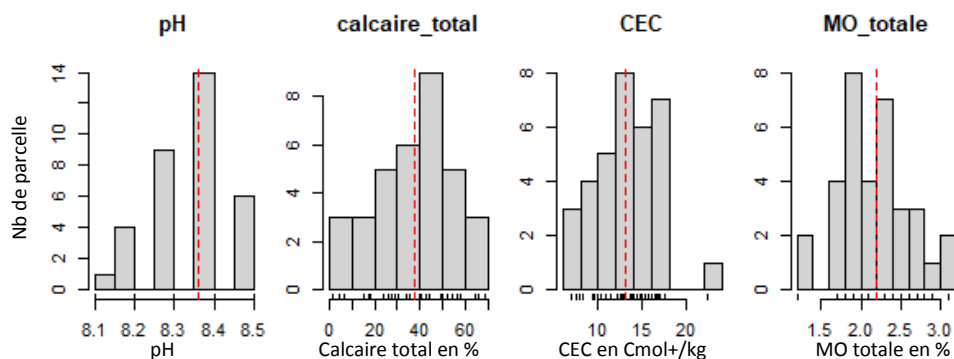


Figure 11 : histogrammes du pH, du calcaire total, de la CEC et de la MO totale. La ligne pointillée rouge représentant la moyenne de chaque indicateur.

Tableau 11 : Statistiques descriptives des indicateurs dynamiques et inhérents de l'étude

| | moyenne ± écart type | médiane | minimum | maximum | coefficient de variation (en %) |
|---|-------------------------|---------|---------|---------|------------------------------------|
| Indicateurs inhérents du sol | | | | | |
| argile (%) | 29,10 ± 5,60 | 28,22 | 18,1 | 43,7 | 19 |
| limon (%) | 44,8 ± 5,88 | 46,32 | 33,3 | 63,3 | 13 |
| sable (%) | 26,10 ± 6,44 | 27,74 | 11,3 | 41,2 | 25 |
| calcaire total (g/kg) | 379,3 ± 172 | 401 | 15 | 684 | 47 |
| calcaire actif (g/kg) | 13,36 ± 5,78 | 15,11 | 0 | 20,2 | 43 |
| Indicateurs dynamiques du sol | | | | | |
| pH | 8,36 ± 0,1 | 8,4 | 8,1 | 8,5 | 1 |
| CEC (Cmol+/kg) | 13,16 ± 3,39 | 13,35 | 6,9 | 22,3 | 26 |
| K (g/kg) | 0,22 ± 0,08 | 0,13 | 0,11 | 0,44 | 38 |
| Mg (g/kg) | 0,13 ± 0,04 | 0,13 | 0,08 | 0,25 | 31 |
| Ca (g/kg) | 13,33 ± 1,54 | 13,27 | 9,57 | 17,35 | 12 |
| Na (g/kg) | 0,01 ± 0 | 0,01 | 0,01 | 0,022 | 26 |
| C/N | 9,70 ± 0,89 | 9,61 | 7,7 | 11,8 | 9 |
| Ntotal (g/kg) | 1,32 ± 0,23 | 1,37 | 0,8 | 1,72 | 18 |
| Corg (g/kg) | 12,81 ± 2,66 | 12,79 | 7 | 18 | 21 |
| BM (mgC/kg) | 331,43 ± 73,64 | 319,17 | 179 | 554 | 22 |
| BM/Corg | 2,63 ± 0,51 | 2,59 | 1,8 | 4,2 | 19 |
| Cmin (mgC/kg/28j) | 431,8 ± 221,99 | 380,63 | 171 | 1404 | 51 |
| Nmin (mgN/kg/28j) | 23,59 ± 12,86 | 20,94 | 79,2 | 111 | 55 |
| Abondance totale nématodes (ind 100 g-1 sol) | 1435,88 ± 688,98 | 1211,97 | 283 | 3899 | 48 |
| Bactériovores totaux (en ind 100 g-1 sol) | 424,67 ± 368,40 | 358,57 | 84 | 2139 | 87 |
| Fongivores totaux (en ind 100 g-1 sol) | 364,84 ± 346,46 | 231,63 | 44 | 1590 | 95 |
| Omnivores + carnivores (en ind 100 g-1 sol) | 54,46 ± 38,68 | 48,34 | 0 | 187 | 71 |
| Phytophages totaux (en ind 100 g-1 sol) | 591,59 ± 359,46 | 518,72 | 98 | 1744 | 61 |
| Bactériovores totaux (en %) | 28,47 ± 12,29 | 26,69 | 14 | 55 | 43 |
| Fongivores totaux (%) | 23,69 ± 13,23 | 19,57 | 4 | 58 | 56 |
| Carnivores + omnivores totaux (%) | 4,42 ± 3,32 | 3,39 | 0 | 14 | 75 |
| Phytophages totaux (%) | 43,36 ± 19,59 | 45,43 | 4 | 73 | 45 |
| EI | 58,78 ± 13,26 | 55,39 | 37 | 87 | 23 |
| SI | 36,48 ± 18,53 | 36,04 | 0 | 71 | 51 |
| Indice de Shannon | 2,06 ± 0,24 | 2,04 | 1,58 | 2,49 | 12 |
| MO totale (%) | 2,2 ± 0,46 | 2,2 | 1,2 | 3,1 | 21 |
| MO libre (%) | 0,50 ± 0,17 | 0,5 | 0,18 | 0,91 | 33 |
| MO liée (%) | 1,70 ± 0,34 | 1,71 | 0,95 | 2,33 | 20 |

3.2) Analyse bivariée : aperçu des relations entre indicateurs de sol et regroupement de variables

Face aux nombres importants d'indicateurs, il était nécessaire d'examiner si des variables co-fonctionnaient et de regrouper les variables qui corrélaient positivement et fortement entre elles (coefficient de corrélation > 0.8). Le corrélogramme (figure 12 p. 36) a permis de mettre en évidence les corrélations significatives entre tous les indicateurs.

D'une manière générale, une absence de relation a été constatée entre les indicateurs physico-chimiques et les variables biologiques. Puis d'un point de vue des relations entre variables physico-chimiques, on note quelques corrélations intéressantes. Tout d'abord, on observe une relation inversement proportionnelle entre la proportion en argile et la proportion en calcaire, avec un coefficient de corrélation de 0.9. Ainsi, les sols les plus calcaires sont les moins argileux et inversement. De fait, la CEC liée à la teneur en argile diminue elle aussi lorsque la proportion en calcaire augmente, celui-ci ne présentant pas de charges négatives. En revanche, les relations entre CEC et teneur en matière organique d'une part, et argile et teneur en MO d'autre part, souvent citées dans la bibliographie, n'ont pas été constatées. Ainsi une forte proportion en argile n'entraîne pas dans notre cas une teneur en matière organique plus élevée, et des taux de MO plus élevés n'impliquent pas une hausse de la CEC. Il est possible que la forte teneur en cailloux ait perturbé ces relations habituellement observées dans un sol.

D'un point de vue biologique, la BM et toutes les MO (MO liée, MO libre) sont corrélées positivement avec le Corg. Ce dernier correspond au carbone contenu dans la MO, d'où les corrélations positives.

Enfin, concernant les nématodes, l'abondance des bactérivores est corrélée positivement avec les nématodes fongivores. Ces deux groupes exploitent tous les deux les micro-organismes du sol ce qui peut expliquer leur corrélation positive.

Au final, suite au corrélogramme, les indicateurs dynamiques avec une très forte relation ont été regroupés. Ainsi, le Cmin a été regroupé avec le Nmin, l'azote total avec le Corg, la MO totale avec le Corg. Dès lors, le Cmin, le Corg ont été utilisés pour la réalisation des tests ANOVA. Le Nmin, l'azote total et la MO total n'ont pas été utilisés.

en calcaire total et actif. Ainsi les parcelles se situant à gauche du premier axe (figure 14) possèdent une teneur en calcaire total et actif plus élevée que les parcelles se situant à droite de l'axe. Ces dernières possèdent, elles, des teneurs en argile plus élevées.

Puis, les proportions en limon et sable contribuent autant à la création de l'axe 1 et 2. Pour la dimension 2, celle-ci est corrélée positivement à 70% avec la proportion en sable et corrélée négativement à environ 50% avec la proportion en limon.

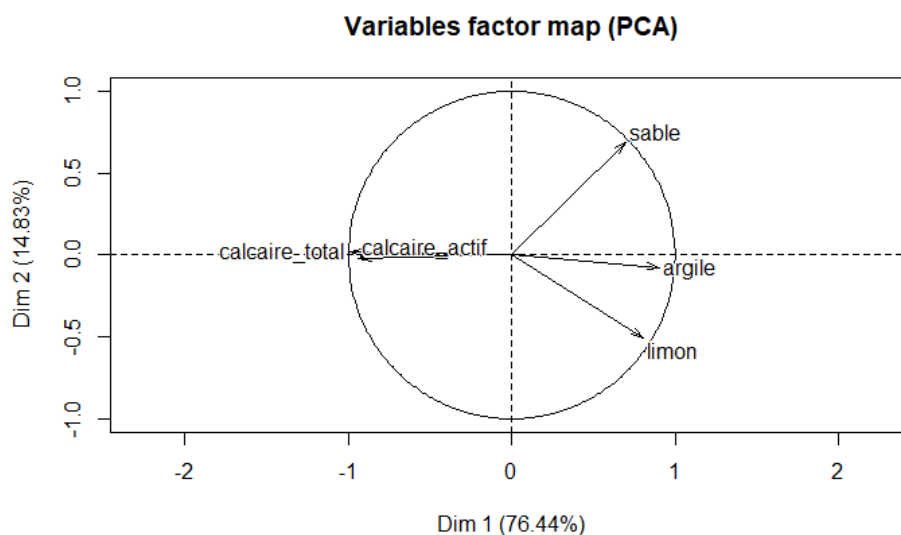


Figure 13 : graphique des variables sur les deux premières dimensions de l'ACP effectué sur les indicateurs inhérents. Le nombre entre parenthèse représentant le % de variance pour chacun des axes

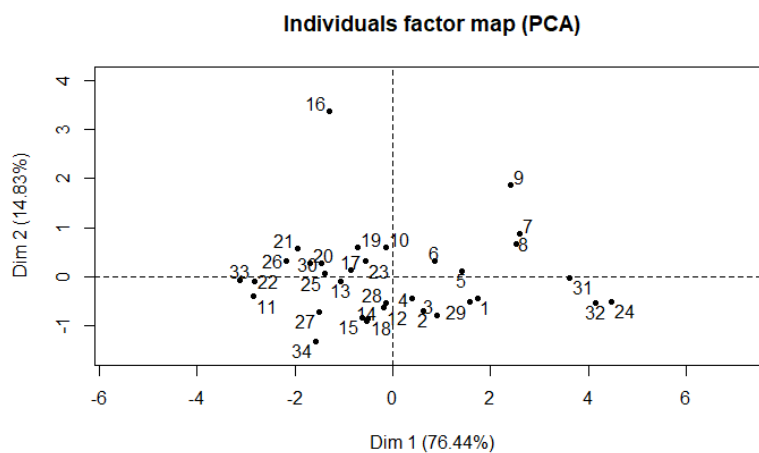


Figure 14 : graphe des parcelles sur les deux premières dimensions de l'ACP. Le nuage de points représentant les numéros des parcelles

Suite à l'ACP, une classification hiérarchique a permis de discriminer des groupes de sols. Trois groupes sont ainsi ressortis de cette analyse (figure 15 p. 38). La figure 16 page 39 illustre la façon dont les groupes de sols ont été discriminés. Puis, les tableaux 12 et 13 page 39 résument les caractéristiques de chaque groupe de sols.

La teneur en calcaire total, actif, et la proportion en argile sont les principales propriétés qui distinguent le groupe A du groupe B et C. Le groupe A se différencie du groupe B et C par sa teneur

en calcaire <17.9% et sa proportion moyenne en argile élevée (30,5%). Puis la proportion en limon permet de discriminer les groupes B et C avec une teneur en limon > 27% pour le groupe B, qui constitue le groupe de sols le plus limoneux. La teneur en sable, facteur non discriminant, elle, est la plus élevée dans le groupe C avec une teneur moyenne de 19.5%.

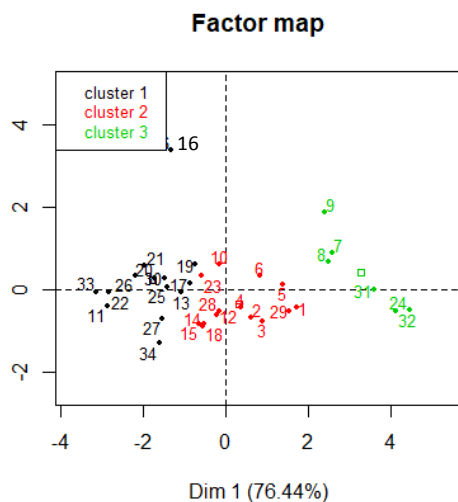


Figure 15 : Graphique relatif aux parcelles issu des deux premières dimensions de l'ACP avec les trois groupes de sols identifiés par des couleurs différentes. Le cluster 1 correspond au groupe de sol C, le cluster 2 au groupe B et le cluster 3 au groupe A

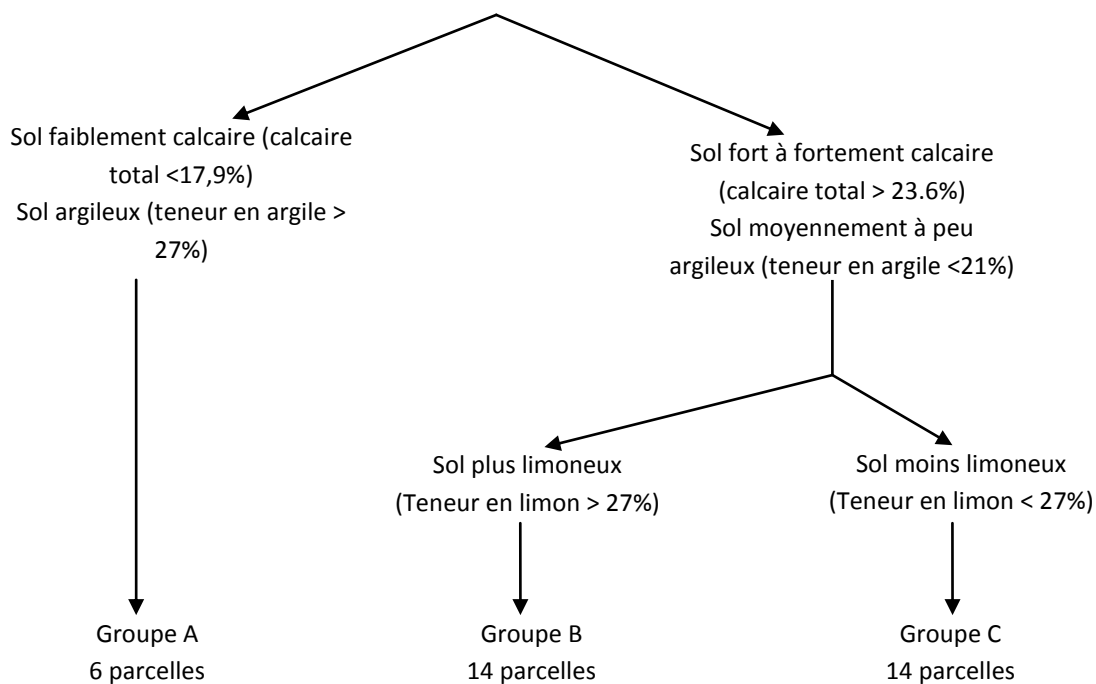


Figure 16 : Classification hiérarchique des groupes de sols

Tableau 12 : Caractéristiques des groupes de sols identifiés

| Groupe de sol | Description | % en calcaire total | % en argile | % en sable | % en limon |
|---------------|--|---------------------|-------------|---------------|--|
| A | « Faiblement calcaire et argileux » | 1.5% à 17.9% | 27% à 38% | 16.7% à 22.4% | 21.2% à 44.3% |
| B | « Fort à très fortement calcaire et limoneux » | 23.6% à 43% | 18% à 26% | 5.7% à 15.7% | 27.2% à 35.8% |
| C | « Fort à très fortement calcaire et peu limoneux » | 40% à 68.4% | 7.5% à 21% | 1.4% à 25.2% | 8.3% à 27% (hormis une parcelle à 33%) |

Tableau 13 : Moyenne des teneurs en calcaire total, argile, sable et limon des groupes de sols identifiés

| Groupe de sol | Moyenne en calcaire total (en %) | Moyenne en argile(en %) | Moyenne en sable (en %) | Moyenne en limon (en %) |
|---------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| A | 10.7% | 30.5% | 19.5% | 35,8% |
| B | 34% | 22.5% | 10.7% | 30.6% |
| C | 56% | 15% | 15.6% | 17.9% |

3.3.1.2) Aperçu général de l'organisation des indicateurs dynamiques par rapport aux groupes de sol via l'utilisation de plans factoriels

Les ACP réalisées sur les indicateurs dynamiques sont disponibles en annexes 16 et 17.

75.1% de la dispersion des variables est expliquée par les dimensions 1 et 2 de l'ACP réalisée sur les indicateurs chimiques (annexe 16), ce qui est un bon score. Puis 54.4% de la dispersion des variables est expliquée par les dimensions 1 et 2 de l'ACP réalisée sur les indicateurs biologiques (annexe 17), ce qui est également un bon résultat étant donné le nombre important de variables biologiques considérées.

L'ACP relative aux indicateurs chimiques (annexe 16) met en évidence une superposition des groupes de sols A, B et C (les ellipses de confiance se chevauchent). Ainsi les groupes de sols ne semblent pas caractériser les indicateurs dynamiques chimiques, hormis le groupe A qui se distingue par sa CEC. Celle-ci a été définie comme un indicateur dynamique selon Salomé et al. (2014) mais semble finalement se comporter davantage comme un indicateur inhérent, puisqu'elle discrimine nettement les groupes de sols, avec les CEC les plus élevées pour le groupe A. De manière similaire, le potassium et le magnésium échangeables auraient pu être classés parmi les indicateurs inhérents, ceux-ci étant liés à la CEC. Ensuite, le recouvrement important des groupes notamment selon l'axe 1 montre que la teneur en matière organique est peu liée au type de sol. Néanmoins, on note que les parcelles du groupe B

semblent avoir dans l'ensemble des valeurs de Corg, MO libre, MO liée et azote total plus élevées comparativement aux parcelles des autres groupes de sols.

En ce qui concerne le calcium, celui-ci est peu représentatif des dimensions de l'ACP (flèche courte).

De fait, le calcium n'a pas été utilisé par la suite dans la réalisation des tests ANOVA.

Enfin, l'ACP réalisée sur les indicateurs biologiques en annexe 17 montre que les types de sol n'influencent pas les indicateurs biologiques. Ainsi, les pratiques culturales sembleraient davantage impliquées dans la variation de ces paramètres.

3.3.1.3) Effet des différents groupes de sol sur les indicateurs dynamiques du sol

Les résultats des tests ANOVA sont visualisables sur le tableau 14 ci-dessous.

Tableau 14 : Résultats des tests ANOVA effectués pour mesurer l'effet des 3 types de sols sur les 22 indicateurs de sols retenus. ** indique un effet significatif, avec une p-value < 0.001 ; *** indique un effet significatif avec une p-value < 0.01 ; ** indique un effet significatif avec une p-value < 0.05 ; * indique un effet significatif avec une p-value < 0.1 ; « ns » indique une absence d'effet significatif avec une p-value > 0.05.**

| Indicateurs | Moyenne Groupe A | Moyenne Groupe B | Moyenne Groupe C | B-C | A-C | A-B |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----|------|-----|
| CEC (Cmol+/kg) | 17,32 | 13,74 | 10,81 | ** | **** | ** |
| K échangeable (g/kg) | 0,29 | 0,23 | 0,18 | * | ** | ns |
| Mg échangeable (g/kg) | 0,15 | 0,14 | 0,11 | * | * | ns |
| C/N | 8,88 | 9,95 | 9,79 | ns | * | ** |
| Corg (g/kg) | 12,22 | 14,16 | 11,71 | ** | ns | ns |
| MO libre (%) | 0,42 | 0,56 | 0,48 | ns | ns | ns |
| MO liée (%) | 1,68 | 1,87 | 1,53 | ** | ns | ns |
| BM (mgC/kg) | 341,33 | 339,79 | 318,86 | ns | ns | ns |
| BM\Corg | 2,78 | 2,41 | 2,81 | * | ns | ns |
| Cmin (mgC/kg/28j) | 439,83 | 460,14 | 400 | ns | ns | ns |
| Bactérovores (%) | 25,83 | 32,93 | 25,29 | ns | ns | ns |
| Fongivores (%) | 17 | 14,5 | 25,86 | ns | ns | ns |
| Omnivores (%) | 4,17 | 4,57 | 4,36 | ns | ns | ns |
| Phytophages (%) | 53,17 | 38,07 | 44,21 | ns | ns | ns |
| Bactérovores2 (ind 100 g-1 sol) | 325 | 502,71 | 389,36 | ** | ns | ns |
| Fongivores2 (ind 100 g-1 sol) | 208,5 | 408,57 | 388,21 | ns | ns | ns |
| Omnivores2 (ind 100 g-1 sol) | 48 | 62,71 | 49,21 | ns | ns | ns |
| Phytophages2 (ind 100 g-1 sol) | 607,83 | 614,79 | 561,43 | ns | ns | ns |
| Abondance N (ind 100 g-1 sol) | 1189,5 | 1589,14 | 1388,36 | ns | ns | ns |
| EI | 66,5 | 53,93 | 60,29 | ns | ns | * |
| SI | 41,83 | 32,57 | 38 | ns | ns | ns |
| Indice de Shannon | 1,99 | 2,09 | 2,06 | ns | ns | ns |

- Effet des types de sols sur les indicateurs chimiques

Les tests ANOVA mettent en évidence un effet principal de la CEC qui diffère significativement entre les trois groupes de sols (figure 17 page 41). La CEC étant liée à la teneur en argile, la moyenne la plus élevée a été constatée pour le groupe le plus argileux (groupe A). À l'inverse la moyenne la plus basse a été constatée pour le groupe le plus calcaire, et donc le moins argileux (groupe C). Ainsi les éléments nutritifs que sont le magnésium et le potassium échangeables, dépendant de la « taille » de la CEC, se retrouvent en concentration plus élevée pour le groupe A (figure 18 ci-dessous).

Concernant le Corg (figure 19 page 42), la moyenne la plus élevée a été trouvée pour le groupe B (14.16 g/kg) avec une différence significative avec le groupe C. Le groupe A le plus argileux ne présente pas la teneur en Corg la plus élevée, ce qui confirme l'absence de relation trouvée entre la matière organique et la CEC. La valeur souhaitable en Corg d'une manière générale pour les types de sols du plateau étant de l'ordre de 18g/kg (Salducci, 2017b), tous les groupes possèdent un taux de matière organique faible. Le rapport C/N moyen (figure 20 page 42), lui, est significativement plus faible pour le groupe A par rapport aux deux autres groupes. Cela peut se traduire par une MO un peu plus surconsommée pour le groupe A par rapport aux deux autres groupes.

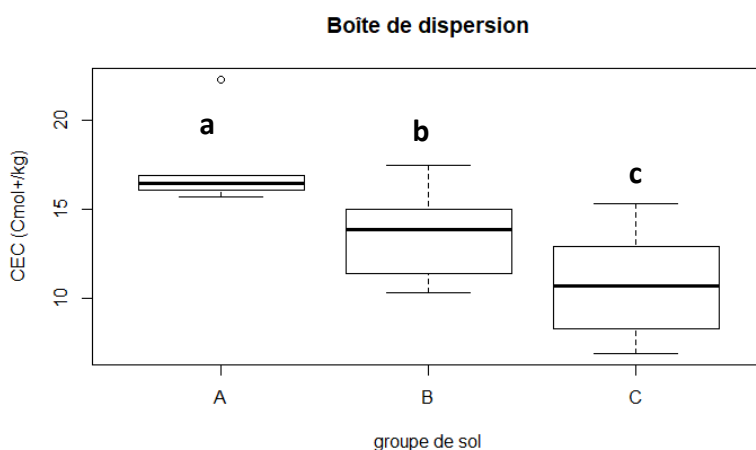


Figure 17 : boîtes à moustaches de la CEC en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1)

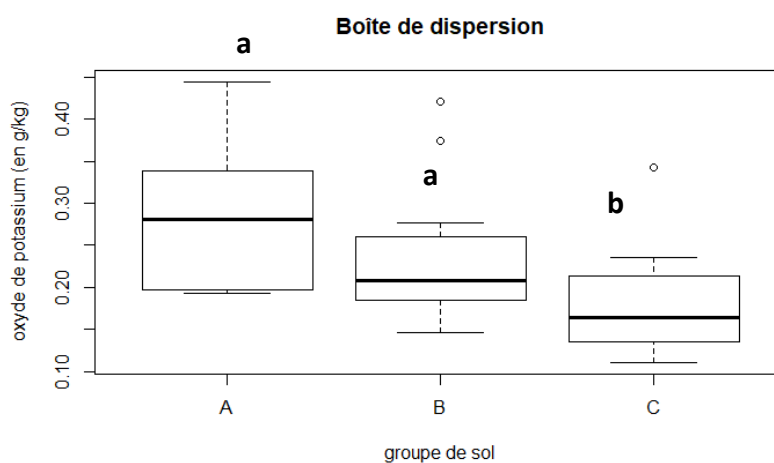


Figure 18 : boîtes à moustaches du K échangeable en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1)

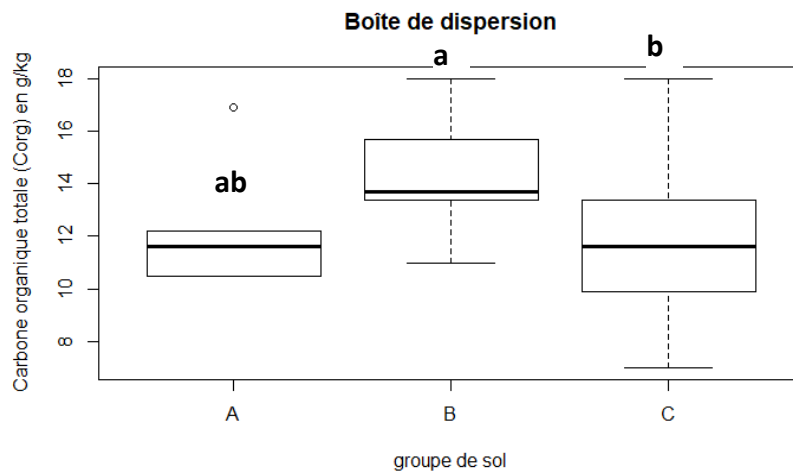


Figure 19 : boîtes à moustaches du Corg en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p -value <0.1)

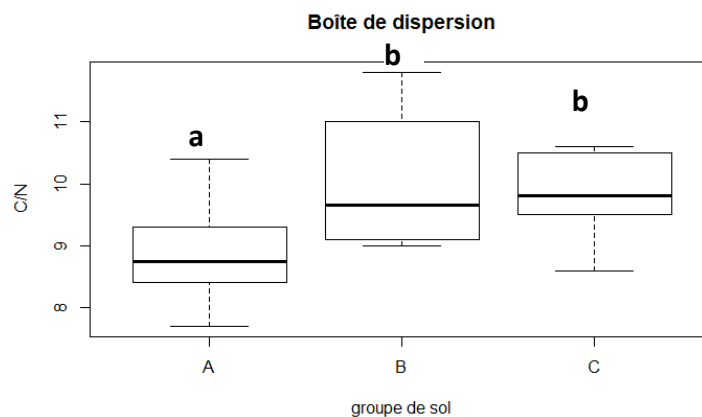


Figure 20 : boîtes à moustaches du C/N en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p -value <0.1)

- Effet des types de sols sur les indicateurs biologiques

Les tests ANOVA ont mis en évidence un effet du BM/Corg, de l'abondance des nématodes bactériovores et de l'indice d'enrichissement des nématodes (EI).

Le rendement microbien représenté par le rapport BM/Corg est le plus faible pour le groupe B (figure 21 p. 43). Néanmoins, la référence se situant aux alentours de 2.1% (Salducci, 2017b), la capacité du sol à produire de la BM reste satisfaisante, le groupe B ayant un BM/Corg moyen de 2.4. En ce qui concerne les nématodes, l'abondance des bactériovores (figure 22) est significativement différente entre le groupe B et C, avec la concentration la plus élevée dans le groupe B.

Enfin, l'EI (indice d'enrichissement) le plus élevé se retrouve dans le groupe A (figure 23 p. 43), avec une différence significative avec le groupe B. Ainsi le groupe A possède la meilleure disponibilité en nutriments (azote, phosphore, *etc.*). Cette meilleure disponibilité s'explique probablement par le caractère plus argileux du groupe qui, avec sa CEC plus élevée, retient en conséquence davantage d'éléments nutritifs.

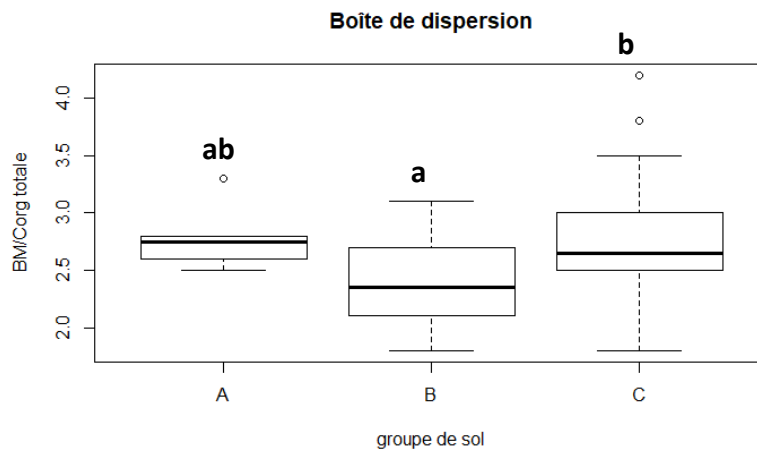


Figure 21 : boîtes à moustaches du rapport BM/Corg en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p -value <0.1)

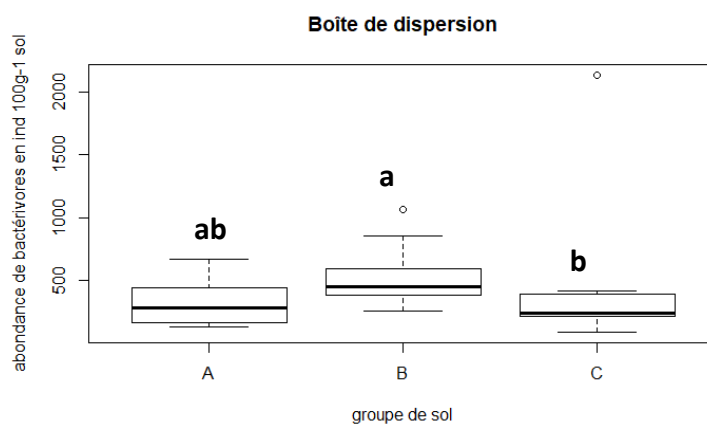


Figure 22 : boîtes à moustaches de l'abondance des nématodes bactérivores en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p -value <0.1)

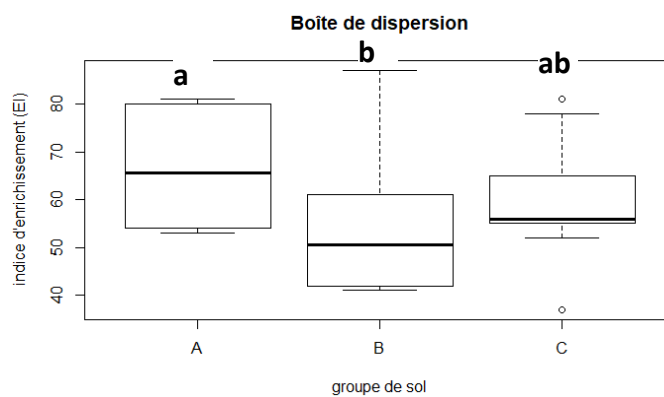


Figure 23 : boîtes à moustaches de l'EI en fonction des groupes de sols. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p -value <0.1)

3.3.2) Résultats liés à la question 2 : Quels sont les liens entre pratiques agricoles et les indicateurs de sol ?

3.3.2.1) Classification en groupe de pratiques

Le résultat de l'ACM réalisée sur l'ensemble des pratiques agricoles sélectionnées est visualisable sur les figures 24 et 25 ci-dessous. Pour avoir la signification entre les variables et les modalités de pratiques se référer aux tableaux des annexes 14 et 15.

Les dimensions 1 et 2 expliquent 45,04 % de la dispersion des variables. Le graphique des individus (figure 24) met en avant des parcelles aux profils très différents. En effet, les parcelles 23, 24, 33, 34, 5, 11 et 2 correspondant aux parcelles en agriculture biologique s'écartent distinctement du reste des parcelles. Ainsi, les pratiques agricoles exercées sont très différentes entre ces deux groupes. Puis, le graphique des modalités de variables (figure 25) met en évidence des associations fortes entre certaines modalités de pratique. C'est le cas des modalités « DM+DC », « labour>4 », « IFT2_fort », « ferti_organon » et « BI » : la plupart des parcelles qui présentent par exemple un IFT fort ont également pratiqué un nombre de labours supérieur à quatre entre 2011 et 2016, mais possèdent aussi un historique cultural à dominance de blé, pratiquent un désherbage mécanique et chimique après plantation, et n'apportent pas de fertilisation organique.

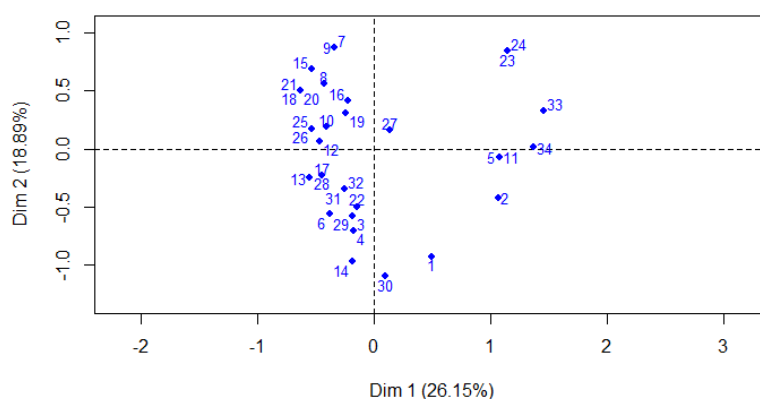


Figure 24 : graphique des parcelles sur les deux premières dimensions de l'ACM

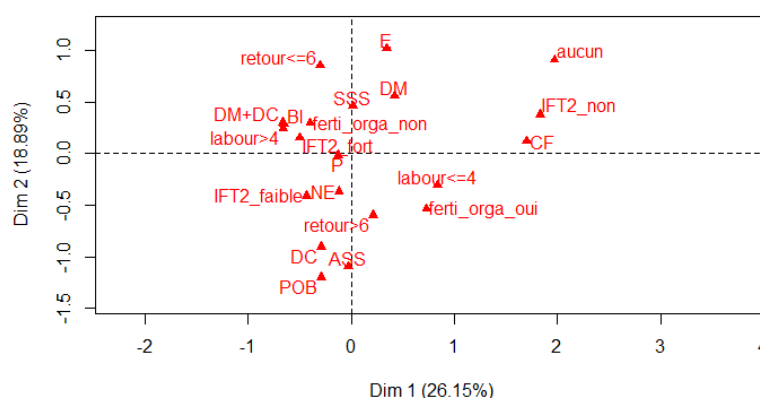


Figure 25 : graphique des modalités de pratiques sur les deux premières dimensions de l'ACM

Suite à l'ACM, six groupes de pratiques ont été discriminés à partir de la classification hiérarchique (figure 26 et 27 p. 46). La pratique « enherbement » qui avait été sélectionnée pour réaliser la typologie n'a pas contribué significativement à différencier les parcelles entre elles. Ainsi, elle n'a pas été prise en compte par le logiciel R dans la création des groupes de pratiques, contrairement aux autres variables (« labour », « sous-solage », *etc*). La figure 27 page 46 met en avant les modalités principales qui ont permis la discrimination des groupes. Puis le tableau 15 page 47 et 48 répertorie les caractéristiques principales de chaque groupe.

L'arbre hiérarchique a permis de différencier deux grands groupes bien distincts : le groupe des agriculteurs biologiques (groupe G5 et G6) et le groupe des agriculteurs conventionnels (groupe G1, G2, G3, G4). Les groupes G5 et G6 se différencient entre eux principalement par le mode de désherbage après plantation qui était inexistant pour le groupe G6. En revanche, ces deux groupes sont similaires sur l'historique cultural avec la présence d'une culture fourragère dans la rotation des 5 dernières années. Par conséquent, le nombre de labours était inférieur ou égal à 4 de 2011 à 2016, la culture fourragère étant présente au moins deux ans de suite. Ensuite, les groupes G1 et G2 regroupent la totalité des parcelles avec une rotation culturale à dominance de blé les 5 dernières années. Ils se différencient entre autres par le mode de désherbage après plantation qui est 100% chimique pour le groupe G2 et qui est chimique et mécanique pour 72% des individus du groupe G1. De plus, aucun sous solage n'a été effectué pour le groupe G1 avant plantation du lavandin alors que 75% des individus du groupe G2 ont sous-solé, soit 6 individus sur 8. Le groupe G1 est également caractérisé par un IFT total cumulé ces 6 dernières années qualifié de « fort » (IFT>10) pour 8 individus sur 11 qui le composent. A l'inverse le groupe G2 présente un IFT total cumulé qualifié de « faible » (IFT cumulé compris entre 1 et 10).

En ce qui concerne le groupe G4, celui-ci ne présente que trois parcelles dans son groupe. Sa différenciation par rapport aux autres groupes provient exclusivement de son historique cultural. En effet, ce groupe présente un historique avec une dominance de culture pérenne (sauge ou lavandin) sur les 5 dernières années. Enfin, le groupe G3 regroupe toutes les parcelles avec un historique d'assolements pois/oléagineux/blé. Il se caractérise d'une part, par l'usage d'apport d'amendement organique au moins une fois les 3 dernières années pour 80% des parcelles, soit 4 individus sur 5, et d'autre part, par un IFT « fort » pour 4 individus sur 5.

L'annexe 18 présente les parcelles avec leurs groupes de sols et de pratiques associées.

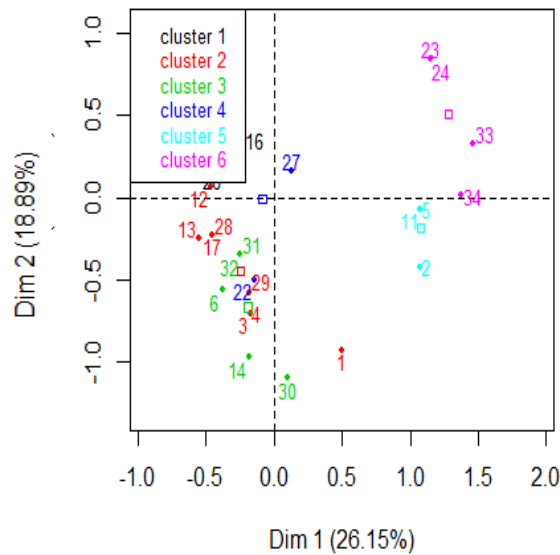


Figure 26 : Graphique des parcelles des deux premières dimensions de l'ACM avec les 6 groupes de pratiques identifiées. Le cluster 1, 2, 3, 4, 5, 6 correspondant respectivement aux groupes de pratiques G1, G2, G3, G4, G5, G6

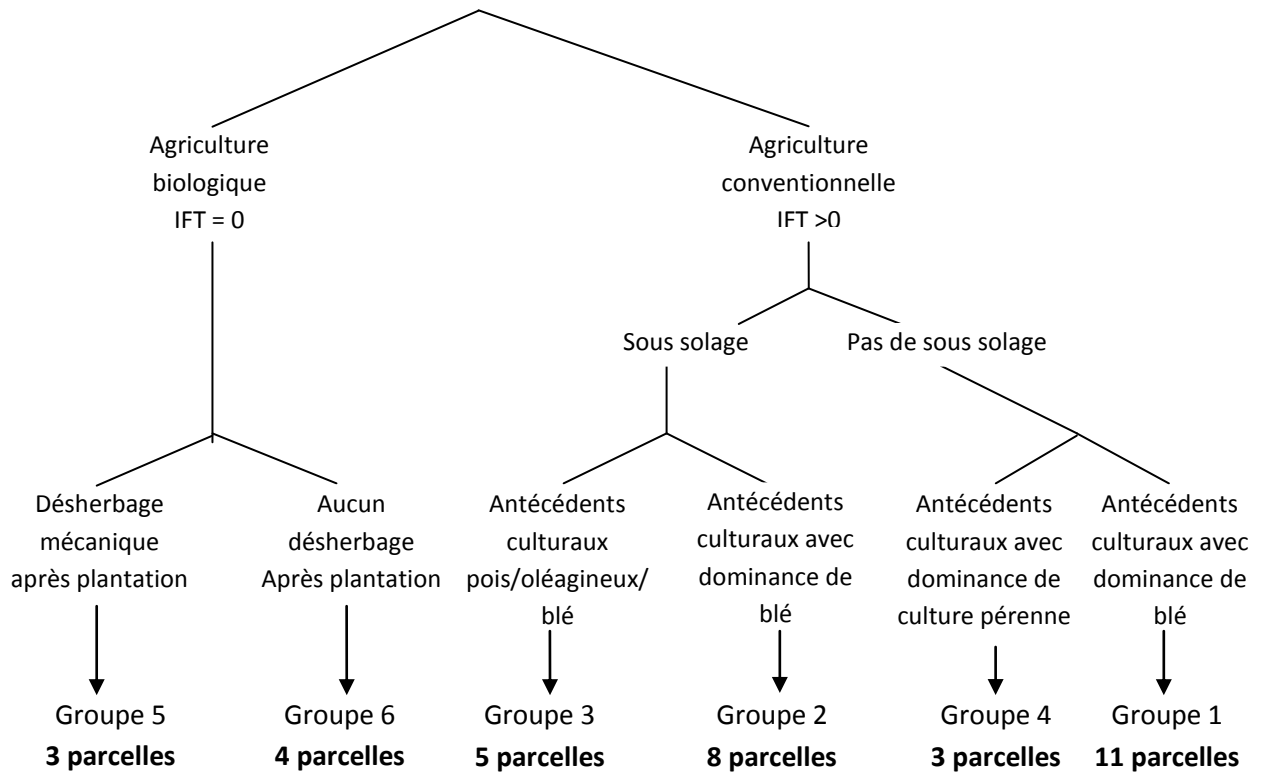













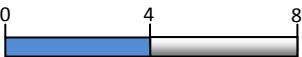


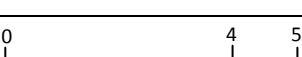
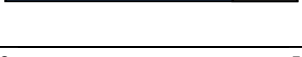


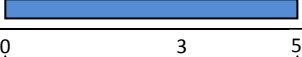
















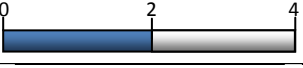
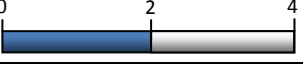

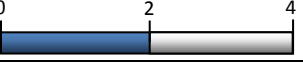


Figure 27 : Classification hiérarchique simplifiée des groupes de pratiques

Tableau 15 : Caractéristiques principales des groupes de pratiques agricoles identifiées

| Groupe de pratique | Nombre de parcelles associées | Modalité de pratique | Nombres de parcelles du groupe associée à la modalité |
|--------------------|-------------------------------|--|---|
| G1 | 11 | Culture de blé prédominant sur les 5 années passées (2012-2016) |  |
| | | Nombre de labours supérieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| | | Absence de sous solage avant plantation du lavandin |  |
| | | Absence d'apport de MO les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | Désherbage mécanique et chimique après plantation du lavandin |  |
| | | IFT total cumulé de 2012 à 2017 supérieur à 10 (IFT qualifié de « fort ») |  |
| | | Délai de retour du lavandin inférieur ou égal à 6 ans |  |
| G2 | 8 | Culture de blé prédominant sur les 5 années passées (2012-2016) |  |
| | | Désherbage uniquement chimique après plantation du lavandin |  |
| | | IFT total cumulé de 2012 à 2017 entre 1 et 10 (IFT qualifié de « faible ») |  |
| | | Présence d'un sous solage avant plantation du lavandin |  |
| | | Absence d'apport de MO les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | Délai de retour du lavandin inférieur ou égal à 6 ans |  |
| | | Nombre de labours supérieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| G3 | 5 | Assolement pois/oléagineux/blé les 5 dernières années (2012-2016) |  |
| | | Apport de MO au moins une fois les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | IFT total cumulé de 2012 à 2017 supérieur à 10 (IFT qualifié de « fort ») |  |
| | | Présence d'un sous solage avant plantation du lavandin |  |
| | | Nombre de labours supérieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| | | Délai de retour du lavandin supérieur à 6 ans |  |
| | | Désherbage uniquement chimique après plantation du lavandin |  |

| Groupe de pratique | Nombre de parcelles associées | Modalité de pratique | Nombres de parcelles du groupe associée à la modalité |
|--------------------|-------------------------------|---|---|
| G4 | 3 | Culture pérenne (sauge, lavandin) prédominante sur les 5 années passées (2012-2016) |  |
| | | Délai de retour du lavandin inférieur à 6 ans |  |
| | | IFT total cumulé de 2012 à 2017 supérieur à 10 (IFT qualifié de « fort ») |  |
| | | Désherbage mécanique et chimique après plantation du lavandin |  |
| | | Absence d'apport de MO les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | Absence de sous solage avant plantation du lavandin |  |
| | | Nombre de labours inférieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| G5 | 3 | Présence d'une culture fourragère sur les 5 années passées (2012-2016) |  |
| | | Absence de produits phytosanitaires |  |
| | | Désherbage mécanique après plantation du lavandin |  |
| | | Apport de MO au moins une fois les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | Délai de retour du lavandin supérieur à 6 ans |  |
| | | Nombre de labours inférieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| | | Absence de sous solage avant plantation du lavandin |  |
| G6 | 4 | Présence d'une culture fourragère sur les 5 années passées (2012-2016) |  |
| | | Absence de produits phytosanitaires |  |
| | | Aucun désherbage après plantation du lavandin |  |
| | | Apport de MO au moins une fois les 3 dernières années (2015-début 2017) |  |
| | | Délai de retour du lavandin supérieur à 6 ans |  |
| | | Nombre de labours inférieur à 4 entre 2011 et 2016 |  |
| | | Absence de sous solage avant plantation du lavandin |  |

3.3.2.2) Aperçu général de l'organisation des indicateurs dynamiques par rapport aux groupes de pratiques via l'utilisation de plans factoriels

Les ACP réalisées sur les indicateurs dynamiques avec comme variable supplémentaire les groupes de pratiques sont disponibles en annexes 19 et 20.

Les ellipses de confiance qui ont pu être dessinées¹³ permettent de constater une différence marquée entre les groupes G6 et G1. En effet, ces groupes semblent bien distincts (les ellipses de confiance ne se superposent pas ou peu). Le groupe G6 se caractérise par des valeurs moyennes en MO totale (et ses composantes), en BM, et en abondance de nématodes bactérivores plus élevée. A l'inverse, le groupe G1 semble présenter des parcelles avec une BM, une MO totale et une abondance de nématodes bactérivores plus faible. Les parcelles de G1 présenteraient par ailleurs dans l'ensemble une proportion et une abondance de nématodes phytophages plus élevées que les autres groupes. Ainsi, les groupes de pratiques semblent davantage incriminés dans la modification des paramètres dynamiques du sol que les groupes de sols.

3.3.2.3) Effet des différents groupes de pratiques sur les indicateurs dynamiques du sol

Les résultats des tests ANOVA sont visualisables sur le tableau 16 page 50.

¹³ Le manque d'effectifs pour les groupes G4 et G5 n'a pas permis de créer des ellipses de confiance

Tableau 16 : Résultats des tests ANOVA effectués pour mesurer l'effet des 6 groupes de pratiques sur les 22 indicateurs de sol retenus. **** indique un effet significatif, avec une p-value < 0.001 ; *** indique un effet significatif avec une p-value < 0.01 ; ** indique un effet significatif avec une p-value < 0.05 ; * indique un effet significatif avec une p-value < 0.1 ; « ns » indique une absence d'effet significatif avec une p-value > 0.05.

| Indicateurs | Moy G1 | Moy G2 | Moy G3 | Moy G4 | Moy G5 | Moy G6 | G4-G1 | G3-G1 | G2-G1 | G5-G1 | G6-G1 | G3-G4 | G2-G4 | G5-G4 | G6-G4 | G2-G3 | G5-G3 | G6-G3 | G5-G2 | G6-G2 | G6-G5 |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CEC (Cmol+/kg) | 13,09 | 14,28 | 13,32 | 11,03 | 14,03 | 11,9 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| K échangeable (g/kg) | 0,21 | 0,29 | 0,18 | 0,17 | 0,21 | 0,21 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Mg échangeable (g/kg) | 0,11 | 0,15 | 0,11 | 0,11 | 0,14 | 0,14 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| C/N | 9,23 | 9,91 | 9,18 | 10,57 | 9,9 | 10,4 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Corg (g/kg) | 10,83 | 14,32 | 12,44 | 13,17 | 13,17 | 15,15 | ns | ns | ** | ns | ** | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| MO libre (%) | 0,38 | 0,61 | 0,51 | 0,56 | 0,45 | 0,63 | ns | ns | ** | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| MO liée (%) | 1,48 | 1,85 | 1,63 | 1,71 | 1,82 | 1,97 | ns | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| BM (mgC/kg) | 285,18 | 331,38 | 320,4 | 295,67 | 347 | 487,75 | ns | ns | * | * | **** | ns | ns | ns | ** | ns | ns | *** | ns | ** | ns |
| BM\Corg | 2,75 | 2,36 | 2,6 | 2,23 | 2,67 | 3,23 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns | * | ns |
| Cmin (mgC/kg/28j) | 322,73 | 533 | 399,2 | 385,67 | 343 | 671,25 | ns | ns | ns | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Bactérivores (%) | 23,73 | 32,88 | 30,6 | 26,67 | 40,33 | 23 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Fongivores (%) | 16,45 | 25,88 | 23,4 | 29,33 | 22 | 37 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Omnivores (%) | 3,55 | 4,25 | 6,6 | 5 | 5,33 | 3,25 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Phytophages (%) | 56,36 | 36,62 | 39,6 | 38,33 | 32,67 | 36,75 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Bactérivores2 (ind 100 g-1 sol) | 283,91 | 687,5 | 409 | 300 | 558,33 | 299 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Fongivores2 (ind 100 g-1 sol) | 204,27 | 567 | 308,6 | 302,67 | 360,67 | 522,5 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Omnivores2 (ind 100 g-1 sol) | 44,36 | 62,12 | 78,4 | 65 | 45 | 37 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Phytophages2 (ind 100 g-1 sol) | 705,55 | 538,12 | 556,8 | 680,67 | 515,33 | 419 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Abondance N (ind 100 g-1 sol) | 1238,5 | 1855 | 1352,6 | 1349,7 | 1479,7 | 1277,5 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| EI | 58,82 | 60,5 | 60,4 | 60,33 | 59,67 | 51,25 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| SI | 39,18 | 34,38 | 41,2 | 38,67 | 32,67 | 28,25 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Shannon | 1,92 | 2,06 | 2,17 | 2,24 | 2,26 | 2 | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

- Effet des types de pratiques sur les indicateurs chimiques

Les tests ANOVA mettent en évidence l'impact des pratiques agricoles sur le Corg et ses composantes (MO libre et MO liée).

En ce qui concerne le Corg, les groupes G6 et G2 ont une concentration en Corg significativement plus élevée (figure 28 ci-dessous), avec des teneurs moyennes de 15.15 g/kg (G6) et 14.32 g/kg (G2) par rapport au groupe G1 (10.83g/kg). Ces teneurs restent faibles pour chaque groupe, puisqu'elles sont en dessous du seuil de référence qui est de 18g/kg. De la même façon, la MO libre présente les mêmes différences significatives avec les mêmes groupes, MO libre et Corg étant relativement liés. Cette concentration en MO libre et Corg plus élevée pour le groupe G2 et G6 peut s'expliquer en grande partie par le travail du sol. En effet, le groupe G2 et G6 n'ont pas effectué de désherbage mécanique depuis la plantation du lavandin. Or le désherbage mécanique entraîne une accélération de la minéralisation de la MO en aérant le sol, ce qui diminue par conséquent le stock de Corg. En revanche, concernant la MO liée, l'effet significatif a été constaté seulement entre les groupes G6 et G1 (figure 29 ci-dessous).

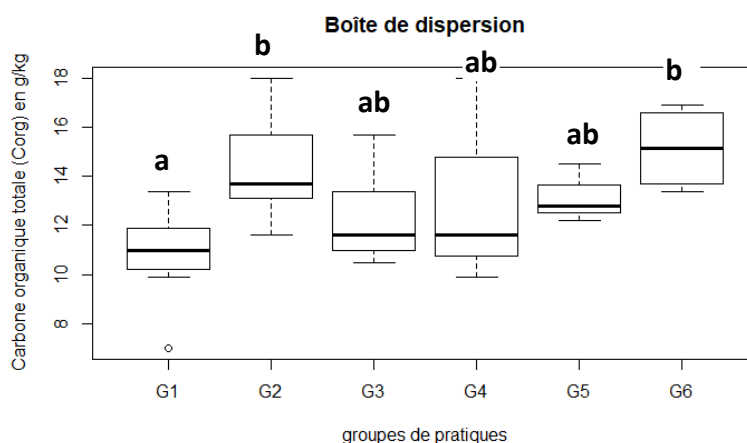


Figure 28 : boîtes à moustaches du Corg en fonction des groupes de pratiques. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1)

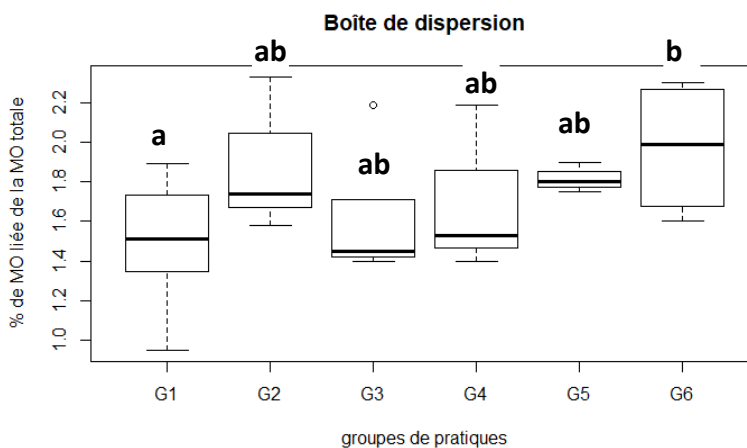


Figure 29 : boîtes à moustaches de la MO liée en fonction des groupes de pratiques. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1)

- Effet des types de pratiques sur les indicateurs biologiques

Les tests ANOVA mettent en évidence les effets de la BM, du rapport BM/Corg et du Cmin qui sont influencés significativement par certains groupes de pratiques.

Concernant les indicateurs microbiens, la BM est significativement différente entre le groupe G6 et les autres groupes, excepté avec le groupe G5 (figure 30 page 53). Le groupe G6 possède la BM moyenne la plus importante (487.75 mgC/kg). La variation intragroupe la plus importante est observée pour le groupe G4 ; le faible nombre de parcelles dans celui-ci (seulement trois) augmentant la probabilité d'avoir de grandes variations au sein du groupe. La moyenne la plus basse a été trouvée pour le groupe G1 (285,18 mgC/kg). Ainsi la biomasse microbienne est satisfaisante seulement pour le groupe G6, la valeur souhaitable étant de l'ordre de 410 mgC/kg (Salducci, 2017b). On constate également que le deuxième groupe de parcelles conduites en AB (groupe G5) présente de meilleurs résultats que le groupe G1 de façon significative.

Ensuite le rapport BM/Corg est significativement différent entre le groupe G6 et G4 et entre le groupe G6 et G2 (figure 31 p. 53), avec la valeur la plus élevée pour le groupe G6. Ainsi la disponibilité en ressources pour le développement microbien est très satisfaisante pour le groupe G6. Néanmoins, comme pour les groupes de sols, la capacité du sol à produire de la BM (exprimée par le ratio BM/Corg) reste satisfaisante pour tous les groupes, le seuil se situant aux alentours de 2.1% (Salducci, 2017a). Ensuite, la vitesse de minéralisation du carbone (Cmin) est la plus élevée pour le groupe G6 (figure 32 p. 53), ce qui est à mettre en lien avec sa forte BM et son BM/Corg élevé. En effet, la biomasse microbienne stimulée, les microorganismes vont consommer davantage de carbone, ce qui augmente les activités de minéralisation, d'où le Cmin plus élevé. La valeur moyenne de 671.25 mgC/kg/28j de G6 est significativement différente avec le groupe G1 (322.73 mgC/kg/28j). Ensuite, on note que le groupe G2 présente une variation intragroupe du Cmin élevée, en raison notamment d'une valeur maximale de 1404 mgC/kg/28j. Cette valeur forte est probablement due à un prélèvement dans une poche d'organique résiduel (Salducci, 2017a).

Enfin, l'abondance totale des nématodes, la proportion et l'abondance des groupes trophiques de nématodes, et les indices nématofauniques tels que l'EI et le SI, ne présentent aucun effet significatif en fonction des typologies de pratiques. L'abondance de nématodes bactérivores, notamment, qui varie significativement selon les groupes de sols, ne varie pas significativement en fonction des groupes de pratiques.

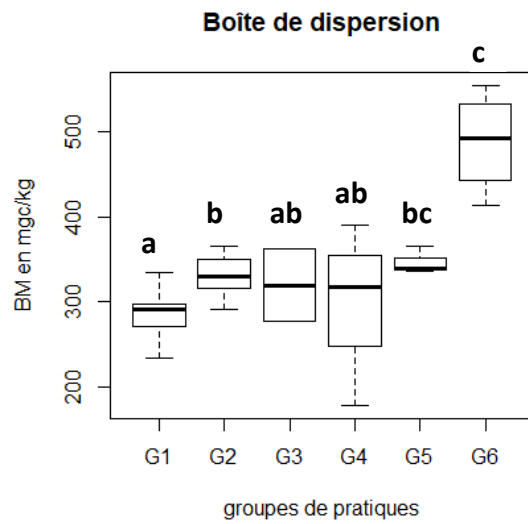


Figure 30 : boîtes à moustaches de la BM en fonction des groupes de pratiques. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1)

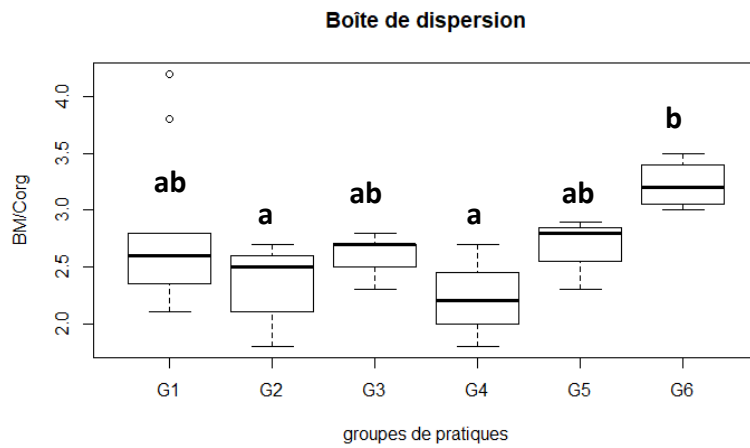


Figure 31 : boîtes à moustaches du rapport BM/Corg en fonction des groupes de pratiques. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1).

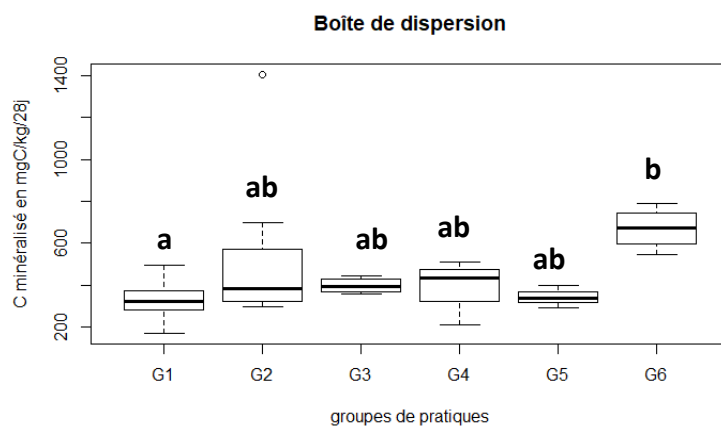


Figure 32 : boîtes à moustaches du Cmin en fonction des groupes de pratiques. Les lettres différentes indiquent des différences significatives (p-value<0.1).

Au final, on retrouve en partie ce qui a été observé avec l'ACP réalisée sur les indicateurs biologiques (annexe 20). Le groupe G6 se distingue grandement du groupe G1 et se caractérise par une MO totale et une BM significativement plus élevées. De plus, le groupe G1 possède effectivement une proportion et une abondance de phytophage plus élevée, mais cette différence reste finalement non significative avec les autres groupes de pratiques (tableau 16 p. 50).

3.3.3) Résultats liés à la question 3 : Quels sont les liens entre pratiques agricoles et les indicateurs de sol ?

Les résultats sur l'état sanitaire des plantiers sont disponibles en annexe 21. La proportion de plants vivants mesurés est très satisfaisante (>83%). Par conséquent, les liens entre qualité des sols et état sanitaire ou entre pratiques agricoles et état sanitaire ne peuvent être évalués pour le moment, la variabilité inter-parcellaire étant faible.

4) Discussion

Étant donné la taille de l'échantillon relativement faible (34 parcelles), le nombre de pratiques et de types de sols relativement importants, il apparaît difficile de valider l'effet d'une pratique ou d'un groupe de sols sur un indicateur de sol. Cependant, une absence de significativité n'indique pas obligatoirement une absence d'effet. Malgré le dispositif ne correspondant pas à un plan d'expérience « strict », on constate des effets tendanciels de certains groupes de sols et de pratiques sur les indicateurs dynamiques (indicateurs de sol modifiables à l'échelle humaine, comme la biomasse microbienne, le carbone organique total, etc.) ce qui répond aux hypothèses 1 et 2 émises (cf. Introduction).

Les ACP réalisées dans un premier temps sur les indicateurs dynamiques ont montré que les types de sols créés à partir des indicateurs inhérents (que sont la texture et la proportion en calcaire total et actif), ne semblent pas ou peu influencer les indicateurs dynamiques physico-chimiques et biologiques contrairement aux pratiques culturales qui paraissent davantage jouer sur ces paramètres. Ces résultats sont encourageants et montrent que ce sont bien plus les pratiques agricoles exercées sur les parcelles qui modifient la qualité du sol que les caractéristiques inhérentes des sols. Néanmoins, les tests ANOVA rapportent tout de même un effet des types de sols sur le carbone organique total (Corg) et les indicateurs liés à celui-ci (BM/Corg, matière organique liée).

Concernant l'hypothèse 1, les types de sols argilo limono sableux et faiblement calcaire (groupe A), limono argileux sableux et fortement calcaire (groupe B), et sablo argileux très fortement calcaire (groupe C) n'ont pas d'influence sur la quasi-totalité des indicateurs dynamiques. Ces types de sols n'ont aucun effet sur la biomasse microbienne (BM) contrairement aux résultats de Coll (2011) qui

rappellent sur des sols viticoles des BM plus élevées pour les sols argileux. Du point de vue de la matière organique, le carbone organique total moyen (ou matière organique totale) de chaque groupe de sol est faible. Néanmoins, leur rendement microbien (BM/Corg), c'est-à-dire leur capacité à produire de la BM, est élevé. Ainsi, les sols possèdent un environnement physico-chimique favorable à la production de BM, mais c'est leur teneur en matière organique totale du sol qui fait défaut. Cette matière organique n'est d'ailleurs pas plus importante dans les sols plus carbonatés contrairement aux résultats de Roussel (2001). En effet, le groupe de sol C très fortement calcaire (calcaire total moyen de l'ordre de 56%) présente le Corg moyen le plus faible des trois groupes de sols. En revanche, le groupe B fortement calcaire (calcaire total moyen de l'ordre de 34%) possède la teneur en Corg la plus élevée, et significativement différente du groupe C. Il est possible que la texture du groupe B ait un bon équilibre entre la teneur en argile et en calcaire, favorisant ainsi la formation des complexes argilo-humiques, et donc une meilleure protection de la MO. Cette MO plus élevée dans le groupe B explique probablement l'abondance en nématodes bactérivores significativement plus forte, qui tend à augmenter lorsque la disponibilité en ressources est favorisée (Li et al., 2016).

Du point de vue des nématodes, Bertrand C. (2001) rapporte que les sols légers et poreux et souvent riches en argile sont préférés par les nématodes. Dans notre cas, l'abondance totale de nématodes et des groupes trophiques est très similaire entre les groupes de sols, hormis pour les nématodes bactérivores. On peut émettre l'hypothèse que la pierrosité relativement importante dans chaque parcelle et le labour récent ont permis une porosité suffisante et une meilleure structure du sol, rendant le milieu propice aux nématodes, quel que soit le type de sol. Il est également possible que le labour récent ait « réinitialisé » en quelque sorte le niveau d'abondance de chaque parcelle, expliquant ainsi les abondances similaires. Selon le laboratoire ELISOL, l'abondance des nématodes pour la quasi-totalité des parcelles est jugée satisfaisante. En revanche, les résultats liés aux nématodes ont été comparés avec des références de « sols viticoles ». Or les prélèvements ont été faits peu de temps après la plantation du lavandin. Des valeurs de références liées aux grandes cultures sont probablement plus adaptées, l'historique culturel des parcelles étant souvent composé de cultures céréalières. Ainsi, l'interprétation des indicateurs liés à la nématofaune aurait été plus « sévère » qu'avec les références viticoles où l'activité biologique est généralement plus faible.

Concernant l'indice d'enrichissement des nématodes (EI), le groupe de sol le plus argileux présenterait une texture et une teneur en calcaire favorisant la disponibilité en éléments nutritifs (phosphore, magnésium, *etc.*).

Enfin, en ce qui concerne la CEC, les agriculteurs possédant les parcelles avec des CEC faibles, c'est-à-dire avec des sols peu argileux et très calcaires (groupe C), devraient préférer une fertilisation organique à l'utilisation d'engrais inorganiques solubles, où les cations sont difficilement retenus et plus facilement lessivables. Un apport de matière organique est fortement conseillé, notamment en matière organique liée, pour améliorer la stabilité et la structure du sol et éviter les pertes de nutriments par lessivage.

Concernant l'influence des groupes de pratiques sur les indicateurs dynamiques (question 2), le carbone organique total (Corg) et la biomasse microbienne (BM) ont été les deux indicateurs les plus sensibles aux pratiques exercées.

Cette BM est plus importante pour les parcelles conduites en agriculture biologique (G5 et G6) et notamment pour le groupe G6. Ces deux groupes de pratiques se différencient entre eux essentiellement par leur mode de désherbage après plantation du lavandin qui est mécanique pour l'un (G5) et absent pour l'autre (G6). Si l'on se réfère aux travaux de Peigne et al. (2009), la BM se répartirait de façon homogène dans la couche du sol travaillée par le labour. Néanmoins, le groupe G6 présente tout de même une BM bien plus élevée que tous les autres groupes, probablement expliquée par les antécédents de sainfoin et l'absence de travail mécanique après plantation du lavandin, facteurs stimulant la biomasse microbienne (Bouthier et al., 2014). De surcroît, deux parcelles sur quatre qui composent ce groupe n'ont pas été labourées depuis 2001, la plantation ayant été effectuée après un sous-solage sur la ligne de plantation. Or, l'absence de labour permet de concentrer la BM sur les premiers centimètres de sol.

A l'opposé du groupe G6, le groupe G1, aux pratiques plus intensives, (présence de labour annuel ou quasi annuel et un désherbage chimique et mécanique après plantation du lavandin), présente la BM la plus faible. Par ailleurs, le groupe G2 qui présente des pratiques proches de G1, voire plus intensives avec l'usage d'un sous-solage avant plantation du lavandin, possède pourtant une BM significativement plus élevée que G1. Il est possible que le désherbage uniquement chimique après plantation du groupe G2 soit moins néfaste que l'action combinée du désherbage mécanique et chimique du groupe G1.

Du point de vue du Corg, les Corg moyens les plus élevés ont été trouvés pour les groupes G2 et G6. Ces derniers sont significativement différents avec le groupe G1. Le mode de désherbage a probablement joué un rôle. Mazzonchini et al. (2011) ont rapporté une diminution du Corg lorsque le sol est désherbé mécaniquement (DM). Or, le groupe G1 a effectué un désherbage mécanique et chimique. Il est probable que l'absence de désherbage mécanique des groupes G2 et G6 ait permis d'éviter une minéralisation plus rapide de la MO. En effet, le groupe G1 possède la MO libre la plus faible. Or cette MO libre se minéralise rapidement et d'autant plus rapidement qu'elle est en contact avec l'air. Ainsi, le désherbage mécanique, en aérant le sol, a réduit la proportion de MO libre. C'est probablement également pour cette raison que la MO libre des groupes G5 et G1 est la plus faible, car tous deux effectuent des désherbages mécaniques, accélérant la dégradation et le déstockage de la MO.

Concernant l'influence des groupes de pratiques sur les nématodes, ceux-ci n'ont eu aucune influence significative. Le mode de désherbage et l'apport de MO souvent identifiés comme facteurs modifiant les communautés de nématodes (Bouthier et al., 2014 ; Li et al., 2016) ne semblent pas avoir eu un impact déterminant sur ceux-ci au niveau des groupes de pratiques formés. Par exemple, les groupes G3 et G5 ayant apporté au moins une fois de la MO entre 2015 et 2017 n'ont pas une

abondance ou des indices nématofauniques significativement plus élevés que les autres groupes de pratiques. L'absence de différences significatives pourrait être due à la quantité et la fréquence d'apport de MO, probablement trop faible pour influencer significativement la composante biologique du sol.

5) Conclusion

5.1) Conclusion de l'étude

A travers cette étude, nous avons pu mettre en évidence des tendances de l'impact de groupes de pratiques agricoles sur la qualité du sol. Par la même occasion, et en raison du dispositif, l'influence de groupes de sol sur la qualité dynamique du sol a été évaluée. L'étude de l'impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol est complexe, en particulier sur la composante biologique, compte-tenu des multiples interactions qui y règnent. Les effets des pratiques doivent donc être mesurés au fil du temps pour une meilleure appréciation des capacités d'adaptation de certains indicateurs dynamiques (en particulier biologiques) aux changements.

Les résultats de l'étude soulignent l'importance de la teneur en argile sur la CEC, et donc sur le potentiel d'adsorption des cations échangeables tels que le potassium et le magnésium. Ainsi, les sols argileux et peu calcaires présentent les meilleures CEC. L'indice d'enrichissement en nématodes (EI) est également le plus élevé pour ce type de sol traduisant une bonne disponibilité en éléments nutritifs. Les groupes de sols joueraient également un rôle sur l'abondance des nématodes bactériovores, avec une préférence de ces nématodes bactériovores pour les sols calcaires et limono-argilo-sableux. Ce type de sol présenterait aussi un environnement plus propice à la formation d'humus (MO stable).

L'abondance des nématodes, la proportion et l'abondance des groupes trophiques, et les indices nématofauniques (SI, EI, indice de Shannon) ne varient pas significativement d'un groupe de pratiques à l'autre. Seuls la BM, le rapport BM/Corg, le Cmin et la MO totale (Corg) et ses composantes varient significativement. Les indicateurs chimiques, CEC, C/N et les bases échangeables (Mg²⁺, K⁺) ne sont pas influencés par les groupes de pratiques dans cette étude.

Le groupe G1 caractérisé par des antécédents cultureux à dominance de blé, des labours quasi-systématiques les six dernières années, et dont le désherbage après plantation est en majorité chimique et mécanique, est le groupe dont la combinaison de pratiques présente les résultats les moins convaincants. Les effets observés ne permettent pas de mettre en cause une pratique particulière, puisque les pratiques ont été étudiées conjointement, mais le travail du sol fréquent semble la pratique la plus déséquilibrante du système, principalement impliquée dans le déstockage de MO. Le système G6, lui, présente des résultats plus convaincants comparativement au groupe G1. En revanche, il ne présente pas de résultat significativement plus positif comparé aux autres groupes, hormis la BM.

Ainsi la combinaison des pratiques suivantes : absence de produits phytosanitaires, utilisation de culture fourragère dans la rotation, absence de désherbage après plantation du lavandin, présenterait des effets plus positifs vis-à-vis essentiellement des pratiques du groupe G1 dont les pratiques plus intensives réduisent la BM et la MO.

Les analyses prévues en 2019 permettront d'en savoir plus sur l'évolution des indicateurs mesurés et sur l'influence de certaines pratiques sur le sol. En attendant il paraît important de pouvoir augmenter les quantités de MO de la majorité des parcelles, souvent trop faibles. Son rôle bénéfique sur les composantes chimiques, biologiques, et physiques du sol a souvent été mis en avant par les chercheurs. Sa valorisation et sa gestion sont des pistes à développer. De surcroît l'évolution de l'état sanitaire des cultures de lavandin, jugée satisfaisante lors des mesures effectuées en juin 2016 est à suivre au cours des prochaines années, afin d'identifier d'éventuels liens avec la qualité du sol en cas de dégradation des plants.

5.2) Bilan personnel

Ce stage a été tout d'abord l'occasion d'en apprendre plus sur le sol, composante complexe encore peu connue par les scientifiques, et une réalité qui m'intéressait particulièrement.

D'un point de vue personnel, ce stage était très complet et m'a permis de me préparer à la vie professionnelle. En effet, j'ai eu la chance de réaliser l'étude de A à Z, c'est-à-dire du prélèvement de sols à l'analyse statistique des données en passant par l'expertise des laboratoires.

Cette expérience m'a permis d'acquérir des bases solides aussi bien théoriques que pratiques. Concrètement, j'ai appris à définir un protocole d'échantillonnage, à interpréter les analyses de sols des laboratoires d'analyses, et à dresser un état des lieux de la qualité du sol. D'un point de vue technique, j'ai pu améliorer mes compétences en analyses statistiques et en informatique via le logiciel R. Malgré des débuts difficiles, j'ai réussi à m'adapter et à m'approprier le logiciel grâce à la documentation, à internet, et au soutien de professionnels en statistiques. Cette capacité d'adaptation de l'ingénieur à différents contextes, missions et enjeux est pour moi une des compétences indispensables chez l'ingénieur. Cette qualité allait de paire avec ma persévérance. Ces atouts ont été déterminants dans l'atteinte des objectifs du stage.

Ce stage m'a permis également de me rendre compte à quel point les relations humaines et sociales sont importantes. De fait, elles sont sources de savoir et un moyen indispensable pour progresser. Malgré l'autonomie dont j'ai fait preuve, mon travail n'aurait pas pu aboutir sans l'aide des partenaires, de ma maîtresse de stage et des personnes avec qui j'ai pu tisser des liens. Ainsi le travail d'équipe m'a permis de mettre à jour mes connaissances et a été un soutien indispensable dans les périodes de doutes et de remises en question. L'échange a été un moteur dans l'avancée de mon travail.

6) Qualité de vie au travail et Management

Lors de cette étude, j'ai été amené à réaliser des entretiens pour en savoir plus sur les pratiques agricoles des agriculteurs. Au fur et à mesure des entretiens, j'ai pu développer une compétence importante et nécessaire pour le bon déroulement des entretiens, le but étant d'entretenir un dialogue social de qualité.

Pour favoriser ce dialogue social et mener à bien les entretiens, plusieurs étapes m'ont semblé importantes. Tout d'abord, la prise de rendez-vous téléphoniques. Il s'agissait de prendre contact avec l'agriculteur pour connaître ses disponibilités et fixer un lieu et une date d'entretien. Lors des appels, il me semblait important de tutoyer l'agriculteur ou de l'appeler par son prénom ; cette familiarité m'a été possible car je les avais rencontrés sur le terrain ou lors de réunions, et eux-mêmes me tutoyaient. Cela me permettait d'avoir une certaine proximité avec lui et d'établir une « ambiance » plus décontractée. Cela me permettait également, à mon sens, de développer une relation plus amicale et humaine et de sortir du contexte professionnel. De surcroît, l'appel téléphonique m'a permis d'avoir un premier aperçu des personnalités des agriculteurs. Je pouvais ainsi ressentir les personnalités plus dominantes, fortes, et les personnalités plus discrètes, et ainsi mieux appréhender les entretiens.

Suite aux appels, des lieux de rendez-vous ont été fixés. Malgré ma demande de réaliser les entretiens dans un endroit plutôt calme et où il était possible de s'asseoir, cela n'a pas toujours été le cas. J'ai ainsi dû m'adapter aux situations. Je me suis ainsi retrouvé dans trois situations différentes :

- Situation 1 : déroulement de l'entretien en position assise mais dans un lieu bruyant (bar, terrasse de café)
- Situation 2 : entretien en position debout et dans un lieu calme (hangar, extérieur)
- Situation 3 : entretien en position assise et dans un lieu calme (chez l'agriculteur)

La situation 1 était délicate dans la mesure où l'échange était interrompu par le bruit des voitures et les discussions des personnes à proximité. Cela nécessitait également de parler fort. La communication était altérée, obligeant parfois à relancer plusieurs fois la même question. Ces éléments perturbateurs empêchaient le bon déroulement de l'entretien et l'obtention d'un dialogue de qualité. Cette situation favorisait néanmoins une relation amicale, très décontractée.

La situation 2 était favorable aux dialogues et aux échanges mais le vent, ou l'attente en position debout, faisait que l'entretien paraissait plus long. De plus, au fur et à mesure du déroulement de l'entretien, l'impatience se faisait sentir et l'enchaînement des questions étaient parfois plus rapides, et les réponses plus brèves.

La situation 3 était la situation idéale, la plus propice aux dialogues et aux échanges.

Ensuite, l'une des étapes clé pour favoriser ce dialogue social a été de mener à bien les entretiens en créant un climat de confiance entre l'agriculteur et moi. Pour établir cette confiance il me paraissait important d'être agréable et souriant au moment du premier contact physique. Puis, lors du déroulement de l'entretien, une écoute attentive était nécessaire pour démontrer l'intérêt que je portais à son discours et éviter de poser des questions inutiles, auxquelles l'agriculteur aurait déjà répondu. Cette erreur pouvait être interprétée par l'agriculteur comme un manque d'attention, et nuire aux dialogues sociaux. Cette erreur s'est notamment produite lorsque le lieu était bruyant, facteur augmentant les risques d'une baisse d'attention. Ensuite, pour mener à bien ces entretiens, j'ai dû m'adapter aux comportements et aux discours de chacun, dont les idées et les pensées sur certains sujets sont parfois très différentes. Pour cela, je ne contredisais pas leurs déclarations. Cela évitait d'éventuelles tensions et laissait à l'agriculteur l'opportunité d'approfondir sa pensée. Il était également important de ne pas lui couper la parole pour le laisser s'exprimer. Cependant, l'agriculteur pouvait parler de sujets hors entretien pendant très longtemps, et il était parfois délicat de l'interrompre, surtout lorsque la personnalité de celui-ci était forte. Il était alors préférable, à mon sens, de maintenir une écoute active et de manifester mon intérêt. Dans cette perspective, j'essayais le plus souvent de conclure en faisant une synthèse partielle de son discours, de façon à manifester ainsi l'attention que je portais à celui-ci.

Enfin, la construction d'un guide d'entretien bien structuré a été également indispensable pour le bon déroulement des entretiens. Cela permettait de travailler dans de bonnes conditions, en évitant une perte de temps ou des relances inutiles, qui auraient pu être ressenties comme un manque de professionnalisme. Mes deux premiers entretiens avec les agriculteurs se sont en conséquence moins bien déroulés que les suivants. L'analyse de ces situations a révélé les défauts de mon guide. Il a fallu alors que je le modifie.

Tutoyer, faire preuve d'empathie, être patient, écouter activement, manifester de l'intérêt et avoir un guide bien construit ont été les principales clés pour favoriser ma relation avec les agriculteurs. Ces divers éléments ont amélioré les échanges, tout en créant un climat de confiance. La construction de ces cadres a favorisé un dialogue social de qualité, fournissant, au final, de meilleurs ressentis et informations, et participant ainsi à la qualité de l'étude.

Bibliographie

ABAWI G. S., WIDMER T. L. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied soil ecology*, 2000, Vol. 15, n° 1, pp. 37–47.

AGRESTE AQUITAINE, l'enherbement s'impose dans le vignoble aquitain – Analyses et Résultats. Novembre 2012, n°62, pp. 1-4.

AGRESTE PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR. Portrait agricole : les Alpes de Haute Provence. Septembre 2010, n°55, pp. 1-8

ALBIACH R., CANET R., POMARES F., and INGELMO F. Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil. - *Bioresource Technology*, 2000, Vol 75, 43-48

ANOVA-Plus. Dépérissement de la lavande : une production mise en danger par les phytoplasmes [en ligne]. Disponible sur : <http://www.anova-plus.com/blog/deperissement-lavande-production-mise-en-danger-les-phytoplasmes/> [Consulté le 8 Mai 2017].

BAILEY K.L., LAZAROVITS G. Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil and Tillage Research*. 2003, Vol. 72, n° 2, pp. 169- 180.

BARRIOS E., DELVE R.J., BEKUNDA M., MOWO J., AGUNDA J., RAMISCH J., TREJO M.T., THOMAS R.J. Indicators of soil quality: A South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*. 2006, Vol. 135, pp. 248- 259. ISSN 00167061.

BEL HADJ HASSEN F., BOURGEOIS M., BURQ N., COLIN AVILA M., DAGHER A., DERMECH N., DUPUY L., GODEFROY G., MACEDO-SILVA V., NOTARO M., OBRIOT M., PASQUIER C., RAKOTOBÉ V., RODRIGUES DE ALBUQUERQUE G., ROUGIER M., ROUSSEAU L., RUYNAT L., VRECORD-MITEL G. Analyse de la structure du sol en parcelles de lavandin sur le plateau de Valensole. Rapport de recherche. Montpellier : Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier, 2013, 25p.

BERTRAND C. Lutte contre les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) en agriculture biologique. 2001

BISPO Antonio, GATTIN Isabelle, HEDDE Mickaël, BODIN Jeanne, VILLENAVE Cécile, PERES Guénola. Quels bioindicateurs pour la gestion durable des sols agricoles et forestiers. Compte rendu des journées de restitution du projet «Bioindicateur pour la caractérisation des sols», Paris, 2012, Vol. 16.

BLANCHARD Eric. Bioindicateurs pour la caractérisation des sols: recueil des interventions. Journée technique nationale, 16 octobre 2012, Paris 7e. Angers : ADEME, 2012, ISBN 978-2-35838-307-3.

BLAVET D., DE NONI G., LE BISSONNAIS Y., LEONARD M., MAILLO L., LAURENT J.Y., ASSELINE J., LEPRUN J.C., ARSHAD M.A., ROOSE E. Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. *Soil and Tillage Research*. 2009, Vol. 106, n° 1, pp. 124- 136.

BONILLA N., GUTIÉRREZ-BARRANQUERO J., VICENTE Antonio, CAZORLA Francisco. Enhancing Soil Quality and Plant Health Through Suppressive Organic Amendments. *Diversity*. 2012, Vol. 4, n° 4, pp. 475- 491.

BORNAND M., DOSSO M. Sol et histoire récente de l'agriculture sur le plateau de Valensole. *Etude et Gestion des sols*. 2015. Vol. 22, pp. 43-58.

BORNAND M., CHABOT C., DOSSO M., LACASSIN J.C. Sols et paysages du sud du Plateau de Valensole : diversité et modes d'utilisations agricoles actuels et passés. 2012, pp 1-44.

BOUCHEZ T., BLIEUX A. L., DEQUIEDT S., DOMAIZON I., DUFRESNE A., FERREIRA S., GODON J. J., HELLAL J., JOULIAN C., QUAISER A., MARTIN-LAURENT F., MAUFFRET A., MONIER J. M., PEYRET P., SCHMITT-KOPLIN P., SIBOURG O., D'OIRON E., BISPO A., DEPORTES I., GRAND C., CUNY P., MARON P. A., RANJARD L. Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environmental Chemistry Letters*. 2016, Vol. 14, n° 4, pp. 423- 441.

BOUTHIER A., PELOSI C., VILLENAVE C., PERES G., HEDDE M., RANJARD L., VIAN J. F., PEIGNE J., CORTET J., BISPO A., PIRON D. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. *Faut-il travailler le sol*. 2014, pp. 85–108.

BRIAT Jean-François, JOB Dominique. *Les sols et la vie souterraine: Des enjeux majeurs en agroécologie*, 2017, Editions Quae Gie. 328 p. ISBN 978-2-7592-2651-1

BROWN Katharine, LEMON Jeremy. Cations and Cation Exchange Capacity | Fact Sheets | soilquality.org.au. [en ligne]. Disponible sur : <http://www.soilquality.org.au/factsheets/cation-exchange-capacity> [Consulté le 7 juillet 2017].

CELETTE Florian, FINDELING Antoine, GARY Christian. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*. 2009, Vol. 30, n° 1, pp. 41 - 51

CELETTE Florian, GAUDIN Rémi, GARY Christian. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*. 2008, Vol. 29, n° 4, pp. 153- 162.

CHAUSSOD R., NOUAIM R. Relations entre matières organiques, activités biologiques et fertilité : quelques notions de base et application en agriculture biologique. *Bouvines Maraîchage*. 2011, pp. 143-146.

CHAUSSOD, R. *La qualité biologique des sols : évaluation et implications*. *Etude et gestion des sols*. 1996, pp. 261- 278.

COLL P., LE CADRE E., MÉROT A., VILLENAVE C. The characterization of the soil biological quality of organic viticulture can be achieved by analyzing soil nematofauna. *Innovations Agronomiques*. 2013, Vol. 32, pp. 391–400.

COLL Patrice. *Qualité des sols viticoles en Languedoc Roussillon: effets des pratiques agricoles*. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Viticulture et œnologie. Montpellier : Montpellier SupAgro, 2011, 306p.

- COSTE Thomas (CRIEPPAM). Réunion sur la méthode d'échantillonnage du projet Sol de REGAIN. 5 Avril 2017a.
- COSTE Thomas (CRIEPPAM). Formation sur la mesure de l'état sanitaire du lavandin. 10 Juin 2017b.
- COULOUMA G., BOIZARD H., TROTOUX G., LAGACHERIE P., RICHARD G. Effect of deep tillage for vineyard establishment on soil structure: A case study in Southern France. *Soil and Tillage Research*. 2006, Vol. 88, n° 1- 2, pp. 132- 143
- DAYEGAMIYE Adrien, TREMBLAY Gilles, DESCHENES Paul, DRAPEAU Anne, Bénéfices des légumineuses dans les rotations de cultures. 2013, pp. 1-2.
- DERMECH N. Élaboration du programme d'actions du projet REGAIN. Mémoire de fin d'étude. Montpellier : École d'ingénieur de Montpellier SupAgro, 2014, 52p.
- DOMINATI Estelle, PATTERSON Murray, MACKAY Alec. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*. 2010, Vol. 69, n° 9, pp. 1858- 1868
- DORAN J.W., ZEISS M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. 2000, Vol. 15, pp. 3- 11.
- DORAN J.W., PARKIN T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W., JONES A.J. (Eds.), 1996, *Methods for Assessing Soil quality*. Soil Science Society of America, Special publication, Vol. 49, Madison, pp. 25-37.
- DORAN J.W., and PARKIN T.B. Defining and assessing soil quality. Special publication, soil Science Society of America, 1994, Madison, n°35, pp 3- 21
- FERRIS H., BONGERS T., DE GOEDE R. G. M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied soil ecology*. 2001, Vol. 18, n° 1, pp. 13– 29.
- FLIEßBACH Andreas, OBERHOLZER Hans-Rudolf, GUNST Lucie, MÄDER Paul. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007, Vol. 118, n° 1- 4, pp. 273- 284.
- GOEBEL J.J., MAUSBACH M.J., KARLEN D.L. Using the National Resources Inventory as a framework to assess soil erosion, soil conservation and soil quality. 1997, In : *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture. Méthodes et résultats*. Vol. 3. OECD Publishing, 2001, 428 p. ISBN 978-92-64-28855-3.
- GOMEZ E., FERRERAS L., TORESANI S. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application. *Bioresource Technology*. 2006, Vol. 97, n° 13, pp. 1484- 1489
- GOULET E., DOUSSET S., CHAUSSOD R., BARTOLI F., DOLEDEC A.F., ANDREUX F. Water-stable aggregates and organic matter pools in a calcareous vineyard soil under four soil-surface management systems. *Soil Use and Management*. 2004, Vol 20, pp. 318-324.

GREGORICH E. G., MONREAL C. M., CARTER M. R., ANGERS D. A., ELLERT B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*. 1994, Vol. 74, n° 4, pp. 367–385.

GUILBAULT Pascal. *Impact des pratiques culturales sur la vie du sol*. 2006.

HOOPER D.U., CHAPIN F. S., EWEL J.J., HECTOR A., INCHAUSTI P., LAVOREL S., LAWTON J.H., LODGE D.M., LOREAU M., NAEEM S., SCHMID B., SETALA H., SYMSTAD A.J., VANDERMEER J., WARDLE D.A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs*. 2005, Vol. 75, n° 1, pp. 3–35.

HUBER Gérald, SCHAUB Christiane. *La fertilité des sols: L'importance de la matière organique*. Chambre d'agriculture du Bas-Rhin, 2011. 46p.

KARLEN, D.L., MAUSBACH, M.J., DORAN, J.W., CLINE, R.G., HARRIS, R.F. AND SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. 1997, Vol. 61, pp. 4- 10.

KARLEN D. L., WOLLENHAUPT N. C., ERBACH D. C., BERRY E. C., SWAN J. B., EASH N. S., JORDAHL J. L. Long-term tillage effects on soil quality. *Soil and Tillage Research*. 1994, Vol. 32, n° 4, pp. 313–327.

KRUPINSKY Joseph M., BAILEY Karen L., MCMULLEN Marcia P., GOSSEN Bruce D., TURKINGTON T. Kelly. Managing plant disease risk in diversified cropping systems. *Agronomy Journal*. 2002, Vol. 94, n° 2, pp. 198–209.

LACASSIN J.C. Discussion téléphonique à propos des sols pédologiques du plateau de Valensole. Juin 2017.

LARKIN Robert P. Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management. *Annual Review of Phytopathology*. 2015, Vol. 53, n° 1, pp. 199- 221. ISSN 0066-4286, 1545-2107.

LARSON, W.E., and PIERCE F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management, 1994, In : DORAN J.W., and PARKIN T.B. Defining and assessing soil quality, Special publication, soil Science Society of America, 1994, Madison, n°35, pp 3- 21.

LI N., PAN F.J, HAN X.Z, ZHANG B. Development of soil food web of microbes and nematodes under different agricultural practices during the early stage of pedogenesis of a Mollisol. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016, Vol. 98, pp. 208- 216.

LOPES Carlos M. Cover crops competition for water in vineyards: case studies in Mediterranean terroirs. In : *Proceedings 11th Int. Terroir Congress*, 2016. Jones, G. and Doran, N.(eds.), pp. 117-123.

MARSDEN Claire. *Agriculture et sols vivants. Qualité des sols en lavandin : vie du sol, matières organiques : mieux comprendre le fonctionnement biologique de son sol pour améliorer sa fertilité*. Diaporama. Valensole, Avril 2017a

MARSDEN C. *Importance de la Matière Organique du Sol*. [en ligne]. 2017b. Disponible sur :

<http://www.supagro.fr/ress-pepites/AC/co/ImportanceMOS.html> [Consulté le 10 Août 2017].

MARSDEN C. Discussion téléphonique à propos des indicateurs de la qualité des sols. Juin 2017c

MARTIN S., BAIZE D., BONNEAU M., CHAUSSOD R., CIESIELSKI H., GAULTIER, J.P., LAVELLE P., LEGROS J.P., LEPRETRE A., STERCKEMAN, T. Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Etude et gestion des sols, 1999, Vol. 6, pp. 215- 230.

MATHEW R.P., FENG Y., GITHINJI L., ANKUMAH R., BALKCOM K. Impact of no-tillage and conventional tillage systems on soil microbial communities. Applied and Environmental Soil Science. 2012, Vol. 2012, pp. 1- 10.

MAZZONCINI M., SAPKOTA T.B., BÀRBERI P., ANTICHI D., RISALITI Rosalba. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. Soil and Tillage Research. 2011, Vol. 114, n° 2, pp. 165- 174. ISSN 01671987.

MCDANIEL M. D., TIEMANN L. K., GRANDY A. S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. Ecological Applications. 2014, Vol. 24, n° 3, pp. 560–570.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA), Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC : Island Press, 2005, 137 p. ISBN 978-1-59726-040-4.

MOREL R, 1989 In : CHAUSSOD R. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. Etude et gestion des sols. 1996, pp. 261- 278.

MURSEC Mateja. Agricultural practices impact on soil quality and health: case study of slovenian irrigated or organic orchards [en ligne]. Thèse de doctorat en Sciences de la terre. 2011. Université de Bourgogne; University of Maribor-SLOVENIA. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00708232/> [Consulté le 5 juin 2017].

NOBLE B. Risks and benefits of soil amendment with composts in relation to plant pathogens. Australasian Plant Pathology. 2011, Vol. 40, pp. 157-167.

OLIVER D.P., BRAMLEY R.G.V., RICHES D., PORTER I., EDWARDS J. Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture: Indicators for soil quality. Australian Journal of Grape and Wine Research. 2013, Vol. 19, n° 2, pp. 129- 139.

PEIGNE J. Processus écologiques - Recréer de la porosité. [en ligne]. 2014. Disponible sur : <http://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/RecreerPorosite.html> [Consulté le 27 août 2017].

PEIGNE J., GAUTRONNEAU Y., VIAN J.F., ACHARD P., CHIGNIER-RIBOULON M., RUFFE Lysiane., VASKOU C. Test Bêche, guide d'utilisation. ISARA-Lyon. Décembre 2016, 23p.

PEIGNE J., VEDIE H., DEMEUSY J., GERBER M., VIAN JF, GAUTRONNEAU Y., CANNAVACCUOLO M., AVELINE A., GITEAU LL, BERRY D., OTHERS. Conservation tillage in organic farming. Carrefours de l'Innovation Agronomique. 2009, Vol. 4, pp. 23–32.

RANJARD Lionel. AgrInnov. Tester les indicateurs de l'état biologique des sols en lien avec les pratiques agricoles –compte rendu final de projet, 2016. 80p.

RAMSEYER M., LANG A. Analyse-diagnostic de l'agriculture du plateau de Valensole. Rapport d'étude. Paris : École d'ingénieur AgroParisTech, 2011, 50p.

RASMUSSEN K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*. 1999, Vol 53, 3-14.

RICHES D., PORTER I.J., OLIVER D.P., BRAMLEY R.G.V., RAWNSLEY B., EDWARDS J., WHITE R.E. Review: soil biological properties as indicators of soil quality in Australian viticulture: Biological indicators for soil quality. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2013, pp. 311-323.

ROUSSEL O., BOURMEAU E., WALTER Ch. Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et gestion des sols*, 2001, Vol. 8, n° 1, pp. 65–81.

SALDUCCI X. Entretien sur le bilan des résultats d'analyses de Celesta-lab. 7 Juin 2017a

SALDUCCI X. Courrier : questions sur les analyses de sol. Communication personnelle le, 16 juillet 2017b.

SALDUCCI X. Qualité des matières organiques des sols : une nouvelle génération d'analyse de routine. In : 8èmes journées de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre GEMAS-COMIFER « fertilisation raisonnée et analyse de terre : quoi de neuf en 2007 », Blois, 20-21 Novembre 2007. Blois : COMIFER, 2007, pp. 1-9.

SALOMÉ Clémence, COLL Patrice, LARDO Egidio, METAY Aurélie, VILLENAVE Cécile, MARSDEN Claire, BLANCHART Eric, HINSINGER Philippe, LE CADRE Edith. The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: A case study in Mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*. 2015, Vol. 61, pp. 456- 465.

SALOME Clémence, COLL Patrice, LARDO Egidio, VILLENAVE Cécile, BLANCHART Eric, HINSINGER Philippe, MARSDEN Claire, LE CADRE Edith. Relevance of use-invariant soil properties to assess soil quality of vulnerable ecosystems: The case of Mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*. 2014, Vol. 43, pp. 83- 93.

SCHOENHOLTZ S.H, MIEGROET H.Van, BURGER J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*. 2000, Vol. 138, n° 1- 3, pp. 335- 356.

SINGER Jérémy, BAUER Phil. Soil Quality: Management: Crop Rotations for Row Crops. 2009 [en ligne]. Disponible sur : http://soilquality.org/practices/row_crop_rotations.html [Consulté le 10 Mai 2017].

TIEMANN L. K., GRANDY A. S., ATKINSON E. E., MARIN-SPIOTTA E., MCDANIEL M. D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*. 2015, Vol. 18, n° 8, pp. 761- 771.

USDA NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Indicators for soil quality evaluation. Soil Quality Information Sheet. [en ligne]. Avril 1996, Disponible sur : https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf

VILLENAVE Cécile. Caractérisation du fonctionnement biologique du sol par l'analyse de la nématofaune. Diaporama. Congénies, juin 2017.

VILLENAVE C. Courrier : questions à propos des résultats du laboratoire ELISOL. Communication personnelle le, 6 août 2017b.

VILLENAVE C., BA A. Oumar., RABARY B. Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune: semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar). Etude et gestion des sols. 2009, Vol. 16, n° 3/4, pp. 369–378.

VILLENAVE C., EKSCHMITT K., NAZARET S., BONGERS T. Interactions between nematodes and microbial communities in a tropical soil following manipulation of the soil food web. Soil Biology and Biochemistry. 2004, Vol. 36, n° 12, pp. 2033- 2043.

WALTER Ch., BISPO A., CHENU C., LANGLAIS-HESSE Al., SCHWARTZ Ch. Les services écosystémiques des sols: du concept à sa valorisation. Agriculture et Foncier-Concurrences entre Usages des sols et entre Usagers des sols Agricoles: La Question Foncière Renouvelée, ed C. Demeter (Paris: Cahier Demeter), 2015, pp. 51–68.

ZAMBUJO Céline. La piste de l'enherbement prometteuse. Vaucluse agricole, 2016, p. 9.

Liste des tableaux et figures

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Production de lavandin en 2008 en % de la production nationale par département | 3 |
| Figure 2 : Les services rendus par les sols | 5 |
| Figure 3 : Classification des organismes du sol selon leur taille..... | 10 |
| Figure 4 : Les principaux types de nématodes et leurs indications..... | 11 |
| Figure 5 : Les fonctions de la MO du sol | 13 |
| Figure 6 : Diagramme ombro-thermique de Valensole | 18 |
| Figure 7 : Photographie aérienne de parcelles du plateau de Valensole, avec une parcelle centrale présentant un calcosol fersiallitique | 19 |
| Figure 8 : Schéma d'une parcelle agricole plane, mais hétérogène en terme de type de sol et localisation de la zone de prélèvement définie selon le postulat..... | 23 |
| Figure 9 : Schéma d'une parcelle de lavandin et du transect suivi pour la mesure du taux de reprise..... | 26 |
| Figure 10 : Histogramme, nombre de labours réalisés de 2011 à 2016 et le nombre de parcelles correspondant..... | 29 |
| Figure 11 : Histogrammes du pH, du calcaire total, de la CEC et de la MO totale..... | 33 |
| Figure 12 : Corrélogramme entre tous les indicateurs de sol..... | 36 |
| Figure 13 : Graphique des variables sur les deux premières dimensions de l'ACP effectué sur les indicateurs inhérents. | 37 |
| Figure 14 : Graphe des parcelles sur les deux premières dimensions de l'ACP..... | 37 |
| Figure 15 : Graphique relatif aux parcelles issu des 2 premières dimensions de l'ACP avec les trois groupes de sols identifiés par des couleurs différentes..... | 38 |
| Figure 16 : Classification hiérarchique des groupes de sols..... | 38 |
| Figure 17 : Boîtes à moustaches de la CEC en fonction des groupes de sols..... | 41 |
| Figure 18 : Boîtes à moustaches du K échangeable en fonction des groupes de sols. | 41 |
| Figure 19 : Boîtes à moustaches du Corg en fonction des groupes de sols. | 42 |
| Figure 20 : Boîtes à moustaches du C/N en fonction des groupes de sols. | 42 |
| Figure 21 : Boîtes à moustaches du rapport BM/Corg en fonction des groupes de sols..... | 43 |
| Figure 22 : Boîtes à moustaches de l'abondance des nématodes bactérivores en fonction des groupes de sols..... | 43 |
| Figure 23 : Boîtes à moustaches de l'EI en fonction des groupes de sols..... | 43 |
| Figure 24 : Graphique des parcelles sur les deux premières dimensions de l'ACM | 44 |
| Figure 25 : Graphique des modalités de pratiques sur les deux premières dimensions de l'ACM..... | 44 |
| Figure 26 : Graphique des parcelles des deux premières dimensions de l'ACM avec les 6 groupes de pratiques identifiées..... | 46 |
| Figure 27 : Classification hiérarchique simplifiée des groupes de pratiques | 46 |
| Figure 28 : Boîtes à moustaches du Corg en fonction des groupes de pratiques..... | 51 |
| Figure 29 : Boîtes à moustaches de la MO liée en fonction des groupes de pratiques..... | 51 |
| Figure 30 : Boîtes à moustaches de la BM en fonction des groupes de pratiques. | 53 |
| Figure 31 : Boîtes à moustaches du rapport BM/Corg en fonction des groupes de pratiques..... | 53 |
| Figure 32 : Boîtes à moustaches du Cmin en fonction des groupes de pratiques..... | 53 |

Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Indicateurs nématofauniques et leurs fonctions associées. | 12 |
| Tableau 2 : Pratiques agricoles comparées et le nombre d'agriculteurs associés..... | 20 |
| Tableau 3 : Dispositif mis en place en fonction des successions culturales..... | 27 |
| Tableau 4 : Dispositif mis en place en fonction de l'IFT total cumulé de 2012 à 2017 | 28 |
| Tableau 5 : Dispositif mis en place en fonction du mode de désherbage | 28 |
| Tableau 6 : Dispositif mis en place en fonction du nombre de labours de 2011 à 2016 | 29 |
| Tableau 7 : Dispositif mis en place en fonction de l'apport de MO entre 2015 et 2017 | 29 |
| Tableau 8 : Dispositif mis en place en fonction du délai de retour du lavandin | 29 |
| Tableau 9 : Dispositif mis en place en fonction du sous-solage..... | 30 |
| Tableau 10 : Dispositif mis en place en fonction de l'enherbement..... | 30 |
| Tableau 11 : Statistiques descriptives des indicateurs dynamiques et inhérents de l'étude | 34 |
| Tableau 12 : Caractéristiques des groupes de sols identifiés..... | 39 |
| Tableau 13 : Moyenne des teneurs en calcaire total, argile, sable et limon des groupes de sols identifiés..... | 39 |
| Tableau 14 : Résultats des tests ANOVA effectués pour mesurer l'effet des 3 types de sols sur les 22 indicateurs de sol retenus.. | 40 |
| Tableau 15 : Caractéristiques principales des groupes de pratiques agricoles identifiées..... | 47 |
| Tableau 16 : Résultats des tests ANOVA effectués pour mesurer l'effet des 6 groupes de pratiques sur les 22 indicateurs de sol retenus..... | 50 |

ANNEXES

| | |
|---|----|
| Annexe 1 : Tableau présentant la liste des indicateurs inhérents et dynamiques considérés et les abréviations associées..... | 1 |
| Annexe 2 : Carte de la région des Alpes-de-Haute-Provence avec la localisation du plateau de Valensole | 2 |
| Annexe 3 : Photographie aérienne du plateau de Valensole avec le réseau de parcelles étudié .. | 2 |
| Annexe 4 : Photographies de différents sols étudiés sur le plateau de Valensole | 3 |
| Annexe 5 : Schéma chronologique de la méthodologie employée dans cette étude | 4 |
| Annexe 6 : Tableau d'interprétation des résultats du test bêche..... | 5 |
| Annexe 7 : Schémas des scénarios de prélèvements envisagés lors de l'étude | 5 |
| Annexe 8 : Schémas du dispositif d'échantillonnage retenu en configuration enherbée et non enherbée | 6 |
| Annexe 9 : Schéma du dispositif d'échantillonnage en cas d'enherbement inter-rang fin (environ 50 cm)..... | 6 |
| Annexe 10 : Guide d'entretien directif utilisé lors des enquêtes des 22 agriculteurs du réseau ... | 7 |
| Annexe 11 : Exemple d'une fiche d'ITK d'une culture de blé de 2015, complétée suite à un entretien..... | 16 |
| Annexe 12 : Photos de lavandins âgés de 2 ans (il ne s'agit pas de plantiers) à 3 stades sanitaires différents | 17 |
| Annexe 13 : Tableau de synthèse des pratiques agricoles exercées sur les 34 parcelles. Les encadrés rouges mettent en évidence les pratiques sélectionnées pour la typologie..... | 18 |
| Annexe 14 : Tableau avec le nom des variables liées aux pratiques agricoles sélectionnées et leur signification | 21 |
| Annexe 15 : Tableau avec les modalités de chaque variable et leur signification | 21 |
| Annexe 16 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. | 22 |
| Annexe 17 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. | 23 |
| Annexe 18 : Tableau des 34 parcelles et leur groupe de sol et de pratiques associées | 24 |
| Annexe 19 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire.. | 25 |
| Annexe 20 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire.. | 26 |
| Annexe 21 : Tableau des résultats des mesures de l'état sanitaire des plantiers | 27 |

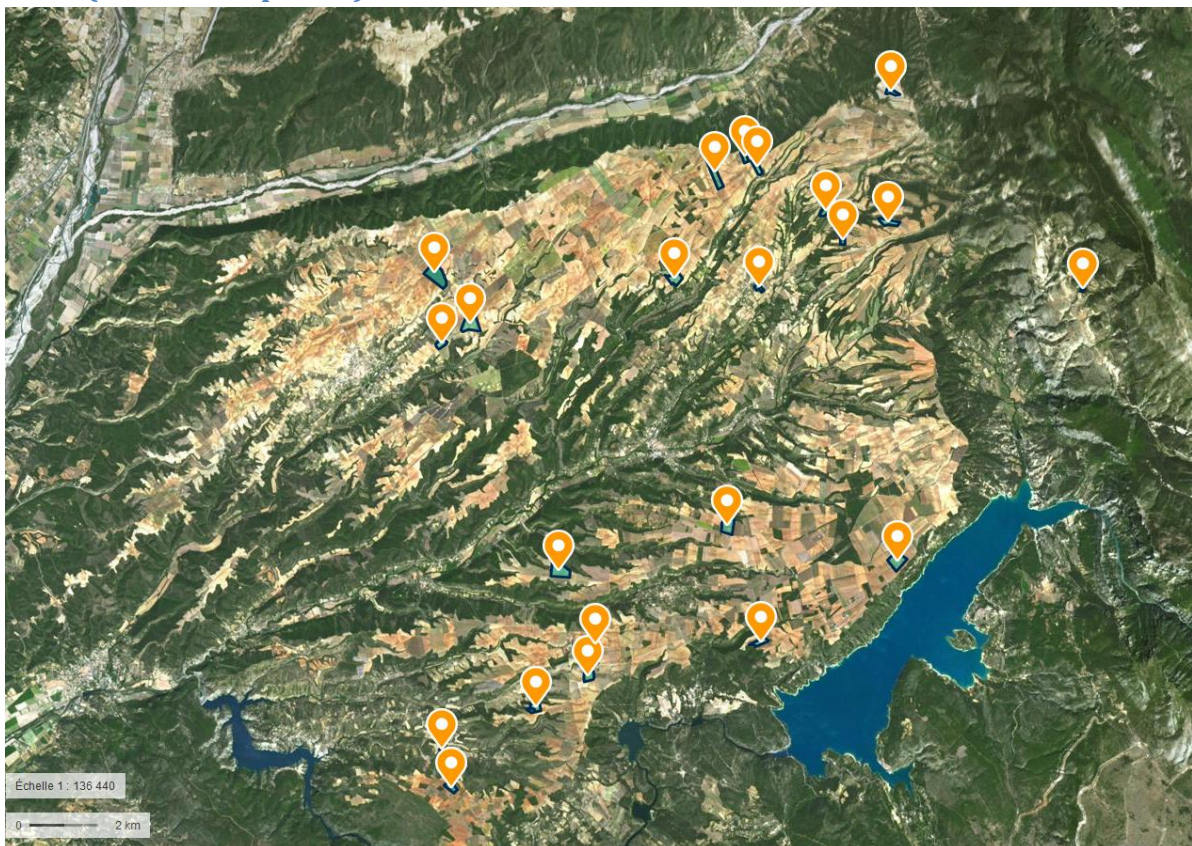
Annexe 1 : tableau présentant la liste des indicateurs inhérents et dynamiques considérés et les abréviations associées

| Indicateurs inhérents du sol | | |
|---------------------------------|---|---|
| Indicateurs inhérent physiques | La texture (teneur en sable, limon et argile) | « argile », « sable », « limon » |
| Indicateurs inhérents chimiques | Calcaire total (CaCO ₃ total) | « Calcaire_total » |
| | Calcaire actif (CaCO ₃ actif) | « Calcaire_actif » |
| Indicateurs dynamiques du sol | | |
| Indicateurs chimiques | pH | |
| | Carbone organique total | « Corg_total » ou « Corg » |
| | Azote total | « Azote_total » |
| | C/N | « C.N » |
| | Bases échangeables K (potassium), Mg (magnésium), Ca (calcium), Na (sodium) | « Potassium », « magnesium », « calcium », « sodium » |
| | La capacité d'échange cationique effective | « CEC » |
| Indicateurs biologiques | La Biomasse microbienne | « BM » |
| | Le ratio BM/Carbone organique total | « BMCorg » |
| | L'abondance des nématodes totaux | « AbondanceN » |
| | la proportion de nématodes bactérivores | « bacterivores » |
| | La proportion de nématodes fongivores | « fongivores » |
| | La proportion de nématodes omnivores et carnivores | « omnivores » |
| | La proportion de nématodes phytophages | « phytophages » |
| | l'abondance de nématodes bactérivores | « bacterivores2 » |
| | l'abondance de nématodes fongivores | « Fongivores2 » |
| | l'abondance de nématodes omnivores et carnivores | « Omnivores2 » |
| | l'abondance de nématodes phytophages | « phytophages » |
| | L'indice d'enrichissement | « EI » |
| | L'indice de structure | « SI » |
| | L'indice de Shannon ou indice de diversité | « Shannon » |
| | Vitesse de minéralisation du carbone | « Cmin » |
| | Vitesse de minéralisation de l'azote | « Nmin » |
| | Matière organique totale | « MO_totale » |
| Matière organique libre | « MO_libre » | |
| Matière organique liée | « MO_liée » | |

Annexe 2 : Carte de la région des Alpes-de-Haute-Provence avec la localisation du plateau de Valensole (Ramseyer et al., 2011)



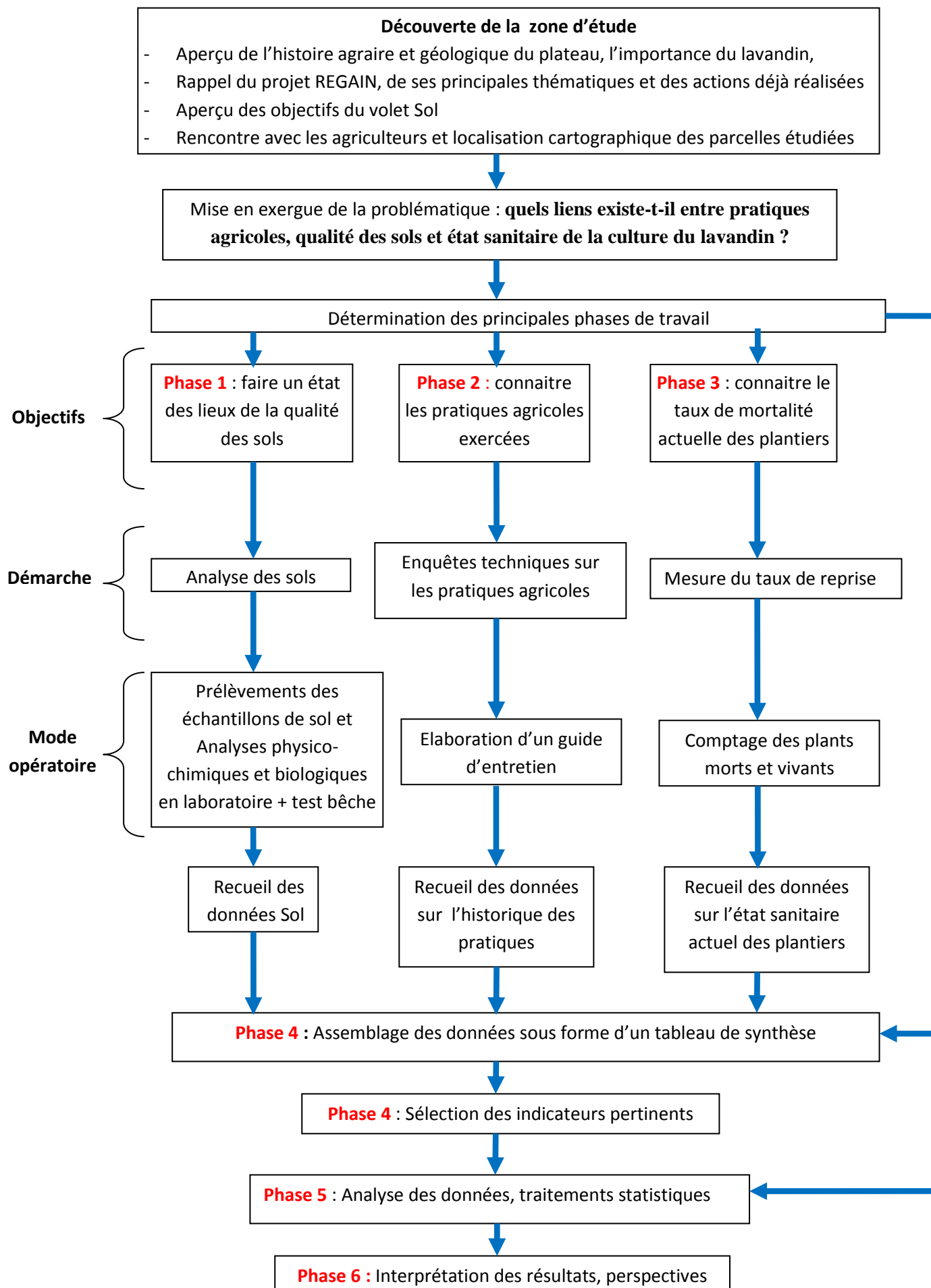
Annexe 3 : photographie aérienne du plateau de Valensole avec le réseau de parcelles étudié (source : Géoportail).



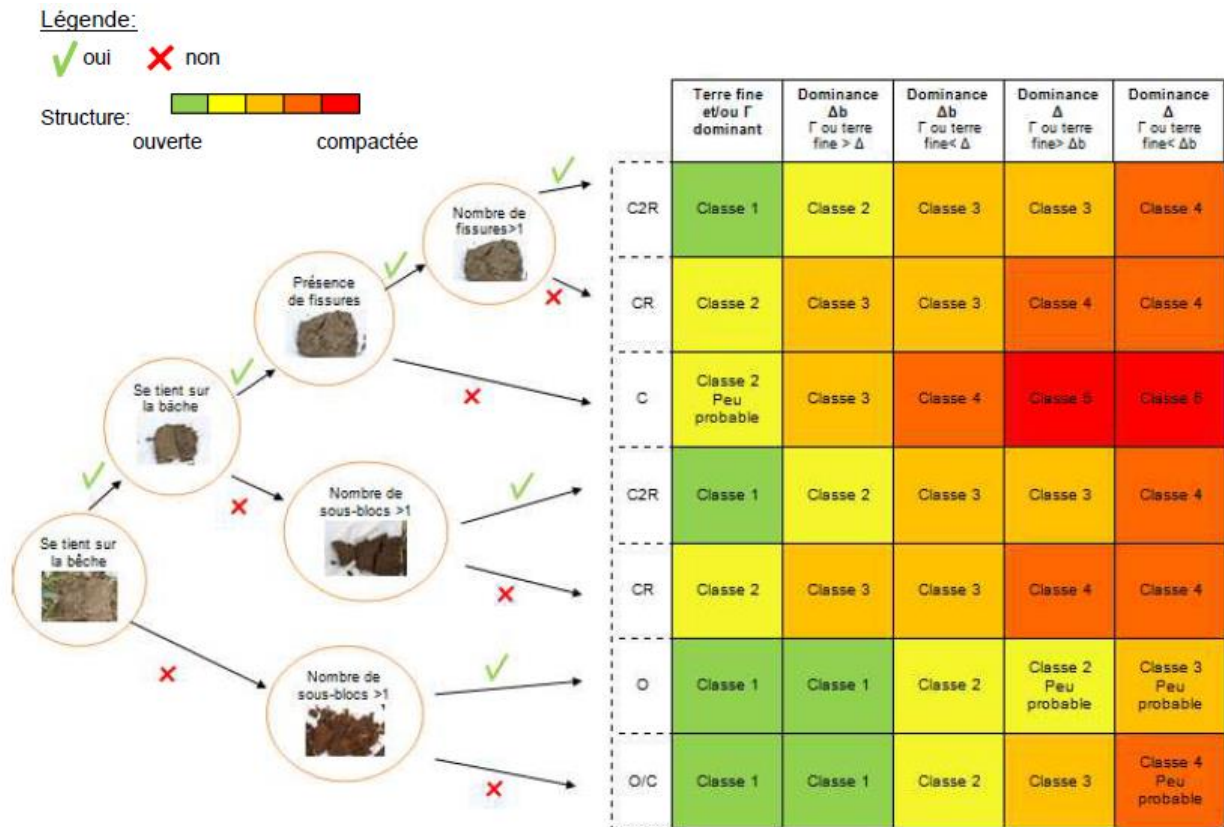
Annexe 4 : photographies de différents sols étudiés sur le plateau de Valensole



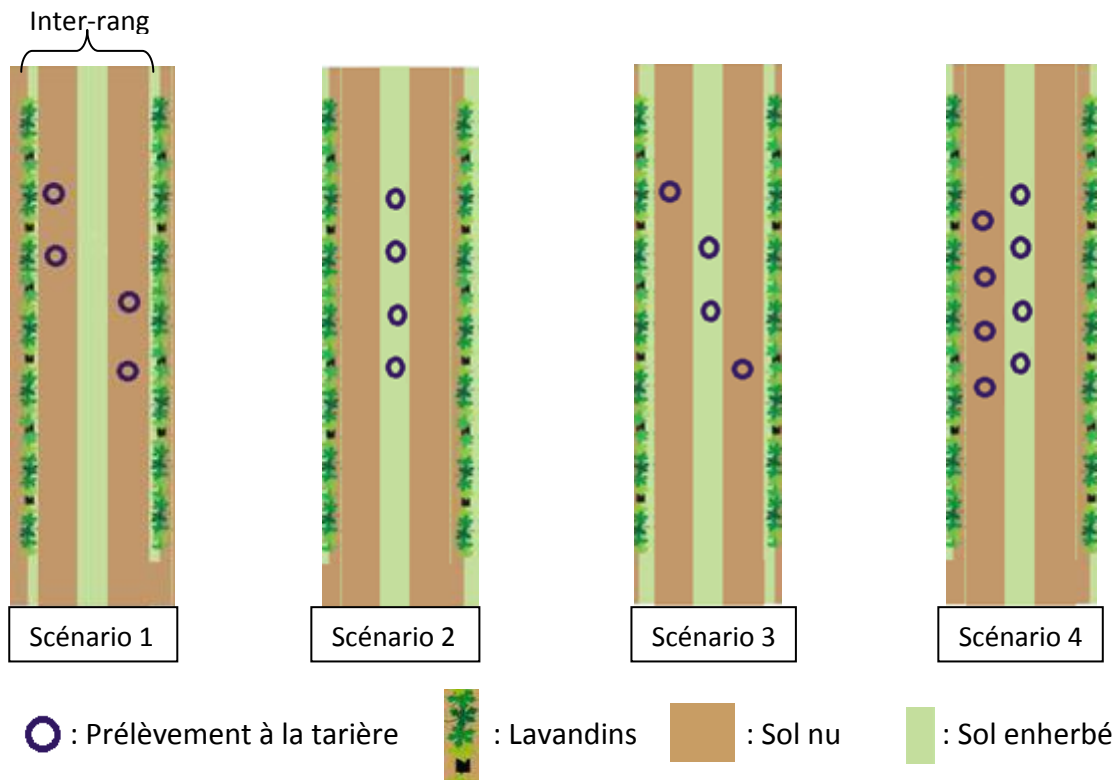
Annexe 5 : schéma chronologique de la méthodologie employée dans cette étude



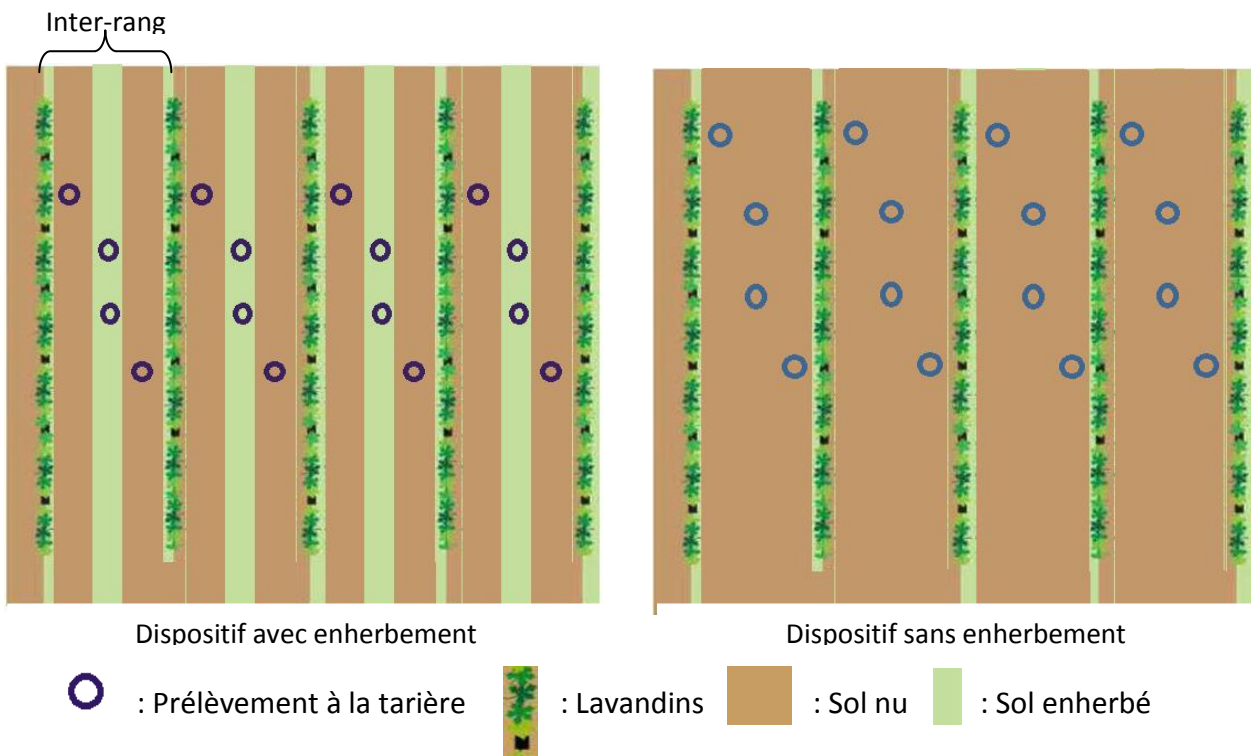
Annexe 6 : Tableau d'interprétation des résultats du test bêche



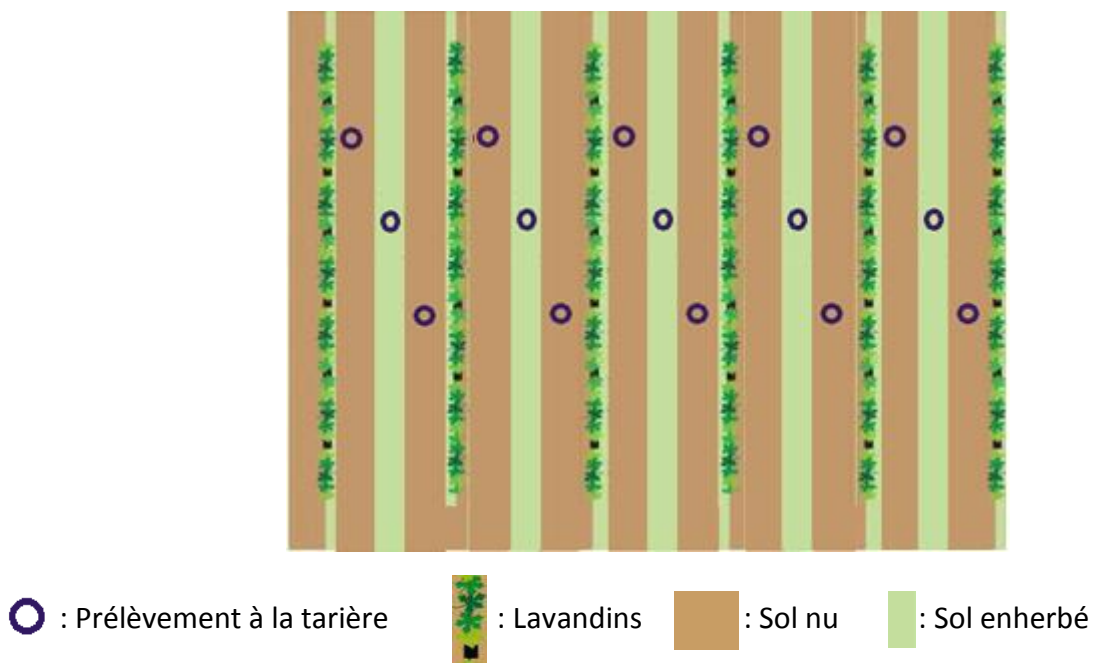
Annexe 7 : schémas des scénarios de prélèvements envisagés lors de l'étude



Annexe 8 : schémas du dispositif d'échantillonnage retenu en configuration enherbée et non enherbée



Annexe 9 : schéma du dispositif d'échantillonnage en cas d'enherbement inter-rang fin (environ 50 cm)



Guide d'entretien sur les pratiques culturelles

Nom de la personne interrogée :

I) Caractéristiques générales de la parcelle :

Situation de la parcelle :

| | |
|---|--|
| Superficie de la parcelle (en hectare) | |
| Date de la plantation | |
| Densité de plantation des lavandins (nbre de pieds par hectare) | |
| Profondeur de plantation des plants de lavandins | |
| Parcelle conduite en agriculture biologique ou conventionnelle ou autre | |
| Type de plant (sain, traditionnel, autre) | |
| Quelle variété de lavandin avez-vous planté sur la parcelle (Grosso, Sumian, ...) | |
| La parcelle a-t-elle déjà été irriguée | |
| La parcelle rencontre-t-elle des problèmes d'érosion ? | |
| Êtes-vous touché par le dépérissement ? | |
| Autres problèmes agronomiques constatés | |

II) **Historique des pratiques culturales**

1) **Rotation**

Quelle est-la Rotation ?

Y insérez-vous des légumineuses ?

Y insérez-vous des inter-cultures ?

Le sol est-il nu en hiver ?

Rotation de 2012 à 2017 :

| année | - 5 (2012) | - 4 (2013) | - 3(2014) | - 2 (2015) | -1 (2016) | Actuelle (2017) |
|------------------------------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------------|
| culture | | | | | | |
| couvert | | | | | | |
| Résidus enfouis (oui ou non) | | | | | | |
| Résidus ramassés ou brûlés | | | | | | |
| Rendement moyen sur la parcelle | | | | | | |

Quelle est la durée moyenne de rotation entre les lavandins ?

A quand remonte le dernier lavandin sur la parcelle ?

2) Le désherbage mécanique

Avez-vous réalisé un désherbage mécanique récemment sur la parcelle étudiée ?

Machines utilisées :

| | |
|------------------|--|
| Tracteur utilisé | |
| Bineuse utilisée | |

| | | | | | | Uniquement pour le lavandin |
|---|---|-------------------------|--------------------------|---|---|--|
| Date du passage (du plus ancien au plus récent) | Type de culture présente à ce moment là | Type d'appareil utilisé | Profondeur du désherbage | Nombre de rang ou inter-rang désherbé par passage | Zone de passage (rang, inter-rang ou les 2) | Temps de passage (temps de traitement par hectare) et/ou consommation horaire du tracteur durant l'opération |
| | | | | | | |

3) La fertilisation minérale

Avez-vous apporté une fertilisation minérale récemment (N, P, K, Mg) ?

Machines utilisées :

| | |
|----------------------------------|--|
| Epandeur(s) utilisé(s) | |
| Tracteur utilisé avec l'épandeur | |

Fertilisation minérale des 3 dernières années :

| | | | | | | | | Pour le lavandin uniquement | |
|------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|--|------------------------------|--|
| Année/ date du passage | Type de produit | Machine, outil utilisé | Nom commerciale du produit | Modalité de Traitement (localisé, en plein, sur le rang, sous le rang, sur l'interrang, autre) | Quantité (kg/ha ou unités/ha) | Culture présente ou à venir | Nombre de rangs traités par passage | Coût du traitement/h a | Temps de passage (temps de traitement par hectare) et/ou consommation horaire du tracteur par opération |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

4) Fertilisation organique

Avez-vous déjà apporté de la matière organique, si oui quand ?

D'où vient la MO apportée ? (arrangement entre voisin, achetée,)

| | | | | | | | | Pour le lavandin uniquement |
|---------------------------|--|------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| Année/ date de passage | Type d'amendement organique ou d'engrais organique | Machine, outil utilisé | Fréquence (tous les x ans) | Nom commerciale du produit | Modalité de Traitement (localisé, en plein, sur le rang, sous le rang, sur l'inter-rang, autre, 1 rang sur 2, etc | Quantité à l'hectare (kg matière brute /ha) | Nbre de rangs traités par passage | Coût du traitement/ha |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| | | | Pour le lavandin uniquement |
|---|---|-----------------------------|---|
| Formule de l'amendement (%MO, %MS, ISMO (% de la MO)) | Comment ? (en profondeur, en pulvérisation, en surface (=épandeur)) Enfouie ou non | Culture présente ou à venir | Temps de passage (temps de traitement par hectare) et/ou consommation horaire du tracteur par opération |
| | | | |
| | | | |

Date du dernier apport de MO ?

Est-ce que vous envisagez d'apporter de la matière organique, si oui, quoi ? Quantité envisagée ?

Avez-vous remarqué un effet de l'apport ? (ex : structure du sol... croissance... adventices...) ?

5) Les traitements phytosanitaires

Matériel utilisé :

| | |
|--|--|
| Pulvérisateur utilisé(s) | |
| Tracteur utilisé avec le pulvérisateur | |

| | | | | | | | | | | Pour le lavandin uniquement | |
|-----------------|--|---|---------------------------|--|--|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------|---|
| Date du passage | Type de traitement (herbicide, fongicide, insecticide, ...) et contre quoi | Produit phytosanitaire naturel ou de synthèse | Nom du produit commercial | Type d'appareil utilisé, type de pulvérisateur | Modalité de Traitement (localisé, en plein, sur le rang, sous le rang, sur l'interrang, autre) | Nbre de rangs traités par passage ? | Surface de la parcelle traitée ? | Dose du produit commercial utilisé | Culture présente à ce moment là ou à venir | Coût du traitement/ha | Temps de passage (temps de traitement par hectare) et/ou consommation horaire du tracteur par opération |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

6) Le travail du sol

Matériel utilisé :

| | |
|--|--|
| Tracteur utilisé(s) pour le travail du sol | |
| Déchaumeuse utilisée | |
| Vibroculteur utilisé | |
| Rouleau utilisé | |
| Charrue | |

Travail du sol des dernières années :

| | | | | | | | | Uniquement pour le lavandin |
|-----------------|--|----------------|-----------------|--------------------------------------|---|--|-----------------------------|---|
| Date de passage | Type de travail du sol (labour, décompactage, ...) | But du passage | Type de machine | Profondeur du travail du sol (en cm) | Lieu de passage (rang, inter-rang, les 2) | Culture présente à ce moment là ou à venir | Résidus enfouies oui ou non | Temps de passage et/ou consommation horaire du tracteur par opération |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Réalisez-vous des décompactages/sous solages ?

Date du dernier passage ?

7) Enherbement/couvert inter-rang

| | |
|---|--|
| La parcelle est-elle enherbée sur l'inter-rang ? Sur tous les inter-rangs ? | |
| Pour quelles raisons avez-vous enherbé ? | |
| Quel est la largeur de la bande enherbée (en cm) ? | |
| Quel type d'enherbement est ce ? Mélange ou pur semé, ou enherbement spontané, quelles espèces sont majoritaires, ... ? | |
| Si semis, lequel ? À quel période a-t-il été semé ? | |

| | |
|--|--|
| | |
|--|--|

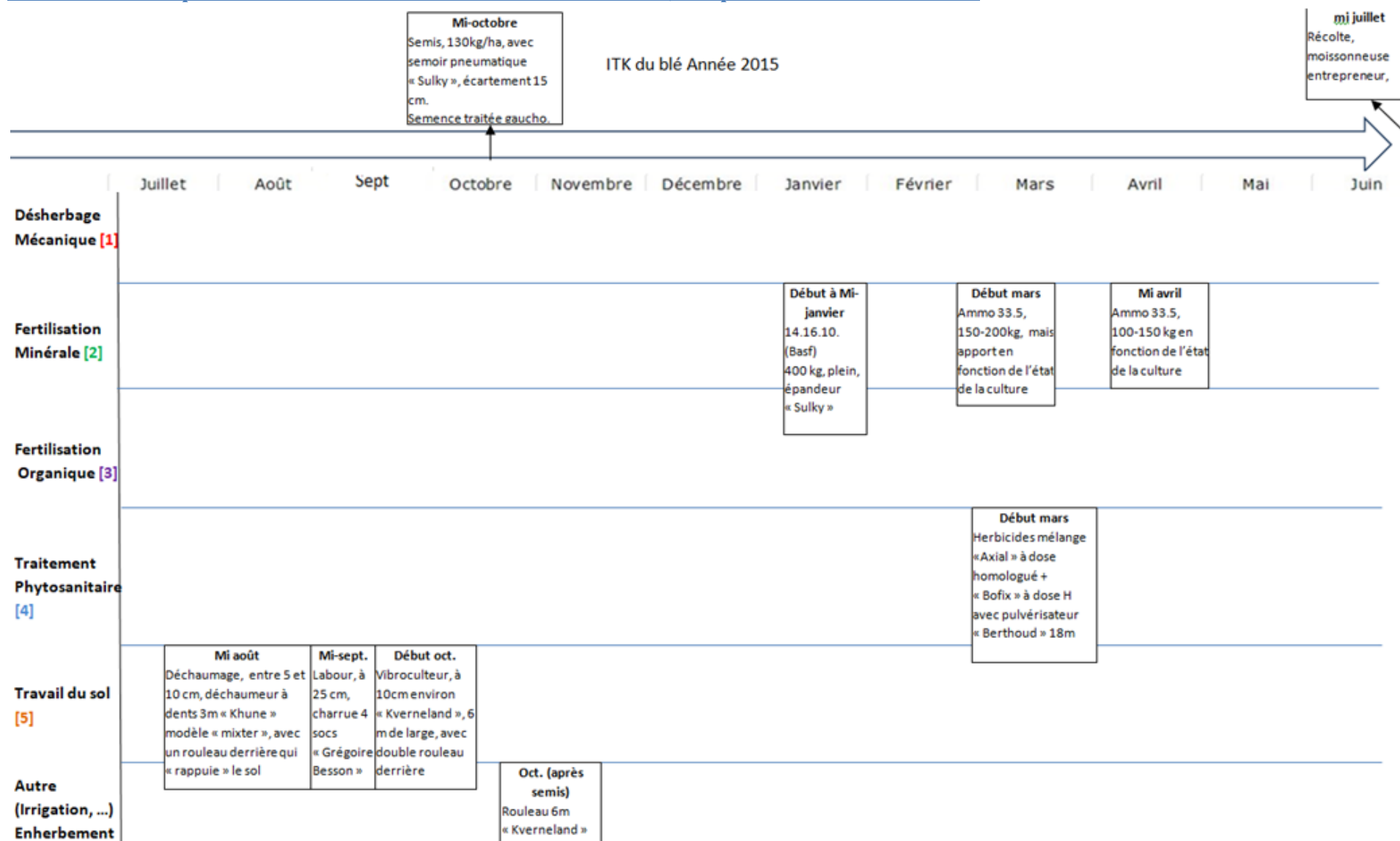
| | |
|--|--|
| Est-ce un enherbement permanent ou temporaire ? | |
| Comment est entretenu cet enherbement ? Tonte, broyage, roulage, fauche, pâturage, autre ? | |
| Destruction prévue ou non, quel moyen (mécanique, chimique), sera-t-il enfoui (profondeur, outil), ou exporté, ou laissé en surface (broyage ou non) ? | |
| Si l'enherbement doit être récolté, quand pensez-vous le récolter ? | |
| Aviez-vous déjà réalisé de l'enherbement auparavant ? | |

| durée d'enherbement | permanent | temporaire | autre |
|--|------------------|-------------------|--------------|
| Type d'enherbement (pur semé, mélange semé, spontané...) | | | |
| Combien cela coûte par ha ou par kg/sac de produit si enherbement non spontané (prix des semences) ? | | | |
| Machine agricole utilisée | | | |
| Temps de passage /Consommation horaire de la machine agricole utilisée pour l'enherbement si possible | | | |
| Schéma de l'enherbement | | | |
| Largeur de l'enherbement | | | |
| Période d'enherbement si temporaire | | | |
| Moyen de destruction de l'enherbement (enfouissement, laissé en surface, exporté, destruction chimique, mécanique, etc.) | | | |

8) Autre

| | |
|---|--|
| Quelles sont les périodes de pointes de travail dans l'année ? quelles sont vos priorités ? (ex : s'occuper du semis de blé) | |
| Nous avons vu un certain nombre de questions sur la qualité des sols. Est-ce que il vous semble que des points importants ont manqué au questionnaire et qu'il parait important de suivre sur la qualité des sols. | |
| D'après vous quels seraient les principaux leviers qui « joueraient » sur la qualité du sol et dans le lien « qualité des sols- état sanitaire, dépérissement du lavandin ». Qu'est ce qui interagirait le plus ? Finalement qu'est-ce que pour vous un sol de bonne qualité ? | |
| Y'a-t-il eu une grosse évolution dans vos pratiques ces 10, 15 dernières années ? Y'a-t-il eu des évolutions majeures en terme de pratique (exemple : passage au semis direct, arrêt du désherbage chimique et passage au mécanique, apport de MO, etc.) | |
| Est-ce que avant c'était une parcelle boisée ? | |
| Réduisez-vous la pression des pneus pour limiter la compaction du sol ? | |
| Quel est votre objectif de rendement à terme en lavandin sur la parcelle ? | |

Annexe 11 : Exemple d'une fiche d'ITK d'une culture de blé de 2015, complétée suite à un entretien



Annexe 12 : photos de lavandins âgés de 2 ans (il ne s'agit pas de plantiers) à 3 stades sanitaires différents



Photo n°1 : Lavandin de classe 1, en bon état



Photo n°2 : Lavandin de classe 2



Photo n°3 : Lavandin de classe 3, mort

Annexe 13 : tableau de synthèse des pratiques agricoles exercées sur les 34 parcelles. Les encadrés rouges mettent en évidence les pratiques sélectionnées pour la typologie

| N° parcelle | mode de conduite | culture 2012 | culture 2013 | culture 2014 | culture 2015 | culture 2016 | culture 2017 | écart entre le plantier et le dernier lavandin (en année) | IFT total 2012-2017 | désherbage chimique 2017 en plein | désherbage chimique 2017 seulement en localisé | désherbage chimique 2017 localisé + en plein |
|-------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------|---------------|--------------|---|---------------------|-----------------------------------|--|--|
| 1 | conv | sainfoin | sainfoin | sainfoin | sainfoin | sainfoin | lavandin | 15 | 2 | oui | | |
| 2 | bio | sainfoin | sainfoin | sainfoin | sainfoin | sainfoin | lavandin | 15 | 0 | | | |
| 3 | conv | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 11 | 10 | oui | | |
| 4 | conv | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 11 | 10 | oui | | |
| 5 | bio | sainfoin | sainfoin | sainfoin | blé dur | blé dur | lavandin | 30 | 0 | | | |
| 6 | conv | jachère | blé dur | tournesol | blé dur | pois | lavandin | 26 | 10 | oui | | |
| 7 | conv | blé dur | blé dur | blé dur | colza | blé dur | lavandin | 6 | 10,75 | | | |
| 8 | conv | blé dur | blé dur | blé dur | colza | blé dur | lavandin | 6 | 10,75 | | | |
| 9 | conv | blé dur | blé dur | blé dur | colza | blé dur | lavandin | 6 | 10,75 | | | |
| 10 | conv | lavandin | blé dur | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 5 | 7,5 | oui | | |
| 11 | bio | sainfoin | sainfoin | mélange céréales | triticale | triticale | lavandin | 7 | 0 | | | |
| 12 | conv | blé dur | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | lavandin | 6 | 8 | oui | | |
| 13 | conv | blé dur | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | lavandin | 6 | 8 | oui | | |
| 14 | conv | colza | blé dur | blé dur | pois | colza | lavandin | jamais | 18 | oui | | |
| 15 | conv | blé dur | blé dur | blé dur | blé dur | coriandre | lavandin | 6 | 10 | oui | | |
| 16 | conv | blé dur | gel annuel | blé dur | blé tendre | blé dur | lavandin | 13 | 9,26 | | oui | |
| 17 | conv | blé dur | gel annuel | blé dur | blé tendre | blé dur | lavandin | 13 | 10 | oui | | |
| 18 | conv | blé dur | blé dur | colza | blé dur | blé dur | lavandin | 6 | 14,5 | oui | | |
| 19 | conv | lavandin | lavandin | lavandin | lavandin | lavandin | lavandin | 0 | 12,3 | oui | | |
| 20 | conv | blé dur | orge | pois | blé dur | orge | lavandin | 6 | 12 | oui | | |
| 21 | conv | blé dur | orge | pois | blé dur | orge | lavandin | 6 | 12 | oui | | |
| 22 | conv | blé dur | sauge | sauge | sauge | orge | lavandin | 27 | 7 | oui | | |
| 23 | bio | lavandin | lavandin | orge | sainfoin | sainfoin | lavandin | 4 | 0 | | | |
| 24 | bio | lavandin | lavandin | orge | sainfoin | sainfoin | lavandin | 4 | 0 | | | |
| 25 | conv | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 7 | 11 | oui | | |
| 26 | conv | fenouil | fenouil | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 7 | 11 | oui | | |
| 27 | conv | lavandin | lavandin | lavandin | orge | blé dur | lavandin | 3 | 20 | oui | | |
| 28 | conv | blé dur | orge | blé dur | blé dur | blé dur | lavandin | 8 | 6 | oui | | |
| 29 | conv | blé dur | blé dur | pois | blé dur | blé dur | lavandin | 28 | 25 | oui | | |
| 30 | conv | pois | blé dur | colza | blé dur | colza | lavandin | 7 | 19 | oui | | |
| 31 | conv | blé dur | pois | blé dur | tournesol | blé dur | lavandin | jamais | 11 | oui | | |
| 32 | conv | blé dur | pois | blé dur | tournesol | blé dur | lavandin | jamais | 11 | oui | | |
| 33 | bio | luzerne + sainfoin | luzerne + sainfoin | avoine | seigle | petit épautre | lavandin | 7 | 0 | | | |
| 34 | bio | luzerne + sainfoin | luzerne + sainfoin | avoine | seigle | petit épautre | lavandin | 7 | 0 | | | |

| N° parcelle | nbre d'année entre le dernier labour et le labour précédent | profondeur labour avant lavandin (en cm) | profondeur labour habituelle (en cm) | dernier labour (date) | nombre de labour (2011-2016) | Sous solage avant plantation lavandin | nbre sous solage en 2016 | déchaumage avant labour | profondeur déchaumage (en cm) | vibroculteur après labour | profondeur vibroculteur (en cm) |
|-------------|---|--|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 1 | 5 | 25-30 | 25-30 | | 1 | oui | 1 | non | | oui | 10 |
| 2 | 5 | 25-30 | 25-30 | oct-16 | 1 | ui | 1 | non | | oui | 10 |
| 3 | 1 | 30 | 30 | nov-16 | 4 | oui | 2 | oui | 8-10 | oui | 10 |
| 4 | 1 | 30 | 30 | nov-16 | 4 | oui | 2 | oui | 8-10 | oui | 10 |
| 5 | 1 | 20 | 20 | nov-16 | 3 | | | oui mais pas pour 2016 | 10 | oui | 7-8 |
| 6 | 1 | 40-45 | 25-30 | nov-16 | 5 | | | oui | 5-8 | oui | 5-10 |
| 7 | 1 | 35 | 25-30 | déc-16 | 5 | | | oui | 5-10 | oui | 10 |
| 8 | 1 | 35 | 25-30 | déc-16 | 5 | | | oui | 5-10 | oui | 10 |
| 9 | 1 | 35 | 25-30 | déc-16 | 5 | | | oui | 5-10 | oui | 10 |
| 10 | 1 | 25-30 | 25-30 | nov-16 | 5 | | | oui | 20 | oui | 10-15 |
| 11 | 1 | 40-50 | 40-50 | nov-16 | 4 | | | oui | 20 | oui | 15-20 |
| 12 | 1 | 35 | 35 | oct-16 | 5 | oui | 1 | oui | 25-30 | oui | 20 |
| 13 | 1 | 35 | 35 | oct-16 | 5 | oui | 1 | oui | 25-30 | oui | 20 |
| 14 | 1 | 25 | 25 | nov-16 | 6 | oui | 1 | oui | 5-10 | oui | 15 |
| 15 | 1 | 25 | 25 | oct-16 | 6 | | | oui | 5-10 | oui | 10 |
| 16 | 1 | 20-25 | 20-25 | nov-16 | 5 | | | oui | 5-8 | oui | 5-8 |
| 17 | 1 | 20-25 | 20-25 | nov-16 | 5 | | | oui | 5-8 | oui | 5-8 |
| 18 | 1 | 30-40 | 30-40 | oct-16 | 6 | | | oui | 10-15 | oui | 10 |
| 19 | 4 | 30-40 | 30-40 | oct-16 | 2 | | | oui | 10-15 | oui | 10 |
| 20 | 1 | 30-35 | 15-20 | déc-16 | 6 | | | oui | 10 | oui | 5 |
| 21 | 1 | 30-35 | 15-20 | déc-16 | 6 | | | oui | 10 | oui | 5 |
| 22 | 1 | 25-30 | 20 | nov-16 | 3 | oui | 1 | oui | 10-15 | oui | 10 |
| 23 | 15 | | | 2001 | 0 | Localisé sur Le rang | 2 | non | | oui | 7-10 |
| 24 | 15 | | | 2001 | 0 | Localisé sur Le rang | 2 | non | | oui | 7-10 |
| 25 | 1 | 45-50 | 40 | nov-16 | 5 | | | oui | 20 | oui | 25 |
| 26 | 1 | 45-50 | 40 | nov-16 | 5 | | | oui | 20 | oui | 25 |
| 27 | 1 | 25 | 25 | nov-16 | 3 | | | oui | 10 | oui | 5-10 |
| 28 | 1 | 40 | 25-30 | oct-16 | 6 | | | oui | 7-10 | oui | 20 |
| 29 | 1 | 25 | 25 | nov-16 | 3 | oui | 1 | oui | 10 | oui | 10 |
| 30 | 3 | 25 | 25 | oct-16 | 2 | oui | 1 | non | | oui (herse rotative) | 10 |
| 31 | 1 | 20 | 20 | nov-16 | 6 | | | non | | oui | 10 |
| 32 | 1 | 20 | 20 | nov-16 | 6 | | | non | | oui | 10 |
| 33 | 1 | 15-20 | 15-20 | oct-16 | 3 | | | oui | 10 | oui | 5-10 |
| 34 | 1 | 15-20 | 15-20 | oct-16 | 3 | | | oui | 10 | oui | 5-10 |

| N° parcelle | désherbage chimique seulement après plantation du lavandin | désherbage mécanique seulement après plantation du lavandin | désherbage mécanique et chimique après plantation du lavandin | pas de désherbage après plantation du lavandin | enherbement (oui ou non) | fertilisation au cours des 12 derniers mois (oui ou non) | date du dernier apport de MO | type de MO | quantité apportée (en kg/ha) |
|-------------|--|---|---|--|--------------------------|--|------------------------------|--|-------------------------------|
| 1 | oui | non | non | non | non | | août-16 | compost(2/3 pailles de lavandin distillées + 1/3 boue épuration | 12500 |
| | | | | | non | | août-16 | | 12500 |
| 2 | non | oui | non | non | | | | | |
| 3 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 4 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 5 | non | oui | non | non | non | | févr-16 | "Kerazote" 10,2,2 | 325 |
| 6 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 7 | non | oui | non | non | oui | oui | févr-17 | "Bio 3G" + "Guanito" | 600 (« Bio3G) + 100 (Guanito) |
| 8 | non | oui | non | non | non | oui | févr-17 | | |
| 9 | non | oui | non | non | oui | oui | févr-17 | | |
| 10 | non | non | oui | non | non | oui | janv-17 | "Orgaval" 2-1-2 | 300 |
| 11 | non | oui | non | non | non | | Automne 2016 | "fertigal" 4-3-3 | 250 |
| 12 | oui | non | non | non | oui | oui | | | |
| 13 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 14 | oui | non | non | non | non | oui | août-15 | boue d'épuration | 20000 |
| 15 | non | non | oui | non | oui | oui | | | |
| 16 | non | oui | non | non | oui | oui | | | |
| 17 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 18 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 19 | non | non | oui | non | non | non | | | |
| 20 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 21 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 22 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 23 | non | non | non | oui | oui | | | | |
| 24 | non | non | non | oui | oui | | | | |
| 25 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 26 | non | non | oui | non | non | oui | | | |
| 27 | oui | non | non | non | oui | oui | oct-16 | compost pailles lavandins | 6000 |
| 28 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 29 | oui | non | non | non | non | oui | | | |
| 30 | oui | non | non | non | non | oui | août-16 | "transfertil" (boue de STEP) | 3000 |
| 31 | non | non | oui | non | non | oui | janv-15 | | |
| 32 | non | non | oui | non | non | oui | janv-15 | | |
| 33 | non | non | non | oui | oui | | mars-16 | "Kerazote" 10,2,2 | 200 |
| 34 | non | non | non | oui | non | | mars-16 | "Kerazote" 10,2,2 | 200 |

Annexe 14 : tableau avec le nom des variables liées aux pratiques agricoles sélectionnées et leur signification

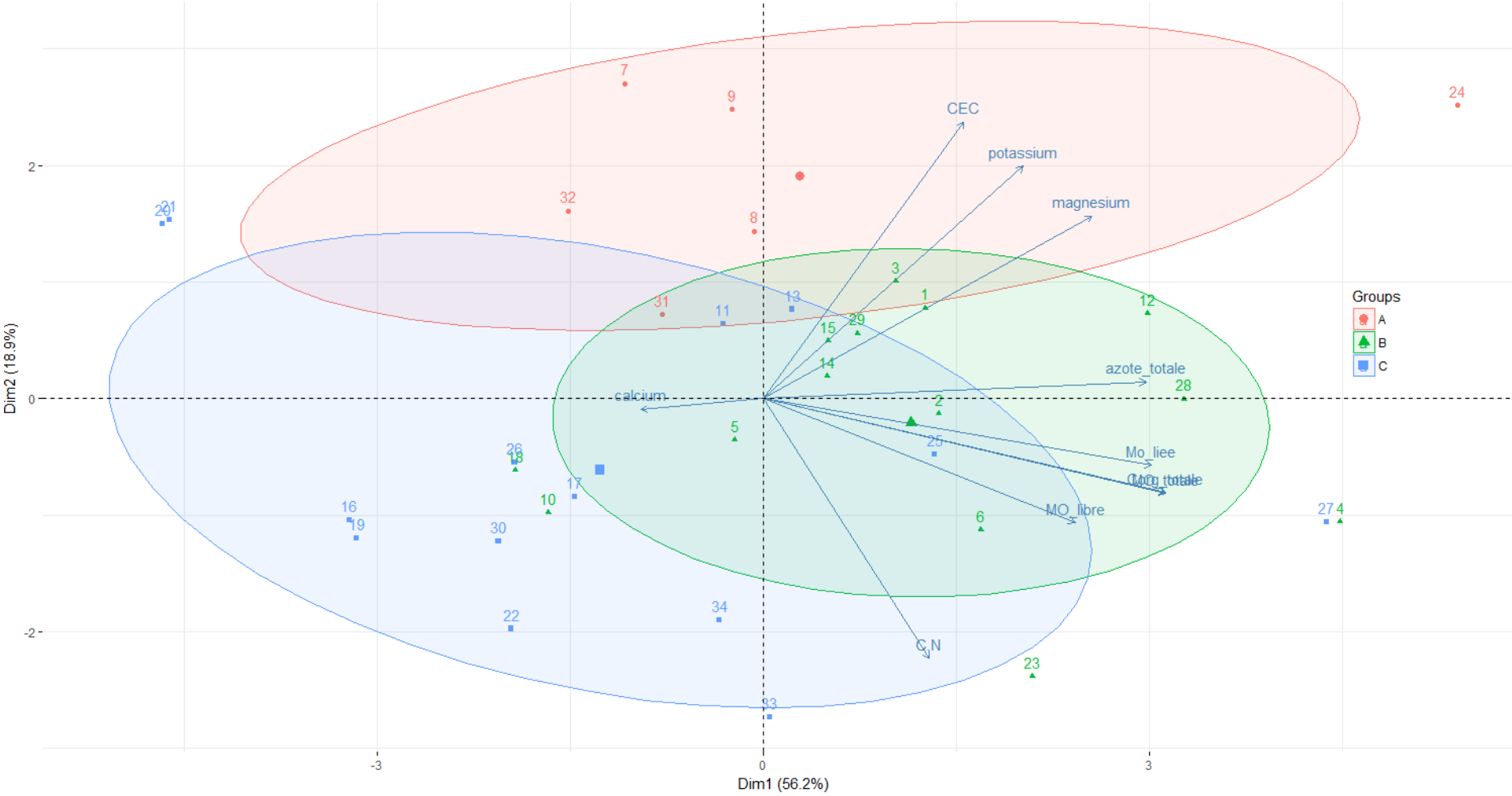
| Variable | Correspondance |
|-----------------|---|
| « succession » | Correspond au type de rotation de 2012 à 2017 |
| « IFT2 » | Correspond à l'IFT total cumulé de 2012 à 2017 |
| « desherbage » | Correspond au mode désherbage ayant eu lieu entre la plantation et le prélèvement des échantillons de sol |
| « ferti_orga » | Correspond à l'utilisation ou non d'au moins un amendement organique entre 2015 et 2017 |
| « delai » | Correspond au délai de retour du lavandin |
| « labour » | Correspond à la fréquence de labour entre 2011 et 2016 |
| « sous solage » | Correspond à l'utilisation ou non du sous solage avant la plantation du lavandin |
| « enherbement » | Correspond à la présence ou non d'un enherbement inter-rang sur la parcelle |

Annexe 15 : tableau avec les modalités de chaque variable et leur signification

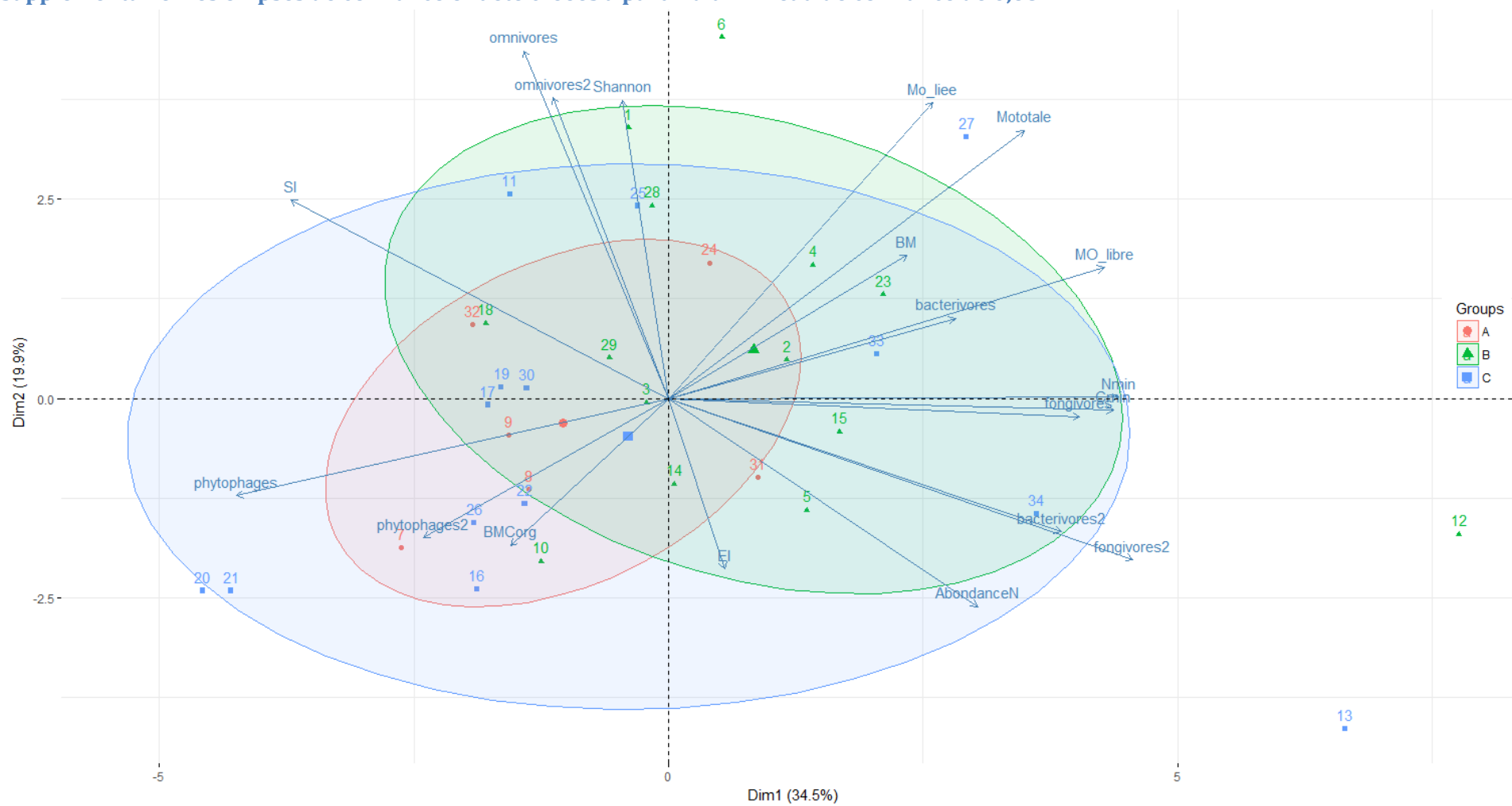
| variable | modalité | correspondance |
|-----------------|-----------|--|
| « succession » | BI | Parcelles dont la culture de blé prédomine sur les 5 années passées (2012_2016) |
| | POB | Parcelles présentant une alternance pois/oléagineux/blé sur les 5 années passées (2012-2016) |
| | CF | Parcelles présentant une culture fourragère sur les 5 dernières années (2012-2016) |
| | P | Parcelles présentant une culture pérenne (sauge, lavandin) sur les 5 dernières années (2012-2016) |
| « IFT2 » | Non | Parcelles dont l'IFT total cumulé de 2012 à 2017 étaient de 0 |
| | Faible | Parcelles dont l'IFT total cumulé de 2012 à 2017 étaient compris entre 1 et 10 |
| | fort | parcelles dont l'IFT total cumulé de 2012 à 2017 étaient supérieur à 10 |
| « desherbage » | Aucun | Parcelles n'ayant effectué aucun désherbage après plantation du lavandin |
| | DC | Parcelles dont le désherbage après plantation du lavandin et jusqu'à la date d'échantillonnage était uniquement chimique |
| | DM | Parcelles dont le désherbage après plantation du lavandin et jusqu'à la date d'échantillonnage était uniquement mécanique |
| | DC+DM | Parcelles dont le désherbage après plantation du lavandin et jusqu'à la date d'échantillonnage était chimique et mécanique |
| « Ferti_orga » | oui | Parcelles ayant fait un apport d'amendement organique au moins une fois les trois dernières années (2015 - début 2017) |
| | non | Parcelles n'ayant pas fait d'apport d'amendement organique les trois dernières années (2015 - début 2017) |
| « delai » | retour<=6 | Parcelles dont le délai de retour du lavandin était inférieur ou égal à 6 ans |
| | retour>6 | Parcelles dont le délai de retour du lavandin était supérieur à 6 ans |
| « labour » | labour<=4 | parcelles avec un nombre de labours inférieurs ou égal à 4 entre 2011-2016 |
| | labour>4 | Parcelles avec un nombre de labours supérieurs à 4 entre 2011 et 2016 |
| « sous_solage » | ASS | Parcelles ayant réalisé un sous solage avant plantation du lavandin |
| | SSS | Parcelles n'ayant pas réalisé de sous solage avant plantation du lavandin |
| « enherbement » | NE | Parcelles ne présentant pas d'enherbement inter-rang |
| | E | Parcelles présentant un début d'enherbement inter-rang ¹⁴ |

¹⁴ Les parcelles présentaient un enherbement très peu développé, hormis pour la parcelle 23 et 24 dont l'enherbement était plus développé.

Annexe 16 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68.



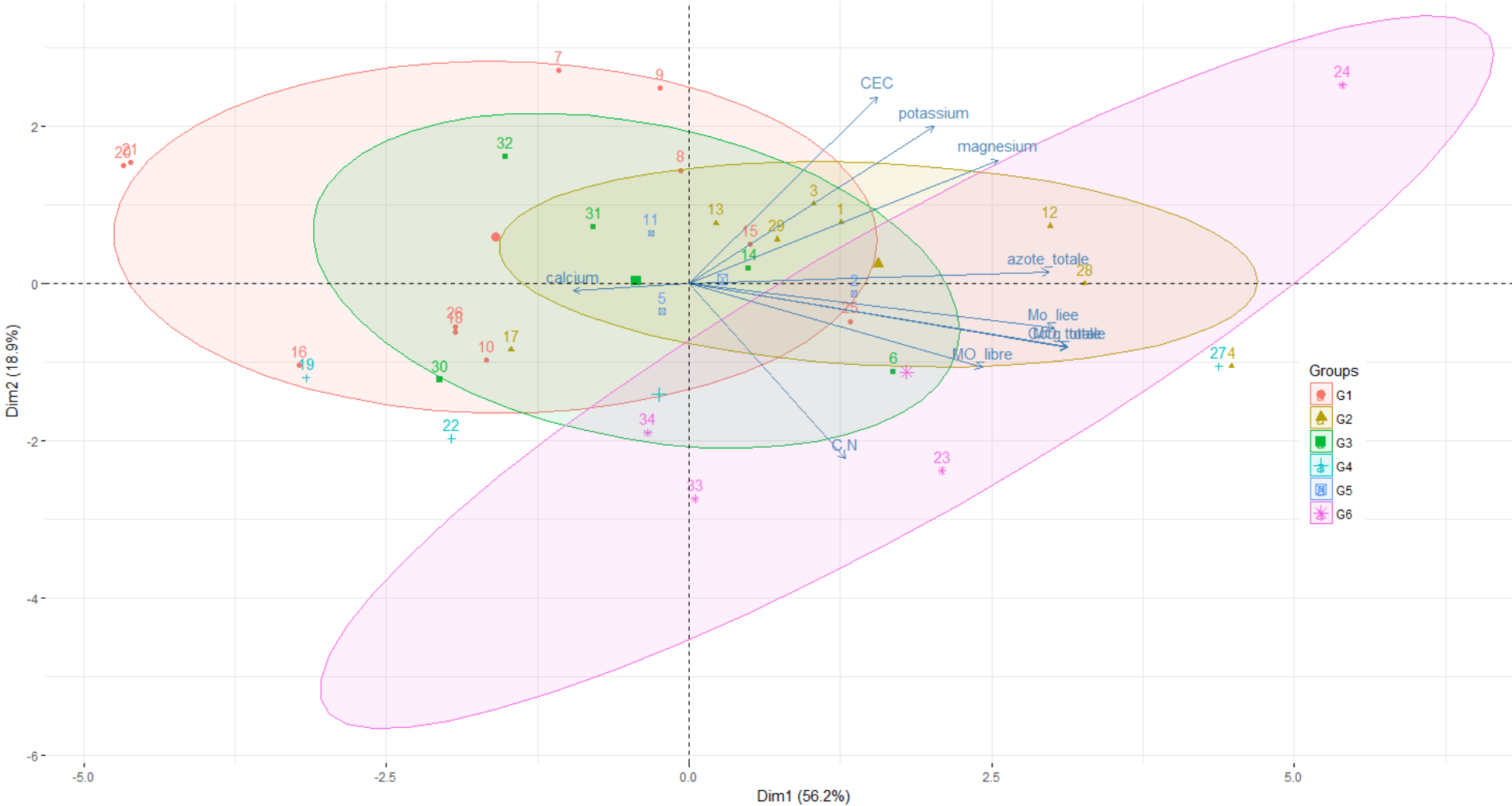
Annexe 17 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de sols comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68.



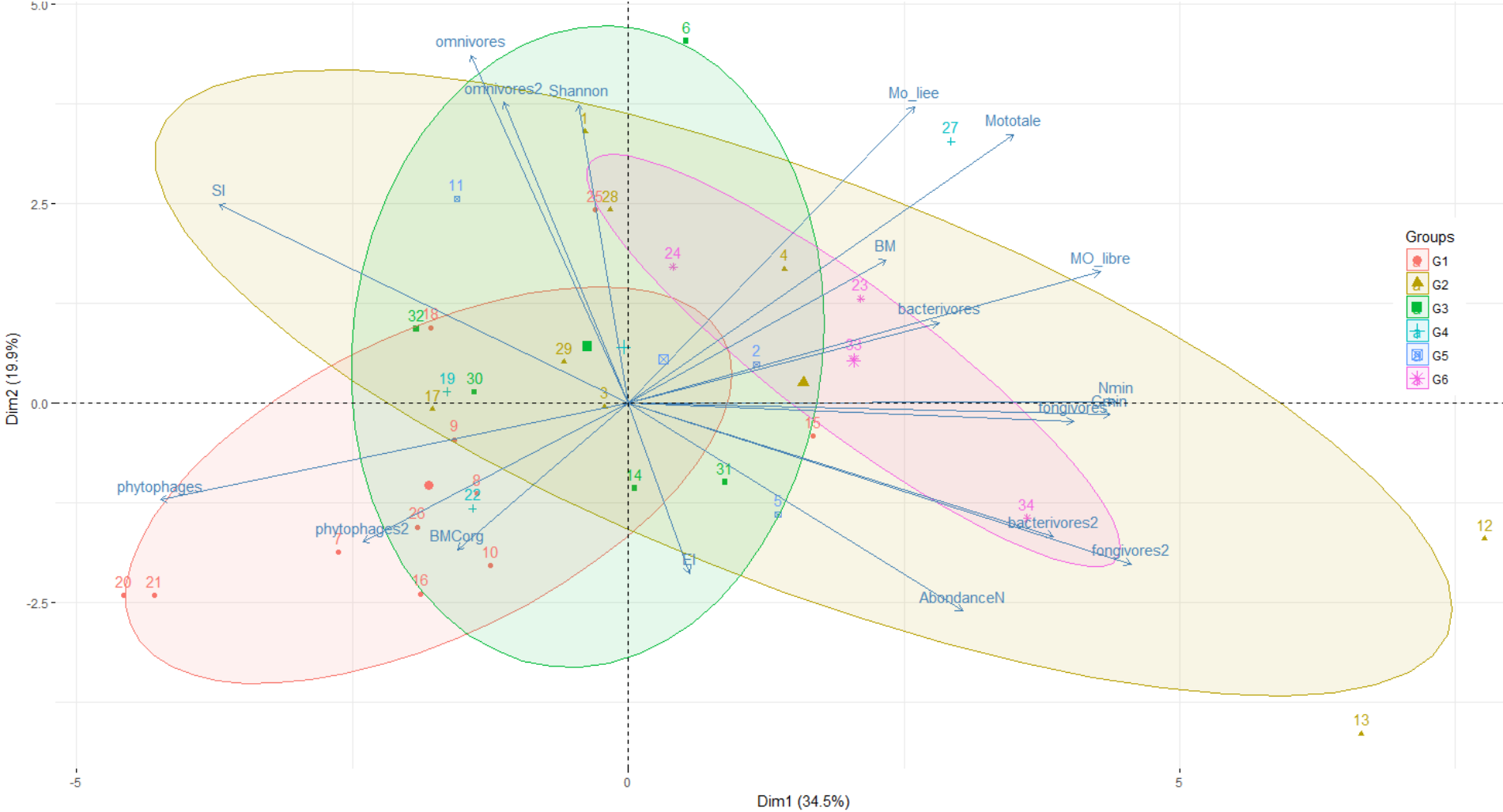
Annexe 18 : tableau des 34 parcelles et leur groupe de sol et de pratiques associées

| N° parcelle | Groupe de sol | Groupe de pratique |
|-------------|---------------|--------------------|
| 1 | B | G2 |
| 2 | B | G5 |
| 3 | B | G2 |
| 4 | B | G2 |
| 5 | B | G5 |
| 6 | B | G3 |
| 7 | A | G1 |
| 8 | A | G1 |
| 9 | A | G1 |
| 10 | B | G1 |
| 11 | C | G5 |
| 12 | B | G2 |
| 13 | C | G2 |
| 14 | B | G3 |
| 15 | B | G1 |
| 16 | C | G1 |
| 17 | C | G2 |
| 18 | B | G1 |
| 19 | C | G4 |
| 20 | C | G1 |
| 21 | C | G1 |
| 22 | C | G4 |
| 23 | B | G6 |
| 24 | A | G6 |
| 25 | C | G1 |
| 26 | C | G1 |
| 27 | C | G4 |
| 28 | B | G2 |
| 29 | B | G2 |
| 30 | C | G3 |
| 31 | A | G3 |
| 32 | A | G3 |
| 33 | C | G6 |
| 34 | C | G6 |

Annexe 19 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques chimiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68.



Annexe 20 : ACP réalisé sur les indicateurs dynamiques biologiques sélectionnés, en intégrant les groupes de pratiques comme variable supplémentaire. Les ellipses de confiance ont été créées à partir d'un niveau de confiance de 0,68.



Annexe 21 : tableau des résultats des mesures de l'état sanitaire des plantiers

| N° parcelle | Total des plants mesurés | nombre de plants classés "douteux" (classe 2) | nombre de plants morts (classe 3) | nombre de plants vivants (classe 1) | plants vivants (en %) | plants douteux (en %) | plants morts (en %) |
|-------------|--------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 500 | 7 | 8 | 485 | 97 | 1,4 | 1,6 |
| 2 | 500 | 31 | 23 | 446 | 89,2 | 6,2 | 4,6 |
| 3 | 500 | 12 | 39 | 449 | 89,8 | 2,4 | 7,8 |
| 4 | 500 | 8 | 12 | 480 | 96 | 1,6 | 2,4 |
| 5 | 500 | 23 | 30 | 447 | 89,4 | 4,6 | 6 |
| 6 | 500 | 1 | 2 | 497 | 99,4 | 0,2 | 0,4 |
| 7 | 250 | 5 | 14 | 231 | 92,4 | 2 | 5,6 |
| 8 | 250 | 5 | 7 | 238 | 95,2 | 2 | 2,8 |
| 9 | 250 | 4 | 10 | 236 | 94,4 | 1,6 | 4 |
| 10 | 500 | 7 | 4 | 489 | 97,8 | 1,4 | 0,8 |
| 11 | 500 | 12 | 10 | 478 | 95,6 | 2,4 | 2 |
| 12 | 500 | 19 | 15 | 466 | 93,2 | 3,8 | 3 |
| 13 | 460 | 15 | 20 | 425 | 92,4 | 3,3 | 4,3 |
| 14 | 500 | 0 | 1 | 499 | 99,8 | 0 | 0,2 |
| 15 | 500 | 2 | 2 | 496 | 99,2 | 0,4 | 0,4 |
| 16 | 500 | 0 | 1 | 499 | 99,8 | 0 | 0,2 |
| 17 | 500 | 1 | 0 | 499 | 99,8 | 0,2 | 0 |
| 18 | 500 | 6 | 18 | 476 | 95,2 | 1,2 | 3,6 |
| 19 | 500 | 6 | 14 | 480 | 96 | 1,2 | 2,8 |
| 20 | 250 | 3 | 1 | 246 | 98,4 | 1,2 | 0,4 |
| 21 | 250 | 3 | 5 | 242 | 96,8 | 1,2 | 2 |
| 22 | 500 | 0 | 7 | 493 | 98,6 | 0 | 1,4 |
| 23 | 500 | 4 | 8 | 488 | 97,6 | 0,8 | 1,6 |
| 24 | 500 | 10 | 11 | 479 | 95,8 | 2 | 2,2 |
| 25 | 500 | 3 | 4 | 493 | 98,6 | 0,6 | 0,8 |
| 26 | 500 | 5 | 8 | 487 | 97,4 | 1 | 1,6 |
| 27 | 500 | 2 | 3 | 495 | 99 | 0,4 | 0,6 |
| 28 | 500 | 11 | 20 | 469 | 93,8 | 2,2 | 4 |
| 29 | 500 | 10 | 4 | 486 | 97,2 | 2 | 0,8 |
| 30 | 500 | 1 | 1 | 498 | 99,6 | 0,2 | 0,2 |
| 31 | 500 | 35 | 47 | 418 | 83,6 | 7 | 9,4 |
| 32 | 500 | 20 | 32 | 448 | 89,6 | 4 | 6,4 |
| 33 | 250 | 2 | 1 | 247 | 98,8 | 0,8 | 0,4 |
| 34 | 250 | 3 | 1 | 246 | 98,4 | 1,2 | 0,4 |

THEME : Production agricole

La qualité des sols sur le plateau de Valensole

Étude de l'impact de pratiques agricoles sur la qualité du sol en parcelle de lavandin

Soil quality on the Valensole plateau

Study of the impact of agricultural practices on soil quality in lavandin plots

Mots-clés : qualité des sols, lavandin, indicateurs physiques, chimiques et biologiques de sol, pratiques agricoles

Key-words : soil quality, lavandin, physical soil indicators, chemical soil indicators, biological soil indicators, agricultural practices

Résumé :

Le sol, par les multiples fonctions qu'il assure (production, épuration, réservoir de biodiversité...) occupe une place centrale au sein des systèmes d'exploitation agricole et des services écosystémiques rendus par les agro-écosystèmes. Depuis plusieurs années, on constate sur le plateau de Valensole une dégradation des sols. Dans ce contexte, quatre structures (PNR Verdon, Chambre d'agriculture 04, Société du canal de Provence et AgroSYS) se sont rassemblées autour du projet agroécologique REGAIN au travers duquel le réseau Sol a été élaboré. D'une durée de 3 ans (2017-2019), ce réseau vise à étudier la qualité des sols sur des parcelles de lavandin, culture pérenne très développée sur le territoire. L'objectif principal de la présente étude consistait à évaluer l'impact des pratiques culturales sur la qualité des sols de 34 parcelles de plantiers de lavandin. Ces parcelles présentaient une variabilité inter-parcellaire importante tant sur les types de sols que sur les pratiques agricoles exercées. Dans un premier temps, la qualité des sols a été évaluée par un ensemble d'indicateurs physico-chimiques et biologiques. Puis les pratiques culturales effectuées sur chacune des parcelles ont été recensées auprès des agriculteurs. Par la suite, des typologies de pratiques agricoles et de sol ont été formées. Les résultats ont permis de mettre en évidence de façon tendancielle l'influence des types de sols et de groupes de pratiques sur la qualité du sol, notamment sur la matière organique.

Abstract :

The soil, through the multiple functions it provides (production, purification, reservoir of biodiversity ...) occupies a major role within farming systems and the ecosystem services delivered by the agro-ecosystems. For several years, there has been a degradation of soils on the plateau of Valensole. In this context, four partners (PNR Verdon, 04 Chamber of Agriculture, Company of the canal of Provence and AgroSYS) have gathered around an REGAIN agro-ecological project through which the SOIL network was developed. This network, three years' duration (2017-2019), aims to study the soil quality on lavandin plots, a highly developed perennial crop on its territory. The main objective of this study was to evaluate the impact of agricultural practices on soil quality of 34 young lavandin plots. These plots showed a wide inter-plot variability in both soil types and agricultural practices. As a first step, soil quality was assessed by a set of physico-chemical and biological indicators. Then the cultivation practices carried out on each plot were identified with farmers. Subsequently, soil typologies and agricultural practices typologies have been designed. The results have highlighted tendentially the influence of soil types and agricultural practices on soil quality, especially on organic matter.

Nombre total de volumes : 1

Nombre total de pages du document principal : 60

Demandeur : Parc naturel régional du Verdon