

Spécialité Agronomie

STAGE DE FIN D'ETUDE

Formation Ingénieur AgroSup Dijon

Formation Continue

Etude de la qualité des sols du plateau de Valensole : mise en relation avec les pratiques agricoles et l'état sanitaire de la culture

(stage réalisé du 18/03 au 30/08/2019)

Alix DELHAL

Nicolas CHEMIDLIN-PREVOST-BOURE

Enseignant référent

Perrine PUYBERTHIER

Tuteur de stage

Parc naturel régional du Verdon

Domaine de Valx, 04360 Moustiers-Ste-Marie

2019



## REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le Parc naturel régional de m'avoir permis d'effectuer ce stage, au cours duquel j'ai beaucoup appris, sur mon sujet de stage et sur beaucoup d'autres.

Un grand merci également à tous les employés du parc pour leur accueil, leur bonne humeur, les moments de partages, culinaires et musicaux, bref pour la très bonne ambiance au cours de ces 5 mois de stage.

Stagiaires et écogardes, ce stage n'aurait jamais été le même sans vous. Donc merci pour votre soutien, mais surtout pour les moments de rigolade, de dépense sportive, les scipionnades et j'en passe... j'espère vous recroiser un jour !

Je remercie de la même manière les agriculteurs, pour le temps qu'ils m'ont accordé, leur patience. Les informations que vous m'avez transmises ont été indispensables à la bonne réussite de ce stage.

Merci à Jean-Claude et Laurent, de la Société du canal de Provence, de nous avoir aidé lors de la phase de prélèvements de sol, et pour avoir répondu à mes interrogations.

La phase d'analyse statistique n'a pas été la plus simple. Pour les longues discussions au téléphone sur la méthode, l'analyse des résultats et l'interprétation et pour la relecture, un grand merci à Claire, sans qui cette étape ne se serait pas si bien déroulée.

Merci également à Nicolas, tuteur pédagogique de ce stage, pour sa réactivité lors de nos échanges par mail, ses conseils, son aide dans le choix de la méthode et pour ses relectures.

Enfin, merci beaucoup à Perrine, pour ton écoute, ton aide dans l'organisation et la réalisation de ce stage, tes conseils, mais aussi pour ta disponibilité, les longues discussions et tes relectures pertinentes qui ont amené au résultat final de ce mémoire.

## TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	
LISTE DES FIGURES .....	
LISTE DES TABLEAUX .....	
LISTE DES ABREVIATIONS .....	
INTRODUCTION.....	1
I. Etat de l'art et problématique.....	3
I.1. Etat de l'art .....	3
I.1.a. La faune du sol : un élément indispensable au bon fonctionnement du sol	3
I.1.b. La matière organique : place et effets.....	5
I.1.c. Les services écosystémiques rendus par le sol .....	6
I.1.d. La notion de qualité du sol : historique et choix d'une définition.....	6
I.1.e. Les indicateurs de la qualité du sol.....	8
I.1.f. Impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol .....	11
I.2. Contexte.....	12
I.2.a. La structure d'accueil : Le Parc naturel régional du Verdon.....	12
I.2.b. Le sujet d'étude .....	13
I.3. Objectifs et hypothèses .....	16
II. Matériels et méthodes : .....	17
II.1. Présentation de la zone d'étude : le Plateau de Valensole .....	17
II.2. Présentation du réseau Sol : .....	19
II.3. Les méthodes appliquées sur le terrain : .....	20
II.3.a. Prélèvement des échantillons de sol.....	20
II.3.b. Envoi des échantillons en laboratoire.....	20
II.3.c. Enquête sur les pratiques agricoles .....	20
II.3.d. Mesure du taux de dépérissement du lavandin .....	21
II.3.e. La mesure de rendement.....	22
II.4. Les méthodes d'analyse .....	22
II.4.a. Création d'une typologie de sols .....	23
II.4.b. Création de modalités de pratiques .....	23
II.4.c. Analyse de l'effet du type de sol et des pratiques sur la qualité du sol...	23
II.4.d. Analyse de l'effet du type de sol et des pratiques agricoles sur l'évolution de la qualité des sols.....	24
II.4.e. Relations entre état sanitaire, pratiques agricoles et qualité du sol.....	24

II.4.f. Etude de quelques indicateurs économiques .....	24
III. Résultats .....	25
III.1. Formation des groupes de sol et des classes de pratiques.....	25
III.1.a. Description des variables texturales.....	25
III.1.b. Création de groupes de sol.....	25
III.1.a. Création des classes pour chaque pratique.....	28
III.2. Impact des types de sols et des pratiques sur les indicateurs de qualité du sol	31
III.2.a. Description de la qualité du sol du plateau de Valensole. ....	31
III.2.b. Réduction du jeu de données .....	32
III.2.c. Effet du type de sol sur la qualité du sol .....	34
III.2.d. Impact des pratiques sur les indicateurs de qualité du sol : analyse à partir des informations qualitatives .....	35
III.2.e. Impact des pratiques sur les indicateurs de qualité du sol : analyse à partir des informations quantitatives .....	37
III.3. Impact des types de sol et des pratiques sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol	39
III.3.a. Description et réduction du jeu de données .....	39
III.3.b. Impact de l'enherbement et de l'apport de MO sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol sur les parcelles expérimentales du réseau Sol.....	40
III.3.c. Impact du sol et des pratiques sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol	41
III.1. Impact du type de sol, des pratiques et de la qualité du sol sur l'état sanitaire des parcelles de lavandin .....	43
III.2. Analyse économique.....	45
IV. Discussion .....	47
CONCLUSION .....	51
Bibliographie .....	53

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cycle biogéochimique simplifié de l'azote en parcelle cultivée (source : Etude des sols (Girard et al, 2017) ; d'après COMIFER, 2011).....	4
Figure 2 : Les groupes trophiques de nématodes (extrait de rapport fourni par Elisol Environnement).....	5
Figure 3 : Rôles de la matière organique dans le sol (source : <a href="https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMOS.html">https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMOS.html</a> ) .....	6
Figure 4 : Territoire du Parc naturel régional du Verdon.....	13
Figure 5 : Marques d'érosion observées sur une parcelle de lavandin sur le Plateau de Valensole, secteur nord de Valensole.....	15
Figure 6 : Schématisation des différentes analyses afin de répondre aux hypothèses proposées.....	16
Figure 7 : Coupes des sols observables sur le plateau de Valensole (extrait de Bornand et al. 2012) et localisation. ....	18
Figure 8 : Délimitation du plateau de Valensole et localisation des parcelles du Réseau Sol.....	19
Figure 9 : Modalités d'échantillonnage en fonction de présence ou non d'enherbement ; .....	21
Figure 10 : Distinction des différentes classes de plants symptomatiques du dépérissement (A à D ; photographies personnelles) et exemple de schéma de parcours pour la mesure du dépérissement (E). ....	22
Figure 11 : Cercle de corrélation des variables de texture et de la teneur en calcaire..	26
Figure 12 : Distinction des groupes de sol selon les axes de l'ACP effectuées sur la texture et la teneur en calcaire.....	26
Figure 13 : Classification hiérarchique des groupes de sol .....	27
Figure 14 : Projection des indicateurs de qualité du sol et des parcelles selon les deux principaux axes de l'ACP sur les indicateurs de qualité retenus après analyse du corrélogramme. ....	33
Figure 15 : Matrice de corrélation entre les indicateurs de qualité sol.....	33
Figure 16 : Projection des parcelles en fonction du groupe de sol auquel elles appartiennent .....	34
Figure 17 : Projection des parcelles et classement en fonction des pratiques après réalisation de la RDA des indicateurs de qualité du sol (variables à expliquer) et des pratiques agricoles (variables explicatives). ....	36
Figure 18 : Projection des parcelles sur les axes de la RDA et classement en fonction de la présence d'un enherbement ou non sur la parcelle sur la culture du lavandin.....	37

Figure 19 : Corrélogramme des taux de variation des indicateurs de qualité du sol entre 2017 et 2019.....	38
Figure 20 : Cercle de corrélation des taux de variations des indicateurs de qualité du sol retenus pour la RDA.....	39
Figure 21 : Effet de la présence d'enherbement inter-rang (A) et de l'apport de MO entre 2012 et 2016 (B) sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol.....	42
Figure 22 : Projection des parcelles et classement en fonction des pratiques sélectionnées automatiquement au cours de la RDA permettant d'expliquer l'état sanitaire des parcelles étudiées.....	44
Figure 23 : Représentation graphique de la marge directe, des charges hors frais de distillation et de l'indice d'efficacité économique pour les parcelles du réseau Sol.....	46

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description des variables texturales et de la teneur en calcaire sur les parcelles étudiées.....	26
Tableau 2 : Distinction des pratiques "anciennes" et "récentes".....	27
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des classes de pratiques anciennes et récentes créées. .....	30
Tableau 4 : Résultats de la comparaison de quelques indicateurs de qualité du sol entre les parcelles témoin et les parcelles expérimentales du réseau Sol.....	40
Tableau 5 : Comparaison de l'état sanitaire sur les parcelles expérimentales du réseau Sol. Les parcelles témoin sont celles sur lesquelles la pratique n'a pas été appliquée. ....	43

## LISTE DES ABREVIATIONS

**Afin de faciliter la lecture du document, un mémorandum, synthétisant l'ensemble des abréviations utilisées pour les indicateurs de qualité du sol retenus, complète cette liste des abréviations.**

ACM : Analyse de comparaisons multiples

ACP : Analyse en composantes principales

BM : biomasse microbienne

CEC : capacité d'échange cationique

Corg : carbone organique

EI : Indice d'enrichissement

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

GIEC : Groupe d'experts international sur l'évolution du climat

IFT : Indicateur de fréquence de traitement

IVD : Indice des voies de décomposition

MO : matière organique

Norg : azote organique

N<sub>tot</sub> : azote total

RDA : Redundancy analysis ou analyse canonique de redondance

SI : Indice de stabilité

## INTRODUCTION

Le sol est défini comme étant la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous-jacente, sous l'action du climat et des organismes vivants (Gis Sol, 2011). Il est généralement constitué à 95 % de matière minérale et de 5 % de matière organique (Feller *et al.*, 2016). Sa composition, principalement sa teneur en argiles (élément de taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ ), limons (élément entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ ) et sables (élément entre 50  $\mu\text{m}$  et 2 mm), détermine sa texture et lui donne des caractéristiques particulières (sol plus ou moins drainant, capacité plus ou moins forte à retenir les cations...). Il existe ainsi une grande diversité de sols. La matière organique joue également un rôle déterminant dans cette diversité. En effet, un sol est aussi caractérisé par la faune et les micro-organismes qui l'habitent. Il s'agit d'un milieu vivant, réservoir de biodiversité, contenant 25 % de la faune et de la flore actuellement référencées sur notre planète (Ministère de l'Ecologie du Développement durable des Transports et du Logement and ADEME, 2010) et où vivraient 80 % de la biodiversité animale (Deprince, 2003). Ainsi, 80 individus de vers de terre vivent sur une surface de 1 m<sup>2</sup> de sol en moyenne en Europe (soit 800 000 par hectare) et plusieurs millions, voire milliards, de microorganismes sont répartis en des dizaines de milliers d'espèces par gramme de sol ((Commission Européenne, 2010), (Dommergues et Manganot, 1970)).

Cette interaction entre matière minérale et organique fait du sol une couche indispensable au développement de la vie sur Terre. (FAO, 2005). En effet, comme évoqué, le sol constitue l'habitat de nombreux animaux et insectes ; il est nécessaire aux végétaux en tant que support de croissance et de développement de leurs racines. Il leur fournit les éléments dont ils ont besoin, et ce grâce à l'intervention des microorganismes dans les cycles géochimiques. Ces végétaux constituent la base de l'alimentation de nombreuses espèces animales. Le sol participe ainsi au maintien de la qualité des ressources en purifiant l'eau et en stockant du carbone, aidant ainsi à la régulation du climat. Il permet à l'Homme de produire son alimentation, mais aussi de se soigner grâce aux champignons qu'il contient, et sert de support aux infrastructures qu'il construit. Le sol rend ainsi de nombreux services et constitue un enjeu collectif pour le développement durable à travers ces différentes fonctions ; il faut donc le préserver.

Or, le sol est une ressource qualifiée de non renouvelable par la FAO. Les fortes pressions auxquelles il est soumis, climatiques (érosion hydrique et éolienne) et anthropiques (artificialisation, pollution), engendrent des processus de dégradation plus ou moins rapides (Gis Sol, 2011), non récupérables sur le pas de temps d'une vie humaine. Un tiers des sols de la Terre sont aujourd'hui modérément à fortement dégradés, principalement menacés par l'érosion, la perte de carbone organique et le déséquilibre en éléments nutritifs (FAO, 2016). En modifiant les pratiques sans anticiper les conséquences à long terme sur le sol (Karlen *et al.* 1997 d'après Pesek, 1994 et Doran *et al.*, 1996), l'agriculture intensive peut être citée comme usage induisant une dégradation des sols. Le retournement de prairies, les pratiques fréquentes de travail du sol en profondeur, les rotations courtes, le tassement et l'usage de produits phytopharmaceutiques entraînent une diminution de la faune du sol. Le recours à des engrais de synthèse permet de s'affranchir du déséquilibre interne des sols en éléments nutritifs et on peut considérer qu'il participe ainsi à l'entretien de l'état dégradé (Gis Sol, 2011). Leur teneur en matière organique est elle-aussi affectée. En France, 30 à 40 % de la

surface de terres arables en serait déficitaire. Il est estimé qu'un redressement de 10 % de la teneur en matière organique serait possible sur 10 ans (Roussel *et al*, 2001). Cela ne se fera donc que sur le temps long. Afin d'entretenir l'ensemble des services écosystémiques rendus par le sol, il est nécessaire de modifier les comportements.

Le plateau de Valensole, situé dans les Alpes de Haute Provence, et connu pour sa production de lavandin, est touché par une dégradation des sols. En effet, une baisse de leur fertilité ainsi qu'une augmentation de l'érodibilité ont été constatées par les agriculteurs et les experts de la Société du Canal de Provence (J.C. Lacassin, communication personnelle, 29 mars 2019). De plus, certaines zones du plateau sont touchées par le dépérissement du lavandin, conséquence induit par le phytoplasme du Stolbur, véhiculé par une cicadelle. Une démarche a été entreprise afin d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol et l'état sanitaire du lavandin. Celle-ci s'inscrit dans un projet global appelé REGAIN, qui a pour objectif de rendre les agrosystèmes plus durables. Afin de développer des pratiques vertueuses, une analyse des pratiques agricoles et de l'état des sols a été engagée. Une première phase a eu lieu en 2017, et a permis, au travers d'analyses de sols et d'enquêtes, de mettre en exergue la diversité des sols et des pratiques agricoles du plateau, et d'en dégager des typologies ainsi que des tendances quant aux relations entre pratiques et état du sol. Il a été proposé en 2019 de poursuivre cette étude, en effectuant un nouvel état des lieux de la qualité des sols, afin de quantifier une potentielle évolution, et de mettre en parallèle les pratiques associées à cette évolution. L'état sanitaire du lavandin sera également étudié au regard de ces pratiques ainsi qu'en fonction de la qualité du sol. En sus, un travail sur des indicateurs économiques permettra d'appréhender un second aspect de la durabilité des pratiques agricoles.

## I. Etat de l'art et problématique

### I.1. Etat de l'art

Etudier la qualité d'un sol demande de connaître le fonctionnement de celui-ci. Cela nécessite de préciser également ce que l'on entend par qualité du sol ; il s'agit en effet d'une notion peu évidente. De plus, son évaluation est faite à l'aide d'indicateurs qui doivent être préalablement sélectionnés. Afin de comprendre l'origine de ces indicateurs et les choix qui seront opérés, quelques notions du fonctionnement biologique du sol viennent compléter les apports effectués en introduction. Le concept de qualité du sol sera ensuite explicité et amènera à une définition, avant d'aborder le choix des indicateurs de qualité du sol. Cette étude s'intéresse à l'effet des pratiques agricoles sur la qualité du sol. Certains ont déjà été mis en évidence ; les principaux seront énoncés pour conclure cet état de l'art.

#### I.1.a. La faune du sol : un élément indispensable au bon fonctionnement du sol

Le sol est le milieu où l'on observe la plus forte densité d'organismes vivants. Ces organismes sont de taille variable, allant de quelques micromètres à plusieurs centimètres, et occupent des compartiments différents du milieu édaphique, principalement localisés dans les 15 premiers centimètres du sol (Feller *et al.*, 2016). Ils ont également des cycles de vie différents et des rôles spécifiques liés à leur mode de vie et à leur régime alimentaire. Principalement, la faune du sol a une fonction physique en participant à la structuration de celui-ci et à l'amélioration de sa stabilité structurale ; un rôle de décomposition et d'intégration de la matière organique dans le sol (Girard *et al.*, 2017). Les vers de terre, les nématodes et les microorganismes sont les organismes prépondérants de la faune du sol.

#### ❖ Les vers de terre, ingénieurs du sol

Les vers de terre sont connus pour les galeries qu'ils creusent dans le sol. Ils réorganisent la matière du sol, participant ainsi à la bioturbation. Ces galeries favorisent la circulation de l'eau et de l'air dans le sol et donc les échanges avec la solution du sol (mélange d'eau, de minéraux et de matière organique située dans le sol). Cette activité concerne les vers de terre endogées, qui vivent exclusivement dans le sol, et les anéciques, qui creusent des galeries verticales et vivent entre le sol et la surface. Elle est aussi réalisée par d'autres organismes de la macrofaune et mégafaune mais à une échelle moindre. La terre ingérée traverse le tube digestif des vers et ressort sous forme de turricules, structure grumeleuse très stable, condensé de sol et de matière organique minéralisée. Ils travaillent ainsi à la formation d'agrégats et structurent le sol (Girard *et al.*, 2017).

Les vers de terre sont aussi de très bons décomposeurs de la matière organique (MO). Cette dernière est ingérée, fragmentée et minéralisée grâce aux microorganismes présents dans leur tube digestif. Ils aident ainsi à la dégradation de la MO et à son incorporation dans le sol, la mettant à disposition des autres organismes. La présence de vers de terre impacte les organismes vivant en interaction avec eux. En effet, la présence de certaines espèces (*Aporrectodea caliginosa*, ou ver gris, famille des Lumbricidés), entraîne une augmentation de la biomasse racinaire de certains végétaux (Castellanos Suarez *et al.*, 2014). La présence de vers de terre conditionne également la structure des communautés microbiennes présentes

dans le sol (Medina-Sauza *et al.*, 2019). Ils interviennent également dans de nombreux services écosystémiques du sol comme la régulation de l'eau et du climat (Blouin *et al.*, 2013). Ils sont donc des êtres indispensables au bon fonctionnement du sol.

### ❖ Le rôle déterminant de la faune du sol dans les cycles biogéochimiques.

La MO constitue la nourriture de la plupart des organismes vivant dans le sol. C'est ainsi qu'elle est dégradée et, à terme, minéralisée. Cette activité n'est possible que grâce à la diversité de taille des organismes et des régimes alimentaires observables au sein de la faune du sol. Les animaux du sol peuvent être des décomposeurs (microorganismes, champignons), acteurs de la minéralisation, des consommateurs primaires de la matière organique (MO) (collembolles, acariens, vers de terre), ou des consommateurs secondaires qui sont des prédateurs (araignées, mille-pattes). Certains consomment donc de la MO morte et d'autres consomment de la MO vivante, issue des végétaux (ravageurs) ou ingérant des champignons ou bactéries (Feller *et al.*, 2016). Ils participent donc aux cycles biogéochimiques, les acteurs les plus importants étant les microorganismes, indispensables dans le cycle de l'azote (Figure 1). Ils participent à une vingtaine de processus biologiques et biochimiques du sol, parmi lesquels : la nitrification, la dénitrification, la minéralisation des composés organiques (Chaussod, 1996).

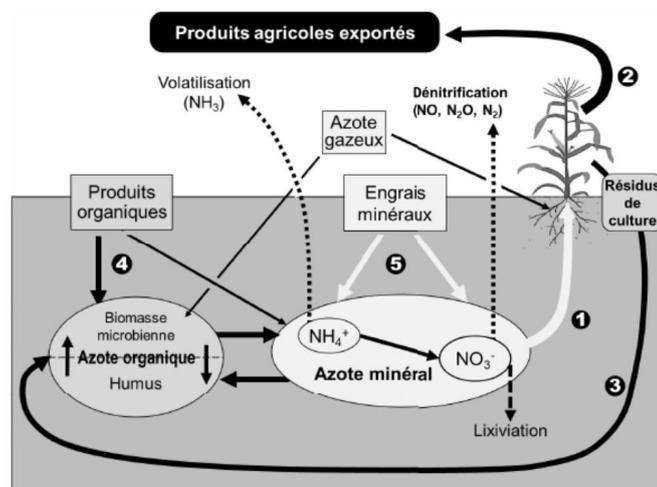


Figure 1 : Cycle biogéochimique simplifié de l'azote en parcelle cultivée (source : Etude des sols (Girard *et al.*, 2017) ; d'après COMIFER, 2011)

Mais les microorganismes jouent aussi un rôle prépondérant dans la structuration du sol. Les mucus qu'ils sécrètent dans le but de dégrader la MO participent à la formation d'agrégats. Ils sont donc eux-aussi des éléments nécessaires au bon fonctionnement du sol.

### ❖ Les nématodes, présents dans toute la chaîne trophique du sol

Les nématodes sont des vers microscopiques très diversifiés (30 000 espèces connues aujourd'hui) présents en quantité importante dans le sol (de 1 à 10 millions par  $m^2$ ) (Feller *et al.*, 2016). Selon les espèces, ils se nourrissent de bactéries (bactérovores), de champignons (fongivores), ou de protozoaires (carnivores) (Figure 2), ce qui en fait des décomposeurs secondaires ((Villenave *et al.*, 2009), d'après (Yeates *et al.*, 1993)). Ils participent ainsi à la

régulation des espèces présentes dans les sols et donc au maintien d'un certain équilibre. Leur présence peut indiquer alors un bon état ou non du sol. Ils peuvent cependant être phytoparasites et donc nuisibles pour les cultures. La présence de certaines espèces est donc synonyme de pression exercée sur les cultures.

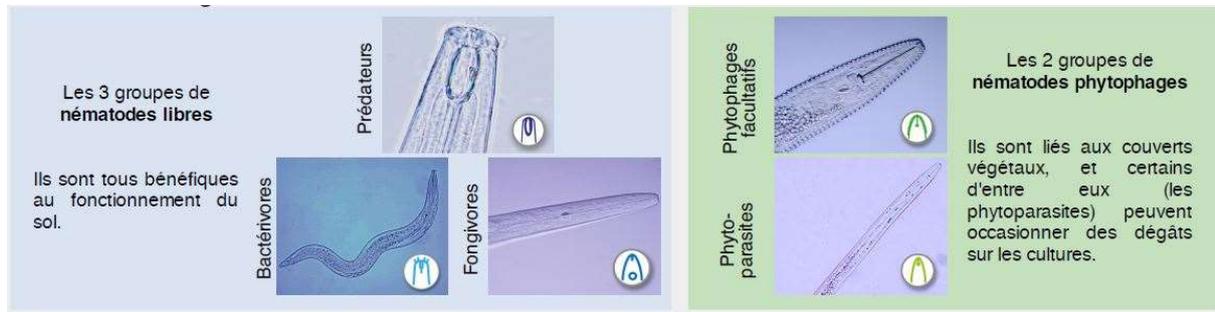


Figure 2 : Les groupes trophiques de nématodes (extrait de rapport fourni par Elisol Environnement).

### I.1.b. La matière organique : place et effets

La matière organique est définie comme étant la matière spécifique des êtres vivants animaux et végétaux. Elle est décrite en 1987 par Mustin comme riche en carbone et constituée à 95 % d'atomes de carbone, hydrogène, oxygène et azote, complétés par du soufre, du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium. Elle est présente dans le sol à hauteur de 5 %, tous types de sol confondus (Feller *et al.*, 2016) et participe au bon fonctionnement du sol. La Figure 3 synthétise ses fonctions dans l'écosystème sol.

La MO est présente dans le sol sous forme vivante, fraîche, ou humifiée. La fraction vivante est constituée de l'ensemble des organismes vivants présents dans le sol. La MO fraîche contient toute matière organique morte mais pas encore décomposée, alors que la MO humifiée a été transformée par voie chimique ou biologique et est sans organisation biologique identifiable à l'œil nu ((Girard *et al.*, 2017) d'après (Thaer, 1809)). La MO constitue la principale source d'énergie de la faune du sol. En fonction des molécules qui la constituent et de sa structuration, celle-ci sera plus ou moins rapidement consommée et minéralisée. Elle est dite stable lorsque son processus de transformation est long (plusieurs années). Cette stabilité est utile afin de restituer progressivement au sol et aux plantes les éléments dont ils ont besoin. Après avoir subi une ou plusieurs transformations, la MO acquiert des propriétés physico-chimiques améliorant le fonctionnement du sol. Les acides fulviques et humiques issus de la dégradation de la MO comportent de nombreuses fonctions acides dissociées qui leur confèrent une capacité d'échange cationique élevée, supérieure aux argiles. Ces structures s'associent également aux argiles, par l'intermédiaire de l'activité biologique, pour former le complexe argilo-humique, entraînant une meilleure stabilité des agrégats (Girard *et al.*, 2017). Enfin, la MO dégradée améliore les propriétés hydrologiques d'un sol. Les charges portées par les acides humiques et fulviques augmentent la capacité de rétention d'eau par capillarité. En s'insérant dans les argiles lors de la phase de rétraction après humectation, la MO fraîche fragmente ces argiles et favorise la circulation de l'eau dans le sol. La présence de MO est donc indispensable à la vie dans le sol et participe à améliorer ses propriétés.

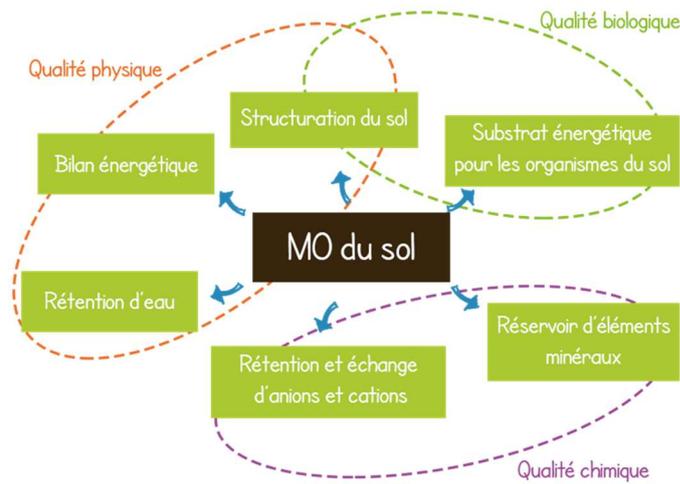


Figure 3 : Rôles de la matière organique dans le sol (source : <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMOS.html>)

### I.1.c. Les services écosystémiques rendus par le sol

Le sol est un écosystème complexe en interaction forte avec son environnement. Sa composition, sa structure et les organismes qu'il contient, lui confèrent des propriétés spécifiques. Il lui est ainsi possible de remplir de nombreuses fonctions. Il est à la fois support de croissance des plantes, des infrastructures humaines, de vie animale, lieu d'échanges avec l'eau et l'air, etc... Toutes ces fonctions sont regroupées sous le nom de services écosystémiques. Il s'agit de biens et de services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être et leur développement (UICN France, 2012). Ils sont classés en quatre catégories par le Millenium Ecosystem Assessment (2005) :

- Les services de support ou de soutien (permettant de construire des infrastructures)
- Les services d'approvisionnement ou de production (alimentation, matériaux de construction, métaux)
- Les services de régulation (du climat et de la qualité de l'eau)
- Les services culturels (préservation du patrimoine historique et culturel)

La FAO (organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation) recense pas moins de 11 fonctions assurées par le sol. Il constitue ainsi une ressource indispensable au bon développement des activités humaines sur Terre.

### I.1.d. La notion de qualité du sol : historique et choix d'une définition

La notion de qualité des sols est vaste et très discutée. De nombreux chercheurs et scientifiques se sont penchés sur la question et ont proposé plusieurs définitions. Cette dernière a évolué avec les connaissances sur le sol, son fonctionnement, et la compréhension de ses relations avec son environnement.

Le premier usage du terme de « qualité des sols » dans la bibliographie remonterait à 1971 par Mausel : la qualité d'un sol est alors « sa capacité à produire du blé, du maïs et du soja sous un haut niveau de gestion » (Bünemann *et al.* 2018). Elle est donc entièrement associée à sa fonction de production, et le restera jusqu'au milieu des années 90. C'est au cours de cette décennie que la définition évoluera le plus, intégrant petit à petit ses autres fonctions. Elle passera ainsi de la simple « capacité à fonctionner » (journal *Agronomy News*, 1995) à la proposition ainsi formulée par Karlen *et al.* en 1997 : la qualité d'un type particulier de sol est sa faculté « à fonctionner dans les limites de ses capacités et de son écosystème naturel ou artificiel, à maintenir une production animale et végétale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air et à soutenir la santé humaine et l'habitation », définition générale et commune aujourd'hui. En effet, le lien entre qualité du sol et qualité de l'alimentation a rapidement été constaté (Karlen *et al.* 1997, d'après Hornick, 1992) tout comme son impact sur la diversité de biotopes qu'il renferme (Karlen *et al.* 1997, d'après Warkentin, 1995). Ses fonctions de maintien de la qualité de l'eau et de l'air sont elles aussi bien connues aujourd'hui.

D'autres définitions existent mais sont proches, associant à la fois les fonctions de productions et de préservation de l'environnement. On pourra retenir celle de Doran et Parkin en 1994 (cité par (Karlen *et al.*, 1997)) : « capacité d'un sol à fonctionner dans son écosystème et dans ses limites d'usage, pour permettre une production biologique, maintenir la qualité environnementale et favoriser la santé des animaux et des végétaux », ou encore celle de Acton et Gregorisch en 1995 (cité par (Karlen *et al.*, 1997)) : « aptitude d'un sol à supporter la croissance de cultures, sans se dégrader, ni nuire à l'environnement ». Ces derniers s'aventurent même à parler de façon similaire de *qualité* et de *santé* du sol. Cette interchangeabilité n'est cependant pas reconnue de tous, mais est employé dans certaines publications.

La qualité d'un sol semble donc liée à sa capacité à fournir de façon satisfaisante les services écosystémiques qu'on lui connaît. Elle s'inscrit également dans une dimension durable. Or, bien qu'une définition générale de la qualité du sol existe, une évaluation pertinente de cette qualité doit être réalisée au regard de la fonction principale du sol considéré, et donc des propriétés qui lui sont attribuées (Karlen *et al.*, 1997, d'après Doran *et al.*, 1996). Dans ce contexte agricole, il est donc possible de retenir la définition suivante de qualité du sol :

Capacité du sol à fonctionner naturellement et à remplir, de façon autonome, ses fonctions productrices (fournir aux plantes l'eau et les minéraux nécessaires à leur croissance), épuratrices et de support de vie.

La notion de fonctionnement naturel sous-entend l'implication de processus naturels tels que l'activité biologique, la décomposition de la matière organique, les échanges avec l'eau et l'air. Les propriétés recherchées seront donc d'ordre physico-chimique et biologique. Il sera nécessaire d'intégrer des éléments de qualité biologique du sol, faisant référence à l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivants qui participent au

fonctionnement du sol (Chaussod, 1996). Sachant désormais à quelle qualité des sols cette étude s'intéresse, il est possible d'aborder la notion d'indicateur de qualité du sol.

#### I.1.e. Les indicateurs de la qualité du sol

Afin d'évaluer la qualité des sols telle que définie précédemment, il est nécessaire d'établir une liste d'indicateurs à étudier. Ces derniers peuvent être nombreux. Leur diversité est présentée ici dans le but de montrer les possibilités qui sont offertes. Ils sont répartis en indicateurs physico-chimiques et biologiques. La notion d'indicateur est également rappelée. Les indicateurs retenus dans le cadre de cette étude seront présentés.

- **La notion d'indicateur :**

Un indicateur est une grandeur mesurable qui fournit des informations sur un phénomène particulier. C'est, selon Trochery (2003), une information synthétique, généralement quantitative, caractérisant un phénomène souvent complexe (cité par Fardeau, 2015). Or, un bon indicateur de qualité des sols doit regrouper certaines caractéristiques. Elles sont rappelées par Chaussod dans sa publication de 1996. Un indicateur doit tout d'abord être **pertinent**, c'est-à-dire être adapté au problème étudié. Il doit également permettre de **rendre compte d'évolutions** dans le temps, et donc **sensible** afin de révéler rapidement cette évolution. Il doit rester **global** afin de permettre de juger de la durabilité de l'agrosystème étudié, mais **robuste** afin de ne pas être affecté par des phénomènes naturels à court terme. Enfin, puisqu'il doit pouvoir être réalisé de façon répétitive et potentiellement de nombreuses fois, un bon indicateur doit être obtenu **à partir de mesures de routines** et si possible de façon peu coûteuse.

- **Les indicateurs physico-chimiques**

Les indicateurs physico-chimiques ont été les premiers indicateurs utilisés pour caractériser la qualité d'un sol. Ils permettent de décrire sa composition, notamment sa texture, et d'évaluer sa capacité à fournir à la plante les éléments qui lui sont nécessaires. En 1991, Larson et Pierce créent une liste de 10 indicateurs physico-chimiques constituant le jeu minimal de données afin d'évaluer la qualité d'un sol. Ces mêmes indicateurs sont proposés par Arshad et Coen en 1992 (Reeves, 1997).

Il s'agit de : **i)** la disponibilité en nutriments, **ii)** la quantité de carbone organique totale **iii)** et labile, **iv)** la texture, **v)** la quantité d'eau disponible pour les plantes, **vi)** la structure du sol, **vii)** la compaction du sol (évaluée à l'aide de la densité volumique et la résistance à la pénétration), **viii)** la profondeur maximale racinaire, **ix)** le pH et **x)** la conductivité électrique.

Ces indicateurs ont largement été utilisés par la suite. Velasquez *et al.* les reprennent en partie en 2007 pour définir un indicateur global de la qualité des sols au Nicaragua. Ils retiennent les mêmes indicateurs physiques, considérant que la qualité physique d'un sol est principalement relative à ses propriétés hydrauliques, son tassement et sa porosité. Ils considèrent également indispensable la quantification de la matière organique pour toutes les fonctions qu'elle a dans les sols. Les auteurs font cependant abstraction de la profondeur maximale racinaire et de la conductivité électrique. Ils intègrent la **concentration en cations** parmi les indicateurs de propriétés chimiques des sols, permettant d'évaluer sa capacité à fournir les minéraux nécessaires aux végétaux. Ainsi, il pourra être utile d'intégrer aux indicateurs physico-chimiques la **capacité d'échange cationique** (CEC). Cette grandeur

indique « la quantité de cations qu'un sol peut retenir dans son complexe adsorbant » (argile + MO) (Baize, 2018). La CEC est d'ailleurs citée comme indicateur par Fardeau dans un article posthume sur les indicateurs de la fertilité des sols. Il y décrit la CEC comme une propriété du sol illustrant sa fonction de garde-manger pour les plantes (Fardeau, 2015). Dans cet écrit, Fardeau répertorie les mêmes indicateurs physiques et chimiques que cités précédemment.

En 2018, Bünneman *et al.* ont analysé de nombreuses études sur la qualité des sols en contexte agricole et ont publié une synthèse des indicateurs utilisés. Il en ressort que, dans plus de 50 % des études, la teneur en MO (matérialisée par le carbone organique C<sub>org</sub>), le pH, le phosphore disponible, la réserve utile et la densité apparente apparaissent dans les indicateurs physico-chimiques ; alors que la texture, le potassium disponible et l'azote total sont utilisés dans plus de 40 %. Certains indicateurs semblent donc incontournables afin d'évaluer la qualité des sols.

Ainsi, dans le cadre de ce travail, les indicateurs physico-chimiques retenus sont les suivants (les abréviations utilisées au cours des analyses sont précisées entre parenthèses) :

- **Le pH (pH)** : décrit l'acidité du sol. C'est un élément important car une acidité trop élevée est néfaste pour les plantes et le développement des microorganismes.
- **La teneur en carbone organique (C<sub>org</sub>)** : exprimée en pourcentage, elle est révélatrice de la teneur en MO du sol et de la quantité de « nourriture » disponible pour les microorganismes.
- **La capacité d'échange cationique (CEC)** : capacité d'échange cationique ; elle est fonction des types d'argiles présentes et de la teneur en MO. Une CEC élevée traduit un échange important de cations et donc des minéraux disponibles pour les plantes.
- **L'azote total (N<sub>tot</sub>)** : cet indicateur donne en réalité la teneur en azote organique qui représente plus de 95% de l'azote présent dans les sols. Cette quantité est liée à la quantité de MO présente dans le sol et va impacter le rapport C/N.
- **La quantité de bases échangeables (potassium : KO ; magnésium : MgO, calcium : CaO)** : ces éléments renseignent sur la disponibilité en minéraux pour les plantes.
- **Le rapport C/N (C<sub>sur\_N</sub>)** : ce rapport donne une bonne indication de la minéralisation. En sol cultivé, un C/N autour de 9 indique une bonne minéralisation et une utilisation possible de l'azote minéral par les plantes, alors qu'un C/N plus élevé (entre 12 et 15) est synonyme d'une minéralisation difficile (Baize, 2018).

La texture et la teneur en calcaire influencent les autres indicateurs, notamment la CEC et le pH. Ils ne sont donc pas retenus comme indicateurs de qualité mais serviront à créer des groupes de sol dont l'impact sur les indicateurs sera étudié.

#### • Les indicateurs biologiques

Les connaissances sur le fonctionnement du sol s'étant rapidement accrues, l'intégration d'indicateurs biologiques dans l'évaluation de la qualité des sols est devenue une nécessité. Doran et Parkin proposent dès 1994 d'élargir la liste des indicateurs de qualité du sol afin d'y intégrer les propriétés biologiques (Reeves, 1997). L'usage d'indicateurs biologiques commence à se développer mais ils sont aujourd'hui encore peu pris en compte dans les analyses de sol (Valé et al., 2011) et peu utilisés pour déterminer la qualité du sol (Bünemann et al. 2018).

La notion de « qualité biologique des sols » est énoncée en 1996 par Chaussod, qui l'associe à l'abondance, l'activité et la diversité des organismes vivant dans le sol. Il est convaincu qu'il s'agit de bons indicateurs afin d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur le sol, principalement en contexte agricole, et qu'ils peuvent servir d'appui dans le choix des pratiques agricoles. Il propose d'utiliser comme indicateurs **l'abondance de vers de terre**, pour leurs rôles dans la structuration du sol et la dégradation de la matière organique, **l'activité enzymatique** microbienne, la **biomasse microbienne**, mais aussi de caractériser **la structure des populations microbiennes** informant sur leur abondance et leur diversité fonctionnelle.

Depuis, des études se sont penchées sur les indicateurs biologiques afin d'en évaluer la pertinence ((Valé *et al.*, 2011), (Bouthier *et al.*, 2015), (Cluzeau *et al.*, 2012)). En complément des indicateurs proposés par Chaussod, d'autres indicateurs ont été testés comme le **fractionnement de la matière organique** (distinction entre MO labile et stable), le **potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote**, ou encore **les métabolites microbiens** qui aident à la caractérisation de l'activité et de l'abondance microbienne. Fardeau, en 2015, cite également la respiration microbienne parmi les indicateurs de fertilité des sols permettant de quantifier l'abondance des microorganismes.

Des travaux s'intéressent également aux populations de nématodes comme indicateurs biologiques de qualité du sol. En effet, la structure des communautés nématofauniques apporte des informations cruciales sur l'état biologique du sol. Elle renseigne sur l'intensité de certains processus comme la décomposition de la MO et la minéralisation ; la structure du réseau trophique non nématologique ; l'état de stabilité du système grâce à la longueur de la micro-chaîne trophique ; et la biodiversité du sol (Villenave *et al.*, 2009). L'abondance de nématodes bactérivores et fongivores donne des informations sur les compartiments bactérien et fongique du sol, alors que les prédateurs (omnivores et carnivores), sensibles aux perturbations physiques et chimiques du sol, renseignent sur la stabilité du milieu et le niveau de perturbation (Villenave *et al.*, 2018). De plus, il est possible de calculer des indices à partir de l'identification et du comptage des nématodes, comme l'**indice d'enrichissement** (EI) et l'**indice de stabilité** (SI) (Balloy *et al.*, 2017). L'indice d'enrichissement, calculé à partir de l'abondance relative de la faune d'enrichissement (bactérivores et fongivores au cycle de vie court), informe sur l'activité des décomposeurs primaires (microorganismes et champignons). L'indice de stabilité renseigne quant à lui sur la stabilité biologique du milieu. Il est également possible de calculer un **indice des voies de décomposition** de la MO (IVD) à partir de l'abondance des nématodes bactérivores et fongivores. Il renseigne sur l'importance de la voie bactérienne dans la décomposition de la MO. Enfin, **l'empreinte métabolique** de la communauté de nématodes est calculée (indice COMFOOT) et renseigne sur l'activité biologique de la population de nématodes (Villenave *et al.*, 2018).

Les indicateurs biologiques utilisés dans le cadre de cette étude sont (les abréviations utilisées au cours des analyses sont précisées entre parenthèses) :

- **La biomasse microbienne (BM)** : cet indicateur permet d'évaluer l'abondance des microorganismes dans le sol. De plus, il est reconnu pour caractériser des situations différentes d'utilisation et de travail du sol, et donc pertinent afin de discriminer les pratiques agricoles (Cluzeau *et al.*, 2012). La méthode, appelée fumigation-extraction, est normalisée.

- **Le rapport BM/Corg (BM\_Corg)** : cet indicateur donne la proportion de carbone organique que représente la biomasse microbienne. Il informe sur la qualité nutritionnelle de la MO et sa capacité à produire de la biomasse microbienne. Ce rapport est sensible aux perturbations (Valé *et al.*, 2011). Il est donc pertinent à utiliser pour discriminer les pratiques agricoles.
- **Le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote (Pot\_min\_C et Pot\_min\_N)** : ces indicateurs donnent à la fois une information sur l'activité microbienne et sur la capacité de la MO à se dégrader. Des potentiels de minéralisation élevés sont synonymes d'une bonne activité microbienne et de la présence de MO facilement dégradables. Ils permettent aussi d'estimer les fournitures annuelles en azote minéral (Baize, 2018). La méthode de mesure est normalisée. Les potentiels de minéralisation exprimés en pourcentage de carbone et d'azote organiques seront également utilisés (**Pot\_min\_Corg** et **Pot\_min\_Norg**), qui donnent une idée de la vitesse de minéralisation par rapport au stock de matière disponible.
- **La nématofaune** : pour les raisons évoquées précédemment, la structure de la communauté de ces organismes (l'abondance des groupes trophiques : **Bacterivores, Fongivores, Prédateurs, Libres, Phytoparasites, Phytophages, Abondance\_tot** ; et leur proportion : **Bact\_p, Fongi\_p, Preda\_p, Libres\_p, Phytopara\_p, Phytophages\_p**) et les indices qui en découlent (**EI, SI, IVD, COMFOOT**) semblent très utiles afin de caractériser l'impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol. L'indice de diversité de Shannon (nom de variable **Shannon**) sera utilisé également.
- **Le fractionnement de la MO (Molibre\_p, Moliee\_p)** : cette méthode permet de distinguer la quantité de MO de taille inférieure ou supérieure à 50 µm et fournit donc respectivement la quantité de MO stable ou liée (humifiée), et de MO labile ou libre (qui sera rapidement minéralisée) (Balloy *et al.* 2017).

Il est important d'insister sur le fait que ces indicateurs permettent de décrire l'état biologique d'un sol, sans pour autant permettre de qualifier sa qualité. En effet, la comparaison à des valeurs de référence est nécessaire pour cela, éléments encore trop peu développés à ce jour. Ces valeurs de référence doivent être issues du même contexte agropédoclimatique que les valeurs à comparer. Un travail conséquent est donc à prévoir afin d'obtenir des références pour l'ensemble de ces contextes (Valé *et al.*, 2011).

#### 1.1.f. Impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol

De nombreuses études ont d'ores et déjà révélé l'impact de certaines pratiques agricoles sur la qualité du sol. En particulier, le travail du sol et la fertilisation influent fortement sur la qualité biologique du sol. Quelques résultats sont présentés ci-après.

Le travail du sol tend à réduire la biomasse lombricienne présente dans le sol ((Bouthier, *et al.*, 2016), (Balesdent *et al.*, 2015), (Karlen *et al.*, 1994)). Chabert a montré que l'abondance et la biomasse de vers de terre était favorisée en semis-direct par rapport au labour. Cependant, le travail profond du sol (labour sous-entendu) n'impacterait pas ni l'activité microbienne ni l'abondance microbienne par rapport à un travail superficiel. Cela

jouerait essentiellement sur la répartition de la biomasse microbienne sur la profondeur du sol, celle-ci suivant la répartition de la matière organique (Bouthier *et al.*, 2016). L'absence prolongée de travail du sol (12 ans) semble favoriser une biomasse microbienne plus importante (Karlen *et al.*, 1994). Les populations de nématodes seraient quant à elles perturbées par le travail du sol. Villenave *et al.* ont montré en 2009 que l'absence de travail du sol provoquait une augmentation de la densité de nématodes dans le sol. La nématofaune alors observée est plus complexe qu'en système avec travail du sol. Le travail superficiel du sol (entre 0 et 10 cm) semble suffisant pour améliorer la plupart des indicateurs biologiques d'un sol (hors fractionnement de la MO) d'après Valé *et al.* (2011).

Le type de fertilisation est un facteur prépondérant de la qualité du sol. Le simple fait de fertiliser, de façon minérale ou organique, est favorable à une plus forte densité et à une diversité plus élevée de nématodes dans le sol (Villenave *et al.*, 2009). L'apport de produits résiduels organiques provoque une augmentation de la quantité de carbone et d'azote dans le sol, ainsi qu'une augmentation de la biomasse microbienne (Valé *et al.*, 2011). Les propriétés d'un sol ayant reçu des apports répétés d'un coproduit lignocellulosique de fabrication d'un biocarburant ont été comparées à celle d'un sol sans apport. Les propriétés du sol ayant reçu les apports de matières organiques se sont révélées meilleures. Ont notamment été observées une augmentation de 20 % de la CEC, une meilleure rétention d'eau de l'ordre de 15 %, une augmentation de 7 % de la quantité d'azote total disponible, et de 69 % du carbone organique (Laird *et al.*, 2010).

D'autres conséquences ont été observées, sur la structure du sol par exemple. Une étude de la structure du sol en parcelle de lavandin, réalisée par l'école de Montpellier Sup Agro, montre que le binage et le tassement limitent le développement racinaire du lavandin : en moyenne, la largeur de développement des racines est inférieure en parcelle tassée ou binée par rapport à une parcelle non tassée ou non binée (Montpellier SupAgro, 2013). Alors que certaines pratiques tendent à dégrader la qualité du sol, d'autres semblent l'améliorer, et peuvent compenser les pratiques défavorables (Bouthier *et al.*, 2016). Le choix de pratiques vertueuses peut donc aider à améliorer la qualité d'un sol.

## 1.2. Contexte

### 1.2.a. La structure d'accueil : Le Parc naturel régional du Verdon

Le Parc naturel régional du Verdon est un syndicat mixte constitué par les 46 communes adhérentes à la charte, les conseils départementaux des Alpes-de-Haute-Provence et du Var et le conseil régional Provence Alpes Côte d'Azur. La structure a obtenu le statut de Parc naturel régional en 1997. La charte actuelle a été rédigée en 2008 et court jusqu'en 2023. Le parc fonctionne comme une collectivité locale. Les grandes décisions (budget, orientations, création de poste) sont prises lors des réunions syndicales au cours desquelles les représentants des différentes collectivités se réunissent. La structure fonctionne grâce aux cotisations des collectivités adhérentes et de l'Etat, complétées par des subventions.

Le territoire du parc, étendu sur une superficie de 180 000 ha, est structuré autour de la rivière du Verdon qui le parcourt d'Est en Ouest (Figure 4). Le parc est constitué de 7 entités paysagères dont le plateau de Valensole. Il renferme une diversité de milieux, et constitue un

réserve de biodiversité puisqu'y sont recensées un tiers des espèces végétales référencées sur le territoire métropolitain et de nombreuses espèces animales d'intérêt comme l'Outarde Canepetière, le Vautour fauve et le Lézard ocellé.

Le Parc naturel régional du Verdon a pour mission de préserver les milieux et la biodiversité ainsi que le patrimoine culturel du territoire, mais aussi d'éduquer et sensibiliser sur ces thématiques. Il est ainsi constitué de cinq commissions : patrimoine naturel et forêt, eau et milieux aquatiques, développement économique, sites, et paysages et aménagement du territoire, diffusion des connaissances et participation des acteurs. Ses agents interviennent dans l'animation de projets de développement, de préservation et de mise en valeur du patrimoine naturel et culturel, et ce, en collaboration avec les acteurs du territoire.

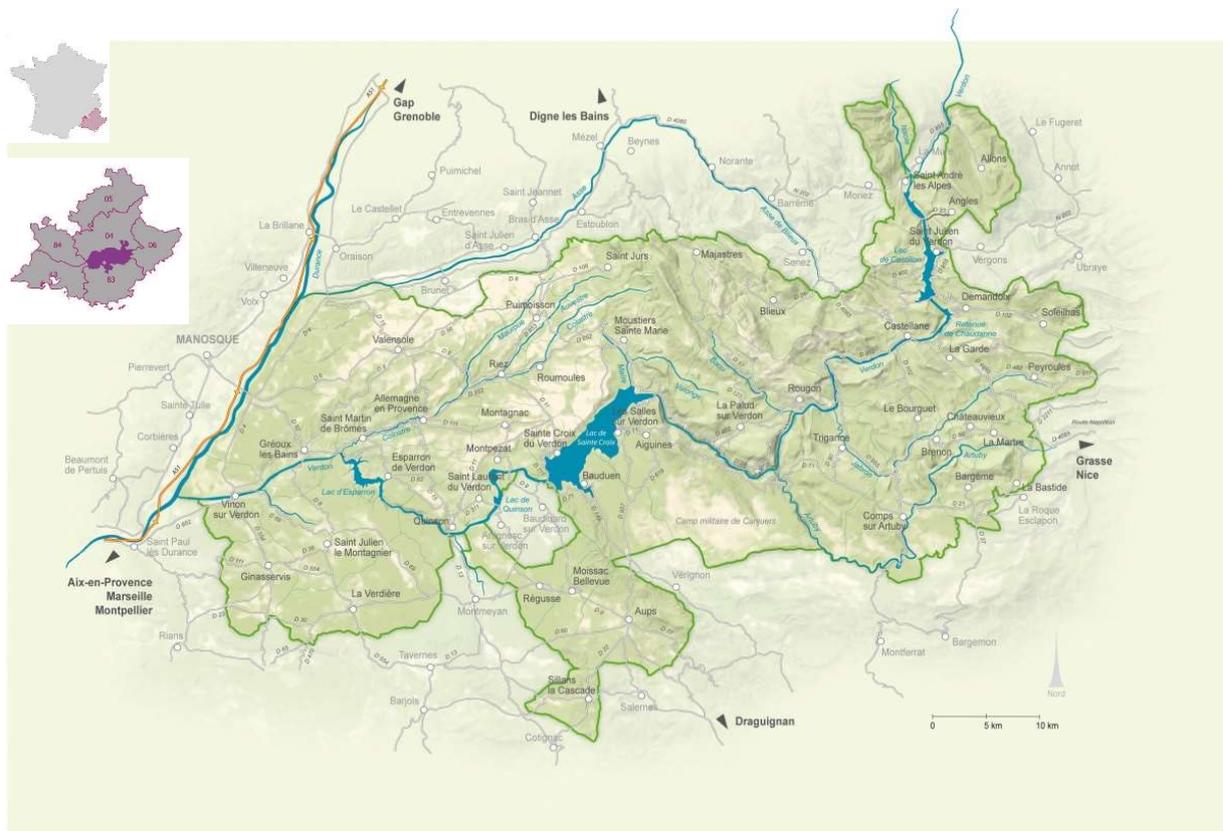


Figure 4 : Territoire du Parc naturel régional du Verdon

### 1.2.b. Le sujet d'étude

Le plateau de Valensole est situé dans le sud du département des Alpes de Hautes Provence, premier département producteur de plantes à parfum, aromatiques et médicinales (Agréste, 2018). Le plateau constitue l'un des sept paysages du Parc naturel régional du Verdon. C'est un territoire dynamique, mu par une forte activité touristique grâce à la proximité des gorges du Verdon. C'est également un paysage modelé par les activités agricoles qui occupent 55 % de sa surface.

Comme ailleurs en France, le plateau a connu une forte évolution de l'agriculture après-guerre. Entre 1950 et aujourd'hui, les petites exploitations de polyculture-élevage, associant cultures de céréales et amanderaies sur le plateau, complétées par de l'élevage ovin sur les secteurs en pente, ont laissé place à des exploitations plus grandes (124 ha en moyenne

d'après le recensement agricole de 2010 (Parc naturel régional du Verdon, 2010)) alternant principalement blé dur et lavandin sur les surfaces planes du plateau. (Bornand and Rosso, 2015).

Ces évolutions n'ont cependant pas été sans conséquence sur l'environnement, en participant notamment à la dégradation de la qualité des eaux : les sols laissés nus en hiver favorisent l'érosion des sols et limitent leur pouvoir filtrant ; la production de blé dur requiert le recours aux engrais minéraux et aux produits phytopharmaceutiques en partie transférés dans les eaux souterraines. En effet, en 2007, la concentration cumulée en produits phytopharmaceutiques (substance active 2,6-dichlorobenzamide ou BAM) était supérieure à 1,5 µg/l dans deux masses d'eau souterraines du plateau de Valensole (mesure effectuée en 2006 à Saint-Jurs et en 2007 à Saint-Julien d'Asse) (Ministère en charge de l'écologie & Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2007). La quantité de nitrates est également parfois élevée dans les eaux souterraines. La source Fontaine Blanche à Valensole était ainsi classée en médiocre pour les nitrates en 2017 (Agence de l'eau RMC, 2018). En 2014, des analyses effectuées dans le cadre du projet COMETE (Contribution à la COMpréhension des MEcanismes de TransfErt des produits phytosanitaires au sein des entités hydrogéologiques du plateau de Valensole) sur des eaux de surface et souterraines ont révélé notamment une fréquence de détection importante du 2,6-dichlorobenzamide sur le plateau à une concentration maximale de 1,43 µg/l (Rivet, Arnal, and Lacassin, 2015). Par ailleurs, les conséquences de l'érosion sont observables sur les parcelles possédant une déclivité (Figure 5) alors que l'aléa érosif (probabilité qu'une érosion se produise) dans cette partie du département évolue de très faible à moyen. Cet aléa a été déterminé par le Gis Sol en fonction des caractéristiques du sol, du terrain (occupation du sol et pente) et des conditions climatiques (Gis Sol, INRA, and Service de l'observatoire et des statistiques, 2011). Une étude de la structure du sol en culture de lavandin sur le plateau de Valensole, menée en 2013 par des élèves de Montpellier Supagro, a révélé un tassement important causé par le passage répété des engins, et la pratique du décompactage et du labour, parfois à l'origine d'une semelle très compacte (Montpellier SupAgro, 2013).

En outre, la culture du lavandin est de plus en plus touchée par le dépérissement, surtout dans le secteur Nord-Ouest du plateau. L'agent en cause dans cette maladie est le phytoplasme du Stolbur (*Candidatus Phytoplasma solani*), véhiculé par la cicadelle *Hyalesthes obsoletus* (Yvin *et al.* 2017). Les premiers signes ont été observés dans les années 60, obligeant les agriculteurs à réduire drastiquement la durée de vie des plantations, la moyenne de la variété de lavandin Abrial passant de 10-15 ans à 2-3 ans. L'arrivée de la variété Grosso en 1972, plus productive et résistante, a permis de relancer la production en quelques années (CNEARC 1991). Cependant, cette variété est elle-aussi victime du dépérissement aujourd'hui (Yvin *et al.* 2017).

Afin d'améliorer cette situation, et dans le but de rendre les agrosystèmes plus durables, le projet REGAIN, porté par le Parc naturel régional du Verdon, la société du Canal de Provence (SCP), la Chambre d'Agriculture des Alpes de Haute-Provence et la chaire d'entreprises AGROSYS de Montpellier, a été créé en 2014. Il regroupe les thématiques de travail suivantes : la fertilisation des céréales à paille ; les plantes à parfum, aromatiques et médicinales ; la diversification des productions ; l'irrigation ; la relation entre agriculture, paysage et biodiversité ; et la qualité des sols. Cette dernière a donc pour objectif d'évaluer la qualité des sols du plateau et de la mettre en relation avec les pratiques agricoles et l'état

sanitaire du lavandin. Ce sujet a fait l'objet d'une première étude, menée en 2017 par un ingénieur agronome stagiaire sur un réseau de parcelles mises à disposition par des agriculteurs volontaires, appelé réseau Sol. À cette occasion, un état des lieux de la qualité des sols sur le plateau de Valensole en culture de lavandin a été réalisé.



*Figure 5 : Marques d'érosion observées sur une parcelle de lavandin sur le Plateau de Valensole, secteur nord de Valensole. Photo personnelle. Les zones claires sur les points hauts sont révélatrices d'une perte de matière qui se retrouve en contre-bas (couleur rouge à brun)*

La relation entre ces types de sols et les indicateurs chimiques et biologiques de qualité du sol a été étudiée. Les indicateurs variant le plus d'un type de sol à l'autre sont : la capacité d'échange cationique (CEC), le potassium échangeable, le carbone organique ( $C_{org}$ ), le rapport C/N pour les indicateurs chimiques et le rapport biomasse microbienne sur  $C_{org}$  ( $BM/C_{org}$ ), l'abondance de nématodes bactéricivores et l'indice d'enrichissement des nématodes pour les indicateurs biologiques. L'impact du type de sol semble cependant peu important sur les indicateurs devant l'impact des pratiques culturales.

L'analyse des pratiques a mis en évidence les relations suivantes : i) les parcelles ayant supporté des précédents à dominance de blé, avec labour quasi-annuel et sur lesquelles un désherbage chimique et mécanique a été effectué après plantation du lavandin possédaient des indicateurs de qualité du sol dégradés : faible quantité de MO, faible activité biologique et quantité d'azote minéral fournie limitée ; ii) les parcelles n'ayant pas connu de rotation (avec précédent lavandin) avaient elles aussi des indicateurs de qualité faibles ; iii) au contraire, les parcelles conduites en agriculture biologique, avec culture fourragère comme précédent cultural et absence de désherbage après plantation du lavandin avaient une biomasse microbienne supérieure à tous les autres groupes.

La mise en relation des pratiques agricoles et de la qualité du sol avec l'état sanitaire du lavandin devait être abordée lors de ce premier stage. Or, les cultures étant des plantiers, le taux de reprise des plants était très élevé pour l'ensemble des parcelles (de l'ordre de 95%). Aucune analyse n'a donc été entreprise dans ce sens en 2017. Des mesures de dépérissement ont cependant été effectuées en 2018 et 2019 et révèlent une hétérogénéité inter-parcellaire. Une mise en regard de l'état sanitaire avec les pratiques agricoles était donc envisageable cette année.

### 1.3. Objectifs et hypothèses

Au cours du stage, de nouvelles analyses de sols ont été effectuées sur les parcelles du réseau Sol. Ces analyses sont les mêmes que celles réalisées en 2017. Les échantillons ont été prélevés sur les mêmes zones, et sept nouvelles parcelles ont été ajoutées au réseau. Les résultats de ces analyses permettront d'étudier de nouveau le lien entre les types de sols et les pratiques sur les indicateurs de qualité du sol. Ces indicateurs pourront ensuite être comparés entre 2017 et 2019 afin de voir si certains montrent une évolution significative en deux ans. Si tel est le cas, le lien avec des pratiques agricoles particulières sera envisagé. Enfin, la relation des pratiques agricoles et de la qualité du sol avec l'état sanitaire du lavandin sera également étudiée. Les différents niveaux d'analyse sont repris dans la Figure 6. Ainsi les hypothèses proposées et à vérifier au cours de cette étude sont les suivantes :

- **Hypothèse 1 :** Le type de sol et les pratiques agricoles influent sur la qualité du sol
- **Hypothèse 2 :** Le type de sol et les pratiques agricoles impactent l'évolution des indicateurs de qualité du sol
- **Hypothèse 3 :** La qualité du sol et les pratiques agricoles ont un impact sur le taux de dépérissement du lavandin.

En complément à ces questions, une étude économique a été menée. Cette dimension conditionne bien souvent les choix des agriculteurs. Le projet REGAIN ayant pour objectif d'orienter les exploitations vers de meilleures pratiques, il est intéressant de la prendre en compte dans cette étude. Cette phase consistera en l'évaluation des coûts et des produits de la production du lavandin pour chaque parcelle en fonction des pratiques agricoles et découlera sur des indicateurs économiques. Les pratiques agricoles pourront être comparées selon ces indicateurs afin de mettre en évidence celles qui sont le plus rentables.

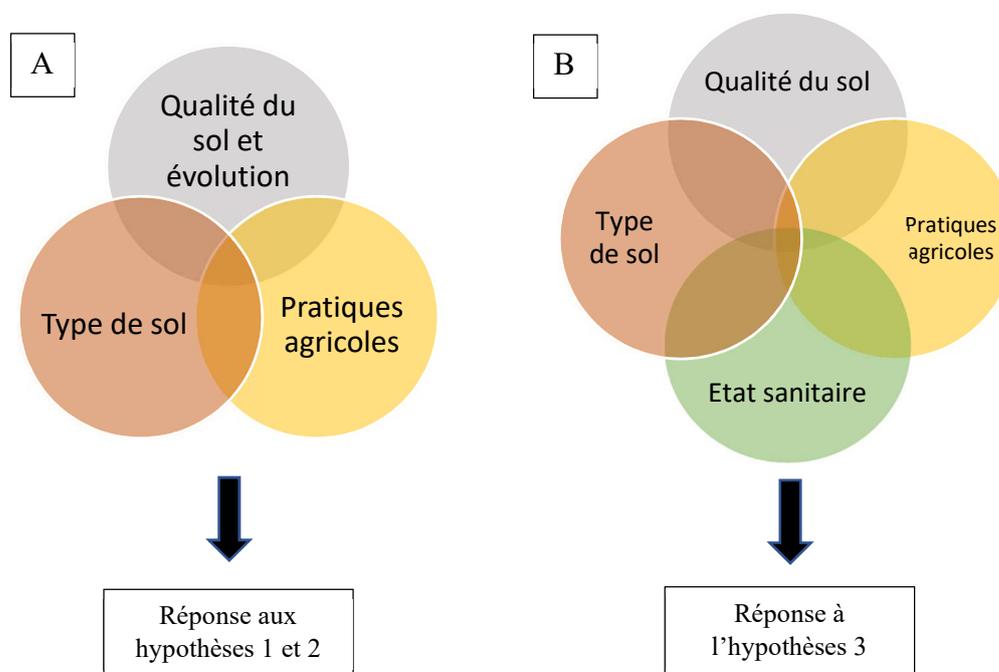


Figure 6 : Schématisation des différentes analyses afin de répondre aux hypothèses proposées. La qualité du sol et son évolution seront étudiées en fonction des pratiques agricoles et du type de sol (A), puis l'état sanitaire sera analysé au regard du type de sol, des pratiques et de la qualité du sol (B).

## II. Matériels et méthodes :

### II.1. Présentation de la zone d'étude : le Plateau de Valensole

#### **Géographie, géologie et pédologie**

Le plateau de Valensole est situé au sud du département des Alpes de Haute-Provence. Il constitue l'un des paysages dominants du Parc naturel régional du Verdon. Il est naturellement délimité par la vallée de l'Asse au Nord, une zone de relief à l'Est, le lac de Sainte-Croix au Sud et la Durance à l'Ouest (Figure 8 page 19). Il s'étend sur une superficie de 34 600 ha environ et est compris entre 360 et 820 m d'altitude. Celle-ci décroît de façon régulière de l'Est vers l'Ouest (DREAL 2014). Il est constitué de surfaces planes (35 %) formant le plateau à proprement parler, de zones de bord de plateau (25 %) et des surfaces de pentes fortes (40 %) (Bornand and Dosso 2015).

Ce plateau résulte du comblement d'un fossé apparu lors de la formation des massifs alpins et préalpins au Miocène (-35 Ma). Le comblement a eu lieu en deux temps : par des matériaux cristallins et d'origine alpine il y a 10 Ma suite à une inversion des mouvements de terrain qui a provoqué une invasion marine ; puis par l'accumulation de matériaux calcaires il y a 5 Ma, conséquence de la déformation et de l'altération des marges subalpines à l'Est. Le plateau de Valensole ne représente que la partie sud de ce bassin. Il sera ensuite de nouveau creusé par des affluents de la Durance (Bornand and Dosso 2015). La répartition des différents matériaux du bassin, la constitution des roches typiques du Plateau et une coupe Ouest-Est montrant le pendage des couches sont présentées en annexe 1.

On y trouve des sols différents selon la pente (Figure 7). Les secteurs plats se démarquent par des sols de couleur rouge peu calcaires, à texture fine argilo-sableuse, et assez profonds (80 à 100 cm). Les zones de cailloux y sont irrégulières. Les zones de bordure de plateau ont des sols moins profonds (40 à 80 cm) mais davantage calcaires, de couleur brun-jaunâtre. La teneur en cailloux y est toujours irrégulière et la terre est fine, de texture moyenne (limon sablo-argileux). Enfin, les sols de pente forment une unité complexe constituée principalement de trois termes : i) en haut de la pente, assemblage d'un sol d'érosion sur marnes affleurantes (argile limoneuse calcaire) et d'un sol colluvial calcaire sur colluvions marno-caillouteuses peu à moyennement profond (sable argileux) ; ii) en milieu de pente, un sol colluvial calcaire à charge en cailloux irrégulière et une texture limono-sablo-argileuse sur marne ; iii) en bas de pente, un sol d'érosion peu épais ou des poudingues affleurants (Bornand and Dosso 2015).

#### **Climat**

Le plateau de Valensole, comme l'ensemble de la région, est soumis au climat méditerranéen. Celui-ci est caractérisé par des hivers rudes et des étés chauds. Les précipitations sont essentiellement concentrées à l'automne et au printemps, et sur un nombre de jours annuel relativement faible (70) (de Beauregard, 2008). Elles peuvent aussi avoir lieu sous forme d'orages qui apportent des quantités importantes d'eau non assimilable par les plantes. La moyenne annuelle oscille autour de 700 mm (Bornand et al., 2012). La région est également soumise à un taux d'ensoleillement important (2 700 h par an) et la température annuelle moyenne est comprise entre 10 et 12°C (Météo France).

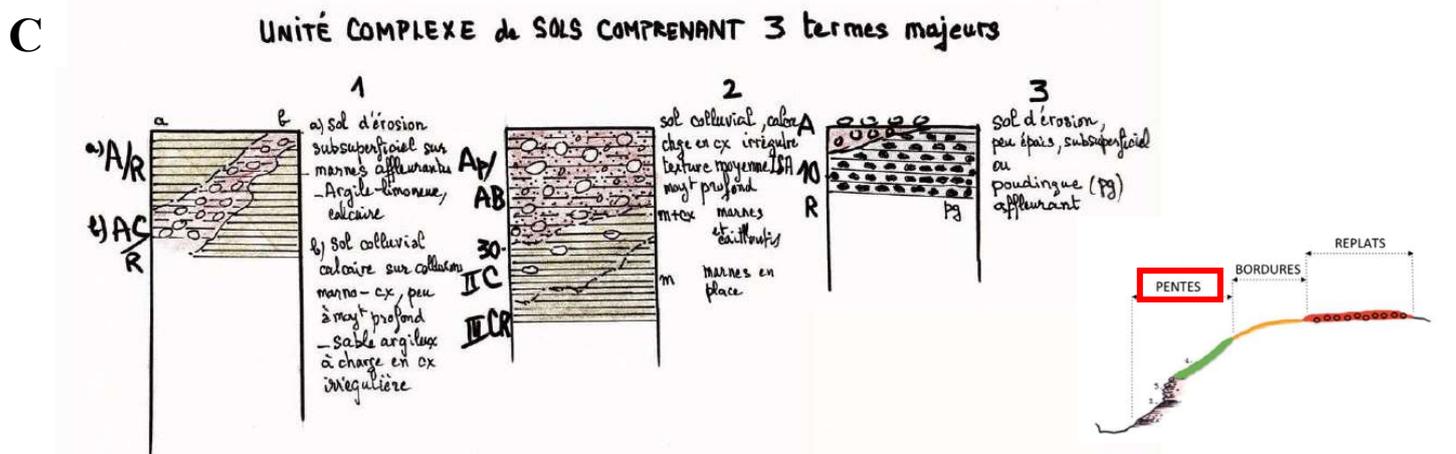
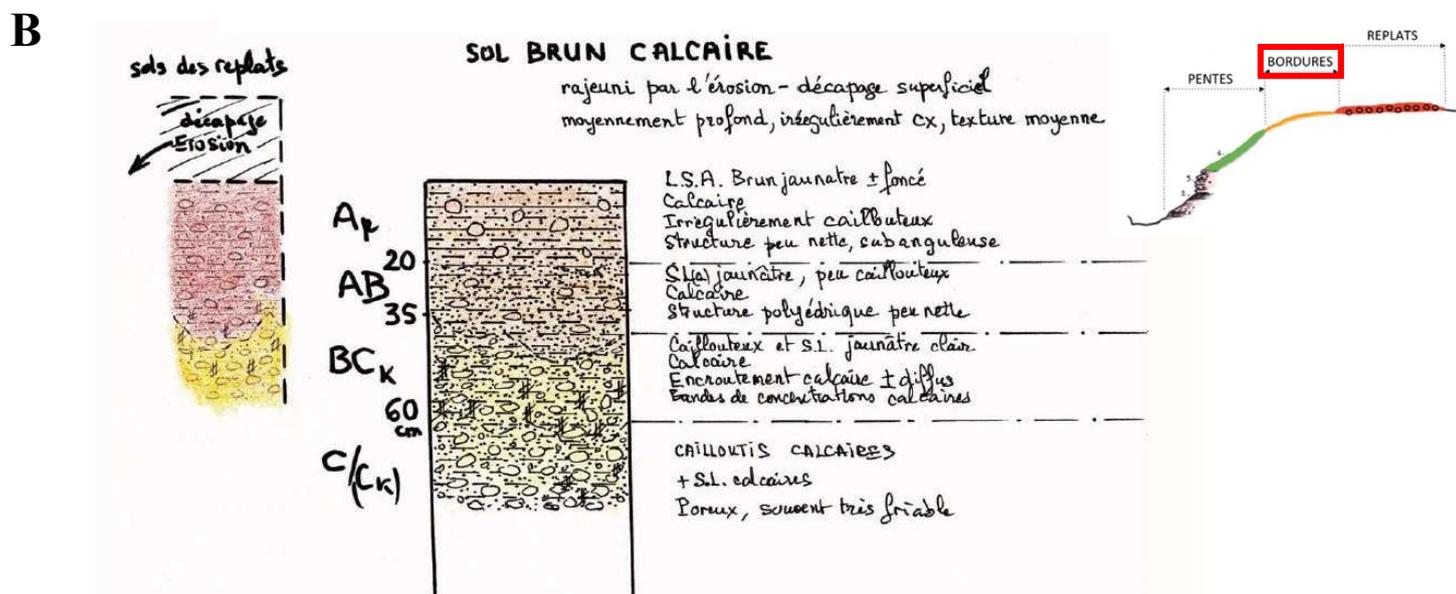
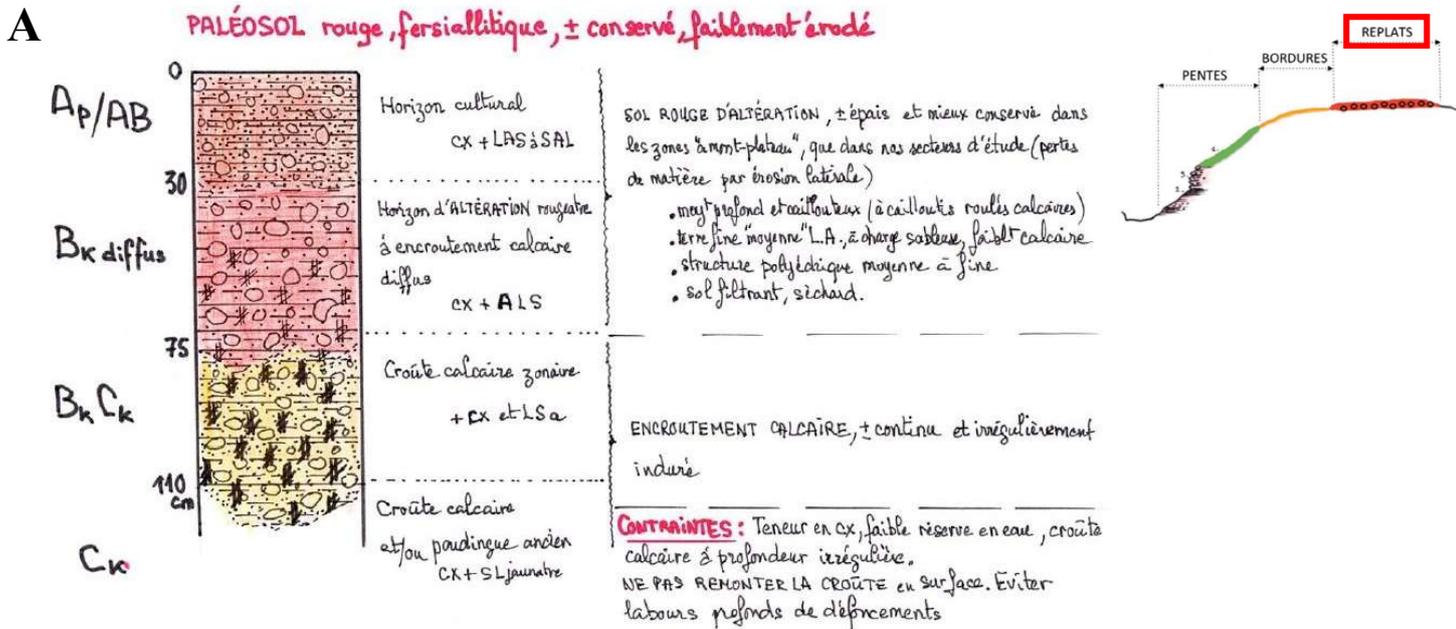


Figure 7 : Coupes des sols observables sur le plateau de Valensole (extrait de Bornand et al. 2012) et localisation : A) sol typique du plateau de Valensole présent sur les replats et zones tabulaires. B) Sol brun calcaire de bordure de plateau. C) Sols des pentes du Plateau de Valensole : 1) sol situé en haut de pente, 2) sol observable en milieu de pente, 3) sol de bas de pente.

## II.2. Présentation du réseau Sol :

Suite à une réunion d'information sur le projet REGAIN et la mise en place du réseau Sol en 2017, 22 agriculteurs se sont portés volontaires pour participer à l'étude afin de mieux comprendre le fonctionnement de leur sol et l'impact sur la qualité de leur culture. Ces agriculteurs ont alors mis à disposition 23 parcelles de lavandin sur lesquelles ont été effectués les prélèvements, pour un total de 34 zones d'échantillonnage. La répartition des zones de prélèvements est la suivante :

- 13 parcelles avec 1 zone d'échantillonnage
- 9 parcelles avec 2 zones d'échantillonnage
- 1 parcelle avec 3 zones d'échantillonnage

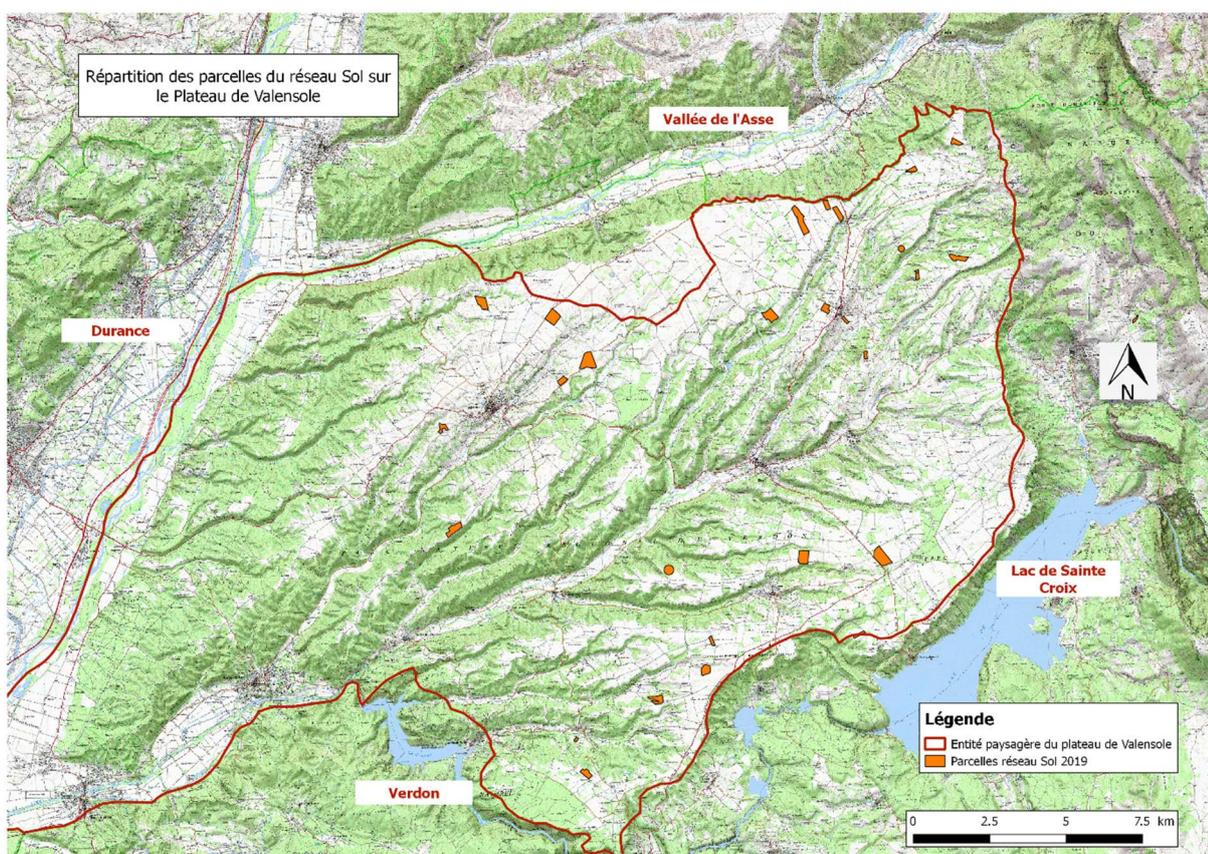


Figure 8 : Délimitation du plateau de Valensole et localisation des parcelles du Réseau Sol

Parmi les parcelles du réseau Sol, quatre sont dites « parcelles expérimentales » car elles comportent une zone d'essai et une zone témoin au sein même de la parcelle. Trois parcelles ont fait l'objet d'un semi de couvert végétal inter-rang. Chaque zone enherbée sera comparée à une zone témoin située dans la parcelle. Une parcelle a fait l'objet d'un épandage de compost de pailles de lavandin. Cette zone sera comparée à une zone témoin située dans la parcelle.

Suite à des formations, le réseau compte aujourd'hui 27 agriculteurs et 38 zones de prélèvement. Toutes sont situées sur le plateau de Valensole et sont en culture de lavandin 2<sup>e</sup> coupe, principalement de variété Grosso. Deux parcelles sont des plantiers de l'année 2019

(année de plantation du lavandin). Le réseau de parcelle est présenté dans la Figure 8. Les agriculteurs du réseau n'ont pas tous les mêmes pratiques agricoles. En effet, cinq sont en bio et 22 en conventionnel. Parmi ces derniers, les pratiques diffèrent également par la fréquence des labours et les rotations avant la culture du lavandin, ou encore sur les traitements phytosanitaires et les apports minéraux et organiques depuis la plantation du lavandin.

### II.3. Les méthodes appliquées sur le terrain :

L'objectif étant de comparer des éléments de 2017 et de 2019, il était nécessaire de conserver les méthodes retenues en 2017 concernant les prélèvements de sol et la mesure du taux de dépérissement du lavandin.

#### II.3.a. Prélèvement des échantillons de sol

Lors de la première campagne de mesures, il a été choisi d'effectuer les prélèvements de sol à la fois sur le rang et l'inter-rang afin d'avoir une représentativité moyenne de la qualité du sol, l'objectif étant de caractériser la parcelle entière. Trois cas de figures se présentaient : i) parcelles sans enherbement ; ii) parcelles avec enherbement étroit ; iii) parcelles avec enherbement large. Selon le cas, les modalités de prélèvement étaient différentes (Figure 9). Les zones d'échantillonnage avaient été enregistrées en 2017 et ont été retrouvées grâce à une tablette munie d'une antenne GPS d'une précision d'un à deux mètres. Les prélèvements ont été effectués à la tarière, entre 0 et 20 cm pour Auréa et Célesta-Lab, et entre 0 et 15 cm pour ELISOL (Chignier, 2017). Ils ont eu lieu entre le 27 mars et le 8 avril 2019.

#### II.3.b. Envoi des échantillons en laboratoire

Trois laboratoires ont été retenus pour effectuer les différentes analyses. Le laboratoire Auréa était en charge de la partie physico-chimie ; l'activité biologique a été analysée par le laboratoire Celesta-Lab ; le laboratoire ELISOL était en charge de l'identification et du comptage des nématodes présents dans les échantillons. Les échantillons ont été stockés à des températures variables (4-5°C pour les échantillons Celesta-Lab ; 7-8°C pour les échantillons ELISOL et à température ambiante pour les échantillons Auréa) et envoyés au fur et à mesure aux différents laboratoires. Les envois ont été réalisés les lundi 1<sup>er</sup>, mercredi 3 et mardi 9 avril 2019.

#### II.3.c. Enquête sur les pratiques agricoles

Afin de pouvoir effectuer la phase d'analyse statistique, il était nécessaire de compléter les pratiques agricoles effectuées sur les différentes parcelles entre 2017 et la période d'échantillonnage de 2019. Pour ce faire, le questionnaire de 2017 a été mis à jour et adapté en fonction des situations. Pour les agriculteurs ayant déjà été interrogés en 2017, il s'agissait principalement de noter les différentes interventions sur la parcelle depuis 2017 (binage, désherbage, fertilisation...), alors qu'il était nécessaire de reprendre l'historique et les pratiques des années antérieures pour les agriculteurs intégrant le réseau cette année.

Le projet REGAIN ayant pour objectif d'orienter les exploitations vers des systèmes plus durables, la dimension économique est utile à étudier. Des questions orientées sur les

coûts de production et le temps de travail complètent ainsi le questionnaire dans le but de calculer des indicateurs économiques.

Les informations ont été récoltées lors d'entretiens physiques avec les agriculteurs, organisés entre le 13 mai et le 4 juin. Chaque entretien était enregistré. Pour deux agriculteurs, le questionnaire a été complété par téléphone. Un agriculteur déjà enquêté en 2017 n'a pas pu être rencontré. Les informations relatives à ses pratiques agricoles ont cependant pu être répertoriées.

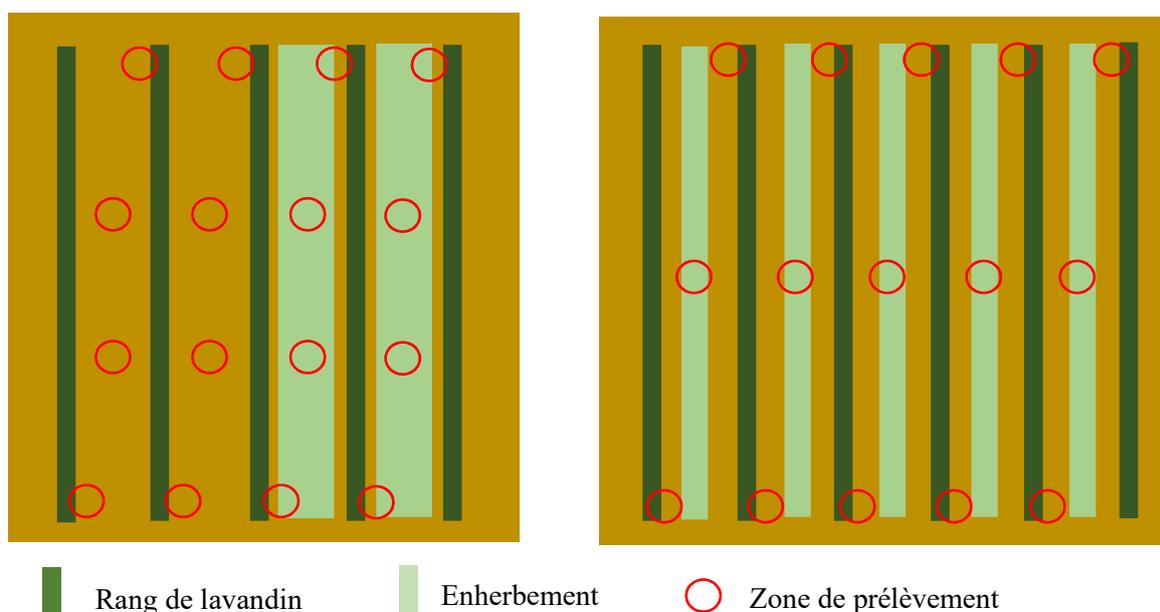


Figure 9 : Modalités d'échantillonnage en fonction de présence ou non d'enherbement ; Cas de gauche, sans enherbement ou avec enherbement large : quatre prélèvements sur quatre enchainements rang / inter-rang / rang. Cas de droite, avec enherbement étroit : trois prélèvements sur cinq enchainements rang / inter-rang / rang.

#### II.3.d. Mesure du taux de dépérissement du lavandin

L'état sanitaire du lavandin sur une parcelle est évalué en estimant le nombre de plants en bonne santé, morts, ou montrant des signes de dépérissement plus ou moins prononcés. Les parcelles sont parcourues sur une portion autour des zones de prélèvements, et les plants symptomatiques sont comptabilisés. Ils sont répartis en trois classes, la classe 1 constituant la classe des plants sains (Figure 10) :

- **Classe 2 :** le plant est bien développé mais les tiges montrent un léger jaunissement et les fleurs un léger retard.
- **Classe 3 :** Le plant est moins développé, les tiges sont courtes et les fleurs sont plus petites ; certaines tiges sont mortes
- **Classe 4 :** Le plant est entièrement mort

Plusieurs schémas de parcours sont possibles ; un exemple, est proposé ci-après (Figure 10). Le but est de parcourir plusieurs rangs et d'observer une quinzaine de pieds par rang, à proximité des zones de prélèvement. Le nombre de plants totaux observés est noté, ce qui permet d'estimer la proportion de plants de chaque classe sur la parcelle entière.

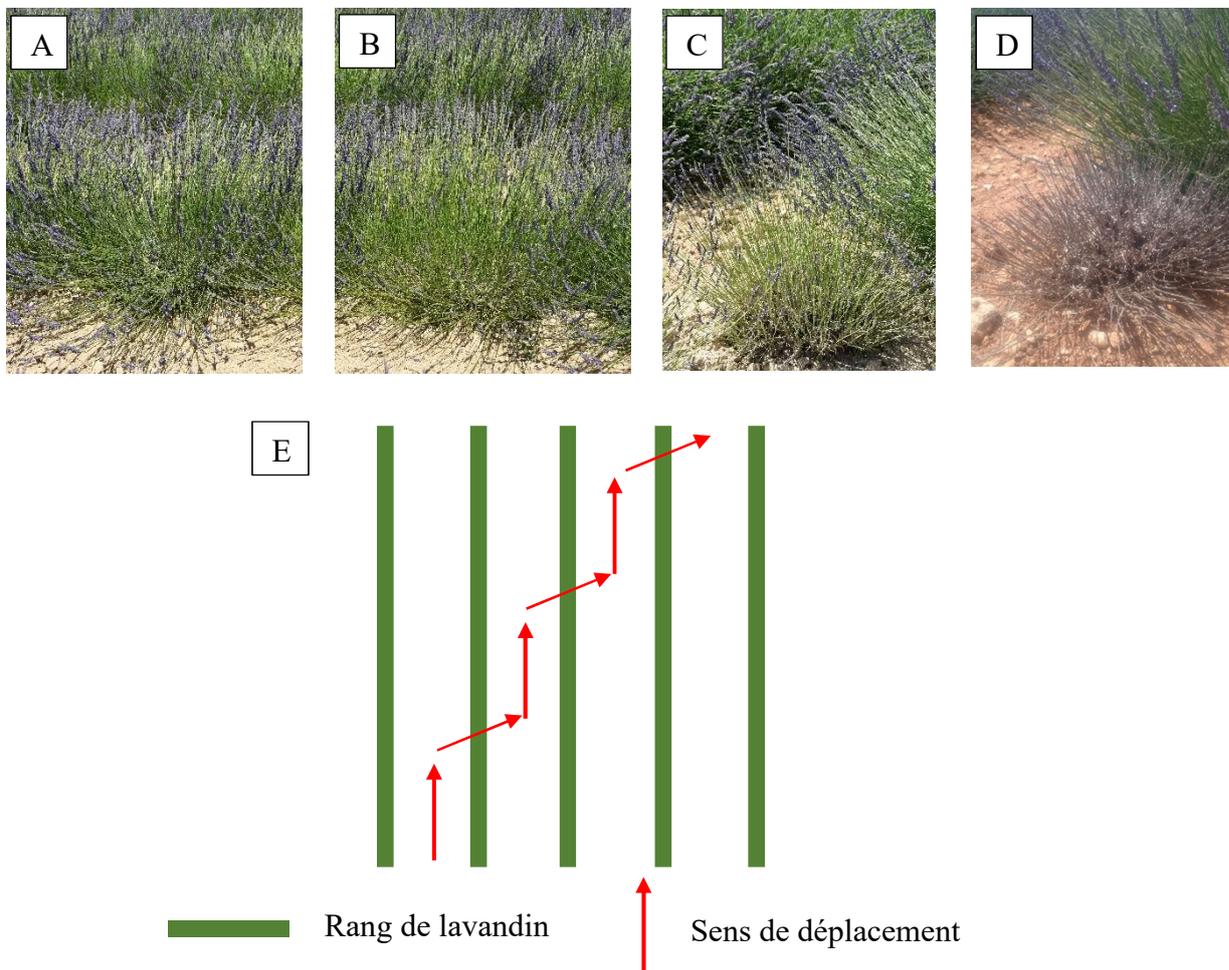


Figure 10 : Distinction des différentes classes de plants symptomatiques du dépérissement (A à D ; photographies personnelles) et exemple de schéma de parcours pour la mesure du dépérissement (E). A : plant sain (classe 1) ; B : plant dépérissant de classe 2 (légèrement jaunissant) ; C : plant dépérissant de classe 3 (retard, tiges courtes, quelques tiges mortes) ; D : plant dépérissant de classe 4 (plant mort).

### II.3.e. La mesure de rendement

Certaines parcelles ont fait l'objet d'une expérimentation. Sur celles-ci, deux échantillonnages de sol ont été faits, l'un en zone témoin et l'autre en zone expérimentale. Afin de mesurer un éventuel effet de l'expérimentation sur le rendement, des mesures ont été faites sur chacune de ces zones afin d'estimer le rendement pour chaque modalité. Pour chaque zone, la récolte est effectuée sur quatre rangs sur une distance de 10m. Un échantillon est prélevé sur chaque rang. Cet échantillon est pesé en frais et en sec et les fleurs sont séparées pour déterminer la proportion de masse qu'elles représentent. Les échantillons sont ensuite distillés. Le rendement est extrapolé sur les 10m linéaires à partir de la masse de chaque récolte. Ces mesures ont été réalisées avec l'aide du CRIEPPAM (Centre Régional Interprofessionnel d'Expérimentation en Plantes à Parfum Aromatiques).

### II.4. Les méthodes d'analyse

Afin de pouvoir comparer la qualité des sols aux pratiques agricoles et aux types de sol, il est nécessaire de regrouper les parcelles disposant de caractéristiques proches. Une fois cette typologie créée, il sera possible de comparer les groupes entre eux en fonction de leurs indicateurs de qualité du sol. Les parcelles seront également classées selon leur état sanitaire afin d'étudier le lien avec la qualité du sol et les pratiques agricoles.

Le logiciel RStudio a été utilisé pour effectuer les analyses statistiques.

#### II.4.a. Création d'une typologie de sols

Les indicateurs de texture ont permis de créer la typologie des groupes de sol. Ces indicateurs sont stables sur le temps court et ne peuvent être modifiés par les pratiques agricoles. La teneur en calcaire total, fortement variable sur le plateau, est intégrée dans ces indicateurs. La typologie a été réalisée à l'aide d'une ACP (analyse en composantes principales), méthode statistique descriptive, utilisable sur un jeu de données quantitatives, permettant de créer des groupes d'individus ayant des caractéristiques proches.

#### II.4.b. Création de modalités de pratiques

Afin de regrouper les parcelles selon les pratiques qui y ont été appliquées, des classes ont été créées pour celles qui comportaient une information quantitative. Elles ont été élaborées de façon à intégrer suffisamment d'individus et à créer des paliers discriminants. Les pratiques ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence et de leur variabilité inter-parcellaire. En effet, il fallait que la variabilité soit suffisante pour que l'impact sur la qualité du sol puisse être étudié. Les pratiques ont été séparées en deux catégories : les pratiques dites « anciennes », réalisées jusqu'à la récolte du précédent du lavandin, et les pratiques qualifiées de « récentes » réalisées après cette récolte. Cela permettra d'étudier l'impact des pratiques à court ou moyen terme.

#### II.4.c. Analyse de l'effet du type de sol et des pratiques sur la qualité du sol

L'effet du type de sol sur les indicateurs de qualité mesurés en 2019 a été étudié indépendamment des pratiques dans un premier temps. Une ACP est effectuée sur les indicateurs de qualité. Le recours à une analyse interclasse (between class analysis) permet ensuite de représenter les individus (les parcelles) en fonction de leur type de sol. Il est possible de constater visuellement si une différence existe entre les types de sol. La significativité de cette différence est vérifiée à l'aide d'un test de MonteCarlo.

Dans un second temps, l'analyse conjointe des types de sol et des pratiques est effectuée. La méthode choisie est une analyse de redondance (RDA), qui permet d'analyser deux tableaux, l'un contenant les variables à expliquer (les indicateurs de qualité du sol) et l'autre contenant les variables explicatives (type de sol et pratiques agricoles). Cette méthode fournit un modèle linéaire combinant les variables qui expliquent le mieux la variance entre parcelles des indicateurs de qualité. Elle donne aussi une information sur l'interaction des variables retenues. Les variables explicatives en entrée peuvent être à la fois qualitatives et quantitatives. Ainsi l'analyse a été faite dans un premier temps en utilisant les classes de pratiques créées, puis en intégrant directement les valeurs quantitatives. Cela permet de travailler sur les données brutes issues des enquêtes et de s'affranchir de tout jugement de valeur.

La construction du modèle est progressive, partant du modèle nul vers un modèle de plus en plus complexe. La fonction « ordistep », qui tend à minimiser le nombre de variables du modèle, est utilisée pour cela.

#### II.4.d. Analyse de l'effet du type de sol et des pratiques agricoles sur l'évolution de la qualité des sols.

Le taux de variation de chaque indicateur est utilisé pour caractériser l'évolution entre 2017 et 2019. Il est calculé de la manière suivante :

$$\tau_i = \frac{(v_{i\ 2019} - v_{i\ 2017})}{v_{i\ 2017}}$$

$\tau_i$ : taux de variation de l'indicateur i ;  $v_{i\ 2019}$ : valeur 2019 de l'indicateur i ;  $v_{i\ 2017}$ : valeur 2017 de l'indicateur i

Les taux de variation de quelques indicateurs biologiques et physico-chimiques de qualité du sol ont tout d'abord été comparés sur les parcelles expérimentales afin de voir si des tendances se dessinaient. La méthode statistique employée ensuite est la même que précédemment. L'impact du type de sol sur l'évolution des indicateurs de qualité est étudié à l'aide d'une analyse interclasse après une ACP. Une RDA est ensuite appliquée : les taux de variations des indicateurs constituent les variables à expliquer ; les types de sol et pratiques sont les variables explicatives. Cette analyse n'a pu être réalisée que sur les parcelles qui ont fait l'objet d'un prélèvement en 2017. Cela concerne 31 parcelles.

#### II.4.e. Relations entre état sanitaire, pratiques agricoles et qualité du sol

L'état sanitaire des parcelles est caractérisé par le pourcentage des différentes catégories de plants. Trois variables ont été retenues : i) le pourcentage de plants sains (classe 1), ii) le pourcentage de plants de classe 2, iii) le pourcentage de plants de classe 3 et 4. Une première analyse de l'effet unique de la qualité du sol sur l'état sanitaire a été réalisée, ce qui a permis de présélectionner les indicateurs influents. L'effet combiné du type de sol, des pratiques et de la qualité du sol sur l'état sanitaire a ensuite été étudié, grâce à une RDA. Les variables d'état sanitaire constituent les variables à expliquer ; le type de sol, les pratiques agricoles et les indicateurs de qualité du sol sont les variables explicatives.

L'enherbement est une pratique utilisée pour lutter contre le dépérissement du lavandin. L'état sanitaire des parcelles expérimentales enherbées a été comparé à celui des parcelles témoins afin de voir si l'effet de cette pratique est avéré sur le terrain.

#### II.4.f. Etude de quelques indicateurs économiques

Les informations récoltées lors des enquêtes ont permis de calculer des indicateurs économiques que sont le produit, le total des charges et la marge directe au niveau parcellaire. Il s'agit d'une marge intermédiaire entre la marge brute et la marge nette, obtenue en déduisant du produit brut de la parcelle les frais directs engagés dans la production, soit les frais de carburant, la main d'œuvre, le coût de la plantation, des produits phytopharmaceutiques et des fertilisants, le coût de distillation et éventuellement les frais d'irrigation. Les charges de structure et l'amortissement du matériel ne sont pas intégrés au calcul. Le calcul du rapport de la marge directe sur le produit, pouvant être considéré comme équivalent du rapport de l'EBE (Excédent brut d'exploitation) sur le produit, au niveau parcellaire, sera utilisé pour décrire l'efficacité économique des exploitations sur les parcelles étudiées (Lamy, discussion personnelle du 7 juillet 2019). Une analyse descriptive permettra de comparer les parcelles du réseau sol et donc les conduites selon ces indicateurs économiques.

### III. Résultats

#### III.1. Formation des groupes de sol et des classes de pratiques

##### III.1.a. Description des variables texturales

Certaines valeurs de variables texturales ont évolué entre 2017 et 2019 alors que ces éléments sont normalement stables dans le temps. Deux parcelles sont concernées par une forte variation de la quantité de limons et de sables. Une variation de plus de 10% de la quantité de calcaire par rapport à la fraction totale est observée sur six parcelles. Les variations concernant la fraction d'argiles sont plus modérées, une seule parcelle étant impactée par une variation de plus de 10% de la fraction totale. Ces variations importantes, bien qu'anormales, peuvent en partie être expliquées par la forte teneur en calcaire qui rend difficile la détermination précise de la texture, les petites particules pouvant s'immiscer dans les différentes fractions, et d'éventuelles erreurs de mesure de la part du laboratoire.

Puisqu'il n'était pas possible de connaître la détermination la plus proche de la réalité, il a été décidé de prendre la moyenne des textures entre 2017 et 2019. Le Tableau 1 présente les teneurs minimales, maximales et les moyennes pour chaque fraction texturale et le calcaire total. Il montre bien la forte disparité de la quantité de calcaire présent (entre 1.45 % et 72.4 %) ainsi que des limons et argiles.

##### III.1.b. Création de groupes de sol

Les groupes de sol ont été créés en effectuant une ACP suivie d'une classification hiérarchique. Le résultat de l'ACP est présenté en Figure 11. Les axes représentent respectivement 77,35 % et 13,45 % de la variabilité, ce qui signifie que plus de 90% de la variabilité est conservée. L'axe 1 est inversement corrélé à la teneur en calcaire et positivement corrélé à la teneur en argiles et en limons. L'axe 2 est positivement corrélé à la quantité de sables.

Des groupes ont été formés, essentiellement selon la position des individus sur l'axe 1 (Figure 12). Ils sont donc discriminés en fonction de leur teneur en calcaire plus ou moins importante. La classification hiérarchique des parcelles et les caractéristiques des différents groupes sont présentées en Figure 13. Le groupe 1 caractérisé par une teneur en calcaire très élevée comporte 22 parcelles. Le groupe 2, dont les proportions de limons, argiles et calcaire sont similaires (autour de 30 %), est constitué de 12 parcelles. Les trois parcelles restantes se démarquent par une très faible teneur en calcaire. Elles forment le groupe 3.

Tableau 1 : Description des variables texturales et de la teneur en calcaire sur les parcelles étudiées

Fraction	Minimum	Maximum	Moyenne
Sables (%)	2,51	21,79	9,97
Limons (%)	13,03	43,90	25,89
Argiles (%)	8,35	39,31	22,65
Calcaire total (%)	1,45	72,40	39,36

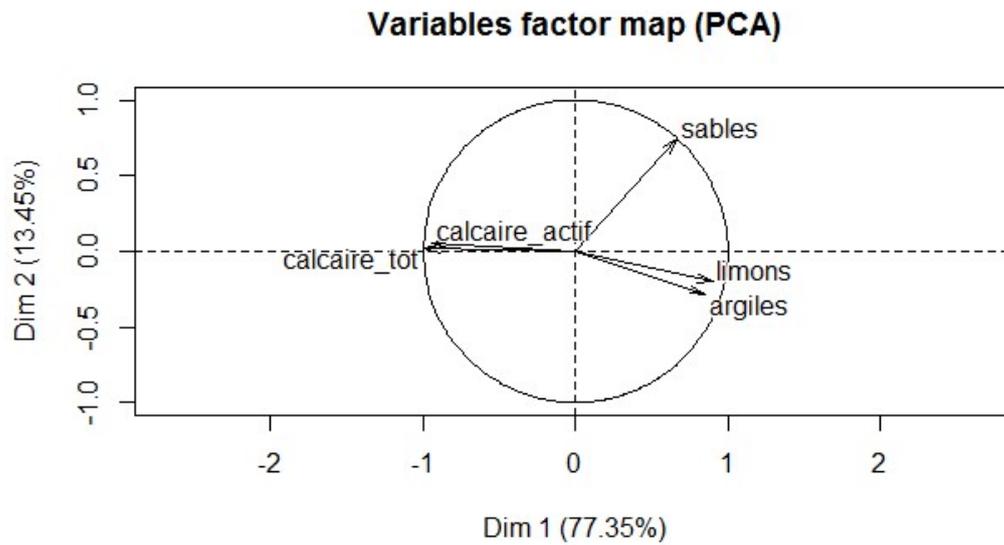


Figure 11 : Cercle de corrélation des variables de texture et de la teneur en calcaire

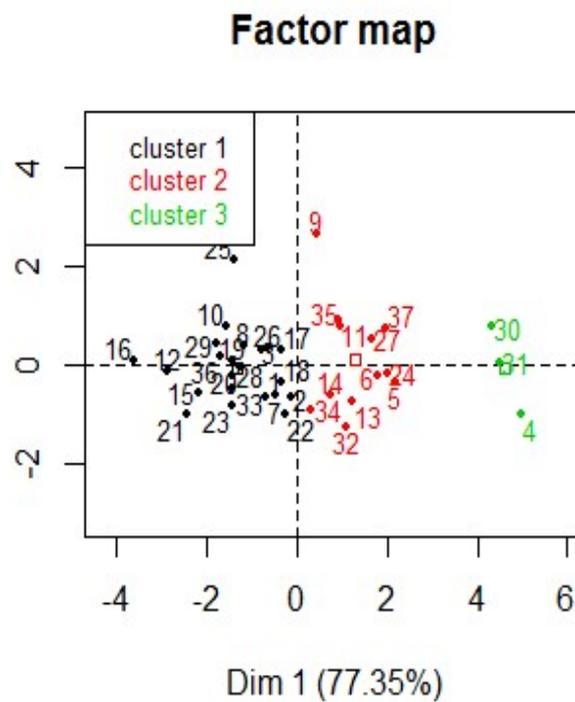


Figure 12 : Distinction des groupes de sol selon les axes de l'ACP effectuées sur la texture et la teneur en calcaire

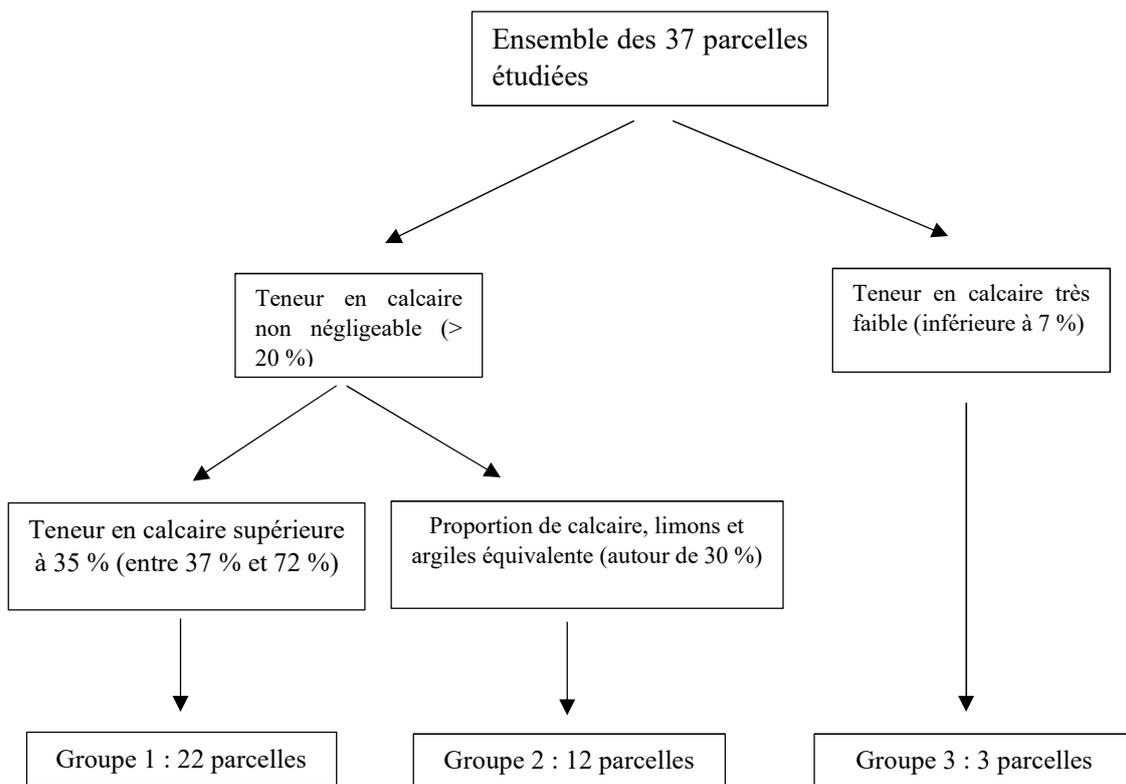


Figure 13 : Classification hiérarchique des groupes de sol

Tableau 2 : Distinction des pratiques "anciennes" et "récentes".

Liste des pratiques « anciennes »		Liste des pratiques « récentes »	
Description	Code associé	Description de la pratique	Code associé
Rotation des cultures depuis 2012	Rotation	Quantité de MO apportée après récolte de la culture précédant le lavandin	MO_17_19
Nombre de labours depuis 2011	Labour	Valeur de l'IFT sur lavandin	IFT_17_19
Valeur de l'IFT entre 2012 et 2016	IFT_12_16	Recours au désherbage chimique (oui / non)	DC_lav
Quantité de MO apportée entre 2012 et 2016	MO_12_16	Unités d'azote apportées sur le lavandin	uN_17_19
Unités d'azote apportées entre 2012 et 2016	uN_12_16	Nombre de binages effectués sur le lavandin (sur toute la parcelle ou sur le rang de lavandin uniquement)	Nb_BIN
Utilisation d'au moins un insecticide entre 2012 et 2016 (oui / non)	Insect_av_lav	Nombre de binages effectués sur toute la parcelle	Nb_BIN_p
		Nombre total de passages sur la parcelle depuis la récolte du précédent du lavandin	Passages
		Enherbement présent sur la parcelle (oui ou non)	Enherbement
		Utilisation d'insecticide sur le lavandin (oui / non)	Insect_lav

### III.1.a. Création des classes pour chaque pratique

Les pratiques anciennes et récentes sont présentées dans le Tableau 2. Les classes de pratiques créées sont décrites ci-dessous et sont synthétisées dans le Tableau 3 (p. 36). Quatre pratiques ont fait l'objet d'un classement des parcelles selon leur caractère de présence ou d'absence. Il s'agit de l'enherbement inter-rang (Enherbement), le recours au désherbage chimique sur lavandin (DC\_lav) et le recours à au moins un insecticide sur les cultures avant lavandin (Insect\_av\_lav) ou sur le lavandin (Insect\_lav) : 10 parcelles ont été enherbées sur l'inter-rang, 27 non ; le désherbage chimique a été pratiqué sur 31 parcelles ; 8 parcelles ont reçu au moins un insecticide sur les cultures précédant le lavandin et 29 n'en ont pas reçu ; 7 parcelles sur 37 ont reçu au moins un insecticide sur la culture du lavandin. Les classes des autres pratiques sont présentées ci-dessous

#### ❖ Historique des cultures

Sur l'ensemble des parcelles étudiées, quatre types de rotations se sont démarquées. La première classe regroupe les parcelles qui ont supporté une majorité de cultures céréalières depuis 2012 (classe BC pour blé et autres céréales). La deuxième rassemble les parcelles sur lesquelles une succession de céréales et plante à parfum a été observée (classe CP). Les parcelles ayant reçu au moins deux cultures différentes des céréales et hors plante à parfum sont regroupées dans la troisième classe (classe CPO pour céréales – pois – oléagineux). La dernière classe regroupe les parcelles ayant supporté une culture fourragère (classe CF pour culture fourragère).

#### ❖ Nombre de labours

Trois classes d'intensité de labour ont été créées en considérant la période de 2011 à 2017. La première classe comprend les parcelles sur lesquels aucun labour ou un seul labour a été pratiqué (une parcelle dans ce cas). La deuxième classe correspond à une pratique répétée mais pas systématique, alors que la troisième correspond aux parcelles ayant connu une pratique intensive systématique du labour depuis 2011.

#### ❖ Classes d'IFT

Cet indicateur représente l'intensité de l'emploi de produits phytosanitaires sur la parcelle. Que ce soit pour les pratiques récentes ou anciennes, trois classes ont été formées. La première rassemble les parcelles en bio, ayant un IFT (indice de fréquence de traitement) nul entre 2012 et 2016 et après 2016. Deux autres classes permettent ensuite de distinguer des pratiques modérées ou plus intenses.

#### ❖ Unités d'azote apportées depuis 2012

L'impact de la fertilisation sur la qualité du sol a également été étudié. Pour ce faire, les parcelles ont été réparties en classes en fonction du nombre d'unités d'azote reçues entre 2012 et 2016 pour les pratiques anciennes, et entre 2017 et 2019 pour les pratiques récentes. Dans ces deux cas, trois classes ont été formées : **classe i)** aucun apport d'azote ; **classe ii)** apport d'azote inférieur respectivement à 500 uN et 50 uN pour les pratiques anciennes et récentes ; **classe iii)** quantité d'azote supérieure à ces valeurs.

### ❖ **Quantité de MO apportée**

Les parcelles sont regroupées en fonction de la quantité de MO qu'elles ont reçu. Deux indicateurs devaient être créés, l'un sur la quantité totale d'amendement<sup>1</sup> ou de fertilisant organique épandue sur la parcelle, et l'autre informant sur la quantité réelle de MO stable apportée. Cette dernière est calculée à partir de la teneur en MO du « produit » épandu et de l'ISMO (indice de stabilité de la MO) qui indique le pourcentage de MO théoriquement encore présente après une année. Il semblait intéressant de distinguer ces deux indicateurs car ils ne vont pas impacter le sol de la même façon. En effet, la MO labile sera facilement dégradée par la faune du sol et aura tendance à dynamiser l'activité biologique alors que la MO stable aura un impact sur la quantité totale de MO présente dans le sol et influera sur des paramètres tels que la CEC et la stabilité structurale. Après avoir créé les classes, il s'est avéré que les parcelles étaient regroupées de la même manière pour les deux indicateurs. Seule la quantité totale de MO apportée a été conservée. Trois classes ont été formées pour les deux ensembles de pratiques : **classe i)** les parcelles n'ayant pas reçu de MO ; **classe ii)** les parcelles ayant reçu moins de 1000 kg de MO par hectare ; **classe iii)** les parcelles ayant reçu plus de 1000 kg par hectare.

### ❖ **Nombre de désherbages mécaniques sur le lavandin**

Les travaux du sol ont une influence sur la biologie du sol. Le désherbage mécanique, ou binage, intervient sur les quelques premiers centimètres du sol (de 5 à 15 cm de profondeur selon les résultats des enquêtes), zone où l'activité biologique est importante. La fréquence de cette pratique pourrait donc avoir un impact sur le fonctionnement biologique du sol. Certains agriculteurs pratiquent des binages uniquement sur le rang de lavandin. Deux pratiques ont donc été distinguées : le nombre total de binages, qu'il soit effectué sur l'ensemble de la parcelle ou sur le rang de lavandin uniquement, et le nombre de binages effectués uniquement sur la totalité de la parcelle (binages « à plein »). Les parcelles ont été classées en trois catégories pour chacune de ces pratiques.

### ❖ **Nombre total de passages sur la parcelle en culture de lavandin**

Cette donnée ne renseigne pas sur l'effet direct d'une pratique sur la qualité du sol, mais permet de tester l'impact du passage répété d'engins sur la parcelle. Si les classes ont une qualité de sol différente, cela signifie que le nombre de passages d'engins est, au moins en partie, en cause. Le nombre de passages varie fortement en fonction des pratiques. Trois classes ont été créées.

---

<sup>1</sup> Un amendement organique se distingue d'un fertilisant par sa teneur en N, P et K. La teneur de chacun de ces éléments doit être inférieure à 3 % de la masse brute et leur somme doit être inférieure à 7 % de la masse brute (norme NF U 44-051).

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des classes de pratiques anciennes et récentes créées. Pour chaque pratique, la première ligne correspond au nom de la classe. La deuxième ligne donne la caractéristique de la classe. La troisième ligne renseigne le nombre de parcelles constituant la classe. Les pratiques dont les modalités sont oui / non ne sont pas présentées dans ce tableau.

Pratiques anciennes				
Pratique	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Rotation	BC	CP	BPO	CF
	Blé et autres céréales	Céréales et plantes à parfum	Blé, pois, oléo-protéagineux	Culture fourragère
	13 parcelles	10 parcelles	6 parcelles	8 parcelles
Nombre de labours depuis 2011	LAB_1	LAB_2	LAB_3	
	0 à 1 labour	2 à 4 labours	5 à 6 labours	
	5 parcelles	13 parcelles	19 parcelles	
IFT entre 2012 et 2016	IFTa_0	IFTa_1	IFTa_2	
	IFT nul	IFT < 10	IFT >= 10	
	8 parcelles	15 parcelles	14 parcelles	
uN entre 2012 et 2016	uNa_0	uNa_1	uNa_2	
	pas d'apport	uN<500	uN>500	
	8 parcelles	9 parcelles	20 parcelles	
MO entre 2012 et 2016	MOa_0	MOa_1	MOa_2	
	MO = 0	MO < 1000	MO >1000	
	23 parcelles	5 parcelles	9 parcelles	
Pratiques récentes				
Pratique	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
IFT après 2016	IFTr_0	IFTr_1	IFTr_2	
	IFT = 0	IFT < 5	IFT > = 5	
	6 parcelles	14 parcelles	17 parcelles	
uN après 2016	uNr_0	uNr_1	uNr_2	
	uN = 0	uN < 50	uN > 50	
	7 parcelles	13 parcelles	17 parcelles	
MO après 2016	MOr_0	MOr_1	MOr_2	
	pas de MO	MO < 1000 kg	MO > 1000 kg	
	13 parcelles	16 parcelles	8 parcelles	
Nombre total de binages	BIN_1	BIN_2	BIN_3	
	Moins de 7 binages	Entre 7 et 9 binages	Plus de 9 binages	
	10 parcelles	13 parcelles	14 parcelles	
Nombre de binages à plein	BINp_1	BINp_2	BINp_3	
	Moins de 4 binages	Entre 4 et 8 binages	Plus de 8 binages	
	8 parcelles	17 parcelles	12 parcelles	
Nombre de passages sur la parcelle	PAS_1	PAS_2	PAS_3	
	Moins de 20 passages	Entre 20 et 25 passages	Plus de 25 passages	
	11 parcelles	18 parcelles	8 parcelles	

## III.2. Impact des types de sols et des pratiques sur les indicateurs de qualité du sol

### III.2.a. Description de la qualité du sol du plateau de Valensole.

La qualité des sols du plateau, donnée par les indicateurs de qualité mesurés en 2019, est hétérogène. La teneur en carbone organique, le rapport C/N, la CEC, la BM ou encore l'abondance de certains nématodes font partie des indicateurs qui varient le plus d'une parcelle à l'autre. Les données sont présentées en annexe 2.

Le pH varie très peu sur le plateau avec des extrêmes compris entre 8 et 8,6. Les sols sont tous basiques. Hormis le pH et les indicateurs nématofauniques, on observe un rapport variant de 2 à 4 entre le minimum et le maximum de chaque indicateur. Le rapport C/N évolue entre 6,8 et 11,8, pour une moyenne de 9,3 ce qui est faible. La quantité de MO se situe entre 1 % et 3 % de la masse de sol avec une moyenne de 2,25 %, alors que la proportion de MO libre varie entre 10 et 30 % environ. La BM varie du simple au triple également (entre 164 mg/kg de sol et 497 mg/kg de sol). Les potentiels de minéralisation sont les indicateurs qui varient le plus (de 155 mg/kg/28j à 594 mg/kg/28j concernant le potentiel de minéralisation du carbone).

Les résultats fournis par les indicateurs nématofauniques révèlent quant à eux une activité biologique modérée sur les parcelles étudiées. Les abondances des différents groupes trophiques sont faibles (inférieure à 1,5 pour 100g de sol) à moyennes (entre 1,5 et 4 pour 100g de sol). Une faible abondance de nématodes phytophages est constatée, ce qui indique une faible pression parasitaire. La structure des communautés est cependant complexe sur une majorité de parcelles avec des indices SI et Shannon satisfaisants (respectivement supérieurs à 25 et à 2) ; seules quatre parcelles ont un indice de structure faible (inférieur à 20). L'indice d'enrichissement (EI) reste moyen, ce qui indique des flux de nutriments modérés (Elisol Environnement, 2019).

La projection des parcelles selon les deux principaux axes de l'ACP (Figure 14, p. 39) montre que certaines se distinguent par des indicateurs particuliers. Alors que les parcelles 15 et 16 sont caractérisées par une abondance totale de nématodes et des potentiels de minéralisation élevés, d'autres se démarquent par un pourcentage fort de nématodes phytophages et phytoparasites (parcelles 28 et 29), la quantité de carbone organique (parcelle 21) ou une CEC et une quantité de MgO plus importantes que les autres (parcelle 32). Ces parcelles sont éloignées de l'origine de la projection. Les parcelles situées plus proche de l'origine n'ont pas d'indicateur prépondérant. Il n'est cependant pas possible de dire si leur valeur est élevée ou non.

On remarque des relations entre indicateurs. Par exemple que les potentiels de minéralisation les plus élevés sont observés sur les parcelles où la biomasse microbienne est la plus importante. Ces parcelles ne sont pas forcément celles qui ont le plus de MO mais celles qui ont une proportion de MO libre plus conséquente. Il est aussi possible de remarquer que le C/N dépend davantage du type de MO que de la quantité de MO totale disponible. C/N et quantité totale de MO sont cependant liés puisque les parcelles avec les C/N les plus faibles sont ceux qui ont le moins de MO. La relation entre la CEC et les quantités d'argiles et de MO est également visible, puisque les parcelles ayant une CEC élevée ont beaucoup d'argiles,

ou beaucoup de MO ou les deux à la fois. Certaines parcelles dérogent à cette règle. Elles possèdent une CEC importante sans avoir une teneur en argiles et une quantité de MO très élevées. Ceci peut s'expliquer par la présence d'une argile dont la structure lui confère une CEC élevée. En effet, le plateau comporte 3 types d'argiles : des illites qui ont une CEC assez faible, autour de 20-30  $\text{cmol}^+/\text{kg}$  ; des chlorites composées de 3 couches de phyllosilicates et à CEC faible (10  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ) ; et des vermiculites à structure de phyllosilicates monoclinique de type 2:1 (2 feuillets tétraédriques pour chaque feuillet octaédrique) à la CEC très élevée (100 à 150  $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ). On peut supposer que ces parcelles contiennent plutôt des vermiculites.

### III.2.b. Réduction du jeu de données

Les indicateurs de qualité étant nombreux, une première analyse basée sur la corrélation entre les variables permet de réduire le jeu de données. La Figure 15 montre les corrélations significatives existant entre les indicateurs. Les variables de textures ont été conservées volontairement afin de visualiser de potentielles relations entre ces variables et les indicateurs de qualité. Une corrélation est observable entre les argiles et les potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote exprimés en pourcentage de carbone et d'azote total. Les argiles sont également corrélées à l'abondance des nématodes phytophages et phytoparasites, ce qui explique la relation avec l'abondance totale de nématodes. Cette observation montre qu'il est pertinent d'analyser la relation entre le type de sol et la qualité du sol.

Parmi les indicateurs de qualité, plusieurs corrélations existent. L'analyse de ces corrélations permet de s'affranchir des indicateurs suivants :

- La quantité de matière organique (MO) : étant calculée à partir de la quantité de carbone organique, elle fournit la même information que cet indicateur.
- Le pourcentage de MO liée (MOliée\_p) : cet indicateur est corrélé aux mêmes indicateurs que le pourcentage de MO libre mais de façon inverse.
- Les potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote (Pot\_min\_C et Pot\_min\_N) : ils sont redondants avec les potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote exprimés en pourcentage de carbone et d'azote organique (Pot\_min\_Corg et Pot\_min\_Norg)
- Les abondances des différents groupes trophiques de nématodes (Bacterivores, Fongivores, Predateurs, Libres, Phytophages, Phytoparasites) : ces indicateurs sont corrélés à l'abondance totale ainsi qu'à la biomasse microbienne BM. La proportion des groupes trophiques et l'abondance totale permettent de conserver toute l'information nécessaire.

Le cercle de corrélation de l'ACP effectuée sur les indicateurs restants montre qu'ils sont peu redondants les uns avec les autres (Annexe 3). Certains indicateurs sont projetés dans le même sens mais l'information qu'ils délivrent n'est pas identique a priori. C'est le cas de l'indice de diversité écologique (Shannon) et du rapport C/N (C\_sur\_N) ainsi que du pourcentage de MO libre et l'indice des voies de décomposition (IVD). L'indice d'enrichissement (EI) est peu explicatif selon ces deux axes mais il est prépondérant sur la projection selon les axes 3 et 4 de l'ACP. Tous les indicateurs utilisés pour l'ACP sont donc conservés pour la suite de l'analyse.

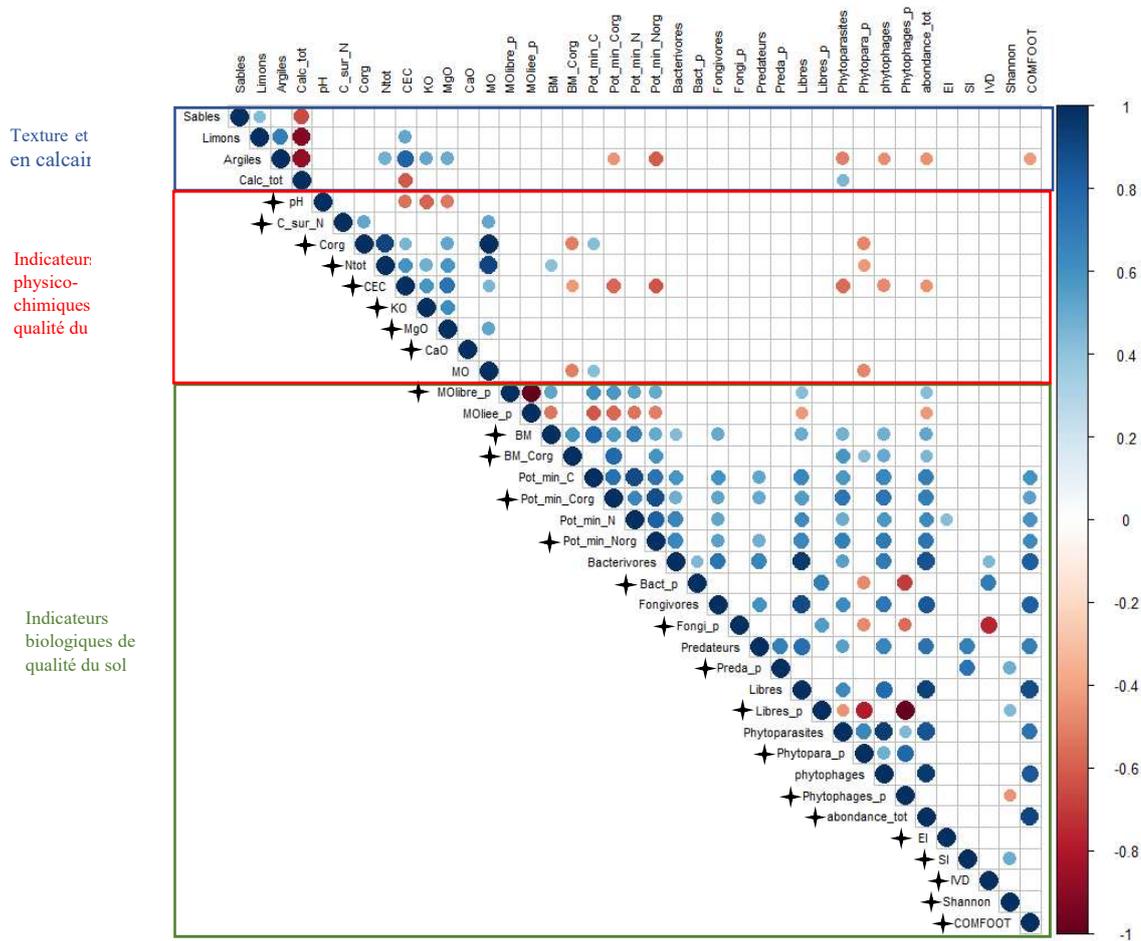


Figure 15 : Matrice de corrélation entre les indicateurs de qualité sol. Les corrélations visibles sont les plus significatives ( $p$ -value=0.01). Les cercles bleus représentent une corrélation positive ; les cercles rouges représentent une corrélation négative. Plus la couleur est intense, plus la relation est forte. Les indicateurs physico-chimiques sont encadrés en rouge et les indicateurs biologiques en vert. Les données de texture et la teneur en calcaire sont encadrées en bleu. Les indicateurs conservés pour l'ACP sont marqués par le symbole \*

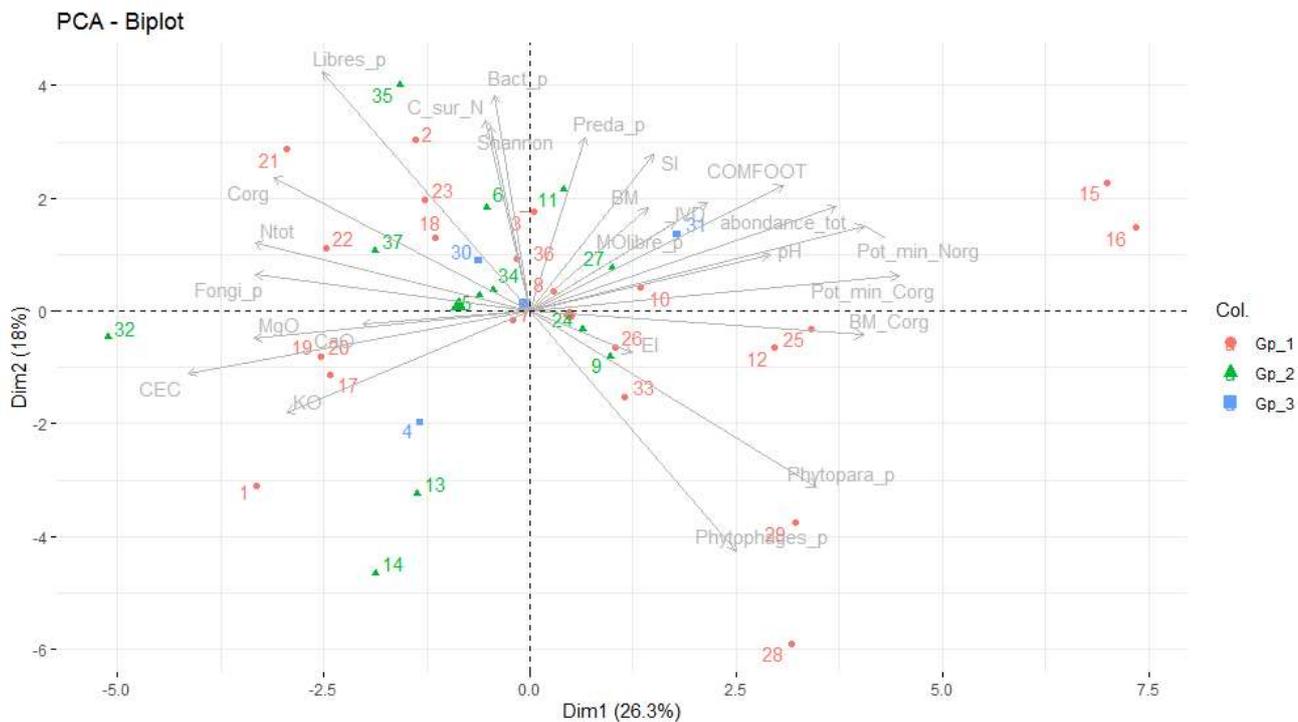


Figure 14 : Projection des indicateurs de qualité du sol et des parcelles selon les deux principaux axes de l'ACP sur les indicateurs de qualité retenus après analyse du corrélogramme. Les parcelles sont identifiées par leur numéro et sont classées selon le groupe de sol auquel elles appartiennent (rouge : Groupe 1 ; vert : Groupe 2 ; bleu : Groupe 3). Les indicateurs de qualité apparaissent en gris. Plus les flèches sont grandes, plus l'indicateur explique une part importante des axes de l'ACP.

### III.2.c. Effet du type de sol sur la qualité du sol

La Figure 16 représente les parcelles en fonction de leur groupe de sol. Les barycentres des trois groupes (matérialisés par un triangle, un carré et un rond plus gros) sont proches les uns des autres et situés à proximité de l'origine de la projection. Cette observation explique que le type de sol n'influence pas un indicateur en particulier.

L'analyse interclasse effectuée sur l'ensemble des indicateurs de qualité retenus révèle que les groupes de sol n'ont pas des indicateurs de qualité du sol significativement différents. Le groupe de sol 3 est isolé des groupes de sol 1 et 2 (Figure 16 A). Cependant, le test de Monte Carlo indique que cette distinction n'est pas significative ( $p$ -value = 0.12). Le classement des parcelles en groupes de sol ne permet d'expliquer que 7.1 % de la variance des indicateurs de qualité. L'analyse distincte de l'effet du type de sol sur les indicateurs physico-chimiques d'une part et les indicateurs biologiques d'autre part montre que les premiers sont davantage influencés par le type de sol ( $p$ -value = 0.01), alors que les seconds ne le sont pas sur notre jeu de données ( $p$ -value = 0.86).

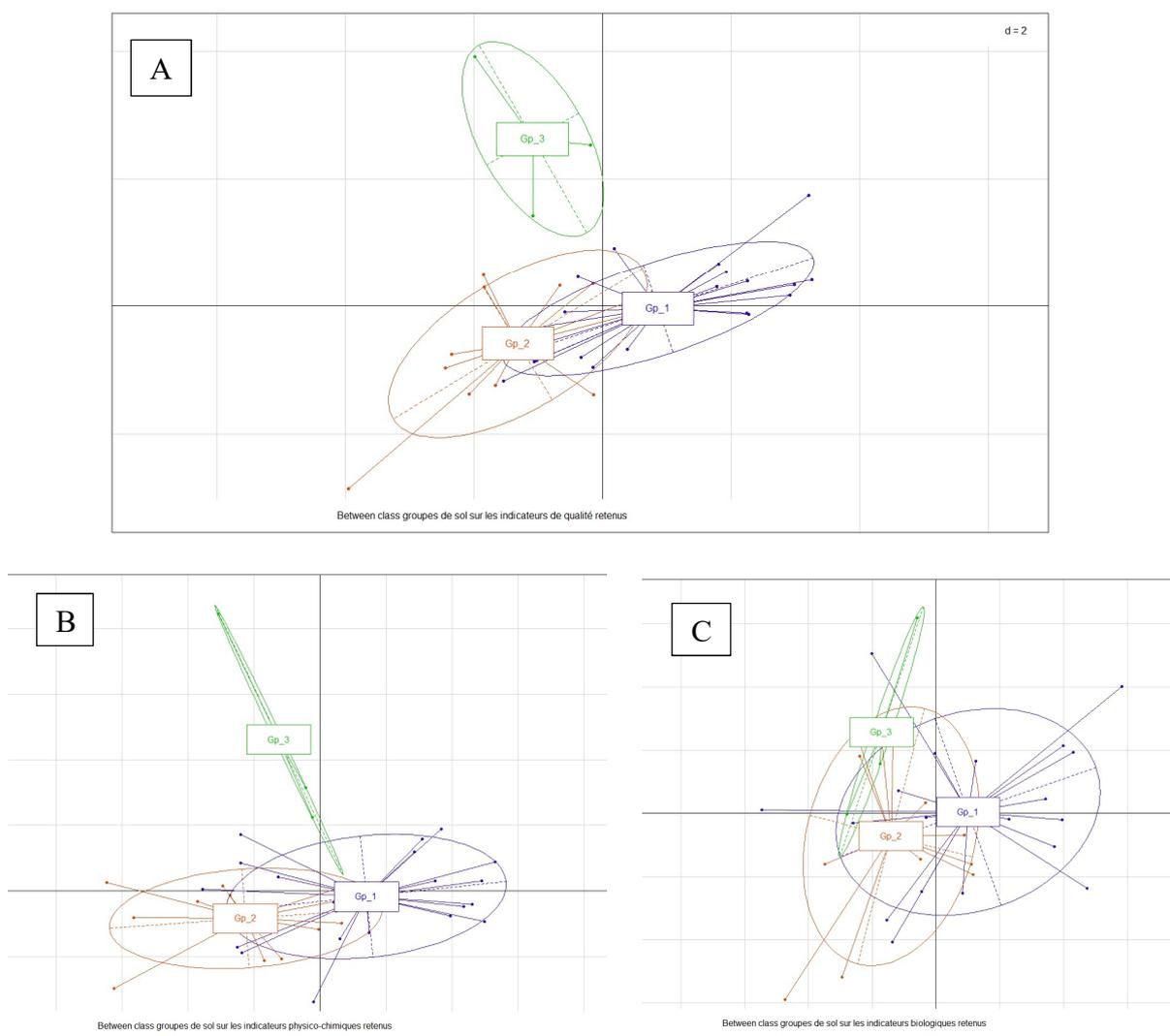


Figure 16 : Projection des parcelles en fonction du groupe de sol auquel elles appartiennent : A : résultat après BCA sur l'ensemble des indicateurs de qualité du sol ; B : résultat après BCA sur les indicateurs physico-chimiques uniquement ; C : résultat après BCA sur les indicateurs biologiques uniquement. Le nom indiqué au centre des ellipses correspond au groupe de sol. Pour chaque figure, le Groupe 1 apparaît en bleu, le Groupe 2 en rouge et le Groupe 3 en vert.

### III.2.d. Impact des pratiques sur les indicateurs de qualité du sol : analyse à partir des informations qualitatives

Les pratiques agricoles ont été transformées en variables qualitatives par la création des classes. Toutes les pratiques agricoles n'ont pas été retenues pour effectuer cette analyse. Le recours au désherbage chimique sur le lavandin (DC\_lav) a été supprimé, puisque redondant avec l'IFT. En effet, toute parcelle ayant un IFT supérieur à zéro a reçu au moins un herbicide. La réalisation d'une ACM (analyse de comparaisons multiples), équivalent d'une ACP sur des variables qualitatives, a permis d'écartier d'autres pratiques. Le recours aux insecticides entre 2012 et 2016 et depuis 2017 ont été éliminés car exprimant peu de variance sur les deux principaux axes de l'ACM. L'information des groupes de sol a été conservée pour cette analyse afin de voir si l'interaction avec les pratiques avait un effet sur les indicateurs de qualité. L'analyse a été faite en distinguant les pratiques anciennes et récentes puis en fusionnant ces pratiques, ce qui permet de travailler sur des échelles de temps différentes.

Le modèle obtenu par sélection automatique dans l'analyse de redondance est composé de deux pratiques : le nombre de binages sur l'ensemble de la parcelle (Nb\_BIN\_p) et la quantité de matière organique apportée entre 2012 et 2016 (MO\_12\_16). Ce modèle explique 56 % de la variance des indicateurs de qualité du sol, 32.48 % étant expliqués par la première pratique et 14.7 % par la seconde. L'interaction entre les deux variables explique 8.8 % de la variance des indicateurs de qualité. Les représentations graphiques (Figure 17 A et B) permettent d'interpréter l'impact de ces pratiques sur les indicateurs. Les indicateurs physico-chimiques sont positionnés à droite de l'axe vertical et les indicateurs biologiques à gauche de cet axe. Les parcelles sur lesquelles peu de binages ont été faits à la fois sur le rang et l'inter-rang ont de meilleurs indicateurs biologiques. Les indicateurs les plus impactés sont l'abondance totale de nématodes, les potentiels de minéralisation, le pourcentage de MO libre et la BM en proportion de carbone organique. Les parcelles ayant subi davantage de binages sont majoritairement celles dont les valeurs de ces indicateurs biologiques sont les plus faibles.

L'interprétation de l'effet de l'apport de MO entre 2012 et 2016 est plus délicate. Les parcelles qui ont les indicateurs biologiques de qualité du sol les plus élevés ont reçu de la MO en quantité modérée. Les parcelles qui ont reçu le plus de MO n'ont pas toutes de meilleurs indicateurs biologiques. Le croisement des deux graphiques montre que les parcelles ayant les indicateurs biologiques les plus élevés sont celles qui ont reçu de la matière organique entre 2012 et 2016 et sur lesquelles peu de binages ont été effectués.

L'addition des IFT, des apports d'azote et des apports de MO avant lavandin et sur lavandin permet d'étudier l'effet de ces pratiques sur un pas de temps plus long. Le modèle obtenu comporte le nombre de binages effectués sur l'ensemble de la parcelle (Nb\_BIN\_p) et le nombre de labours pratiqués depuis 2011 (Labour). Le nombre de binages explique dans ce cas 39.8 % de la variance des indicateurs de qualité du sol et le nombre de labours 12.7 %. La représentation graphique (Figure 17 C) permet de dire qu'un nombre de labours important ne permet pas d'obtenir des indicateurs biologiques élevés. Cependant, le recours modéré au labour n'est pas incompatible avec des indicateurs biologiques élevés.

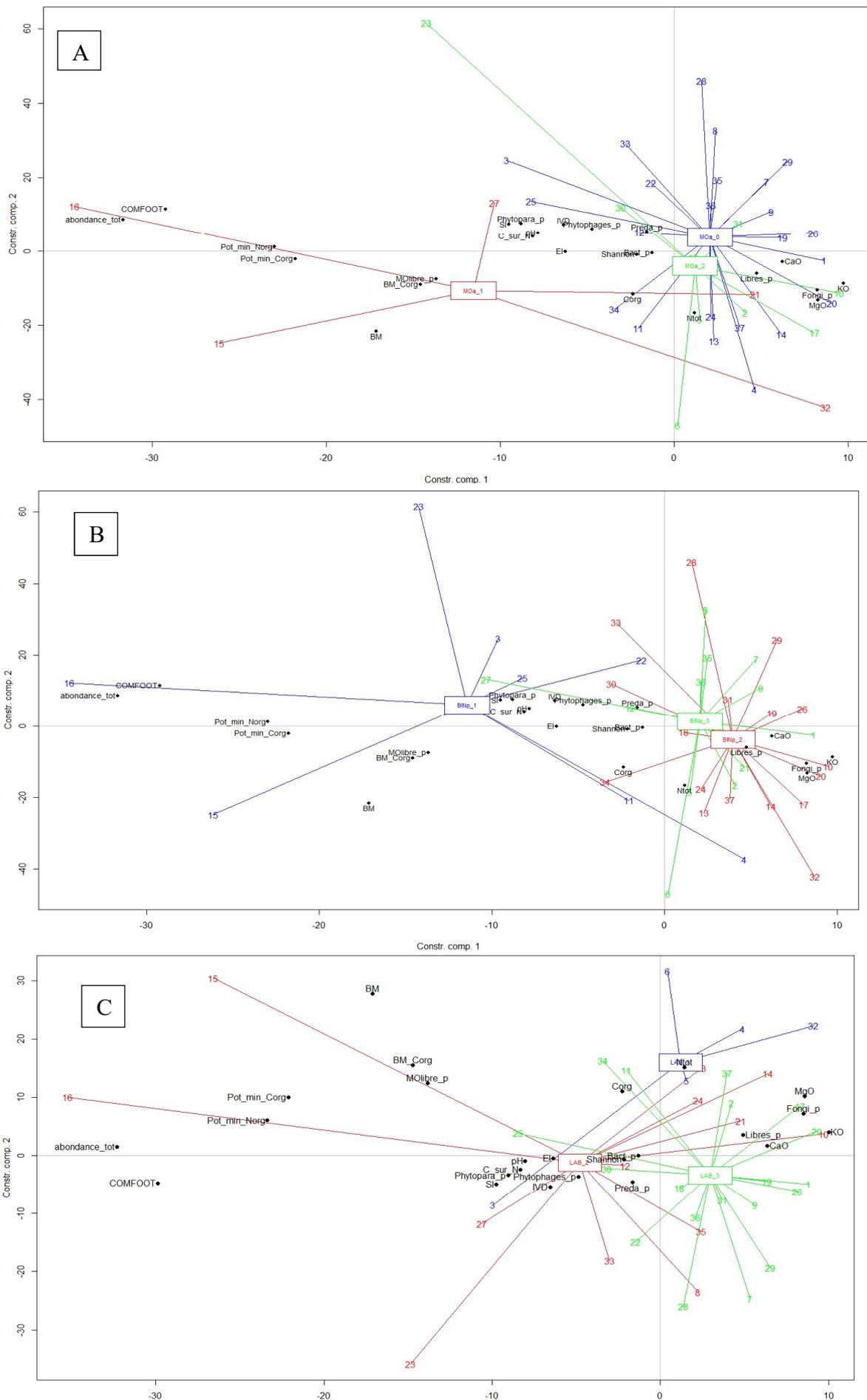


Figure 17 : Projection des parcelles et classement en fonction des pratiques après réalisation de la RDA des indicateurs de qualité du sol (variables à expliquer) et des pratiques agricoles (variables explicatives). A : représentation en fonction de l'apport de MO, bleu : classe MOa\_0, rouge : classe MOa\_1 ; vert : classe MOa\_2. B : représentation en fonction du nombre de binages à plein, bleu : classe BINp\_1, rouge : classe BINp\_2 ; vert : classe BINp\_3. C : représentation en fonction du nombre de labours, bleu : classe LAB\_1 ; rouge : classe LAB\_2 ; vert : classe LAB\_3. Les figures A et B résultent de l'analyse de l'impact des pratiques agricoles (anciennes et récentes distinctes) sur les indicateurs de qualité du sol. La figure C résulte de l'effet des pratiques anciennes et récentes fusionnées sur les indicateurs de qualité. Les parcelles sont identifiées par leur numéro. Les flèches permettant de montrer la contribution des indicateurs pour chaque axe ont été supprimées pour faciliter la lecture. Les indicateurs sont positionnés à l'extrémité des flèches théoriquement représentées.



La projection des parcelles et leur représentation selon la classe d'enherbement montre une distinction nette entre les deux groupes (Figure 18). L'axe horizontal de la projection est expliqué de façon positive par plusieurs indicateurs biologiques, principalement l'abondance totale de nématodes, l'indice COMFOOT, les potentiels de minéralisation du carbone et de l'azote, la BM et le pourcentage de MO libre. Les parcelles ayant reçu un enherbement sont projetées en majorité à la droite de l'axe vertical et se démarquent ainsi par des valeurs élevées pour ces indicateurs. L'enherbement est donc positivement corrélé à ces indicateurs.

L'apport d'azote entre 2012 et 2016 est projeté sur la gauche de la figure. Cette pratique est inversement corrélée à la plupart des indicateurs biologiques. Les parcelles qui ont reçu le plus d'azote sur cette période se démarquent plutôt par des valeurs d'indicateurs physico-chimiques élevées et des indicateurs biologiques plus faibles. Ce résultat indique que le travail du sol et l'apport de MO ne sont pas les seules pratiques à expliquer les indicateurs de qualité du sol. L'enherbement et l'apport d'azote expliquent également une part importante de leur variance.

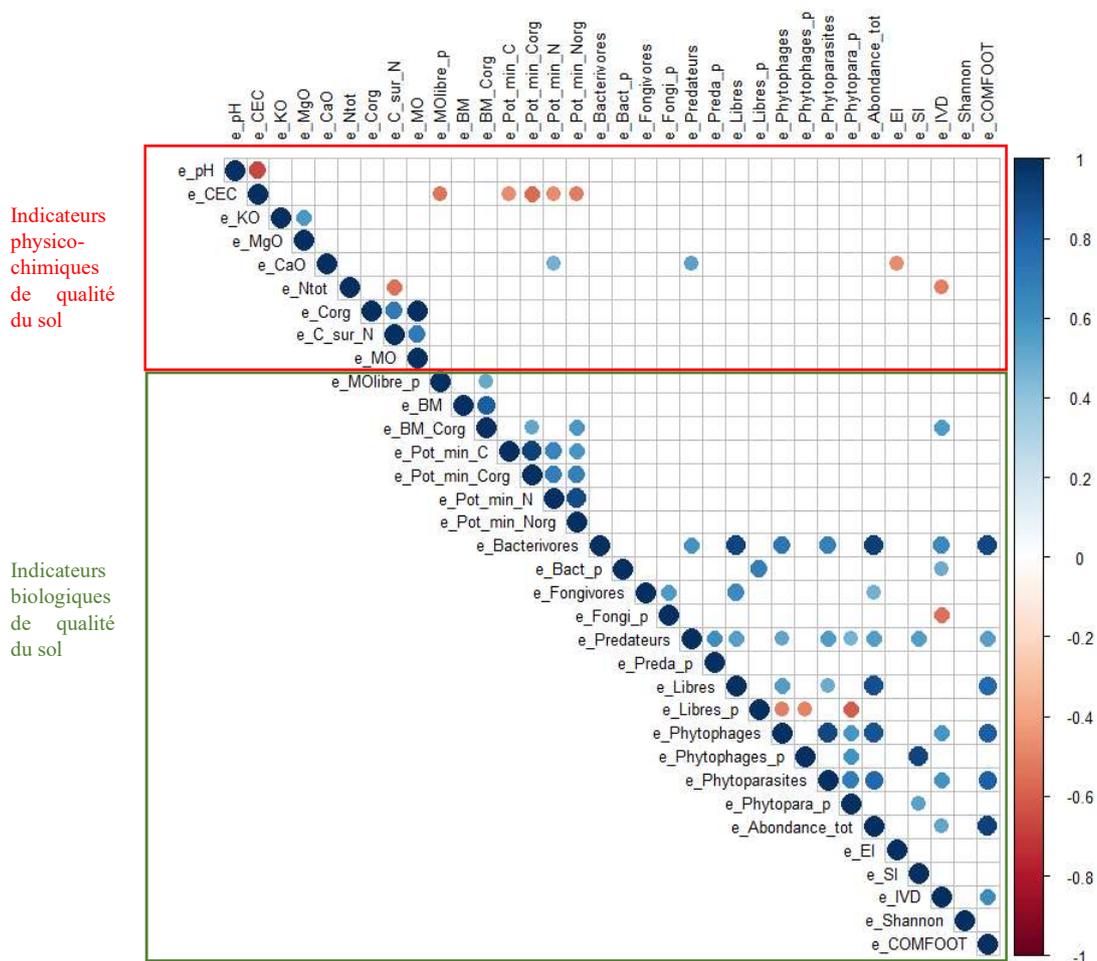


Figure 19 : Corrélogramme des taux de variation des indicateurs de qualité du sol entre 2017 et 2019. Les cercles bleus indiquent une corrélation positive et les cercles rouges une corrélation négative. Plus la couleur est intense et plus la corrélation est importante. Les corrélations significatives entre les taux de variations des indicateurs de qualité sont moins nombreuses qu'entre les indicateurs. Les indicateurs physico-chimiques de qualité du sol sont encadrés en rouge ; les indicateurs biologiques de qualité du sol sont encadrés en vert.

### III.3. Impact des types de sol et des pratiques sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol

#### III.3.a. Description et réduction du jeu de données

La mise à plat du jeu de données permet d'extraire trois informations principales sur l'évolution de la qualité du sol depuis 2017 (annexe 4). Chaque indicateur est concerné par une diminution pour certaines parcelles et une augmentation pour d'autres. Les extrêmes, moyennes et écarts types des taux de variation montrent que les indicateurs physico-chimiques ont moins évolué que les indicateurs biologiques. Les taux de variation les plus importants concernant les indicateurs physico-chimiques sont observés sur le pourcentage de MO libre (e\_MOlibre\_p) dont les valeurs sont comprises entre -0.43 et +0.45. Les autres indicateurs physico-chimiques ont des taux de variations compris entre -0.26 et +0.45. Les plus élevés sont observés sur les oxydes de potassium et de magnésium du fait des apports minéraux effectués sur les parcelles (respectivement +0.45 et +0.40).

Les indicateurs biologiques sont en baisse sur une majorité de parcelles, la médiane de la plupart étant négative. Les abondances de nématodes sont concernées par les baisses les plus importantes (le taux de variation moyen de l'abondance totale est de -0.65). Les relations constatées sur les indicateurs de qualité ne se retrouvent pas toutes sur les taux de variation. Le corrélogramme confirme ce constat (Figure 19). La réalisation d'une ACP montre que les taux de variations des abondances des groupes trophiques de nématodes sont redondants avec le taux de variation de l'abondance totale. Le potentiel de minéralisation du carbone (e\_Pot\_min\_C) est également redondant avec ce même potentiel de minéralisation exprimé en pourcentage de carbone organique (e\_Pot\_min\_Corg). Les flèches des potentiels de minéralisation de l'azote ne sont pas superposées. Les taux de variation restants se superposent peu et ceux qui sont peu explicatifs sur les deux premiers axes de l'ACP (Figure 20) le sont davantage sur les axes 3 et 4. Les taux de variation conservés sont donc ceux associés aux indicateurs utilisés pour l'analyse précédente sur la qualité du sol. Seul le taux de variation du potentiel de minéralisation de l'azote (e\_Pot\_min\_N) est ajouté à cette liste.

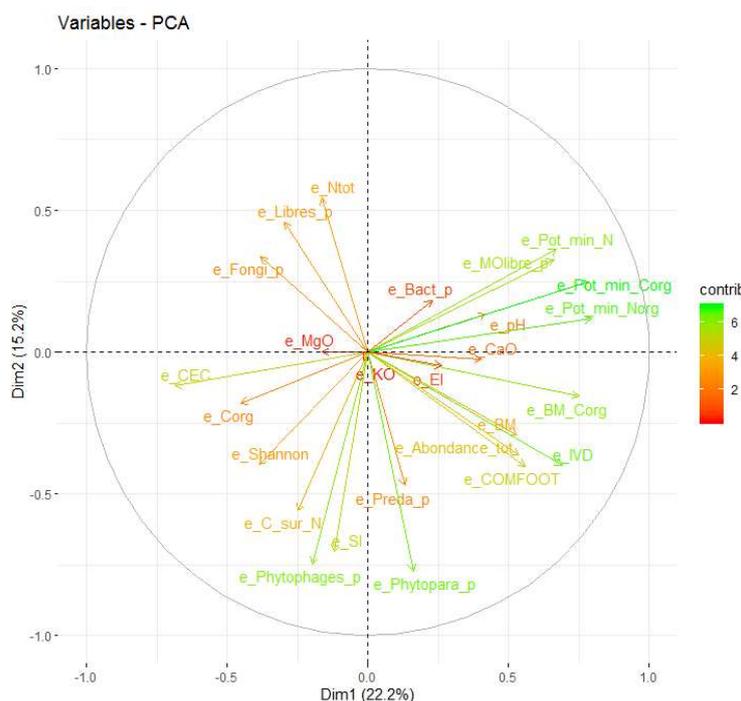


Figure 20 : Cercle de corrélation des taux de variations des indicateurs de qualité du sol retenus pour la RDA. La longueur et la couleur des flèches informent sur l'importance de la contribution des indicateurs dans la construction des axes. L'orientation des flèches indique si l'indicateur explique davantage l'axe horizontal ou vertical et si la corrélation est positive ou négative. Peu de flèches sont superposées ce qui indique peu de redondance d'information.

### III.3.b. Impact de l'enherbement et de l'apport de MO sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol sur les parcelles expérimentales du réseau Sol

L'enherbement et l'apport de MO ont fait l'objet d'expérimentations sur quatre parcelles du réseau Sol. Une observation globale du taux de variation de quelques indicateurs de qualité sur ces parcelles donne des informations à propos de l'impact de ces deux pratiques sur l'évolution de la qualité du sol. La présence d'un enherbement impacte davantage les indicateurs biologiques d'après les données sur les parcelles expérimentales. Les observations sont synthétisées dans le Tableau 4. Le faible nombre d'individus ne permet pas de traiter ces données de façon statistique.

Tableau 4 : Résultats de la comparaison de quelques indicateurs de qualité du sol entre les parcelles témoin et les parcelles expérimentales du réseau Sol. Parmi les parcelles témoin, l'une est naturellement enherbée mais a été binée plusieurs fois.

Indicateur	Moyenne des taux de variation		Description
	En parcelle témoin	En parcelle enherbée	
MO	0,01 (+/- 0,09)	0,19 (+/- 0,07)	Effet positif sur l'évolution de la MO observé sur les trois sites ; effet positif sur la proportion de MO libre observé sur un seul site
MOLibre_p	0,06 (+/- 0,21)	0,06 (+/- 0,31)	
BM	-0,2 (+/-0,13)	-0,06 (+/- 0,11)	La biomasse microbienne augmente de façon plus importante dans deux cas sur trois sur les parcelles enherbées. Diminution moins importante en parcelle enherbée sur le troisième site
Pot_min_C	-0,21 (+/- 0,25)	-0,06 (+/- 0,57)	Meilleure évolution du potentiel de minéralisation du carbone sur parcelle enherbée dans 2 cas sur 3. Le potentiel de minéralisation de l'azote diminue davantage ou augmente moins en parcelle enherbée
Pot_min_N	-0,01 (+/- 0,27)	-0,16 (+/- 0,36)	
Abondance_tot	-0,72 (+/- 0,33)	-0,29 (+/- 0,54)	L'abondance des nématodes diminue de façon moins importante sur les parcelles enherbées du fait d'une augmentation de l'abondance de phytophages
Libres	-0,80 (+/- 0,20)	-0,46 (+/- 0,43)	
Phytophages	-0,29 (+/- 0,80)	0,48 (+/- 1,34)	
EI	-0,1 (+/- 0,16)	-0,09 (+/- 0,33)	Effet globalement neutre sur l'évolution mais les valeurs de ces indicateurs sont plus élevées en parcelles expérimentales. L'IVD augmente de façon plus importante en milieu enherbé.
SI	6,37 (+/- 7,80)	2,36 (+/- 1,42)	
IVD	0,25 (+/- 0,84)	0,63 (+/- 0,39)	
Shannon	0,14(+/- 0,04)	0,16 (+/- 0,09)	
CEC	-0,01 (+/- 0,22)	-0,05 (+/- 0,11)	L'effet de l'enherbement est faible sur l'évolution des indicateurs physico-chimiques
KO	0,19 (+/- 0,15)	0,1 (+/- 0,15)	
MgO	0,12 (+/- 0,11)	0,09 (+/- 0,13)	
CaO	0,03 (+/- 0,02)	0,01 (+/- 0,07)	

L'apport de MO n'a été testé que sur une parcelle. Une diminution de la quantité de carbone organique est observée sur la parcelle expérimentale. Celle-ci en contient cependant plus que la parcelle témoin. La biomasse microbienne est stable sur la zone expérimentale mais diminue légèrement sur la zone témoin. Les potentiels de minéralisation diminuent sur les deux modalités mais de façon plus importante sur la partie témoin. Le même phénomène est observé à propos de l'abondance totale de nématodes. La quantité d'oxydes de potassium

et de magnésium augmente davantage sur la parcelle expérimentale. L'effet est inversé pour l'oxyde de calcium alors qu'aucune différence n'est observée pour la CEC. Ces observations montrent que les indicateurs de qualité du sol évoluent dans le même sens de façon général entre les parcelles témoins et expérimentales. Les deux pratiques semblent cependant favoriser leur augmentation ou limiter leur diminution. L'enherbement entrainerait une augmentation plus importante des indicateurs biologiques.

### III.3.c. Impact du sol et des pratiques sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol

Pour cette analyse, le nombre de parcelles est réduit à 31, parcelles sur lesquelles des prélèvements ont été faits en 2017 et 2019. Comme précédemment, l'effet du sol sur l'évolution des indicateurs de qualité a d'abord été analysé indépendamment des pratiques agricoles. Il en ressort de la même façon que le type de sol joue peu sur l'évolution des indicateurs de qualité. Ce paramètre influence les indicateurs physico-chimiques de façon significative ( $p$ -value = 0.02). Le classement des parcelles en groupes de sol ne permet cependant d'expliquer que 12.4 % de l'inertie de ces indicateurs. L'effet du type de sol sur les indicateurs biologiques seuls et sur les indicateurs biologiques et physico-chimiques réunis est non significatif ( $p$ -value respectives de 0.55 et 0.26).

Les pratiques ont ensuite été ajoutées à l'analyse. Le recours au désherbage chimique sur le lavandin (DC\_lav) a été retiré des pratiques comme précédemment. L'usage d'insecticides sur les précédents de lavandin et sur la culture de lavandin ont été conservés afin de n'exclure aucune explication possible de l'évolution de la qualité du sol. Le modèle obtenu n'est constitué que d'une seule pratique qui est la présence d'un enherbement sur la parcelle. Il n'explique cependant que peu de variance de l'évolution des indicateurs (7.45 %). Une tentative a été faite en excluant cette pratique du jeu de données. Aucun modèle n'a alors été trouvé pour expliquer les écarts des taux de variation entre parcelles.

Afin de voir si un modèle plus explicatif existe, l'analyse a également été faite à partir des valeurs quantitatives de texture, de teneur en calcaire et de certaines pratiques (nombre de labours, apports de MO et d'azote anciens et récents, IFT ancien et récent, le nombre de désherbages mécaniques et le nombre de passages sur la culture de lavandin). Les autres pratiques ont été conservées sous forme qualitative. Le modèle obtenu ne contient également qu'une seule variable explicative, l'apport de MO entre 2012 et 2016. Ce modèle explique 10.3 % de la variance de l'évolution des indicateurs de qualité des sols.

La Figure 21 montre la corrélation des deux pratiques identifiées sur les taux de variation des indicateurs de qualité du sol. La présence d'un enherbement est positivement corrélée à 15 indicateurs et négativement corrélée à 11 indicateurs. La corrélation négative sur les pourcentages de nématodes bactériovores, fongivores et libres découle directement de la forte corrélation positive avec les pourcentages de nématodes phytophages et phytoparasites. Les prédateurs sont positivement corrélés à l'enherbement. L'indice de structure SI est lui aussi fortement corrélé à cette pratique de façon positive. La corrélation est cependant négative pour les potentiels de minéralisation, la biomasse microbienne et l'azote total.

L'effet de l'apport de MO entre 2012 et 2016 sur les indicateurs de qualité est proche de celui de l'enherbement. 14 indicateurs y sont corrélés positivement, parmi lesquels 13 sont corrélés positivement à l'enherbement.

Ces modèles expliquent peu l'évolution des indicateurs de qualité dans le temps mais ils montrent que l'enherbement et l'apport de MO jouent un rôle et ont des effets similaires sur l'évolution de la qualité du sol. Cependant, le type de sol n'impacte que peu l'évolution des indicateurs de qualité du sol.

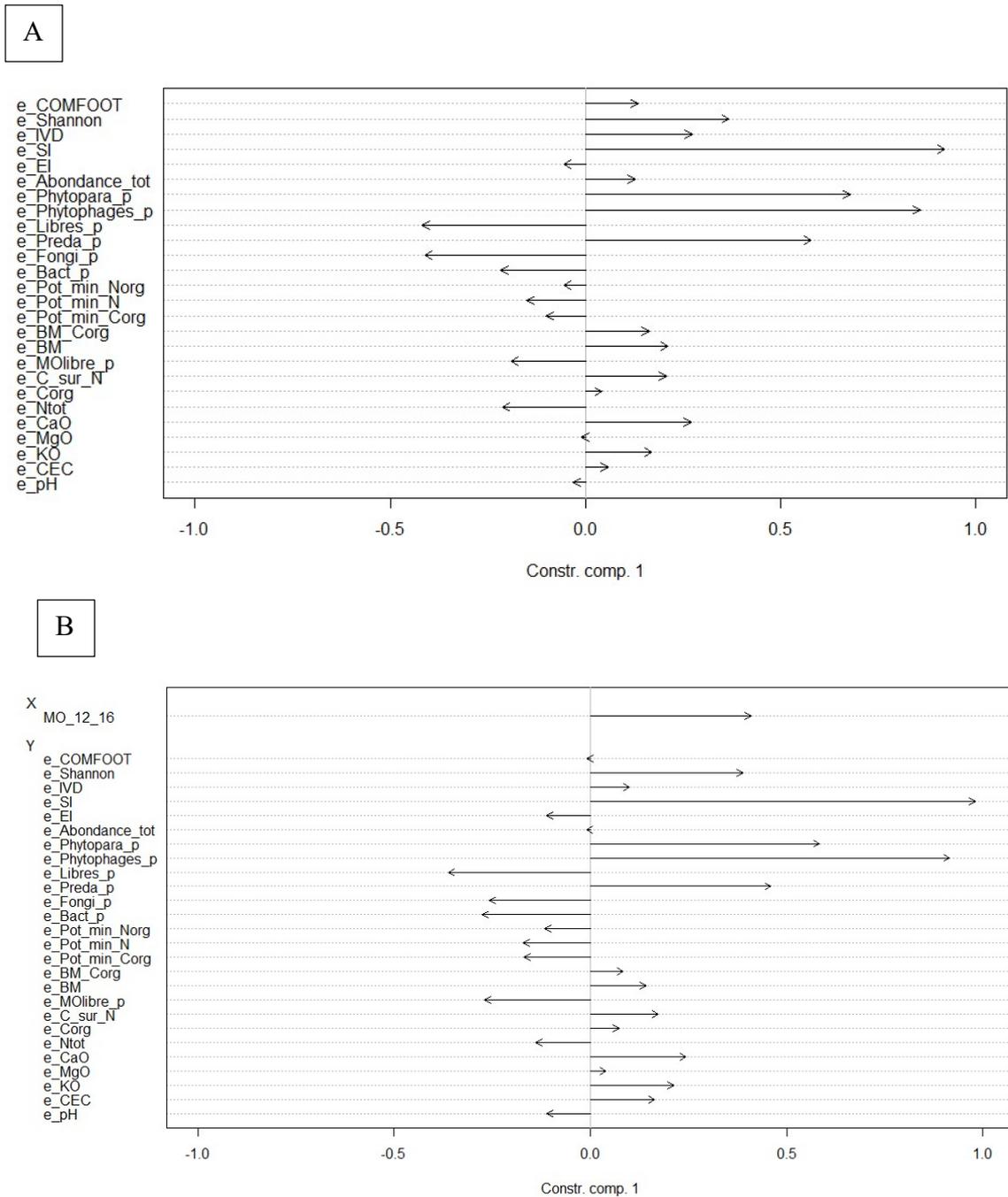


Figure 21 : Effet de la présence d'enherbement inter-rang (A) et de l'apport de MO entre 2012 et 2016 (B) sur l'évolution des indicateurs de qualité du sol. Le résultat A est obtenu après analyse de l'effet des pratiques en données qualitatives sur les taux de variation des indicateurs de qualité du sol. Le résultat B est obtenu après analyse de l'effet des pratiques en données ququantitatives et qualitatives sur les taux de variation des indicateurs de qualité du sol.

### III.1. Impact du type de sol, des pratiques et de la qualité du sol sur l'état sanitaire des parcelles de lavandin

L'état sanitaire est bon pour une grande majorité des parcelles du réseau Sol. Seules deux parcelles se distinguent par des taux de plants sains faibles (64 et 66 %) alors que la moyenne des autres parcelles est de 92 %. Ces deux parcelles ont été retirées du jeu de données. L'effet est analysé sur les trois variables d'état sanitaire que sont le pourcentage de plants sains, le pourcentage de plants en classe 2 et le pourcentage de plants en classe 3 et 4.

Les expérimentations menées en enherbement permettent de constater un effet positif de cette pratique sur l'état sanitaire (Tableau 5). Lorsque la pression du dépérissement est importante (parcelle n°17, 78 % de plants sains), l'état sanitaire est amélioré en présence d'enherbement (91,5 % de plants sains sur la parcelle expérimentale n°18). Sur les sites où la pression de dépérissement est faible, on constate un effet modéré, voire nul (couples de parcelles 15/16 et 25/26). Aucun effet n'est constaté dans le cas d'apport de MO, les parcelles témoin et expérimentale ayant toutes les deux un pourcentage de plants sains élevé. L'analyse statistique globale permet de tester l'effet de ces pratiques sur un échantillon plus conséquent.

Tableau 5 : Comparaison de l'état sanitaire sur les parcelles expérimentales du réseau Sol. Les parcelles témoin sont celles sur lesquelles la pratique n'a pas été appliquée.

Parcelles	Classe 1 (plants sains)	Classe_2	Classe_3_4
Apport de MO			
TEMOIN 14	0,955	0,03	0,015
EXPE 13	0,96	0,035	0,005
Enherbement			
TEMOIN (15)	0,935	0,06	0,005
EXPE (16)	0,96	0,04	0
TEMOIN (17)	0,78	0,04	0,18
EXPE (18)	0,915	0,08	0,005
TEMOIN (26)	0,985	0,005	0,01
EXPE (25)	0,984	0,01	0,006

Le nombre de variables explicatives a été réduit afin de pouvoir en réaliser la sélection automatique. L'effet de la qualité du sol sur l'état sanitaire du lavandin a fait l'objet d'une première analyse, au cours de laquelle les indicateurs maximisant le  $R^2$  sur les trois variables d'état sanitaire ont été conservés : CEC ; KO ; CaO ; MOlibre\_p ; BM\_Corg ; Bact\_p ; Libres\_p ; Abondance\_tot ; IVD. Ces mêmes indicateurs ont été retenus pour réaliser l'analyse globale. Concernant les pratiques agricoles, le désherbage chimique (DC\_lav) a été retiré comme pour les analyses précédentes. Le nombre de passages sur la parcelle a également été retiré a priori pour limiter le nombre de variables. L'information contenue dans cette variable est partiellement reprise par le nombre de binages et l'IFT sur le lavandin. Le modèle final comporte trois variables : i) l'apport de MO entre 2012 et 2016 (MO\_12\_16) qui explique 31.6 % de la variance, ii) la rotation (Rotation) qui explique 18.3 % de la variance, iii) le pourcentage de MO libre (MOlibre\_p) qui explique 9.1 % de la variance des variables

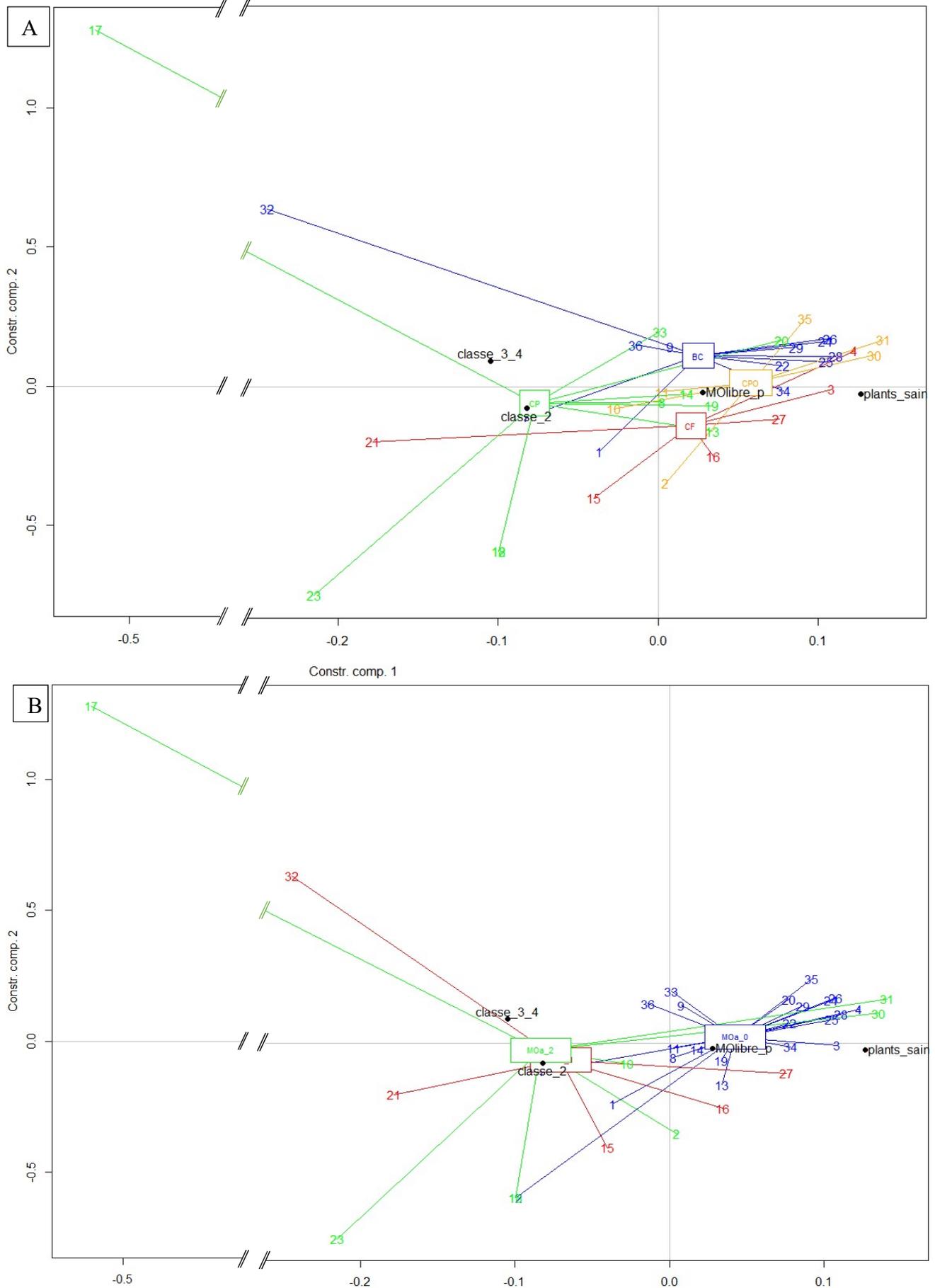


Figure 22 : Projection des parcelles et classement en fonction des pratiques sélectionnées automatiquement au cours de la RDA permettant d'expliquer l'état sanitaire des parcelles étudiées. A : Classement des parcelles selon la rotation (BC : blé et céréales, CF : dominante culture fourragère, CP : céréales et plantes à parfum, CPO : céréales, pois et oléagineux) ; B : Classement des parcelles selon l'apport de MO entre 2012 et 2016. Les parcelles sont identifiées par leur numéro. Les flèches permettant de montrer la contribution des variables quantitatives pour chaque axe ont été supprimées pour faciliter la lecture. Les variables quantitatives sont positionnées à l'extrémité des flèches théoriquement représentées. Un facteur 0.9 a été appliqué sur la projection des classes d'état sanitaire afin de toutes les visualiser.

d'état sanitaire. Le modèle global explique ainsi 59 % de la variance. Les classes de rotation BC, CF et CPO sont corrélées positivement à la classe\_1 d'état sanitaire (Figure 22 A). Ces rotations favorisent un meilleur état sanitaire. La classe CP (céréales et plantes à parfum) est davantage corrélée aux variables classe\_2 et classe\_3\_4, ce qui indique que cette pratique entraîne un état sanitaire du lavandin moins bon. Les parcelles ayant supportées cette rotation n'ont cependant pas toutes un état sanitaire dégradé. La Figure 22 B montre que l'apport de MO entre 2012 et 2016 est inversement corrélé à une proportion élevée de plants sains. Certaines parcelles ayant reçu de la MO entre 2012 et 2016 ont cependant un état sanitaire satisfaisant (parcelles 2, 16 et 27) voire très bon (parcelles 30 et 31). Les parcelles n'ayant pas reçu de matière organique ont majoritairement, quant à elles, un très bon état sanitaire. Le pourcentage de MO libre (MOlibre\_p) est positivement corrélé à un pourcentage de plants sains élevés. Une proportion importante de MO libre serait donc favorable à un bon état sanitaire du lavandin. Cette opposition entre les parcelles ayant reçu de la matière organique avec celles qui n'en ont pas reçu et qui ont des taux de MO libre plus important s'explique par le fait que la MO apportée est sous forme compostée et donc stable, ce qui va augmenter la proportion de MO sous cette forme et par conséquent réduire la part de MO libre dans le sol.

### III.2. Analyse économique

Les informations récoltées au cours des enquêtes ont permis de calculer le produit, les charges et la marge directe des parcelles du réseau Sol pour l'année 2018. La marge brute n'a pu être calculée dans le cas de deux parcelles par manque de données suffisamment précises. Les parcelles dont le taux de dépérissement était très élevé n'ont pas été intégrées dans cette analyse.

Les frais de récolte et de distillation sont très hétérogènes du fait d'un amortissement plus ou moins avancé du matériel. Le coût de distillation fourni par les agriculteurs incluait les coûts de transports et de coupe du lavandin pour certaines parcelles et pas pour d'autres. Cette analyse ayant pour objectif de comparer les données économiques sur des parcelles dont les pratiques sont différentes, le coût de distillation du kilogramme d'huile essentielle de lavandin a été moyenné pour l'ensemble des parcelles afin de ne pas donner trop de poids à une activité indispensable à l'obtention du produit final.

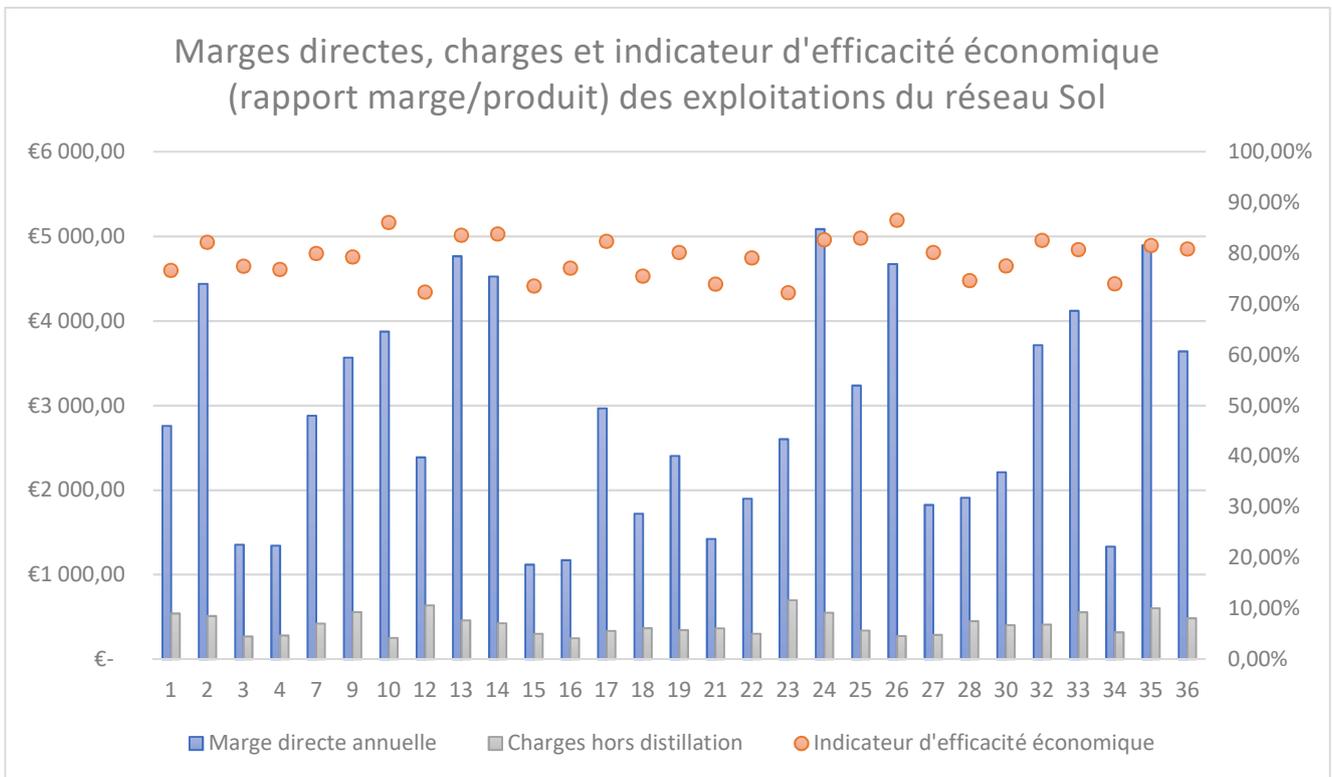


Figure 23 : Représentation graphique de la marge directe, des charges hors frais de distillation et de l'indice d'efficacité économique pour les parcelles du réseau Sol. La lecture des valeurs de marge directe et des charges se fait sur l'axe de gauche. La valeur d'efficacité économique se lit sur l'axe de droite. Les parcelles n° 8, 20, 29 et 31 n'apparaissent pas car avaient les mêmes résultats économiques que les parcelles n° 7, 19, 28 et 30 respectivement. Les parcelles d'un même couple respectivement ont fait l'objet des mêmes pratiques en culture de lavandin et ont obtenu les mêmes rendements.

Les résultats (Figure 23) montrent une forte hétérogénéité des rendements, allant de 40 kg à 205 kg d'huile essentielle produite par hectare de culture. Cette hétérogénéité se retrouve dans les marges calculées. Les écarts de rendement les plus importants sont observés entre producteurs bio et conventionnels, bien que le rendement varie du simple au double parmi les producteurs conventionnels. La marge directe moyenne des parcelles en conventionnel est de 3065 € par hectare (les extrêmes allant de 491 € à 5085 € par hectare). Le montant moyen de leurs charges s'élève à 775 € par hectare. Les producteurs bio ont une marge directe moyenne de 1373€ pour des charges moyennes à hauteur de 417 €, ce qui est presque la moitié du montant moyen chez les conventionnels. L'efficacité économique est cependant élevée pour l'ensemble des parcelles, le rapport entre la marge directe et le produit se situant autour de 0.8 pour chacune d'entre elles. L'efficacité économique n'est donc pas liée à une marge directe très élevée mais à un équilibre entre les charges et le produit.

## IV. Discussion

Les résultats obtenus montrent que les pratiques agricoles jouent un rôle important sur la qualité des sols et l'état sanitaire des parcelles de lavandin du plateau de Valensole. L'effet des pratiques agricoles sur la qualité des sols est prépondérant à celui du type de sol, ce paramètre n'apparaissant dans aucun des modèles explicatifs lorsque son effet est étudié en même temps que celui des pratiques agricoles. L'étude indépendante de l'effet du type de sol sur les indicateurs de qualité du sol indique néanmoins que cela influe sur les indicateurs physico-chimiques. Ce paramètre reste donc nécessaire pour aider à l'interprétation des indicateurs physico-chimiques. L'état sanitaire semble quant à lui être sous l'influence combinée des pratiques agricoles et de la qualité du sol.

La matière organique est un élément indispensable à une bonne qualité du sol. Elle joue un rôle capital dans la stabilité structurale, la rétention d'eau et l'activité biologique. La méta-analyse réalisée par Ren *et al* en 2019 révèle que l'apport de MO, sous forme de fumier, a pour conséquence une biomasse microbienne plus importante qu'avec une simple fertilisation minérale. Il a également été montré que l'utilisation de produits résiduels organiques favorise la diversité des organismes présents dans le sol (ADEME, 2017). Il n'est donc pas surprenant de retrouver cette pratique parmi les variables retenues comme ayant une forte incidence sur les indicateurs de qualité du sol. La projection des parcelles et des variables du modèle obtenu pour expliquer la variance des indicateurs de qualité du sol précise que les parcelles sur lesquelles un apport modéré de MO a été fait ont des indicateurs biologiques élevés (abondance totale de nématodes, potentiels de minéralisation, pourcentage de MO libre et biomasse microbienne) comparativement aux parcelles qui ont reçu de fortes quantités de MO ou qui n'ont reçu aucun apport. Or, les apports modérés ont été faits à partir d'engrais organiques, alors que les apports plus conséquents ont été faits avec du compost de paille de lavandin, assimilés à des amendements organiques. La MO contenue dans les engrais organiques est plus labile que celle contenue dans les composts de pailles de lavandin, et donc plus facilement minéralisable par les microorganismes. Les potentiels de minéralisation sont ainsi augmentés, et les microorganismes, accédant à une source d'énergie plus facilement dégradable, se développent davantage, favorisant également l'augmentation de la population de nématodes. Par ailleurs, la présence de matière organique libre (fraîche) dans le sol est corrélée à une proportion importante de plants sains dans la parcelle. La MO libre étant une source d'énergie pour la biomasse microbienne, l'hypothèse suivante peut être émise : l'effet positif de la MO libre sur le fonctionnement biologique rend le milieu plus résilient et moins propice à la présence de ravageurs. La mise à disposition de matière facilement dégradable favorise l'augmentation de la biomasse microbienne mais aussi sa diversité en permettant le développement d'espèces colonisatrices impliquées dans les processus de dégradation rapide de la MO. Une amélioration de la diversité microbienne a pour conséquence l'occupation d'une plus grande diversité d'habitats ce qui restreint les niches disponibles pour les parasites. Cette hypothèse doit cependant être vérifiée. De plus, il semblerait que l'apport de MO sous forme de compost, correspondant plutôt à de la MO stable, soit négativement corrélé à l'état sanitaire. Ce résultat demande à être étudié plus en détail.

L'état sanitaire de la culture est également expliqué par la succession culturale avant le lavandin. Plus les précédents culturaux sont diversifiés, meilleur est l'état sanitaire. Le lien entre la répétition des cultures de lavandins sur une même parcelle et un dépérissement important est une hypothèse émise dès 1989 par Devaux, technicien au CEAM (Centre

d'expérimentation en agriculture de montagne) (ITEIPMAI Station Sud-est, 1993). La monoculture de lavandin favorise la prolifération du ravageur, la cicadelle, vecteur du phytoplasme qui provoque le dépérissement. Le modèle linéaire obtenu indique en effet que les parcelles sur lesquelles une rotation à base de céréales et plantes à parfum a été réalisée ont un état sanitaire plus dégradé que les autres. Une nuance est à apporter car les plantes à parfum ne regroupent pas que la culture du lavandin. De la sauge sclérée ou du fenouil ont été cultivés sur certaines parcelles appartenant à cette classe de rotation. De plus, la proportion de plants sains sur les parcelles du réseau sol est majoritairement supérieur à 90 % ce qui entraîne une faible variance. Il est nécessaire de poursuivre les analyses dans les prochaines années afin de voir si le dépérissement évolue et si les résultats obtenus sont confirmés.

Dans le modèle issu de la sélection automatique associée à une RDA, l'enherbement n'apparaît pas comme pratique limitant la dégradation de l'état sanitaire. Pourtant, sur l'une des parcelles expérimentales, dont la zone témoin subit une pression forte du dépérissement, la différence d'état sanitaire est nettement marquée en la faveur de la zone enherbée. Cette pratique semble donc avoir une incidence sur l'amélioration de l'état sanitaire. L'absence de cette pratique dans le modèle explicatif de l'état sanitaire peut s'expliquer par le faible nombre de parcelles sur lesquelles un enherbement a été pratiqué (10 sur 38) et la faible variance d'état sanitaire sur l'ensemble des parcelles. La principale hypothèse émise quant à l'impact de l'enherbement est un effet barrière provoqué par la présence d'une culture en inter-rang qui empêche l'envol de la cicadelle véhiculant le phytoplasme. Il est également possible que les pieds de lavandins soient rendus plus résistants suite à la présence d'une culture en inter-rang. Celle-ci va modifier le milieu et concurrencer la culture principale, rendant ainsi les plants de lavandin plus vigoureux. L'hypothèse de la création d'un nouvel habitat pouvant abriter des auxiliaires est également émise par les instituts techniques (CRIEPPAM, Bio 04). Pour confirmer ces premiers constats et ces hypothèses, il faudra inciter les agriculteurs à développer l'enherbement de leur parcelle de lavandin au sein du réseau Sol.

Aussi, l'enherbement contribue à un apport de MO fraîche au sol puisque les résidus sont laissés sur l'inter-rang après destruction. Or, la présence de MO libre (fraîche), est positivement corrélée à un pourcentage de plants sains élevé. Ce lien plaide de nouveau pour un effet positif de l'enherbement sur l'état sanitaire. L'effet de l'enherbement n'a cependant été étudié que de manière qualitative, les quantités de MO apportées ne prenant pas en compte ces restitutions de MO fraîche. Il serait intéressant d'étudier l'effet de l'enherbement de manière quantitative en évaluant la quantité de matière organique libre apportée par type de couvert végétal et l'impact sur la qualité du sol et de l'état sanitaire.

La présence d'enherbement inter-rang explique également une variance importante des indicateurs de qualité du sol. Salome *et al* ont montré en 2016 que la présence d'un enherbement inter-rang, même temporaire, en culture de vigne était favorable à une quantité plus importante de carbone organique d'origine microbienne. Dans notre cas, l'impact semble être positif sur davantage d'indicateurs biologiques, principalement sur l'abondance totale de nématodes, l'indice COMFOOT (caractérisant l'activité de la population de nématodes), les pourcentages de minéralisation, le pourcentage de MO libre et la biomasse microbienne. La restitution de MO fraîche après destruction de l'enherbement peut en être l'explication. L'hypothèse de la création d'un milieu plus favorable à l'activité biologique peut également être émise. La présence de la culture modifie le microclimat en favorisant un taux d'humidité plus important ; les racines représentent une source de MO pour les microorganismes et

fragmentent le sol, entraînant ainsi une meilleure oxygénation de l'écosystème, ce qui permet une meilleure minéralisation. L'enherbement entraîne aussi une complexification biologique du milieu puisqu'une augmentation de l'indice de stabilité SI est observée sur ces mêmes parcelles. Ces effets se retrouvent sur l'évolution des indicateurs de qualité, les mêmes indicateurs étant impactés positivement, hormis les potentiels de minéralisation et le pourcentage de MO libre. Pour comprendre cette absence d'effet positif de l'enherbement sur l'évolution de ces deux indicateurs, les données brutes ont été observées. Il est alors possible de remarquer que certaines des parcelles ayant été enherbées avaient des valeurs très élevées de potentiels de minéralisation. Les valeurs 2019 sont inférieures à 2017 sur ces parcelles mais restent parmi les plus élevées du jeu de données grâce à l'enherbement.

Parmi les pratiques étudiées, l'apport de MO et l'enherbement ont donc des effets positifs sur les indicateurs biologiques de qualité du sol, leur évolution. L'enherbement inter-rang et une proportion élevée de MO libre ont aussi un effet bénéfique sur l'état sanitaire du lavandin. Néanmoins, les résultats ont révélé l'effet négatif de certaines pratiques comme le travail du sol, sur la qualité du sol et l'état sanitaire du lavandin.

En effet, limiter le nombre de binages à plein serait profitable sur le plan biologique en favorisant l'abondance de nématodes, l'indice COMFOOT, les potentiels de minéralisation, le pourcentage de MO libre et la biomasse microbienne. Le travail du sol est responsable d'une modification de l'écosystème sol en impactant la diversité des organismes, leur abondance et leurs activités ((Altieri, 1999), cité dans (Bouthier *et al*, 2016)) en les blessant ou les tuant directement ((Roger-Estrade *et al*, 2010), cité dans (Bouthier *et al*, 2016)). Une biomasse et une activité microbiennes plus importantes ont été observées sur de nombreux sites en absence de travail du sol ou avec un travail du sol léger en comparaison à des sites où un travail du sol important a été pratiqué (Zuber *et* Villamil, 2016).

Le labour fait également partie des pratiques qui impactent la qualité du sol. Des études ont d'ores et déjà montré l'effet négatif de cette pratique sur l'abondance des bactéries et des champignons dans le sol (ADEME, 2017), effet que l'on retrouve dans nos résultats. Un recours excessif au labour (5 à 6 entre 2011 et 2016) limite l'activité biologique alors qu'un nombre modéré de labours (2 à 4 sur la même période) favorise une biomasse microbienne et une abondance de nématodes plus importantes, des potentiels de minéralisation plus élevés, ainsi que de meilleurs indices d'enrichissement (EI), de stabilité (SI) et de voie de décomposition (IVD), traduisant respectivement des flux de nutriments plus importants, un réseau trophique plus complexe et une plus grande proportion de bactéries par rapport aux champignons. Le labour, en tant que pratique de travail du sol, perturbe le milieu et agresse les organismes qui y vivent. Limiter la fréquence de labour permet donc le développement d'organismes sensibles aux perturbations et donc une meilleure diversité biologique.

L'apport d'azote entre 2012 et 2016, tout comme le travail du sol, l'enherbement et l'apport de matière organique, explique, lui aussi, une part de la variance des indicateurs de qualité du sol. La quantité d'azote apportée au cours de cette période est globalement plus importante sur l'ensemble des parcelles qu'au cours des années 2017, 2018 et 2019 (moyenne de 450 kg/ha entre 2012 et 2016 contre 51 kg/ha entre 2017 et 2019). Cela peut expliquer le fait que les apports anciens soient ressortis statistiquement comme expliquant davantage les indicateurs de qualité du sol que les apports récents. Les parcelles ayant reçu le plus d'azote

sont celles qui ont les indicateurs physico-chimiques les plus élevés, parmi lesquels on retrouve les oxydes de potassium et de magnésium. Un lien avec ces derniers indicateurs peut être justifié par le fait que les apports d'azote sont effectués sous forme minérale et souvent associés à du phosphore, du potassium et du magnésium dans les fertilisants. Cette pratique est cependant opposée aux indicateurs biologiques de qualité du sol. Aucune relation directe ne permet a priori d'expliquer cette opposition (C. Villenave, conversation personnelle du 02 septembre 2019). Néanmoins, il se trouve que les parcelles sur lesquelles un apport important d'azote a été fait entre 2012 et 2016 ont également subi un nombre moyen ou élevé de binages à plein et n'ont, pour la plupart, pas été enherbées. Or, l'absence d'enherbement et de fréquents binages à plein ont des effets négatifs sur plusieurs indicateurs biologiques de la qualité du sol. L'apport d'azote cumulé à d'autres pratiques défavorables aux indicateurs biologiques justifierait cette corrélation négative avec les indicateurs biologiques. L'interaction entre l'enherbement et l'apport d'azote explique d'ailleurs 12,5 % de la variabilité des indicateurs de qualité du sol. Une relation existe donc entre ces deux pratiques.

Beaucoup d'éléments ont été pris en compte dans ces analyses, mais tous n'ont pas été intégrés. C'est le cas du facteur climat dont l'effet sur la qualité du sol est montré. Valé *et al* montrent en 2011 que le contexte pédoclimatique impacte davantage les indicateurs de qualité biologique du sol que la rotation. La température et l'humidité jouent aussi un rôle important dans le processus de minéralisation (Pansu & Sarmiento, 2009). Les conditions climatiques affectent également l'effet des pratiques agricoles : Reeves, dans son article de 1997, rappelle que l'apport de MO et le recours limité au labour impactent davantage la qualité du sol en milieu chaud et humide qu'en milieu sec. En effet, l'humidité est un facteur indispensable à la vie du sol. Or, les prélèvements de sol ont été effectués à la fin d'un épisode hivernal sec, ce qui a pu avoir un effet négatif sur l'activité biologique des sols (C. Villenave, conversation personnelle, 17 juillet 2019). Ce facteur peut expliquer en partie la forte baisse constatée sur l'abondance des groupes trophiques de nématodes (Elisol Environnement, 2019).

Des indicateurs permettant de calculer une note globale de qualité du sol existent, comme le GISQ (global indicator of soil quality) ou l'IBQS (Indicateur biologique de la qualité des sols). Il aurait été possible d'affecter une note globale à chacune des parcelles, ce qui aurait présenté l'intérêt de donner à l'agriculteur une indication synthétique sur l'état de son sol. Mais ces notes obligent souvent à prioriser certains indicateurs. Elles introduisent ainsi une plus grande part de subjectivité dans l'analyse des résultats. Il nous a semblé plus pertinent d'étudier d'abord l'effet des pratiques sur un panel d'indicateurs de qualité de sol, afin de discerner les indicateurs les plus sensibles. Ce premier travail étant fait, il pourrait être envisagé par la suite de créer un indicateur de synthèse afin d'attribuer une note globale à chaque parcelle.

## CONCLUSION

L'évaluation de la qualité du sol est une tâche complexe qui demande d'identifier précisément le contexte afin de sélectionner les propriétés du sol à évaluer. Dans ce contexte agropédoclimatique qu'est le plateau de Valensole, en culture de lavandin, il a été choisi de s'intéresser à des indicateurs physico-chimiques et biologiques de la qualité du sol traduisant sa capacité à fonctionner naturellement et à remplir, de façon autonome, ses fonctions productrices (fournir aux plantes l'eau et les minéraux nécessaires à leur croissance), et de support de vie.

L'analyse des indicateurs de qualité du sol des parcelles du réseau Sol, a révélé une qualité hétérogène sur la zone d'étude. Le rapport C/N, la CEC, la biomasse microbienne et l'abondance de nématodes sont les indicateurs qui varient le plus. L'évolution dans le temps des indicateurs de qualité du sol est également différente d'une parcelle à l'autre, et touche davantage les indicateurs biologiques que les indicateurs physico-chimiques. Les pratiques agricoles permettent d'expliquer en partie cette variabilité, et certaines ont un rôle prépondérant, essentiellement sur les indicateurs biologiques. Cette étude a montré que l'apport de matière organique, modéré et sous forme d'engrais granulé, et l'enherbement inter-rang sont favorables à une meilleure abondance de nématodes et biomasse microbienne, et à des potentiels de minéralisation plus élevés. A l'inverse, un travail du sol trop fréquent (labour et désherbage mécanique à plein) perturbe le milieu et impacte négativement ces indicateurs. L'apport d'azote est également ressorti comme ayant un effet négatif sur ces indicateurs. Cet effet semble cependant traduire la conséquence d'autres pratiques : l'absence d'enherbement et un travail du sol important.

Il a également été mis en évidence que l'apport de MO et l'enherbement impactent le plus significativement l'évolution des indicateurs de qualité du sol, notamment biologiques. Leur effet sur l'abondance de nématodes, principalement phytophages, la complexité de la communauté de nématodes et la biomasse microbienne sont positifs, ainsi que sur certains indicateurs physico-chimiques (rapport C/N,  $C_{org}$ , CaO, KO, CEC). Ces pratiques ne permettent cependant d'expliquer qu'une faible part de la variabilité inter-parcellaire de l'ensemble des indicateurs. L'état sanitaire du lavandin est quant à lui meilleur après une rotation diversifiée et avec une proportion de MO libre élevée.

Enfin, l'analyse des marges directes révèle que celles-ci sont en moyenne 2,2 fois supérieures chez les producteurs conventionnels par rapport aux producteurs en agriculture biologique. Ces écarts se justifient par une différence importante de rendement mais aussi par une valorisation de la culture bio peu supérieure à la culture conventionnelle, ce qui ne compense pas les écarts de rendement. L'ensemble des parcelles étudiées montre cependant une très bonne efficacité économique qui traduit, pour toutes, un bon équilibre entre le produit et les charges.

La valeur économique d'une production agricole est bien sûr importante, mais il est de plus en plus urgent, dans le contexte actuel de réchauffement et d'aléas climatiques, de prendre en compte sa valeur environnementale. Selon le dernier rapport du GIEC, les sols s'appauvrissent 20 à 100 fois plus rapidement qu'ils ne se forment, et se réchauffent davantage que l'atmosphère (GIEC, 2019). Des pratiques intensives, imposées aux agriculteurs au nom de la productivité, en sont une des causes. Adapter les pratiques permettra

donc d'améliorer la qualité du sol mais aussi de conserver la matière nécessaire à l'activité agricole en limitant l'érosion, et de lutter contre le changement climatique en participant au stockage de carbone dans les sols. Les connaissances sur le fonctionnement du sol sont riches mais demandent encore à être approfondies et ne cessent de montrer l'importance de la biodiversité, animale et végétale, dans le maintien d'écosystèmes sols sains et résilients. Afin de préserver leur support de production et pour gagner en durabilité et en autonomie, les agrosystèmes devront donc composer avec davantage de biodiversité et la cultiver en limitant le recours aux intrants de synthèse et aux pratiques perturbatrices du milieu.

## Bibliographie

- Acton, D.F., Gregorisch, L.J., 1995. Understanding soil health, p. 5-10. In D.F. Acton and L.J. Gregorisch (ed.). *The health of our soils – toward sustainable agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, ON.
- ADEME, 2017. La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. Synthèse de Recherche. Projet de recherche coordonné par : « Observatoire des sols vivants ».
- Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2018. Liste des stations qualité des eaux souterraines du département des Alpes de Haute Provence. Disponible sur : <http://sierm.eaurmc.fr/surveillance/eaux-souterraines/liste-stations.php?donnees=etat&codeRegion=93&codeDept=04&codeCommune=&nomAquifere=&codeEntiteHydro=&codeMassEau=>. Consulté le 23 avril 2019.
- Agreste. 2018. Mémento de La Statistique Agricole.
- Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 74 : 19-31.
- Arshad, M.A., Coen, G.M., 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *Alternative Agric.* 7, 12–16.
- Baize, D., 2018. Guide Des Analyses En Pédologie. 3rd ed. QUAE.
- Balesdent, J., Dambrine, E., and Fardeau, J.C., 2015. Les Sols Ont-Ils de La Mémoire ? 1st ed. QUAE.
- Balloy, B., APCA, A., Bispo Ademe, Bouthier, A., Chenu, C., Cluzeau, D., and Degan, F., 2017. TOUR D ' HORIZON DES INDICATEURS RELATIFS À L ' ÉTAT ORGANIQUE ET BIOLOGIQUE DES SOLS.
- Beauregard (de), J. 2008. Le Plateau de Valensole. *Revue de Géographie Alpine* 35(1):63–110. Disponible sur <https://doi.org/10.3406/rga.1947.5240>. Consulté le 21 février 2019.
- Blouin, M., Hodson, M. E., Delgado, E. A., Baker G., Brussaard L., Butt K. R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J. E., Cluzeau D., and Brun J. J.. 2013. A Review of Earthworm Impact on Soil Function and Ecosystem Services. *European Journal of Soil Science* 64(2):161–82.
- Bornand M., Chabot C., Dosso M., and Lacassin J.C.. 2012. Sols et Paysages Du Sud Du Plateau de Valensole : Diversité et Modes d ' Utilisations Agricoles Actuels et Passés.
- Bornand, M. and Dosso, M., 2015. Sols et Histoire Récente de l ' Agriculture Sur Le Plateau de Valensole Constats et Perspectives. *Etude et Gestion Des Sols* 22:43–58.
- Bouthier A., Pelosi C., and Villenave C.. 2016. Impact Du Travail Du Sol Sur Son Fonctionnement Biologique Impact Du Travail Du Sol Sur Son Fonctionnement Biologique. Pp. 85–108 in *Faut-il travailler le sol ?*
- Bouthier, A., Trochard R., Vale M., Chaussod R., and Nouaïm R. 2015. Valoriser Les Indicateurs Microniologiques En Grandes Cultures et En Polyculture-Élevage. Pp. 1–13 in *12èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS*

Lyon - 18 et 19 novembre 2015.

- Bünemann, E. K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R E, Deyn (de) G., Goede (de) R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Groeningen (van) J.W., and Brussaard L. 2018. Soil Quality – A Critical Review. *Soil Biology and Biochemistry* 120 (February):105–25.
- Chaber A., [sd]. Utilisation d'indicateurs biologiques pour l'analyse de l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement – (dossier 99/19 – Diagnostic environnemental et indicateurs biologiques). Projet pilote conduit par l'ACTA. Montluel, 152p.
- Chaussod, R. 1996. La Qualité Biologique Des Sols : Évaluation et Implications. in *Le sol, un patrimoine menacé ?*
- Chignier, M., 2017. La Qualité Des Sols Sur Le Plateau de Valensole : Etude de l'impact de Pratiques Agricoles Sur La Qualité Du Sol En Parcelle de Lavandin.
- Cluzeau, D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., and Cortet J.. 2012. Integration of Biodiversity in Soil Quality Monitoring : Baselines for Microbial and Soil Fauna Parameters for Different Land-Use Types. *European Journal of Soil Biology* 49:63–72.
- CNEARC. 1991. Le Plateau de Valensole. Etude Du Développement d'une Petite Région Rurale En Mutation.
- Commission Européenne. 2010. *Atlas Européen de La Biodiversité Des Sols*.
- Deprince A. 2003. La Faune Du Sol - Diversité, Méthodes d'étude, Fonctions et Perspectives. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 49:123–38.
- Dommergues, Y., and Mangenot, F.. 1970. *Ecologie Microbienne Du Sol*. Masson,.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality, p. 3-21. In J.W. Doran *et al* (ed.). *Defining soil quality for sustainable environment*. SSSA Spec. Publ 35. SSSA and ASA, Madison, WI.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M., Liebig, M.A., 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56 : 1-54.
- DREAL. 2014. *Atlas Des Paysages Des Alpes de Haute-Provence*.
- Elisol Environnement, 2019. Analyse de la nématofaune du sol de plantiers de lavandin. Analyses de l'échantillonnage d'avril 2019. Rapport.
- FAO, 2015. Les sols sont une ressource non renouvelables. Disponible sur : <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/fr/c/278960/>. Consulté le 25 avril 2019.
- FAO. 2016. *Etat Des Ressources En Sols Du Monde*.
- Fardeau, J.C., 2015. Des Indicateurs de La Fertilité Des Sols. *Étude et Gestion Des Sols* 22:77–100.
- Feller, C., Marsily (de), G., Mougin, C., Pérès, G., Poss, R., and Winiarski, T. 2016. *Le Sol. Une Merveille Sous Nos Pieds*. Belin.
- GIEC, 2019. *Climate Change and Land*. An IPCC special report on climate change,

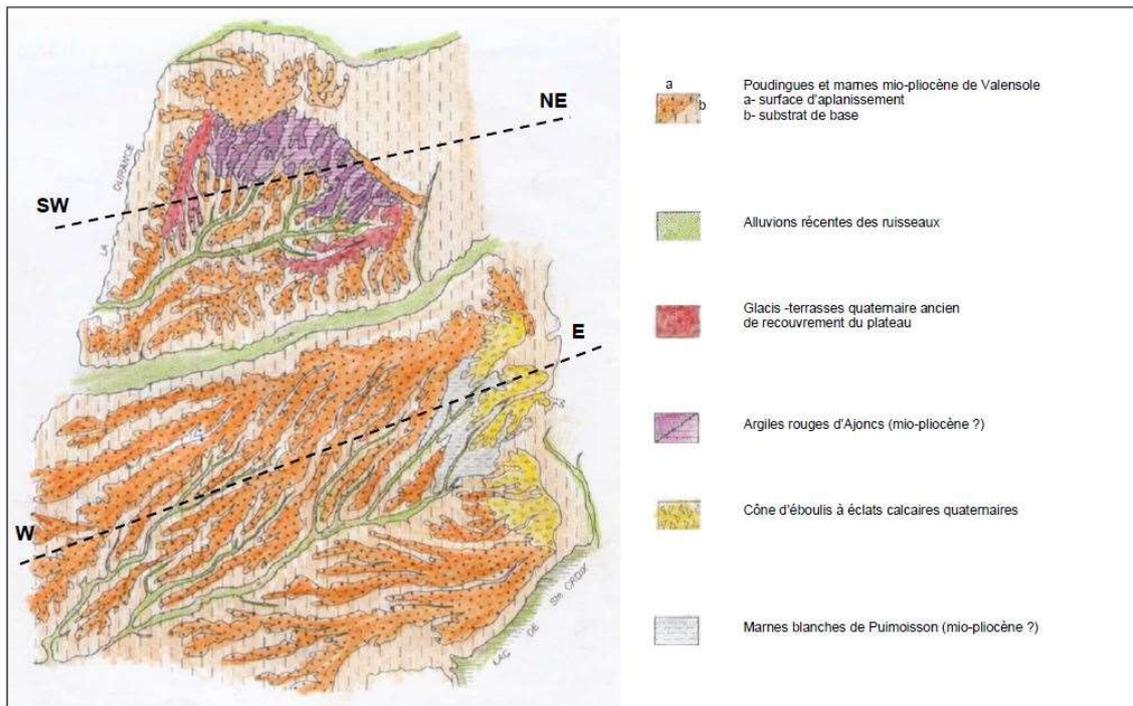
- desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for policy makers.
- Girard, M.C., Schwartz, C., and Jabiol, B. 2017. *Etude Des Sols. Description, Cartographie, Utilisation.* edited by DUNOD.
- Gis Sol. 2011. L'état Des Sols de France. *Groupement d'Intérêt Scientifique Sur Les Sols* 188.
- Gis Sol, INRA, and Service de l'observatoire et des statistiques. 2011. L'aléa d'érosion Des Sols Par Petite Région Agricole.
- Hornick, S.B., 1992. Factors affecting the nutritional quality of crops. *Am. J. Altern. Agric.* 7:63-68.
- Karlen, D. L., Maubach M. J., Doran J. W., Cline R. G., Harris R. F., and Schuman G. E.. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61:4–10.
- Karlen, D. L., Wollenhaupt N. C., Erbach D. C., Berry E. C., Swan J. B., Eash N. S., and Jordahl J. L. 1994. Long-Term Tillage Effects on Soil Quality. *Soil and Tillage Research* 32(4):313–27.
- Laird, D. A., Fleming P., Dedrick D.D., Horton R, Wang B., and Douglas L. K.. 2010. Impact of Biochar Amendments on the Quality of a Typical Midwestern Agricultural Soil. *Geoderma* 158(3–4):443–49.
- Medina-Sauza, R. M., Álvarez-jiménez, M., Delhal, A., Reverchon, F., Blouin, M., Guerrero-Analco, J.A., Cerdan, C.R., Guevara, R., Villain, L., and Barois, I. 2019. Earthworms Building up Soil Microbiota, a Review. *Frontiers in Environmental Science* 7(June):1–20.
- Météo France, *Le climat en métropole.* Disponible sur <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole#> Consulté le 21 février 2019.
- Ministère de l'Ecologie du Développement durable des Transports et du Logement and ADEME. 2010. *La Vie Cachée Des Sols.*
- Ministère en charge de l'écologie and Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 2007. *Pesticides Dans Les Eaux Superficielles et Souterraines Des Bassins et de Corse.*
- Montpellier SupAgro. 2013. Analyse de La Structure Du Sol En Parcelles de Lavandin Sur Le Plateau de Valensole.
- Mustin, M., 1987. Le compost, gestion de la matière organique. F. Dubusc Eds., Paris, 954p.
- Nouaïm, R. and Chaussod R.. 2013. Biodiversité Microbienne et Qualité Du Sol : Des Indicateurs Biologiques à Portée Agronomique. Pp. 1–10 in *12èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS Lyon - 18 et 19 novembre 2015.*
- Pansu, M., Sarmiento, L., 2009. Micro-organismes et matière organique du sol (modèle MOMOS). *Etude et gestion des sols* 16 : 113-134.
- Parc Naturel Régional Du Verdon. 2010. Document d'objectifs Des Sites Natura 2000.
- Reeves, D. W. 1997. The Role of Soil Organic Matter in Maintaining Soil Quality in Continuous Cropping Systems. *Soil and Tillage Research* 43:131–67.

- Rivet, F., Arnal C., and Lacassin, J. C.. 2015. Projet COMETE, Journée Régionale Eaux Souterraines Du 08-09-2015. (04).
- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., Richard, G., 2010. Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*. 111 : 33-40.
- Roussel, O., Bourmeau E., and Walter C. 2001. Évaluation Du Déficit En Matière Organique Des Sols Français Et Des Besoins Potentiels En Amendements Organiques. *Etude et Gestion Des Sols* 8(1):65–81.
- Suarez, C., Edith, D., Gigon, A., Puga-Freitas, R., Lavelle, P., Velasquez, E., and Blouin, M.. 2014. Combined Effects of Earthworms and IAA-Producing Rhizobacteria on Plant Growth and Development. *Applied Soil Ecology* 80:100–107.
- Trochery, F. 2003. Des indicateurs pour quoi faire ? In Thévenet G et Faedy L. eds. Les fertilités des sols et les systèmes de culture. pp. 177-186. Imprimerie Saint-François. Blois.
- UICN France. 2012. Panorama Des Services Écologiques Fournis Par Les Milieux Naturels En France - Volume 1 : Contexte et Enjeux.
- Valé, M., Bouthier, A., Trochard, R., Chaussod, R., and Nouaïm-Chaussod, R. 2011. Pertinence de Nouveaux Indicateurs Pour Évaluer l'impact Des Pratiques Culturelles Sur Le Fonctionnement Biologique Des Sols. *10èmes Rencontres de La Fertilisation Raisonnée et de l'analyse Du COMIFER et Du GEMAS* (5).
- Villenave, C., Chauvin, C., Santune, C., Cérémonie, H., and Schneider, A.. 2018. Effet Des Légumineuses Sur Le Fonctionnement Biologique Du Sol : Une Méta-Analyse Sur La Nématofaune Du Sol. *Innovations Agronomiques* 69:47–60.
- Villenave, C., Oumar Ba, A., and Rabary, B.. 2009. 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* 16(3/4):369–78.
- Yvin, C., Chaisse, E., Fontaine, M., Rivoal, J.B., Verdin, E., Nicolé, F., Jourdan, P., Savarit, P., and Gallois, P.. 2017. Dépérissement de La Lavande et Du Lavandin : Mise En Oeuvre d'un Programme de Recherches Appliquées Afin d'apporter Des Solutions de Lutte Aux Producteurs. Vol. 55.
- Zuber, S.M., Villamil, M.B., 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 97 : 176-187.



## ANNEXES

**Annexe 1:** A) Répartition géographique des différents types de matériau du Plateau de Valensole. B) Constitution de la roche du Plateau de Valensole (a) et Topographie générale et pendage des roches (b). Documents issus de (Bornand *et al.* 2012)

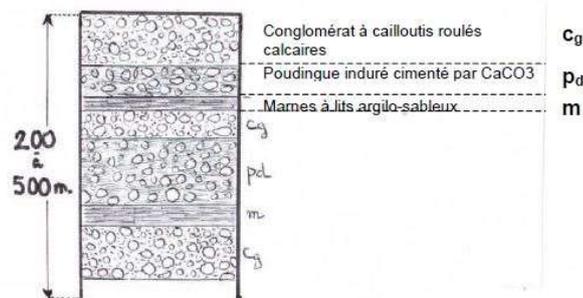


A

**a: constitution des roches**

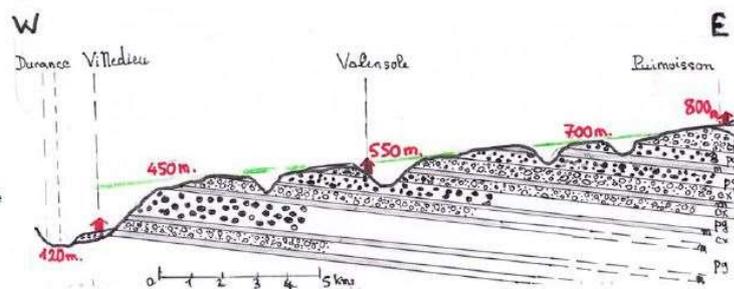
*Matériau mère du plateau:*

- Complexe conglomératique et marnes fluviodeltaïque issu des paléo-rivières de la Durance, de l'Asse, de la Bléone et du Verdon.
- Age miocène, avec recouvrements plio-quaternaires localisés.
- Cailloutis calcaires roulés
- Epaisseur cumulée: 200 à 500 mètres.



**b: coupe W-E  
Topographie générale et  
pendage des roches**

- Vaste glacis tabulaire,*
- Dont l'altitude décroît d'Est (800m) à l'Ouest (450m)
  - Pendage des dépôts (W\_E), légèrement incliné vers l'Est par rapport aux replats de surface
  - Importants et nombreux recouvrements par les rivières et thalwegs locaux.

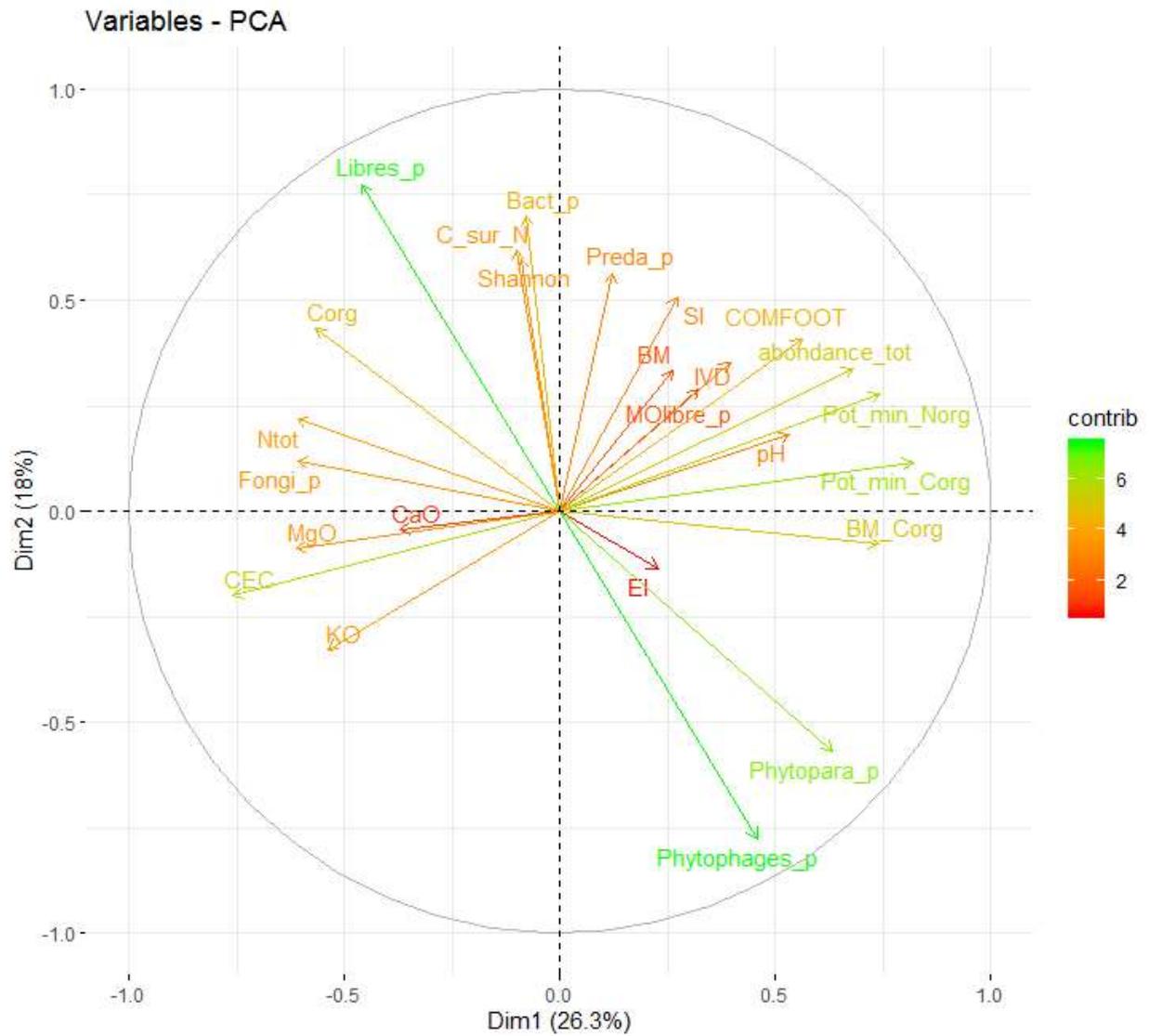


B

**Annexe 2 :** Tableau résumé des valeurs des indicateurs de qualité du sol mesuré en 2019 sur les parcelles du réseau SOL.

Indicateurs	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance	Ecart-type	Coeff variation
pH	8,0	8,6	8,3	8,3	0,03	0,16	0,02
C_sur_N	6,83	11,81	9,33	9,35	0,79	0,89	0,10
Corg (g/kg de sol)	5,90	18,40	12,80	13,06	7,39	2,72	0,21
Ntot (g/kg de sol)	0,79	1,97	1,44	1,39	0,07	0,26	0,18
CEC (cmol+/kg)	6,71	21,55	13,64	13,74	11,92	3,45	0,25
KO (g/kg de sol)	0,12	0,48	0,22	0,24	0,01	0,09	0,38
MgO (g/kg de sol)	0,06	0,21	0,13	0,13	0,00	0,04	0,29
CaO (g/kg de sol)	10,80	15,20	14,00	13,98	0,61	0,78	0,06
MO (%)	1,01	3,17	2,21	2,25	0,22	0,47	0,21
MOlibre_p (% MO)	12	33	22	22,51	28,53	5,34	0,24
MOliee_p (% MO)	67	88	78	77,49	28,53	5,34	0,07
BM (mg/kg)	164	497	288	290,49	4926,42	70,19	0,24
BM_Corg (% Corg)	1,26	4,04	2,30	2,28	0,31	0,56	0,24
Pot_min_C (mg/kg/28j)	155,60	594,40	318,80	315,51	8582,52	92,64	0,29
Pot_min_Corg (% Corg)	1,37	4,74	2,30	2,45	0,44	0,66	0,27
Pot_min_N (mg/kg/28j)	11,98	41,05	20,50	21,56	39,50	6,29	0,29
Pot_min_Norg (% Norg)	0,94	3,21	1,52	1,57	0,19	0,44	0,28
Bacterivores	19	335	89	103,97	5832,53	76,37	0,73
Bact_p	0,09	0,42	0,25	0,25	0,01	0,08	0,30
Fongivores	16	221	66	82,38	2842,02	53,31	0,65
Fongi_p	0,09	0,45	0,20	0,22	0,01	0,08	0,38
Predateurs	0	86	19	24,38	431,91	20,78	0,85
Preda_p	0,00	0,16	0,05	0,06	0,00	0,04	0,73
Libres	62	613	188	210,70	18438,05	135,79	0,64
Libres_p	0,28	0,73	0,54	0,53	0,01	0,12	0,22
Phytoparasites	2	681	57	98,97	15705,30	125,32	1,27
Phytopara_p	0,01	0,52	0,20	0,22	0,02	0,13	0,59
phytophages	42	923	150	195,62	27699,19	166,43	0,85
Phytophages_p	0,27	0,72	0,46	0,47	0,01	0,12	0,25
abondance_tot	117	1457	337	406,46	81249,14	285,04	0,70
EI	30	72	49	49,38	122,52	11,07	0,22
SI	11	80	41	43,95	314,89	17,75	0,40
IVD	29	75	56	54,05	152,27	12,34	0,23
Shannon	1,73	2,47	2,23	2,20	0,03	0,18	0,08
COMFOOT	18,00	405,00	85,00	108,51	7839,59	88,54	0,82

**Annexe 3** : Cercle de corrélation des indicateurs de qualité du sol retenus après analyse du corrélogramme.



**Annexe 4** : Tableau résumé des valeurs des taux de variation des indicateurs de qualité du sol calculés entre 2017 et 2019.

Variable	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Variance	Ecart-type	Coeff variation
e_pH	-0,06	0,02	0,00	-0,01	0,00	0,02	-1,89
e_CEC	-0,16	0,32	0,00	0,03	0,02	0,13	4,33
e_KO	-0,26	0,45	0,04	0,07	0,02	0,16	2,10
e_MgO	-0,20	0,40	0,02	0,05	0,02	0,15	3,18
e_CaO	-0,10	0,08	-0,01	0,00	0,00	0,05	-16,62
e_Ntot	-0,20	0,25	0,03	0,04	0,01	0,10	2,80
e_Corg	-0,13	0,36	0,07	0,08	0,02	0,13	1,51
e_C_sur_N	-0,21	0,38	0,04	0,05	0,02	0,14	2,65
e_MO	-0,13	0,36	0,06	0,08	0,02	0,13	1,50
e_MOlibre_p	-0,43	0,45	0,02	0,00	0,03	0,19	38,96
e_BM	-0,46	0,11	-0,11	-0,12	0,02	0,16	-1,30
e_BM_Corg	-0,47	0,16	-0,19	-0,18	0,03	0,17	-0,91
e_Pot_min_C	-0,69	0,42	-0,20	-0,20	0,05	0,22	-1,09
e_Pot_min_Corg	-0,75	0,15	-0,25	-0,26	0,05	0,21	-0,84
e_Pot_min_N	-0,55	0,49	0,01	-0,02	0,06	0,24	-14,18
e_Pot_min_Norg	-0,53	0,54	-0,04	-0,05	0,05	0,23	-4,65
e_Bacterivores	-0,98	0,19	-0,74	-0,65	0,10	0,32	-0,50
e_Bact_p	-0,74	0,87	-0,04	-0,02	0,16	0,40	-25,90
e_Fongivores	-0,97	-0,09	-0,72	-0,68	0,05	0,23	-0,33
e_Fongi_p	-0,72	6,70	-0,11	0,22	1,72	1,31	6,01
e_Predateurs	-1,00	2,33	-0,52	-0,26	0,72	0,85	-3,28
e_Preda_p	-1,00	4,67	0,21	0,80	2,51	1,58	1,98
e_Libres	-0,98	0,03	-0,75	-0,69	0,05	0,23	-0,34
e_Libres_p	-0,51	1,09	-0,08	-0,03	0,11	0,34	-11,29
e_Phytophages	-0,92	2,03	-0,71	-0,42	0,46	0,68	-1,61
e_Phytophages_p	-0,46	8,17	0,11	0,70	2,91	1,71	2,45
e_Phytoparasites	-0,98	1,64	-0,84	-0,60	0,37	0,61	-1,02
e_Phytopara_p	-0,86	2,12	-0,29	-0,03	0,62	0,79	-28,98
e_Abondance_tot	-0,96	0,21	-0,76	-0,65	0,09	0,30	-0,45
e_EI	-0,45	0,34	-0,09	-0,11	0,05	0,23	-2,06
e_SI	-0,61	15,00	0,14	1,23	9,27	3,05	2,47
e_IVD	-0,65	1,22	-0,03	0,07	0,18	0,42	5,99
e_Shannon	-0,16	0,36	0,07	0,06	0,02	0,14	2,15
e_COMFOOT	-0,98	0,70	-0,74	-0,63	0,14	0,37	-0,59

## **Résumé**

Le sol est un écosystème nécessaire au développement de la vie sur Terre, par l'ensemble des services qu'il rend. Une de ses principales fonctions est d'être support de l'agriculture, activité sans laquelle l'Homme ne pourrait se nourrir. Il est donc nécessaire de conserver un sol de bonne qualité, capable de remplir ses fonctions. Or, les pratiques agricoles peuvent impacter positivement ou négativement la qualité du sol. Ainsi, la qualité du sol a été étudiée en 2019 sur le plateau de Valensole (Alpes de Haute-Provence) en culture de lavandin, après une première étude menée en 2017. La notion de qualité du sol a été précisée et une définition adaptée au contexte a été retenue. Un ensemble d'indicateurs de qualité (physico-chimiques et biologiques) ont également été sélectionnés. Des prélèvements de sol ont été réalisés sur les mêmes parcelles qu'en 2017. Les indicateurs et leur évolution sur deux ans (variables à expliquer) ont été étudiés en fonction du type de sol et des pratiques culturales (variables explicatives) à l'aide d'une analyse de redondance (RDA) associée à une sélection automatique des variables explicatives. Les résultats montrent que le type de sol impacte peu les indicateurs de qualité du sol, mais les pratiques jouent un rôle important, principalement sur les indicateurs biologiques. L'apport de matière organique (MO) et l'enherbement sont favorables à une meilleure abondance de nématodes, un indice COMFOOT, une biomasse microbienne et des potentiels de minéralisation plus élevés alors que le travail du sol (labour et binage) dégrade ces indicateurs. L'enherbement et l'apport de MO favorise aussi une meilleure évolution des indicateurs biologiques de qualité du sol. L'état sanitaire de la culture du lavandin a également été étudié à la fois en fonction du type de sol, des pratiques agricoles et de la qualité du sol. Les résultats obtenus montrent qu'une succession de culture diversifiée avant le lavandin et une proportion importante de MO libre sont favorables à un meilleur état sanitaire.

## **Abstract :**

Soil is an essential ecosystem for the life development on the Earth, because of all the services it provides. Mainly, it is the support of agriculture, an activity without which human can't feed. It is so important to keep a good soil quality; to ensure its functions. However, agricultural practices have good or bad effects on soil quality. Thus, soil quality has been assessed in 2019 on the plateau de Valensole (Alpes de Haute-Provence) on lavender fields, after a first study managed in 2017. For that, the soil quality definition has been specified, adapted to the agropedoclimatic context. Physical, chemical and biological indicators have been selected. Soil samples have been done on the same areas than in 2017. The indicators and their evolution from 2017 (variables to explain) have been studied regarding soil type and agricultural practices (explicative variables) using redundancy analysis (RDA) coupled with automatic selection of the explicative variables. For results, soil type has almost no effect on soil quality indicators, whereas agricultural practices have a more consequent effect, mainly on biological indicators. Organic matter supplying and cover crop between lavender rows are benefit to better nematode abundancy, COMFOOT indicator, microbial biomass and mineralisation of C and N. In contrary, tillage (labour and mechanical weeding) reduces these indicators. Cover crop between lavender rows and the supply of organic matter ensure a better evolution of these biological indicators too. Lavenders health was also studied regarding simultaneously soil type, agricultural practices and soil quality. As results, a diversified crop sequence before lavender and high rate of labile organic matter lead a better lavender health.

**Mots clés :** Qualité du sol ; indicateurs ; pratiques agricoles ; état sanitaire ; lavandin