

Spécialité Agronomie

Dominante Agroécologie pour des Productions Végétales Durables (APOGEE)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
Formation Ingénieur AgroSup Dijon
Formation Initiale

**La compaction des sols dans les vergers de kiwi français :
Problématiques, Enjeux et Réponses**

(Stage réalisé du 23/03/2020 au 23/08/2020)

Quentin GIRARD

Enseignant référent

Monsieur Manuel BLOUIN

Professeur en écologie

AgroSup Dijon

26 Bd Docteur Petitjean

21 079 DIJON

Tuteurs de stage

Monsieur Yvan CAPOWIEZ

Chercheur

INRAE Avignon - unité EMMAH

228 route de l'Aérodrome

84 914 AVIGNON

Madame Adeline GACHEIN

Directrice

Bureau Interprofessionnel du Kiwi (B.I.K.)

100 allées de Barcelone

31 000 TOULOUSE

Remerciements

En premier lieu, je remercie M. Manuel Blouin, mon enseignant référent à AgroSup Dijon, qui a suivi mes avancées tout au long du projet, et m'a guidé dans la rédaction de ce rapport. Je remercie aussi Mme Sylvie Granger, responsable de la dominante d'approfondissement APOGEE à AgroSup Dijon, qui m'a guidé dans le choix de ce stage, la rédaction d'un pré-Mémoire fait en amont du stage ainsi que la formulation de la problématique de recherche.

Je remercie ensuite l'ensemble du personnel du BIK et les quatre autres stagiaires s'y exerçant pour leur accueil, leur bienveillance et leur contribution dans ce stage. Je remercie aussi le personnel administratif du site INRAE d'Avignon pour m'avoir aidé à gérer l'ensemble des dossiers administratifs concernant mon introduction dans la structure d'accueil, la gestion des déplacements, ainsi que la gestion des aléas causés par la pandémie de covid-19.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux cinq producteurs qui ont bien voulu mettre à disposition leurs parcelles et appliquer les traitements concernés. Je remercie Mme Amélie Valadas, Mme Géraldine Sueres et M. Franck Gilbert, mes interlocuteurs respectifs des coopératives Scaap Kiwi de France, Garlanpy et Blue-Whale. Ils m'ont apporté leur savoir technique, ont géré la mise en place des essais, et ont fait le lien avec les cinq producteurs concernés.

Je remercie par ailleurs l'ensemble des vingt-sept producteurs de kiwi ayant répondu au questionnaire diffusé en ligne le 4 mai 2020.

Enfin, je tiens évidemment à remercier mes deux tuteurs de stage Mme Adeline Gachein et M. Yvan Capowiez tout d'abord pour m'avoir accepté dans leur projet et m'avoir confié les responsabilités qui s'ensuivent, et aussi pour tout ce qu'ils m'ont appris, le temps qu'ils ont su m'accorder, et leur aide précieuse dans la rédaction de ce rapport.

Résumé

Implanté en France depuis les années 1980', la plupart des vergers de kiwi sont toujours en place aujourd'hui, mais la filière souffre actuellement d'un manque de travaux scientifiques. Dans ce contexte, il est devenu plus que nécessaire de s'intéresser à la qualité des sols, jouant un rôle certain sur la santé des arbres. Un travail bibliographique a permis de mettre en évidence les nombreuses observations faites dans le monde sur des symptômes de dépérissements qui seraient liés à la stagnation d'eau et l'asphyxie racinaire. La décompaction est alors présentée comme une des solutions majeures pour pallier ces problèmes inquiétants et grandissants, qui en France ont grandi de manière effrayante au cours même de ce stage. Un questionnaire diffusé en ligne a permis de recenser les pratiques culturales adoptées par les producteurs qui auraient un lien avec la compaction. Bien que beaucoup se soucient de l'état de compaction de leur sol, la plupart n'osent pas les travailler pour ne pas abimer le système racinaire réputé très sensible. Enfin, une partie expérimentale a été ouverte dans l'objectif de tester les effets de la scarification du sol et de l'apport de matière organique dans des vergers de producteurs. Les résultats n'ont pour le moment pas permis de confirmer les effets positifs de ces traitements, mais certaines tendances sont tout de même intéressantes et posent des questions. D'une densité moyenne de $1,19 \text{ g.cm}^{-3}$ de sol, les sols ne semblent pas si tassés que cela en surface. Il faudrait également étudier la compaction plus en profondeur pour tester le lien de causalité entre la compaction des sols et les symptômes de dépérissement.

Mots clés : Scarification, matière organique, engorgement des sols, densité apparente, système racinaire

Abstract

Established in France since the 1980s', most kiwi orchards are still in place today, but the sector currently suffers from a lack of scientific support. In this context, it has become more than necessary to take an interest in the quality of the soil, which plays a definite role in the health of the trees. Bibliographical work has highlighted the many observations made throughout the world on the symptoms of dieback linked to water stagnation and root asphyxia. Decompaction is then presented as one of the major solutions to alleviate these worrying and growing problems, which in France have grown frighteningly during this course. A questionnaire distributed online made it possible to identify the cultural practices adopted by the producers which would be linked to compaction. Although many are concerned about the state of compaction of their soil, most do not dare to work it so as not to damage the root system, which is reputed to be very sensitive. Finally, an experimental part was opened with the aim of testing the effects of soil scarification and organic matter input in growers' orchards. The results have not yet confirmed the benefits of these treatments, but some trends are nevertheless interesting and raise questions. At an average soil density of 1.19 g.cm^{-3} the soils do not appear to be that compacted on the surface. Compaction should also be studied more deeply to test the causal link between soil compaction and dieback symptoms.

Key words: Scarification, organic matter, soil waterlogging, bulk density, root system

Sommaire

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	3
Sommaire	4
Liste des abréviations	5
Avant-propos	6
Introduction	1
1. Etat de l'art	2
1.1. La compaction des sols en arboriculture	2
1.1.1. Compaction : définition et impact sur la structure physique du sol	2
1.1.2. Compaction et impact sur les populations de vers de terre	5
1.2. Les problèmes agronomiques liés au sol en vergers de kiwi	6
1.2.1. Présentation de la filière kiwi	6
1.2.2. Morphologie de l' <i>Actinidia</i>	7
1.2.3. Culture du kiwi et relation eau-sol-racine	9
1.2.4. La compaction des sols en verger de kiwi : Causes probables et solutions	13
1.3. Leviers proposés	14
1.3.1. Travail mécanique du sol et scarification	14
1.3.2. Apports de matière organique	15
1.4. Demande et objectifs de l'étude	17
1.5. Question de recherche et hypothèses de travail	17
2. Matériels et Méthodes	18
2.1. Enquête auprès des producteurs de kiwis	18
2.2. Essais chez les producteurs	20
2.2.1. Dispositif expérimental	20
2.2.2. Conduite des essais	20
2.2.3. Variables mesurées	22
2.3. Gestion de données et analyses statistiques des résultats	24
3. Présentation des résultats	25
3.1. Résultats de l'enquête	25
3.1.1. Description de l'échantillon enquêté	25
3.1.2. Conduite de culture et recensement des pratiques culturales	26
3.1.3. Observations faites par les producteurs	27

3.1.4.	Opinions sur la question de recherche.....	27
3.1.5.	Typologie des producteurs enquêtés	28
3.2.	Résultats de l'expérimentation	30
3.2.1.	Présentation des profils de sol.....	30
3.2.2.	Analyse des indicateurs de densité apparente, colonnes de sol et vitesse d'infiltration d'eau.....	30
3.2.3.	Présentation des résultats de l'analyse racinaire	33
4.	Discussion des résultats.....	33
4.1.	Discussion des résultats du questionnaire	33
4.2.	Discussion des résultats de l'expérimentation.....	35
4.3.	Critiques, perspectives et recommandations	37
	Conclusions	40
	Bibliographie.....	41
	Annexe	45

Liste des abréviations

BIK	Bureau national interprofessionnel du kiwi
CTIFL	Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
GIS	Groupement d'intérêt scientifique
INRAE	Institut national de recherche agronomique et de l'environnement
MO	Matière organique
NSA	Non scarifié amendé
NSNA	Non scarifié non amendé
PSA	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Actinidiae</i>
SA	Scarifié amendé
SAU	Surface agricole utile
SNA	Scarifié non amendé

Avant-propos

Ce mémoire rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome d'AgroSup Dijon. A l'origine, l'objectif de ce stage visait à évaluer les effets de la scarification des sols, de l'apport de matière organique, et de l'inoculation de vers de terre dans le but de régénérer des sols compactés dans les vergers de kiwi du Sud-Ouest de la France. Mais les difficultés n'ont pas manqué dans la bonne réalisation de ce stage. L'année 2020 fut notamment marquée par la pandémie de la covid-19 et les réglementations associées.

Les deux premiers mois de stage ont ainsi été effectué en télétravail, confiné dans ma résidence familiale en Lorraine à 900 km du bureau de Toulouse. J'ai ensuite effectué mon stage en présentiel du 27 mai au 21 août 2020. Cela a eu un premier impact sur le stage, le confinement ne m'a en effet pas permis d'évaluer l'état initial des sols avant la mise en place des traitements, et le temps restreint sur les parcelles a diminué les chances d'observer des effets des traitements sur la qualité des sols. La première sortie se faisant en juin sur des sols déjà trop secs, nous n'avons pas pu évaluer les populations de vers de terre, ni réaliser des lâchers pour ensuite observer les évolutions de population et leurs impacts sur la qualité physique des sols. Aussi, le travail à distance ne m'a pas permis de suivre convenablement la mise en place des essais ce qui a parfois engendré quelques difficultés. Enfin, il s'est trouvé que les parcelles mises à disposition par les agriculteurs étaient particulièrement loin du bureau de Toulouse, ce qui a entraîné quelques barrières logistiques dans la gestion des déplacements de terrain.

Le titre, la problématique et les objectifs du projet ont donc dû être adaptés durant la réalisation de ce stage en fonction des différents problèmes rencontrés. Au final, l'objectif fut d'une part de dresser une sorte d'état des lieux de la qualité des sols dans les vergers de kiwi, et d'autre part d'observer si possible les premiers effets des traitements appliqués sur la qualité physique des sols. Ce stage s'effectue en parallèle d'un autre stage de M2 s'intéressant à l'enherbement des sols dans les vergers de kiwi dans l'objectif là aussi d'améliorer la qualité des sols. Ces deux stages s'inscrivent en prévision d'un projet thèse sur les dépérissements des kiwis français, un fléau pour lequel l'état du sol peut jouer un rôle important. Ce stage représente donc les prémices de l'expérimentation sur le sol au sein du BIK et de la filière kiwi française, c'est un premier cycle, qui a pour but d'ouvrir la discussion sur de nouveaux projets.

Introduction

Dans un souci de durabilité des vergers, des problèmes liés à des déséquilibres du sol sont de plus en plus montrés du doigt en arboriculture. Dans un article de Réussir fruit et légume de 2017 Michel Giraud, ingénieur du Ctifl, parle de ‘fatigue des sols’. Ce phénomène se traduit selon lui par une baisse de vigueur des arbres qui serait liée à des déséquilibres du sol, des conditions agronomiques inadéquates et à un dysfonctionnement du système racinaire. Il parle de phénomène « complexe et multicausal » (Le Corre, 2017). Il est en effet primordial de prendre compte de la complexité du sol avant d’établir un lien entre une de ses caractéristiques et la santé des vergers. Bien que souvent liés entre eux, l’impact du sol sur la culture dépend des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, mais aussi des conditions climatiques du milieu, de la présence de bioagresseurs ou encore des pratiques culturales appliquées (tassement dû aux roues, irrigation...). C’est dans ce contexte-ci que la compaction des sols, causes et conséquences de beaucoup d’autres points nommés ci-dessus, est présentée comme l’un des enjeux majeurs de durabilité des vergers dans les systèmes arboricoles.

Dans les vergers de kiwi français, le sol n’a jusqu’à présent été que très peu étudié. Sans que les liens de cause à effet ne soient clairement établis, la compaction des sols est aujourd’hui présentée comme l’un des facteurs majeurs de problèmes rencontrés dans les vergers comme des dépérissements ou des pertes de vigueur ou de rendement (Tacconi et al., 2019). Les besoins et enjeux de la filière sont donc forts dans ce domaine. Malgré certaines études déjà mises en place ailleurs dans le monde, il est nécessaire de pouvoir estimer la qualité des sols dans les vergers français pour notamment tenter d’en caractériser la compaction. L’un des principaux enjeux au développement du kiwi français, dont les premiers pieds sont arrivés il y a seulement 50 ans sur le territoire national, est de développer cette jeune filière et de proposer des préconisations aux producteurs (Baudry et al., 2003).

Dans ce contexte, le GIS Fruit a organisé une « Journée d’échange sur la valorisation des sols de vergers ». Le GIS Fruit (Groupement d’Intérêt Scientifique) est un consortium d’acteurs de la filière fruitière ayant pour objectif d’accompagner les mutations de ce secteur (GIS Fruit, 2020). C’est lors de cette journée que Yvan Capowiez, chercheur à l’INRAE d’Avignon, a présenté ses travaux traitant des effets de la scarification sur la qualité physique et biologiques des sols en vergers de pommiers. La directrice du bureau interprofessionnel du kiwi (BIK) Adeline Gachein participait elle aussi à cette journée. Le BIK rassemble sous forme associative les producteurs, coopératives et expéditeurs de kiwi français qui travaillent ensemble dans l’objectif de développer, promouvoir et valoriser le kiwi français. Face à des enjeux croissants tel que le dépérissement, les administrateurs du BIK ont décidé d’accroître la recherche et développement en kiwi afin de combler des manques de données scientifiques sur des points jugés cruciaux. Sous les financements du GIS Fruit c’est dans ce contexte que naquit ce projet, fruit de la collaboration entre l’INRAE et le BIK, visant à mieux comprendre les enjeux de la compaction des sols dans les vergers de kiwi, et d’en tester des solutions.

1. Etat de l'art

Cette partie a été rédigée pendant le confinement lors de mon télétravail et ne correspond plus à 100% à la partie expérimentale du stage. J'ai néanmoins choisi de présenter cette partie telle que nous l'avions imaginé au début du stage, car elle rend compte du travail effectué et complète certains aspects permettant de mieux comprendre les enjeux et problématiques autour de la compaction des sols, qui pourront être utilisés dans des projets futurs.

1.1. La compaction des sols en arboriculture

1.1.1. Compaction : définition et impact sur la structure physique du sol

1.1.1.1. Compaction, notion de porosité, et indicateurs

Par définition, la structure du sol est l'arrangement spatial des particules solides du sol à un moment donné. Ce phénomène est caractérisé par la présence de vides entre les particules, qu'on appelle porosité, rempli de fluides (liquide ou gazeux) en fonction des conditions. L'arrangement des particules solides entre elles entraîne donc l'arrangement des pores du sol entre eux (Fell et al., 2018). Un des premiers indicateurs de la compaction des sols dans les études scientifiques est la mesure de la densité apparente, c'est-à-dire la masse de terre par unité de volume (Richard et al., 2001 ; Van Dijck et Van Asch, 2002 ; Lang et Russell, 2019 ; Hughes et Wilde, 1989). A l'inverse certaines études s'intéressent plutôt à caractériser la porosité du sol car c'est finalement cette partie qui est impactée par la compaction (Langmaack et al., 2002 ; Richard et al., 2001). Les pores du sol peuvent alors être arbitrairement classés en fonction de leur taille, on parle de **macropores** pour les pores de moins de 50 mm de diamètre et de **micropores** pour les pores de plus de 50 mm de diamètre (Pagliai et al., 2004 ; Langmaack et al., 2002 ; Richard et al., 2001). Fell et al. (2018) montrent ainsi que le tassement affecte principalement les pores plus grands par occlusion, perturbation ou réduction de leur taille. Pour aller encore plus loin et mieux comprendre les mécanismes de compaction dans le sol, d'autres auteurs s'intéressent eux à la distribution des pores dans le sol. De nombreuses études tentent d'analyser les pores en fonction de leur forme et de leur position et arrangements entre eux (Pagliai et al., 2004 ; Langmaack et al., 2002). En effet la continuité des pores affecte de nombreux processus importants dans les sols. Pagliai et al. (2004) parlent de « pores de transmissions », des pores continus allongés qui affectent directement la croissance des plantes en facilitant la pénétration des racines et en augmentant le stockage et la transmission d'eau et de gaz.

Les indicateurs sont donc nombreux pour caractériser le sol, et les vides du sol, face à des phénomènes de compaction. Ils sont plus ou moins onéreux, certains utilisent des pénétromètres pour évaluer la résistance mécanique à la pénétration du sol (Petry et al., 2016 ; Van Dijck et Van Asch, 2002), tandis que d'autres utilisent une notation visuelle suivant une méthodologie définie (méthodologie CoreVESS) (Fell et al., 2018). Il existe cependant d'autres indicateurs qui s'intéressent plus particulièrement aux conséquences de la compaction sur les systèmes agricoles intéressés.

1.1.1.2. Les conséquences de la compaction sur la structure physique des sols

Le tassement du sol comme une forme de dégradation du sol comprend plus qu'une augmentation de la densité apparente du sol. Il en résulte d'une perte de plusieurs fonctions du sol telles que les flux de gaz et d'eau et de l'espace poreux habitable en raison du pétrissage, de l'homogénéisation et de la perte de structure (Langmaack et al., 2002).

Tout d'abord, **la compaction constitue une barrière au bon développement des racines**. Dans des vergers de pêcheurs, Petry et al. (2016) se sont intéressés à l'impact de la compaction du sol sur le développement des racines. Les résultats montrent que la densité racinaire est affectée par la présence de régions compactées, avec notamment une réduction de la fréquence des racines épaisses (diamètre supérieur à 2 mm) dans les échantillons prélevés dans des portions de sol compactées et à une profondeur de sol croissante. D'autre part, la partie compactée de l'inter-rang (sous les roues) limite la distribution latérale du système racinaire du pêcheur (Petry et al., 2016). Au travers de la compaction, de nombreuses études sur le kiwi se sont déjà penchées sur le développement des racines dans le sol en analysant notamment la longueur des racines (Smith et al., 1989), la densité de racines (cm racine par cm³ de sol) (Gandar et Hughes, 1988) ou encore la masse racinaire (kg de racines par plant) (Hughes et Gandar, 1989).

Deuxièmement, **la compaction affecte les mouvements d'eau dans le sol**. En effet, un sol compacté, en diminuant la porosité du sol, diminue la réserve utile du sol (Richard et al., 2001), mais aussi sa rétention en eau. Des sols compactés deviennent donc des sols plus sensibles à l'hydromorphie (Van Dijck et Van Asch, 2002). Les études qui s'intéressent à la compaction des sols vont là aussi très généralement se pencher sur les propriétés hydriques de ces sols compactés (Pagliai et al., 2004 ; Richard et al., 2001 ; Van Dijck et Van Asch, 2002). Ces deux premiers points ont un impact sur la durabilité des vergers, et sur la vigueur des arbres concernés pouvant se traduire par une baisse de rendement et donc un **impact économique pour le producteur**.

Enfin, **la compaction des sols peut aussi avoir un impact négatif sur l'environnement** comme le montre la synthèse bibliographique de Soane et Van Ouwkerk (1995). Le compactage peut modifier les flux des gaz du sol vers l'atmosphère en raison de son influence sur la perméabilité du sol, l'aération du sol et le développement des cultures. Il est démontré que le compactage du sol entraîne des changements dans les propriétés du sol qui contrôlent les émissions de gaz à effet de serre, le ruissellement de l'eau et des polluants dans les eaux de surface, et le mouvement des nitrates et des pesticides dans les eaux souterraines. Le compactage du sol affecte également les quantités d'engrais et d'énergie utilisés dans la production agricole, ce qui peut avoir des conséquences environnementales négatives supplémentaires.

1.1.1.3. Les causes probables de la compaction des sols

Quand on parle de compaction des sols en agriculture, on accuse principalement le passage des roues, avec des engins qui sont aujourd'hui de plus en plus lourds (Langmaack et al., 2002). En arboriculture, un des facteurs aggravant est la nécessité d'appliquer des fongicides après la pluie car c'est à ce moment-là que le besoin est le plus important. Le passage de ces machines est donc souvent effectué dans des conditions trop humides (faible portance), avec

une répétition de ces opérations dans ces conditions plusieurs fois par an pendant plusieurs années (Petry et al., 2016). Le travail du sol est aussi remis en cause dans la compaction des sols. Sur ce sujet, la pratique du labour est encore très controversée dans le monde scientifique. Alors que le labour est censé favoriser l'écoulement d'eau en profondeur, certains résultats montrent que les sols labourés révèlent une diminution de la longueur, du volume et de la tortuosité des pores (Langmaack et al., 2002). Mais le travail du sol n'est pas la seule cause de dégradation de la structure du sol, d'autres pratiques de gestion comme l'irrigation sont également importantes, surtout à plus long terme (Pagliai et al., 2004).

Outre l'impact de l'homme, Langmaack et al. (2002) expliquent que les processus intrinsèques du sol ont une forte influence sur l'état des sols, ce qui peut évidemment conduire à une compaction naturelle. Des fortes pluies sur de courtes périodes, et a fortiori des inondations, peuvent aussi mener à des phénomènes de compaction naturels, ce qui s'accroît sur des sols avec une forte concentration en limons. En effet, la texture des sols a elle aussi une forte influence sur la tendance des sols à la compaction (Pagliai et al., 2004).

Enfin, Pagliai et al. (2004), soulignent l'importance d'étudier la compaction en sous-sol, car selon eux cette zone, largement sous-estimée dans les études, est en grande partie responsable du caractère hydromorphe de certains sols.

1.1.1.4. Possibilité de régénération de sols compactés

Selon Fell et al. (2018), la résilience de la structure est définie comme la capacité du sol à retrouver son intégrité structurale après une perturbation, tandis que la stabilité est la capacité du sol à résister à un changement (structurel) de contrainte appliquée. La vulnérabilité de la structure est définie comme l'effet combiné de la résilience et de la stabilité (Fell et al., 2018). La récupération de la structure du sol dégradé est beaucoup moins documentée que la dégradation de la structure et en particulier pour le compactage. Les auteurs soulignent un manque général de connaissances quantitatives sur les mécanismes associés et leur contribution relative dans les différents sols et climats, et le taux de récupération qui peut être attendu. L'étude de Fell et al. (2018) montre que la qualité et la vulnérabilité de la structure du sol dépendent fortement de la teneur en carbone organique du sol. Les pentes de la relation entre les propriétés physiques du sol et le taux de carbone organique sont un indicateur de la qualité de la structure en général. Même si la qualité de structure d'un sol est bonne, sa vulnérabilité reste selon eux importante si le rapport taux de carbone organique sur taux d'argile est faible (Fell et al., 2018). Selon Langmaack et al. (2002), la réhabilitation de la structure du sol dégradée après un événement de compaction est plus en raison des processus intrinsèques du sol que des opérations de travail du sol. L'effet du travail du sol pour briser la structure du sol compacté semble faible. D'un autre côté, les opérations de travail du sol et la circulation sur le terrain montrent un fort effet de compactage dans des sols anciennement non compactés, ce qui peut contrecarrer les processus de réhabilitation de la structure du sol. Les auteurs parlent alors du grand potentiel qu'ont les vers de terre pour favoriser la réhabilitation structurale des sols (Langmaack et al., 2002).

1.1.2. Compaction et impact sur les populations de vers de terre

1.1.2.1. Vers de terre indicateurs de la compaction des sols

En agronomie, les vers de terre sont classés en trois principales catégories écophysiologicals : les espèces épigées qui vivent à la surface du sol dans la litière ; les espèces endogées qui vivent continuellement dans le sol et creusent un réseau de galeries sub-horizontales à horizontales ; et les espèces anéciques (~80 % de la masse des lombrics) qui occupent l'ensemble du profil de sol dans des galeries verticales à sub-verticales qu'ils creusent pour certains jusqu'à un mètre de profondeur.

Que ce soit en grandes cultures, en forêt, en vergers ou pâtures, un grand nombre d'études mettent en évidence une **corrélation négative entre la densité apparente et l'abondance de vers de terre** (Capowiez et al., 2009 ; Keller et al., 2017 ; Schon et al., 2011 ; Beylich et al., 2010). Comme le montre l'étude de Keller et al. (2017), où la biomasse des vers de terre dans des parcelles compactées est 35% inférieure de celle de sols non compactés. Le compactage du sol diminue donc les quantités de vers de terre, d'une part directement par mortalité (écrasement) ou indirectement par modification de leur habitat (Schon et al., 2011). En effet, l'apparition d'engorgement et la diminution des niveaux d'oxygène dans le sol au point de conditions d'anaérobies affecte aussi la faune du sol (Beylich et al., 2010).

Les effets de la compaction sur les vers de terre dépendent aussi de la **catégorie écophysiological de l'espèce, et de l'âge / la taille des vers de terre considérés**. En ce qui concerne le type écologique des espèces, les espèces épigées semblent être plus sensibles à la compaction (Dominguez et al., 2010). Chan et Barchia (2007) ont ainsi montré que *A. caliginosa* était fortement affecté par le compactage du sol. De son côté l'étude de Langmaack et al. (2002) montrent que l'activité de fouissement de l'anécique *L. terrestris* ne semble pas être affectée négativement, tandis que l'endogé *A. caliginosa* semble avoir une activité de fouissement réduite dans un sol anciennement compacté. En ce qui concerne la taille des vers de terres, Dominguez et al. (2010) montrent que les espèces plus grandes semblent être moins sensibles au compactage du sol.

Enfin, même si l'abondance de vers de terre reste inchangée face à la compaction, leur **activité** peut être limitée. Le volume des terriers et la longueur totale des terriers, par exemple, peuvent être considérablement réduits en raison de sols compactés (Beylich et al., 2010). Ampoorter et al. (2011) ont fait des études sur *L. terrestris* et expliquent que dans des sols compactés, il devient plus difficile de repousser les particules. Le ver est donc obligé d'ingérer une plus grande quantité de sol pour creuser. Comme ce processus a des besoins énergétiques élevés, il conduit à une activité réduite qui peut s'arrêter à des degrés de compaction élevés.

1.1.2.2. Vers de terre acteurs dans la décompaction des sols

Les vers de terre peuvent non seulement récupérer mais aussi neutraliser en partie les effets néfastes causés par la compaction du sol (Cambi et al., 2015). Dans une forêt du Missouri, Jordan et al. (2000) ont vérifié qu'une récupération presque complète de la densité des vers de terre, qui avait été considérablement réduite par le compactage du sol, s'était produite deux ans après l'exploitation forestière. Un rétablissement plus lent des populations de vers de terre a été

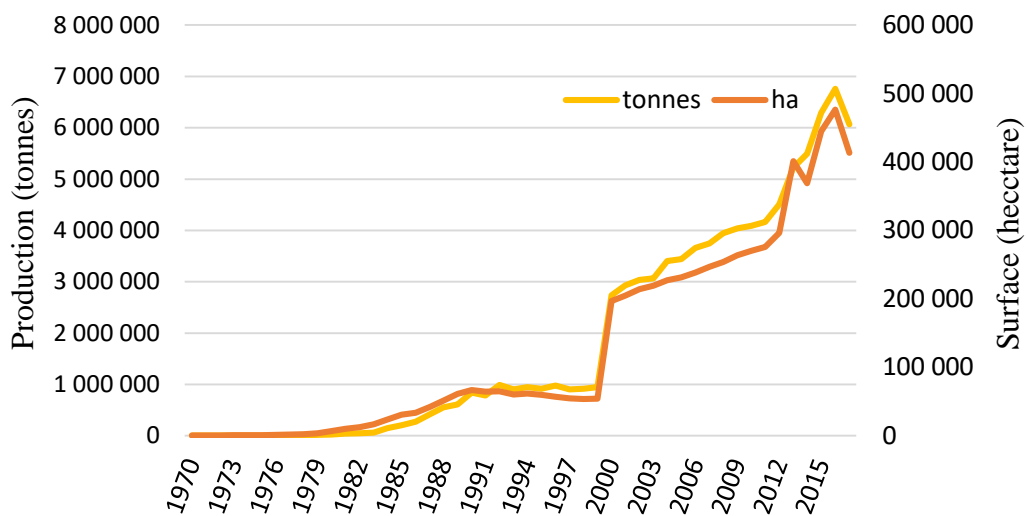


Figure 1 : Production et surface de kiwi dans le monde de 1970 à nos jours (FAOSTATS, 2018)

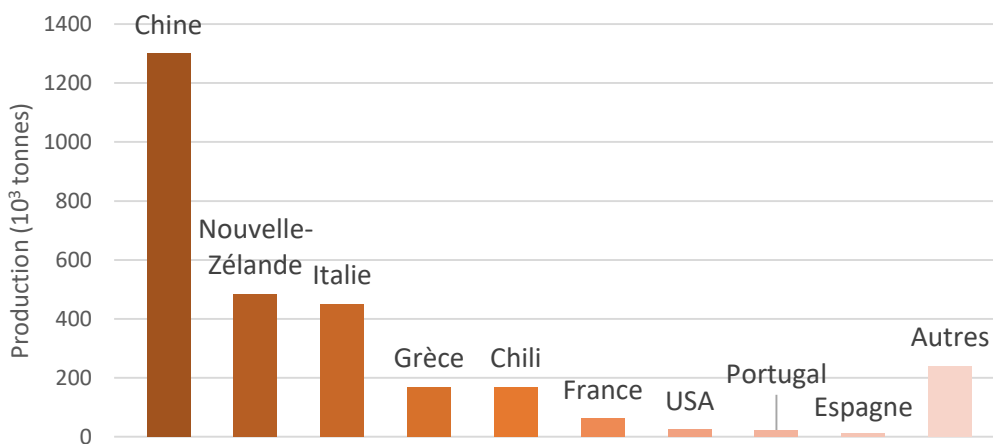


Figure 2 : Répartition de la production mondiale de kiwi (FAOSTATS, 2018)

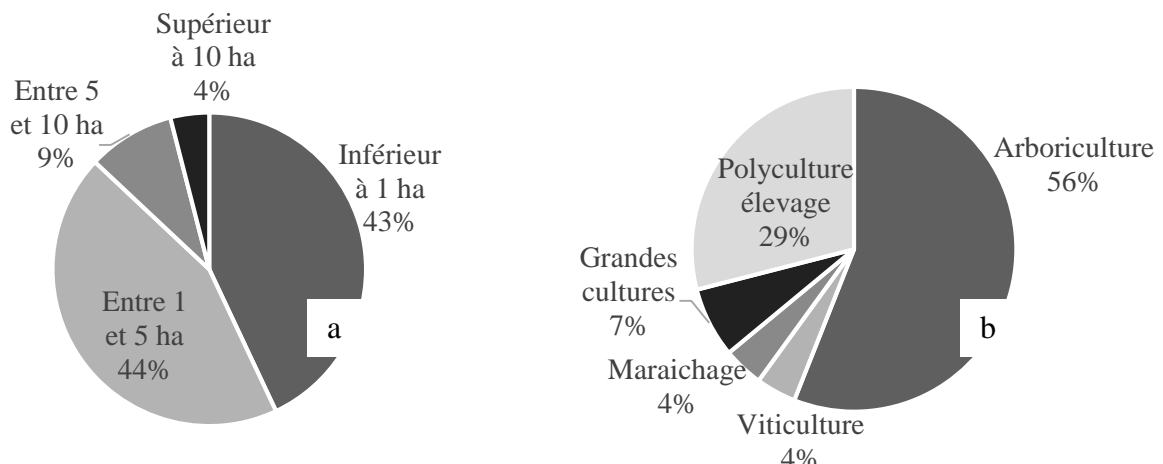


Figure 3 : Surface moyenne (a) et structure (b) des exploitations de kiwi françaises (Serrurier, 2013)

enregistré par Bottinelli et al. (2014) dans deux forêts du nord-est de la France qui ont été trafiquées par un camion à huit roues motrices avec une charge d'environ 23 tonnes.

Cependant, les effets des vers de terre dans la décompaction des sols restent controversés. Récemment, Lang et Russell (2019) ont réalisé une méta analyse des effets des vers de terre sur la densité apparente. Ce travail montre que les effets des vers restent très variables selon les études allant d'une diminution de 25% à une augmentation de 36% de la densité apparente. Les auteurs dénoncent d'importantes lacunes dans nos connaissances sur les effets des vers de terre sur la densité apparente en particulier vis-à-vis de la complexité de nos sols. L'impact des vers de terre, très multicritère, dépend de l'espèce, de leur masse corporelle et des caractéristiques du sol concerné. Reste à savoir ce qui se passe dans les vergers de kiwi du Sud-Ouest de la France.

1.2. Les problèmes agronomiques liés au sol en vergers de kiwi

1.2.1. Présentation de la filière kiwi

1.2.1.1. La filière kiwi dans le monde

Le kiwi (*Actinidia*) est une plante originaire de Chine, où il est dégusté depuis plus de 2 000 ans. Il faudra attendre le début du XX^e siècle pour que la culture soit domestiquée et sélectionnée par les néo-zélandais, qui lui donnèrent son nom commercial : le kiwi, et permettent à ce fruit de connaître ses premiers succès sur la scène internationale (Baudry et al., 2003). Depuis, la production a considérablement augmenté dans le monde allant de 60 000 ha de vergers en 1994 à 410 000 ha en 2015 (figure 1). Depuis 2015 la légère baisse de la production observée est essentiellement liée au développement de la bactériose du kiwi *Pseudomonas syringae* pv. *Actinidiae* (PSA), et à des conditions climatiques défavorables. Par ailleurs, et comme le montre la figure 2, la filière est caractérisée par un nombre très restreint de pays producteurs (Baudry et al., 2003). En termes de production, la Chine reste le premier pays producteur de kiwi au monde (1 300 000 t/an). Sa production est néanmoins insuffisante pour combler la demande de son marché intérieur en kiwi, et la Chine reste donc un pays importateur de kiwi. En terme d'exportations, deux pays ressortent : La Nouvelle-Zélande (485 000 t/an), second producteur et premier exportateur de kiwi au monde, et l'Italie (451 000 t/an). Ensuite, se situe la Grèce et le Chili (170 000 t/an) et enfin la France (62 000 t/an). La France, au sixième rang mondial, ne produit qu'environ 2% de la production, ce qui révèle encore une fois que la production n'est concentrée que sur très peu de pays (FAOSTAT, 2018).

1.2.1.2. La filière kiwi en France

Avec 3 804 ha cultivés, 53 202 tonnes produites et 1 500 producteurs en 2019, le kiwi est la 8^e espèce de fruit produite en France (FranceAgrimer, 2018). Arrivée dans les années 1980, la culture du kiwi en France reste récente avec des vergers qui sont encore en place aujourd'hui (Baudry et al., 2003). La moyenne d'âge actuelle des vergers tourne autour de 26 ans.

Les surfaces moyennes de kiwi cultivées par les producteurs restent petites avec une moyenne de 2,89 ha. Comme le montre la figure 3a 75% des exploitants cultivent moins de

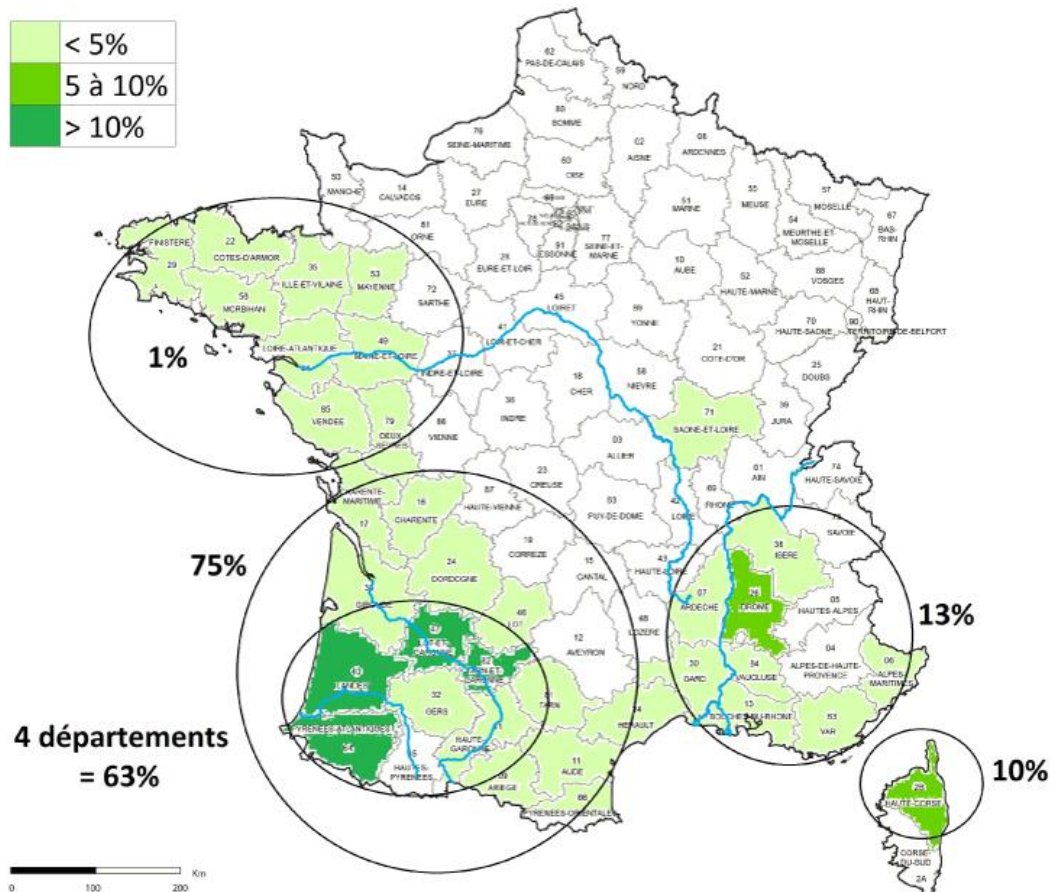


Figure 4 : Localisation des vergers de kiwi français et importance relative de chaque département dans la production nationale (France Agrimer, 2018)

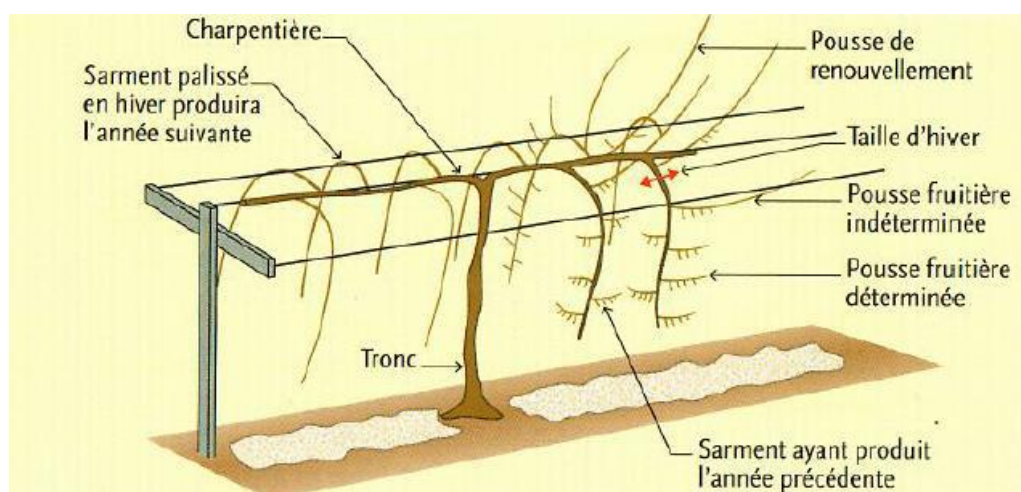


Figure 5 : Schéma théorique d'un plant de kiwi conduit en système T-barre (Baudry et al., 2003).

3 ha de kiwi, 12% entre 3 et 5 ha et 11% plus de 5 ha. Le kiwi était historiquement un atelier complémentaire d'une exploitation de polyculture-élevage (bien que pouvant représenter un revenu conséquent). Aujourd'hui, les kiwiculteurs sont plus spécialisés : 56% des exploitations ayant du kiwi sont à dominante arboricole, pour 29% en polyculture élevage et 15% en cultures végétale (céréales, maraichage, horticulture, viticulture) (figure 3b). (Serrurier, 2013).

Concernant la répartition géographique des vergers français, ils se sont développés dans les territoires les plus propices, très souvent en bordure de fleuves pour faciliter l'accès à l'eau. La majeure partie des vergers français est localisée dans le Sud-Ouest avec 78 % de la production nationale représenté par deux bassins de production et quatre départements, la vallée de la Garonne (Tarn-et-Garonne, Lot-et-Garonne) et la vallée de l'Adour (Pyrénées-Atlantiques, Landes) (figure 4). Un troisième bassin de production se situe autour de la vallée du Rhône qui représente 13% de la production nationale, ainsi qu'au nord de la Corse (10%). Enfin, il existe des kiwis en beaucoup plus faible proportion tout au long de la côte Ouest en remontant jusqu'à la vallée de la Loire et la Bretagne (1% de la production nationale).

1.2.2. Morphologie de l'*Actinidia*

1.2.2.1. Eléments de base

Le kiwi est une liane du genre *Actinidia*. Il existe plus de 50 espèces mais seulement 3 sont cultivées : *Actinidia deliciosa* (variété verte : Hayward), *Actinidia chinensis* (variétés jaunes & rouge), *Actinidia arguta* (baby kiwis) (Baudry et al., 2003). Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement à la variété Hayward, qui représente encore aujourd'hui près de 90% des volumes mondiaux. Le kiwi est une culture pérenne conduite comme une vigne avec un palissage. Il est cultivé sous deux systèmes, soit en T-barre (figure 5), soit en pergola, le système T-barre étant le plus majoritaire en France (Baudry et al., 2003).

Sur le plan spatial, et comme le montre la figure 5 ci-contre, un arbre est constitué de sa structure pérenne avec le tronc à environ 1,70 m de haut et deux charpentières, et de sa structure productrice représentée par les sarments, taillés chaque hiver pour redonner des fruits l'année suivante.

1.2.2.2. Système racinaire

Les kiwis ont un vaste système racinaire clairsemé, il est composé de racines principales fortes et charnues, et de radicelles nombreuses et très ramifiées comparé aux autres espèces fruitières (Baudry et al., 2003). Hughes et al. (1986), ont étudié le système racinaire de neuf vergers de kiwi néo-zélandais différents sur des sols limoneux, argilo-limoneux, et sablo-limoneux. Selon cette étude, la profondeur varie en fonction du type de sol et de l'âge du verger, mais les racines descendent en moyenne jusqu'à 1 m de profondeur. Hughes et Wilde (1989), montrent ensuite que la quasi-totalité des racines se trouvent dans les 25 premiers centimètres du sol, ce qui est très superficiel pour une culture pérenne. Sur des sols limoneux, McAneney et Judd (1983), font valoir dans leur étude que les racines s'étendent latéralement jusqu'à 2,2-2,4 m de la base du tronc.

Le système racinaire semble atteindre sa densité et distribution latérale maximale à partir de 10 ans. En effet, les résultats de Hughes et al. (1986) montrent que dans des vergers de moins de 10 ans, la densité des racines diminue en s'éloignant de la base du tronc, et après 10 ans les

racines explorent la totalité du verger. Il faut donc attendre 10 ans pour qu'un plant développe entièrement son système racinaire, après lesquels les nouvelles racines sont produites pour remplacer les plus anciennes.

Des mesures sur des plantations matures de kiwi ont indiqué qu'avec une densité de plantation commune de 5 x 5 mètres, les racines sont capables d'exploiter horizontalement toute la réserve d'eau du sol disponible (McAneney et Judd, 1983). Les racines du kiwi ont de nombreuses ramifications très développées, et importantes pour le bilan carbone, la nutrition minérale et les relations hydriques de la plante (Reid et al., 1993). Cependant, comme de nombreuses études le révèlent, les racines du kiwi ont un rapport très sensible avec l'eau du sol.

- **Besoins en eau**

Dans l'étude de McAneney et Judd (1983), les conductivités hydrauliques mesurées dans les tissus de xylème du kiwi sont les plus élevées connues des auteurs. Pour résumer, McAneney et Judd (1983) montrent que les plants de kiwi ont des **besoins en eau particulièrement élevés**, dûs à une surface foliaire très importante et à un taux de transpiration lui aussi très important. En effet, en France, l'irrigation sur plant de kiwi paraît indispensable, et tous les vergers sont pourvus d'un système d'irrigation. Dans la monographie du kiwi, le CTIFL estimait en 2003 un déficit à compenser sur les vergers français allant de 300 à 600 mm d'eau.ha⁻¹.an⁻¹ en fonction des années (Baudry et al., 2003).

- **Besoins en oxygène**

En plus des besoins en eau indispensables, les racines du kiwi sont aussi très sensibles à ce qu'on appelle l'asphyxie racinaire. Smith et al. (1989) ont étudié en milieu contrôlé le comportement des plants de kiwi lorsque les racines étaient soumises à différents taux d'oxygène. Ils rappellent que les espèces varient considérablement d'une part dans leur sensibilité initiale et d'autre part dans leur capacité à s'adapter à des conditions anaérobiques. Ils montrent alors que les plants d'*Actinidia* sont peu performants dans ces deux domaines. Au niveau de leur sensibilité initiale, Smith et al. (1989) font valoir que l'espace entre les cellules radicalaires destinées à la circulation des gaz est d'environ 2% du volume total des racines, dans les sols aérés et non-aérés. Or les valeurs en dessous de 5% sont considérées comme très sensibles aux conditions anaérobiques, avec l'exemple des pois et haricots qui sont des espèces traditionnellement considérées très sensibles aux conditions anaérobiques et qui ont une porosité racinaire double de celle du kiwi. Du côté de la capacité à s'adapter aux conditions anaérobiques, le manque d'oxygène dans la rhizosphère peut être compensé au niveau des racines de certaines espèces par le développement de tissus parenchymateux. Cette modification de l'anatomie racinaire permet à l'oxygène de diffuser plus librement des tissus du sol vers les racines. Cependant les auteurs n'observent pas de tels développements pour les racines du kiwi qu'elles soient en milieu aérés ou non aérés. Enfin, les auteurs montrent qu'une plante d'*Actinidia* adulte peut consommer environ $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ d'oxygène, ce qui est modéré à élevé par rapport à d'autres d'espèces (les valeurs vont de 1,8 à $9 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). D'après l'expérience menée par Smith et al (1989), il ne faudrait donc que 5 heures pour épuiser tout l'oxygène disponible dans la rhizosphère dans un sol bien ventilé passant à une situation d'asphyxie. Cette forte consommation en oxygène, couplée à une sensibilité importante et un

manque d'adaptation aux conditions anaérobiques assure que même une courte période de faible concentration en oxygène va sérieusement affecter le plant de kiwi. D'après les mêmes auteurs, il suffirait que 25% des racines soient soumises à des conditions d'anoxie pour déterminer une baisse de la conductance stomatique de la couronne après environ 48 h (Smith et al., 1989).

Les plants de kiwi ont donc de forts besoins en eau d'un côté et sont très sensibles aux conditions anaérobiques de l'autre. La monographie du kiwi (Baudry et al., 2003) souligne ce problème et préconise aux producteurs français de faire très attention dans la gestion de l'irrigation, car trop d'eau pourrait engendrer des conditions d'asphyxie pour les racines. Ils conseillent notamment l'utilisation de sondes de gestion hydrique pour apporter la bonne dose au bon moment et éviter ce phénomène. Pour en revenir à la compaction du sol, une diminution de la porosité diminue donc la place pour l'eau et l'oxygène, **ce qui fait du kiwi une espèce bel et bien physiologiquement sensible à la compaction des sols.** Etroitement lié à la compaction, le kiwi est donc particulièrement sensible à la stagnation de l'eau, même transitoire, dont les effets délétères peuvent survenir, si le sol ne permet pas le drainage rapide des excès d'eau, même après une forte pluie (Reid et al., 1992). Ainsi, des problèmes de dépérissement sur des plants de kiwi transcrits par des symptômes souterrains et aériens, et associés à la pourriture des racines, à l'engorgement en eau et au manque d'aération du sol ont déjà été observé partout dans le monde. De nombreuses études se sont penchées sur le sujet du lien entre kiwi, sol et eau du sol, que ce soit en Nouvelle-Zélande (Reid et al., 1992 ; Reid et al., 1991 ; Smith et al., 1990 ; Hughes et Wilde, 1989), en Corée du Sud (Lee et al., 2001), au Chili (Latorre et al., 1991) et en Italie avec ce qu'ils appellent la « Moria del kiwi » (Tacconi et al., 2019 ; Sorrenti et al., 2016 ; Tacconi et al., 2014).

1.2.3. Culture du kiwi et relation eau-sol-racine

1.2.3.1. Exemple de la « Moria del kiwi » en Italie

Une détérioration progressive, allant parfois jusqu'à la mort des plants de kiwi, a été observée en 2012 et 2013 sur environ 600 ha dans la province de Vérone au nord de l'Italie (Tacconi et al., 2014). Ce phénomène apparaît alors soudain et difficilement explicable, les italiens le nomment « Moria ». Récemment Tacconi et al. (2019) ont fait le point sur la situation encore problématique aujourd'hui. La « Moria » se répand actuellement à travers tout le pays affectant 12,6% de la surface nationale (3 160 ha sur 25 000 ha) avec plus 1 600 hectares arrachés depuis 2012. La « Moria » est caractérisée par une pourriture racinaire, qui entraîne le flétrissement des plantes, avec pour conséquence une perte de production voire la mort de l'arbre (Tacconi et al., 2019).

La « Moria » apparaît de façon inégale dans le verger (Tacconi et al., 2019). Elle est observée dans tous les cultivars cultivés à Vérone (« Hayward », « Soreli », « Jin Tao », « Summer ») et dans des vergers de tout âge, y compris ceux qui viennent d'être plantés (Tacconi et al., 2014). Cependant, tous s'accordent à dire que les zones sans pentes semblent être beaucoup plus touchées, tandis que les zones vallonnées sont quasiment épargnées par le problème (Tacconi et al., 2014 ; Sorrenti et al., 2016 ; Tacconi et al., 2019).

Les causes du problème restent floues. En 2014, Tacconi et al. font la remarque qu'en 2012 et 2013, le déclin progressif des plants s'est produit pendant des étés avec des températures

élevées (plus de 35°C) nécessitant une irrigation abondante des sillons, et avec des températures douces et des précipitations abondantes en hiver et au printemps qui ont causé de longues périodes d'engorgement du sol. Les auteurs ont analysé les sols sous plantes saines et symptomatiques mais les résultats n'ont montré aucune anomalie ni différence significative : la texture est limono-sableuse avec 2,6-3% de matière organique, généralement riche en limon aux premiers 20 cm, tandis qu'au-dessus de nombreux sables et graviers sont présents. Cependant les auteurs assuraient déjà en 2014 le rôle des agents pathogènes, de la structure et de la gestion des sols, et du changement climatique dans le phénomène de la « Moria » (Tacconi et al., 2014). En 2016, Sorrenti et al. mettent l'accent sur l'implication de la gestion de l'eau et de l'irrigation dans le déclin soudain des kiwis véronais. En effet, l'été 2012, malgré la tendance climatique anormale, les fournitures d'irrigation dans les vergers de Vérone respectaient la gestion traditionnelle de la zone. La gestion l'eau serait alors le déclencheur d'une série de conditions défavorables (par exemple des agents pathogènes) qui ont endommagé le système racinaire des plantes (Sorrenti et al., 2016).

En 2019, Tacconi et al. remettent en cause l'implication de l'irrigation comme principal facteur. Ils soulignent que depuis plus de 30 ans les pratiques d'irrigations sont les mêmes et maintenant un excès minimum d'eau provoque l'effondrement des plantes. Ces auteurs pensent que les facteurs biotiques (agents pathogènes) jouent un rôle déterminant dans l'apparition du phénomène. Cependant, **le problème est si répandu qu'il n'est pas possible de trouver un facteur commun entre celui-ci et une pratique culturelle particulière, si ce n'est éventuellement le changement climatique**, qui est malheureusement aussi présent dans le Sud-Ouest de la France. En effet, certains cas sont attribuables à une stagnation temporaire de l'eau à la suite de fortes pluies, mais de nombreux cas "inexplicables" semblent entraîner la mort. Les causes précises ne sont donc pas encore connues. La structure du sol, de l'eau et des micro-organismes semble jouer un rôle important. Les changements climatiques en cours entraînent un changement des précipitations, à la fois en termes de fréquence et d'intensité, et de températures, qui influencent par conséquent l'évapotranspiration des plantes et induisent donc une plus grande demande en eau (Tacconi et al., 2019).

De tels phénomènes de détérioration de l'état sanitaire des plants de kiwi ne sont pas présents qu'en Italie et ont été observés ailleurs dans le monde. En Nouvelle-Zélande en 1988, le cyclone Bola a provoqué l'inondation de vergers de kiwi (jusqu'à 440 mm en 48 h). Des auteurs ont tenté d'observer les symptômes de cet événement dès le premier déclin des plants (Reid et al., 1991), puis d'analyser les performances des kiwis la saison suivante (Reid et al., 1992). De même, encore en Nouvelle-Zélande, avec le cyclone Delilah, où environ 30 000 arbres (plus de 50 ha) sont morts en raison de la saturation en eau du sol pendant 3 jours consécutifs (McAneney et al., 1989).

1.2.3.2. Symptômes souterrains

Hughes et Wilde (1989) ont mesuré l'impact d'un sol hydromorphe par rapport à un sol bien drainant sur des plants de kiwi. Tout d'abord ils confirment que la densité apparente est bien nettement plus élevée de 0 à 70 cm pour les sols à caractère hydromorphes. Ensuite ils montrent que le volume occupé par les racines est presque 2 fois plus faible, les racines vont quasiment 2 fois moins profond, et enfin la masse racinaire est quasiment 3 fois plus faible dans

le sol à caractère hydromorphe que dans le sol drainant. **Face à l'hydromorphie le système racinaire paraît donc beaucoup moins développé** (Hughes et Wilde, 1989). En conditions contrôlées Smith et al. (1990) précise que la croissance radicale des plantes d'*Actinidia* a déjà été réduite après 3 heures par jour d'asphyxie répétée pendant 10 jours.

En plus du mauvais développement des racines, celles restantes montrent des signes de mauvaise santé. Tout d'abord par la couleur, de nombreuses études parlent d'un **brunissement généralisé**, affectant surtout les petites racines, avec peu de renouvellement des racines primaires (blanches) (Reid et al., 1991 ; Tacconi et al., 2019 ; Sorrenti et al., 2016). Dans les cas graves, on observe une hypertrophie et une décomposition ultérieure de la couche corticale la plus externe des racines, qui a tendance à se séparer facilement (détachement phloématique) du cylindre central. Ceci traduit une fonctionnalité compromise du système vasculaire. Les vaisseaux du xylème des racines atteintes de la « Moria » ont un diamètre plus petit et certains semblent partiellement voire totalement obstrués, limitant efficacement leur fonctionnalité globale (Sorrenti et al., 2016).

Enfin, en étudiant la santé des plants de kiwi après inondation, Reid et al. (1991) expliquent que le déclin précoce est étroitement associé à la **mort des racines nourricières**. Ils affirment alors qu'un des principaux facteurs de la mort des racines nourricières et du déclin précoce des arbres est la mauvaise structure du sol, ce qui a entraîné un drainage inadéquat et l'anaérobie du sol, et rejoint la problématique de cette étude (Reid et al., 1991).

1.2.3.3. Symptômes aériens

Sur sol hydromorphe par rapport à un sol sain, Hughes et Wilde (1989) notent une réduction de la circonférence du tronc, des fruits plus petits (et non récoltés), et des arbres avec moins de feuilles, plus flétries. En milieu contrôlé, Smith et al. (1990) déterminent que la croissance de l'arbre est réduite lorsque l'apport d'oxygène sur les racines est réduit, et cette diminution est proportionnelle au nombre d'heures par jour sans aération. Des symptômes sur les feuilles apparaissent alors systématiquement : 1. Flétrissement des feuilles les plus âgées, 2. Chlorose inter veineuse, 3. Apparition de plaques nécrotiques interveineuses (Smith et al., 1989). Les mêmes auteurs rapportent une réduction substantielle de l'activité stomatique foliaire. Ainsi, la fonctionnalité stomatique des plantes n'est entièrement récupérée que 3 jours après le rétablissement des conditions normales de ventilation (après 24h d'anoxie), alors qu'elle n'est pas récupérée pour les plantes maintenues en asphyxie pendant au moins 3 jours en continu, comme preuve des effets irréversibles induits par l'asphyxie radicale, même de courte durée (Smith et al., 1990). Sorrenti et al. (2016) expliquent que le manque d'oxygène dans le sol dans la zone racinaire dû à un excès d'eau augmente l'effort que les racines elles-mêmes rencontrent pour absorber l'eau. L'interruption de l'écoulement de l'eau vers les feuilles, bien que l'eau abonde dans le sol, est donc responsable du dessèchement de ces dernières.

Dans le cas de la « Moria », des symptômes récurrents sont observés à partir de la phase de nouaison, d'abord sur quelques pousses sur lesquelles apparaissent des dessiccations partielles qui avancent du bord ou de l'apex du rabat des feuilles vers l'intérieur, jusqu'à affecter une grande partie de la lame elle-même. Les feuilles présentent une nécrose brune étendue, souvent accompagnée de déformations au bord. Par la suite, lorsque la nécrose affecte la plupart des feuilles, la phylloptose et l'effondrement définitif des plantes prennent le relais. Au cours du phénomène, les plantes montrent une activité végétative réduite et un faible développement des fruits (Sorrenti et al., 2016).

En Nouvelle-Zélande, après les inondations dues au cyclone Bola, les premiers symptômes ont été définis par défoliation prématurée dans les onze premières semaines suivant l'inondation (Reid et al., 1991). La saison suivante, les auteurs ont recensé que 14% des plants étaient morts. Ceux qui ont survécu aux symptômes de déclin précoce ont montré une faible vigueur du feuillage et de la croissance du tronc. La vigueur du feuillage est positivement liée à la santé des racines nourricières. Les plants qui ont survécu aux symptômes de déclin précoce ont produit 26% de masse en moins et 24% de fruits en moins que celles qui n'ont montré aucun déclin précoce. Par rapport aux plants ayant une vigueur suffisante, les plants de faible vigueur au printemps 1988 ont produit 77% de masse de fruits en moins et 69% de fruits en moins par plant. Les auteurs s'accordent à dire qu'**il n'est probablement pas rentable pour les kiwiculteurs d'essayer de sauver des plants qui montrent un déclin précoce suite aux engorgements d'eau** (Reid et al., 1992).

1.2.3.4. Irréversibilité des symptômes

De nombreuses études sur le sujet s'accordent sur le caractère irréversible du phénomène. En effet, dans l'expérience de Hughes et Wilde (1989) le verger était jugé en relative bonne santé depuis plusieurs années. Or, la pluviométrie était nettement plus faible les années précédentes que celle de l'été 1986 après laquelle les symptômes de mauvaise santé du verger sont apparus. Cette forte pluviométrie combinée avec un sol qui draine mal est probablement la cause de mort racinaire et des symptômes physiologiques qu'ils observent dans cette étude. Les auteurs expliquent que les vergers plantés sur des sols avec un mauvais écoulement de l'eau peuvent bien se porter durant plusieurs années avec une pluviométrie faible à moyenne, mais que des symptômes graves voir fatals pour les plants peuvent arriver après une année de pluviométrie inhabituellement élevée. Ces vergers sont donc moins résilients, notamment face au changement climatique (Hughes et Wilde, 1989).

En ce qui concerne le phénomène de la « Moria », Tacconi et al. (2019) font eux aussi valoir que la détérioration sanitaire des kiwis atteint irréversiblement, même en une seule saison, la plante entière. Les kiwis ont d'abord montré des dégâts d'engorgement 3 à 7 jours après l'inondation, mais la proportion d'arbres affectés variait considérablement d'un site à l'autre. Pour Sorrenti et al. (2016) les répercussions actuelles sont probablement le résultat d'une gestion de l'eau peu rationnelle au fil des décennies mais qui, avec la succession de saisons climatiquement "anormales", a entraîné la mort de plantes. Dans le cas des inondations du cycle Bola, la moitié des arbres affectés étaient encore stressés ou morts au printemps suivant (octobre 1988). Il semble que le moyen le plus important d'améliorer la résistance des kiwis aux inondations soit de s'assurer que la structure du sol est bien entretenue (Reid et al., 1991).

1.2.3.5. Engorgement et développement de maladies

La culture d'*Actinidia* est récente en France et jusqu'à l'arrivée de PSA, les problèmes sanitaires étaient restés plutôt limités. Cependant, en France comme à l'étranger, il a largement été prouvé que la présence d'eau en excès (fortes pluies, inondations) de manière passagère ou permanente, est un élément essentiel à l'expression d'un groupe de maladie en particulier : le *Phytophthora* (Baudry et al., 2003 ; Lee et al., 2001 ; Latorre et al., 1991 ; Tacconi et al., 2019).

Les symptômes de l'action du champignon *Phytophthora* ont été observés fin des années 1980' au Chili avec pourriture des racines, flétrissement et chlorose des feuilles, absence de croissance des serments, et éventuellement mort des plants (Latorre et al., 1991). En Corée en

1997, les vergers de kiwi ont été sévèrement touchés par une pourriture racinaire causée par le *Phytophthora*, un champignon qui n'existait jusqu'à présent pas dans ce pays (Lee et al., 2001), et évoquent les mêmes symptômes que ceux observés au Chili. D'après Lee et al., ce sont les symptômes de pourriture racinaires qui permettent de distinguer le *Phytophthora* d'autre maladie comme *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (PSA), la maladie du kiwi la plus répandue en France et dans le monde. Concernant la « Moria » en Italie, Tacconi et al. (2014) ont analysé plus de 50 racines symptomatiques révélant la présence d'espèces de *Phytophthora*, *Pythium* et *Cylindrocarpon* dans environ 70% des échantillons. Un autre élément important, les auteurs prouvent la pathogénicité du champignon avec des inoculations expérimentales de plants de kiwi faites avec des isolats identifiés comme *Phytophthora cryptogea*, *P. citrophthora* et *Pythium vexans* (Tacconi et al., 2014). Le point commun entre ces trois cas est que l'apparition du *Phytophthora* s'est révélée après de fortes pluies inhabituelles dans la région, et s'est avérée particulièrement plus sévère sur les sols pauvrement drainés et sans pente. Lee et al. (2001) ont montré sur leurs échantillons que 19 parcelles sur 23 ont été touchées en plaine, tandis que seulement une parcelle sur 58 a été infectée sur les vergers en coteaux.

En France, le *Phytophthora* est la première cause de mortalité des arbres (Baudry et al., 2013). Pour lutter contre le *Phytophthora*, les producteurs de kiwi ont aujourd'hui le droit d'utiliser le produit phytopharmaceutique Aliette Flash contenant 80% de Fosetyl-Al. Cependant, la maîtrise parfaite du régime hydrique du sol est présentée comme étant la meilleure méthode d'évitement à la propagation du champignon (Baudry et al., 2003 ; Lee et al., 2001 ; Latorre et al., 1991 ; Tacconi et al., 2019). Des travaux sur la décompaction des sols afin d'éviter la stagnation d'eau et l'asphyxie des racines peuvent donc éviter la propagation du *Phytophthora* et se présenter comme un mode gestion prophylaxique pour les producteurs.

1.2.4. La compaction des sols en verger de kiwi : Causes probables et solutions

Après avoir développé toutes les conséquences possibles que peuvent engendrer la compaction des sols sur des vergers de kiwi, il est temps d'énoncer les causes probables de cette compaction et les solutions qui ont été ou qui sont à envisager. De ce qui ressort de la littérature, mis en parallèle avec les retours de la profession (producteurs, coopératives, interprofession...), les causes probables de la compaction en vergers de kiwi sont les suivantes :

- **L'irrigation** : indispensable et abondante en vergers de kiwi (Baudry et al., 2003), il a déjà été montré qu'une mauvaise gestion de l'irrigation peut rapidement entraîner la compaction des sols lorsque les interventions se font ensuite sur des sols trop humides (Sorrenti et al., 2016).
- **Les inondations**, comme décrit ci-dessus, ont des conséquences irréversibles en vergers de kiwi (Reid et al., 1991 ; Reid et al., 1992). En France, les vergers sont quasiment exclusivement situés en bord de fleuve car les terres d'alluvion s'y trouvant sont plus propices à la culture du kiwi, et cela permet aussi un accès beaucoup plus facile à l'eau. Mais cette proximité avec les fleuves mène régulièrement aux inondations des vergers, qui favorisent la compaction et la dégradation de la qualité du sol en général.
- **Les conditions climatiques** : le sud-ouest est régulièrement soumis à des orages très violents, et le **dérèglement climatique** va accentuer leur survenue. Comme développé ci-dessus, tous les symptômes de dépérissement du kiwi dans le monde ont été observés

après des conditions climatiques anormalement rudes, ce qui guette aussi les régions du Sud-Ouest de la France.

- Enfin, on peut supposer que le **piétinement** humain et le **passage des roues** par les engins agricoles peuvent facilement engendrer la compaction des sols. En effet, la récolte des fruits (de fin octobre à début novembre), et les travaux de taille (tout au long de l'hiver) sont des travaux importants mobilisant beaucoup de personnes, le tout se déroulant majoritairement dans les conditions automnales et hivernales humides, favorisant une compaction superficielle sous le rang même des plants de kiwi, là où se situe la majeure partie des racines de l'arbre. Concernant le passage de roue, il reste très faible par rapport à d'autres cultures comme les pommiers par exemple, qui nécessitent beaucoup plus de traitements fongiques, mais n'est pas à oublier dans les causes de la compaction cette fois entre les rangs de kiwi, celles-ci pouvant empêcher la progression latérale des racines.

De manière général, les sols sous les vergers français de kiwi sont des sols plutôt filtrants avec une structure de qualité, mais les caractéristiques morphologiques du kiwi décrites en 2.3 en font une culture très sensible même à une légère compaction. De plus, l'effet des causes énoncées de la compaction des sols, parfois négligeable sur une année de production, est à multiplier avec la longévité des vergers.

Pour tenter de trouver des solutions aux problèmes liés à la compaction et la stagnation d'eau, des mesures de prophylaxie sont tout d'abord à envisager en vergers de kiwi. Sorrenti et al. (2016) proposent une meilleure gestion de l'irrigation, en utilisant des tensiomètres ou autres instruments appropriés pour évaluer le potentiel hydrique du sol et / ou de la plante, afin d'ajouter la bonne quantité au bon moment. Pour favoriser l'établissement de conditions idéales pour la prolifération de nouvelles racines, les mêmes auteurs envisagent la mise en place de systèmes de drainage et fossés de drainage en bordure des parcelles, l'entretien d'une culture de couverture dans l'inter rang et un niveau adéquat de matière organique dans le sol (Sorrenti et al., 2016). En France, le rapport du Ctifl préconise déjà aux producteurs ces méthodes prophylaxiques (Baudry et al., 2003), en mettant aussi l'accent sur le choix de la parcelle de kiwi (= sols drainants, zones régulièrement inondées à éviter, une exposition réduite au vent peut aussi limiter l'assèchement et donc l'irrigation...etc..).

Outre les mesures pour tenter d'éviter la compaction des sols en vergers de kiwi, cette étude se concentre sur deux leviers tentant de restaurer la porosité dans des sols déjà compactés : la scarification de sols et l'apport de matière organique.

1.3. Leviers proposés

Deux axes d'étude sont envisagés pour tenter de diminuer le tassement des sols : améliorer directement la qualité physique, ou améliorer la qualité biologique pour améliorer indirectement la qualité physique des sols.

1.3.1. Travail mécanique du sol et scarification

En agriculture, un des premiers leviers utilisé pour améliorer la structure d'un sol est le travail mécanique. Or, au vu du système racinaire superficiel sensible et très important pour la plante, il n'est pas envisageable d'utiliser des pratiques telles que le labour qui certes favoriserait l'écoulement d'eau mais détruirait aussi le système racinaire (Baudry et al., 2003).

En Corée du Sud, un traitement de sous-solage qui injecte de l'air sous pression dans le sol (60 cm de profondeur) a montré des avantages sur les propriétés physiques et chimiques du sol, avec des mesures de résistance à la pénétration réduite de 40% et une porosité augmentée de 16%, mais aussi des fruits plus gros à la récolte. En France si la pratique du sous-solage est conseillée et pratiquée par les producteurs de kiwi (Baudry et al., 2003), elle ne s'attaque cependant qu'au centre de l'inter rang des vergers, sans forcément améliorer la qualité sous le rang de kiwi, dans la zone supposée piétinée. C'est ainsi que la scarification, beaucoup moins agressive pour les racines, est envisagée dans cette étude pour lutter contre la compaction des sols sous le rang des vergers de kiwi.

La scarification est un outil particulièrement connu pour son utilisation sur pelouse, notamment chez des particuliers. En agriculture le principe est le même, des dents positionnées hélicoïdalement sur un axe transversal en rotation permettent de perforer le sol sans en déstructurer totalement l'horizon de surface. Aujourd'hui cette pratique est principalement utilisée en forêt, avec l'objectif de régénérer le couvert végétal et de lever le blocage provoqué par les compétitions interspécifiques, sans pour autant s'intéresser à ses effets sur la compaction du sol (Dassot et al., 2017). Les effets de la scarification sur les propriétés physiques et biologiques des sols sont donc pour le moment très peu référencés, et même très peu utilisés en arboriculture.

Une étude Brésilienne sur soja dans un alfisol a tout de même fait ressortir des résultats intéressants (Fin et al., 2018) : la scarification y a permis de réduire significativement la densité apparente du sol, la résistance à la pénétration, la microporosité et le rapport micropore/macropore, et d'augmenter la porosité totale. La préparation du sol par la scarification fournit donc selon les auteurs un environnement qui facilite le drainage et l'aération du système racinaire, ce qui entraîne des rendements de soja plus élevés (Fin et al., 2018). Cependant, l'une des limites de l'utilisation de ces systèmes de préparation du sol est le côté éphémère de leurs avantages sur les propriétés du sol, car la reconsolidation du sol se produit naturellement, les effets positifs de Fin et al. (2018) décrits ci-dessus ont disparus 18 mois après le passage de scarification. Drescher et al. (2016) ont observé dans un oxisol que les changements dans les propriétés indicatives de la structure du sol tels que la densité, la porosité totale et la macroporosité, ont duré moins d'une saison de récolte, mais que les effets de la scarification se sont maintenus jusqu'à 24 mois pour les propriétés liées au transport de l'eau, y compris la conductivité hydraulique et le taux d'infiltration stable de l'eau dans le sol, ces indicateurs étant donc plus sensibles pour évaluer la durée de la décompression mécanique. Selon les techniciens du CETA Basse Vallée de Durance, l'usage actuel sur pommier en France est de trois passages par an, ce qui permettrait une efficacité constante des effets.

1.3.2. Apports de matière organique

Comparés à la scarification des sols, les effets de l'apport de matière organique sur la structure du sol sont mieux connus, se distinguent alors des effets directs sur la structure du sol et d'autres effets indirects via la faune du sol.

1.3.2.1. Amendement organique et amélioration de la portance du sol

Il est connu qu'un apport de matière organique aurait tendance à améliorer la porosité du sol, ce qui pourrait, en partie, diminuer les problèmes compaction. Selon Pagliai et al. (2004), la taille et la distribution des pores augmente quel que soit l'apport de matière organique. Une

étude uruguayenne sur des terres d'alluvion limoneuses a montré que l'ajout d'amendements organiques augmentait la porosité et diminuait la densité apparente du sol (Alliaume et al., 2007). Selon les mêmes auteurs, les amendements organiques ont amélioré l'exploration des racines et la longueur totale des pousses et une tendance a été détectée sur l'amélioration du rendement en fruits de myrtilles. En 2008, Grosbellet dans sa thèse explique l'augmentation de la porosité par deux phénomènes. Tout d'abord par simple effet de dilution : les matières organiques ayant des masses volumiques réelles plus faibles que les matières minérales, un apport de matière organique devrait donc diminuer la masse volumique apparente du sol. Deuxièmement, l'augmentation de la porosité peut aussi être liée à l'augmentation de l'agrégation du sol après un apport de matière organique. Il paraît évident que plus les particules de sol sont grossières, plus les espaces lacunaires entre ces particules sont importants. Un autre point ressort alors, plus que la mise en place d'une nouvelle structure, c'est la stabilité de cette structure qui est importante pour garantir le maintien de propriétés physiques favorables au développement des végétaux, on parle alors de stabilité structurale des agrégats. Kay (1990) définit la stabilité structurale comme la capacité d'un sol à conserver l'arrangement de sa phase solide et de sa porosité quand il est soumis à une contrainte. Enfin, au travers de l'amélioration de la porosité, l'apport de matière organique induit aussi une amélioration du système hydrique du sol avec notamment une capacité de rétention d'eau plus importante, ce qui a été observé par de nombreux auteurs (Khaleel et al., 1981).

1.3.2.2. Les amendements organiques comme « boosters » de la vie du sol

L'apport de matière organique est aussi propice au développement de la faune du sol et donc sa qualité biologique (Lordache, 2010). C'est la macrofaune du sol qui est particulièrement intéressante dans le cadre du tassement des sols, car en creusant des galeries, cette composante de la qualité biologique des sols a un impact sur la qualité physique du sol et l'augmentation de sa porosité (Capowiez *et al.*, 2006). En creusant des galeries, les vers de terre maintiennent la porosité dans le sol, favorisent un meilleur écoulement de l'eau mais digèrent également la matière organique et participent à la minéralisation des nutriments. (cf partie 1.1.2.2. : Vers de terre acteurs dans la décompaction des sols).

En termes d'amendement organique, des études en vergers de kiwi ont déjà montré des résultats intéressants. Selon Sorrenti et al. (2016), l'apport d'améliorants organiques sur sol dans des vergers atteints par la « Moria » peut contribuer à stimuler l'émission de nouvelles pointes racinaires. Müller et al. (2019) ont comparé deux modes de production de kiwi différents : l'un en agriculture intégrée et l'autre en agriculture biologique. Comme les auteurs le rappellent, les résultats de cette étude sont multifactoriels, mais la principale différence entre les modes de production est la quantité et le type d'apport organique apporté. Ainsi les sols conduits en agriculture biologique (avec un apport plus important de MO) ont des taux de carbone organique significativement plus élevés que ceux des vergers suivant un mode de production dite intégrée, ce qui est positivement corrélé avec la porosité totale du sol. Les macrospores y sont plus grands et avec une connectivité plus grande, mais significativement moins nombreux dans les sols en système biologique que intégré. La gestion des vergers organiques a amélioré la fonction de filtrage de la couche arable en augmentant le taux de carbone des sols et en modifiant l'architecture des pores (Müller et al., 2019). Les résultats de Lago et al. (2019) soulignent un plus grand nombre de vers de terre anéciques après apport de matière organique, qui selon eux ont un rôle plus crucial dans l'amélioration de la structure du sol et l'incorporation de la matière organique.

1.4. Demande et objectifs de l'étude

En France, le GIS fruit a lancé un programme de « valorisation des sols de vergers ». Dans ce sens l'organisme a présenté les enjeux de recherche sur les sols des vergers, qu'ils définissent comme une « composante encore mal connue des 'expérimentations – système' en verger », ces enjeux sont ; *mieux comprendre les processus pour gérer le sol en diminuant les intrants et en mobilisant les services écosystémiques.* (Goutines et al., 2019)

Dans ce contexte, le Bureau national Interprofessionnel du Kiwi (B.I.K.) basé à Toulouse a fait appel à l'INRA pour mener des études scientifiques sur l'effet de différentes pratiques culturales sur l'état des sols. Des études semblables ont déjà été conduites dans d'autres pays plus gros producteurs de kiwi. Cependant, à l'exemple de la Nouvelle-Zélande, les vergers sont implantés sur des sols volcaniques avec des caractéristiques totalement différentes des conditions pédoclimatiques du Sud-Ouest de la France. L'objectif du stage est donc de récolter des données adaptées aux conditions locales, qui permettront par la suite de fournir la préconisation la plus adaptée possible aux exploitations de la région.

Le sujet de stage se décline en trois objectifs spécifiques :

- ❖ Recenser les pratiques de travail du sol mises en place aujourd'hui par les producteurs de kiwi français.
- ❖ Faire un état des lieux de la qualité des sols dans les vergers de kiwi du Sud-Ouest de la France
- ❖ Tirer toutes les informations possibles de l'impact de la scarification et de l'apport de matière organique sur la compaction du sol.

De manière plus générale, cette étude vise donc à étudier différents indicateurs de la qualité des sols dans deux des principaux bassins de productions français de kiwi (Bassin de l'Adour, bassin de la Garonne).

1.5. Question de recherche et hypothèses de travail

Dans ce contexte, la question de recherche traitée dans le mémoire est la suivante :

En quoi la compaction des sols constitue-t-elle un enjeu majeur pour les vergers de kiwi français ?

Pour répondre à cette question, quatre hypothèses de travail peuvent alors être posées :

- ❖ Les pratiques et opinions diverses des producteurs de kiwi permettent de mieux comprendre les enjeux, les causes et les conséquences de la compaction des sols.

- ❖ Il existe une variabilité mesurable de la compaction des sols au sein des vergers de kiwi, et entre les vergers de kiwi selon la texture du sol et la conduite des producteurs des vergers.
- ❖ Il est possible d'observer les conséquences de la compaction des sols sur l'état des vergers.
- ❖ Quatre mois après le passage des traitements, il est possible d'observer des premiers effets de la scarification et de l'apport de matière organique sur des indicateurs de la qualité physique des sols.

La vérification de ces hypothèses a impliqué une démarche sur deux grands axes de travail décrits dans la partie Matériel et Méthodes ci-après.

2. Matériels et Méthodes

Deux axes de travail distincts mais complémentaires sont suivis :

- Une **partie enquête** auprès des producteurs de kiwi français
- Une **partie expérimentale** conduite dans cinq vergers de producteurs du bassin de l'Adour et de la Garonne.

2.1. Enquête auprès des producteurs de kiwis

Les pratiques actuelles chez les producteurs sont variables (herbicides, travail du sol, mulch...) et conduisent à des sols avec des caractéristiques physiques et biologiques également très variables. Il est donc dans un premier temps nécessaire de caractériser les pratiques actuelles de travail du sol en vergers de kiwi. Mais aussi de faire remonter toutes sortes de savoir empirique, et de faire valoir le niveau de connaissance et l'opinion que les producteurs ont des sols de leurs vergers.

Un questionnaire internet a ainsi été diffusé le 4 mai 2020 via le réseau interne du BIK dans l'objectif d'atteindre l'ensemble des producteurs adhérents à l'institut. Ce questionnaire a été réalisé et diffusé via la plateforme Google form et est présenté en annexe de ce rapport.

➤ Elaboration du questionnaire

Les questions ont été réfléchies en sous-thèmes pour structurer le questionnaire de manière à avoir des réponses pertinentes. L'enchaînement des sections a été choisi dans l'objectif d'obtenir d'abord les informations générales sur les exploitations des producteurs répondants avant de poser progressivement les questions en lien direct avec le sujet.

Section 1 : Présentation

Cette première section sert d'une part de présentation personnelle, ainsi que des deux organismes commanditaires (INRAE et BIK). Elle permet d'autre part d'introduire brièvement le projet de recherche et les objectifs du questionnaire.

Section 2 : Exploitation et système de culture

Cette rubrique est une entrée en matière permettant de prendre connaissance assez généralement des exploitations et des systèmes de culture des producteurs ayant répondu à ce questionnaire. Les questions posées concernent les surfaces cultivées (en kiwi et totales), les modalités de plantation des vergers (distances entre pieds, à plat ou en butte, en système T-barre ou non) ainsi que le mode de production (agriculture biologique ou conventionnelle). Puis d'autres questions sont posées sur le système et le mode de pilotage de l'irrigation, la présence ou non d'un système de drainage, et enfin l'observation par les producteurs d'une quelconque maladie ou mortalité présente dans ses vergers.

Section 3 : Milieu biophysique

De la même manière que précédemment, l'objectif dans cette section est de prendre connaissance des conditions du milieu auxquels sont soumis les vergers de l'échantillon enquêté. Les questions posées concernent la situation topographique des vergers (en pente ou à plat), la pluviométrie et l'inondabilité des parcelles, ainsi qu'un certain nombre d'indicateurs caractéristiques de classification des sols des vergers tel que la texture, la pierrosité, le pH et le taux de matière organique. Pour aller plus loin, il leur a été demandé une appréciation de la profondeur de leurs sols ainsi que la profondeur racinaire des kiwis, de la présence et de l'évolution de la faune du sol, et du caractère ou non hydromorphe et/ou compact des sols de leur verger.

Section 4 : Conduite de culture

Comme dit précédemment, l'objectif dans cette rubrique est de recenser les pratiques mises en place par les producteurs aujourd'hui. Ainsi, les premières questions visent à calculer le nombre moyen de passages de tracteur pour les traitements phytopharmaceutiques, les travaux de taille et de récolte.

Section 4 a : Conduite de culture – travail du sol

Afin de rentrer plus précisément dans le vif du sujet de ce stage, une sous-rubrique a été élaborée pour prendre connaissance des pratiques de travail du sol mises en place par les producteurs, ainsi que la fréquence, l'objectif principal et l'opinion qu'ont les producteurs de leurs pratiques.

Section 4 b : Conduite de culture – Apport de Matière organique

Une autre sous-section a été créée pour connaître cette fois les modalités d'apport de matière organique mises en place par les producteurs. Les questions posées concernent alors la forme, l'origine, la dose, la fréquence, ainsi que l'objectif et l'opinion qu'ont les producteurs de cet apport de matière organique.

Section 5 : La compaction des sols en verger de kiwi

L'objectif dans cette rubrique est de connaître l'opinion et la connaissance qu'ont les producteurs sur le sujet de ce stage. Cette section est organisée sous forme de questions ouvertes pour tenter de retirer toutes informations de producteurs qui auraient entendu parlé, pensé ou même testé quelconques pratiques innovantes sur le sujet de la compaction des sols en verger de kiwi.

Tableau 1 : Détail des parcelles de l'expérimentation

Nom de la parcelle	SCAAP – Verger A	SCAAP – Verger B	Garlanpy – P24	Garlanpy - E27	Blue-Whale - Bourret
Coordonnées GPS	43.543653, -1.045575	43.523634, -1.065613	43.530405 -1.122038	43.495577 -1.021348	43.954083, 1.174528
Surface de la parcelle	5 000 m ² = 0,5 ha	4 640 m ² = 0,46 ha	17 020 m ² = 1,702 ha	10 000 m ² = 1 ha	7 700 m ² = 0,77 ha
Année de plantation	2002	1999	1998	1998	1997
Distance inter rang	5 mètres	5 mètres	5 mètres	5 mètres	5 mètres
Distance entre 2 pieds	4,5 mètres	4 mètres	4 mètres	4 mètres	3 mètres
Distance avec cours d'eau	5 mètres du Gave de Pau	260 mètres du Gave d'Oloron	860 mètres des Gaves Réunis	25 mètres du Gave d'Oloron	82 mètres de la Garonne
Inondabilité de la parcelle	Parcelle régulièrement inondée : 2014, 2018 et 2019	Parcelle régulièrement inondée : 2014, 2018 et 2019	Parcelle inondée que récemment : Février 2020, Novembre 2018	Parcelle inondée plusieurs fois par an, dernière de 1 m 80 en Décembre 2019	Parcelle très peu inondée. Dernière inondation il y a 4 ans.
Hauteur d'eau maximale	1, 50 mètres	1, 50 mètres	1, 50 mètres	2 mètres	Moins de 1 mètre
Nombre de jours consécutifs avant disparition de l'eau	Maximum 2 jours	Maximum 2 jours	Maximum 3 jours	Maximum 2 jours	Maximum 1 jour
Date d'analyse de sol	2015	2017	2019	2016	Pas d'analyse référencée
Taux de matière organique	1,4%	2,2%	2,3%	2%	1% selon lui
Texture du sol	Sablo-limoneux	Limono-sableux	Limon argileux	Sable argilo-limoneux.	Limono-argileux
% argile	11,6	16,3	19	10,6	-
% limon	37,2	46,1	63,4	26,3	-
% sable	48,3	28,2	8,9	50,5	-
pH eau	7,9	8,2	8,2	8,3	-
Mode de production	Conventionnel - arrêt du désherbage	Conventionnel	Conventionnel - arrêt du désherbage	Conventionnel	Biologique
Implantation à plat ou en butte	A plat	Butte	Légère butte	A plat	A plat
Système d'irrigation	Microjet sous frondaison	Microjet sous frondaison	Aspersion	Microjet sous frondaison	Aspersion
Système de drainage	Drains inter-rangs	Drains inter-rangs	Drains inter-rangs	Fossé de drainage	Pas de système de drainage

Section 6 : Informations complémentaires

Cette dernière section permet de collecter les coordonnées du répondant tout en le remerciant d'avoir pris le temps de répondre à toutes les questions de l'enquête.

2.2. Essais chez les producteurs

Au vu du contexte de cette étude, deux objectifs ressortent de l'expérimentation :

- Faire une sorte de premier état des lieux de la qualité des sols dans les vergers de kiwi du Sud-Ouest de la France
- Détecter les premières évolutions de la qualité des sols dues aux traitements appliqués

2.2.1. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée dans cinq parcelles de cinq producteurs différents. Les quatre premières parcelles se situent dans la vallée de l'Adour aux abords de la commune de Peyrehorade à 260 km du bureau de Toulouse, et la dernière dans le bassin de la Garonne près de Montauban à 50 km environ de Toulouse. Sur les quatre producteurs de la vallée de l'Adour, deux travaillent avec la coopérative Scaap kiwi de France et deux avec l'organisation de producteurs Garlanpy. Le producteur du bassin de la Garonne travaille lui avec la coopérative Blue-Whale. C'est le travail du Bureau national interprofessionnel du Kiwi en transversalité avec les autres acteurs de la filière qui a permis aux coopératives les plus proches de trouver, en amont de ce stage, les parcelles et producteurs favorables à la mise en place d'essais expérimentaux. Dans l'optique d'une bonne homogénéité des parcelles, les vergers choisis sont tous de variété Hayward, en T-barre, de 15 à 25 ans d'âge, et paraissent globalement sains sanitaires avec pas ou peu de mortalité. Concernant le mode de conduite, les vergers sont tous fertilisés sans apport de matière organique, avec application d'un désherbage chimique ou arrêt récent du désherbage chimique. Aussi, tous ces vergers ont été choisis car ils présentaient, selon le jugement des producteurs et des techniciens de coopérative, des problèmes de compaction à des degrés divers. Le tableau 1 présenté ci-contre résume les caractéristiques de chaque verger étudié.

Sur ces parcelles, quatre modalités ont été réparties de manière aléatoire et pratiquées par les producteurs des vergers concernés. La figure 7 représente une schématisation pour l'exemple du verger B de l'expérimentation.

- Scarifié non amendé (S NA)
- Non scarifié amendé (NS A)
- Scarifié amendé (S A)
- Non scarifié non amendé (NS NA)

2.2.2. Conduite des essais

Ce sont les producteurs, en lien avec leurs coopératives, qui se sont occupés de la mise en place des modalités dans les vergers.



Figure 6 : Photo du scarificateur Actiflore lors du passage de l'outil dans le verger B de l'expérimentation

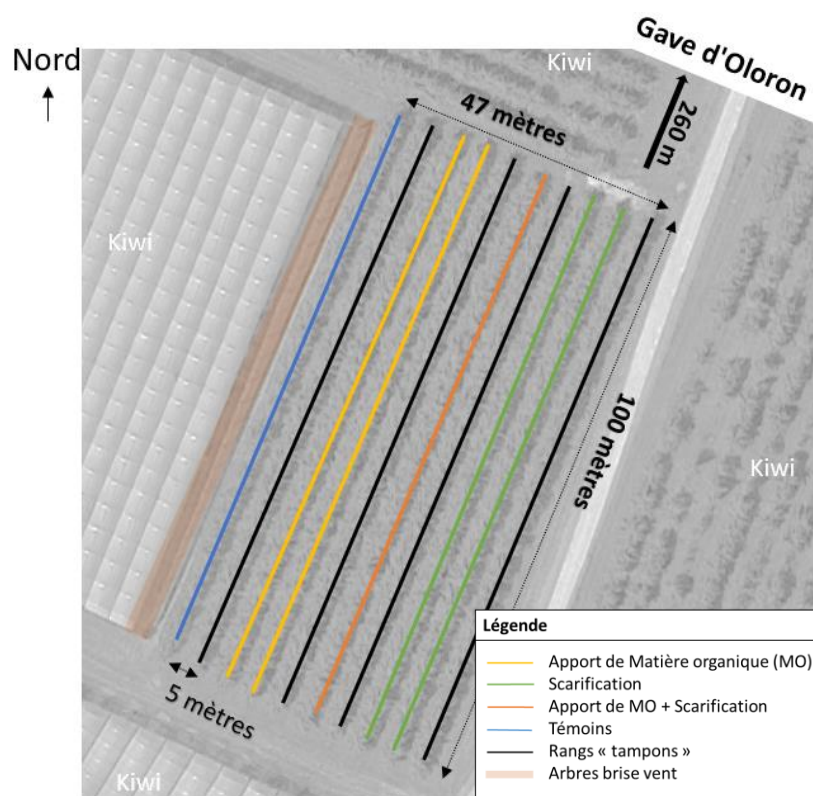


Figure 7 : Représentation schématique du verger B de l'expérimentation

Scarification des sols

Le modèle utilisé est un Actiflore 3,5 mètres à double rotor vendu par la société Actisol (figure 6). L'outil est équipé de pointe à lame trempées de 19 cm de longueur positionnées hélicoïdalement sur un axe transversal, les couteaux sont alors répartis en quinconce sur des entretoises distantes de 18 cm ce qui permet une densité de perforation de 12 points au m².

Un premier passage a été appliqué les 21 et 24 février 2020 pour les vergers A et B, et la première semaine de mars pour les vergers P24, E27 et BW. Un second passage était programmé pour le mois de mai, mais n'a finalement pas été effectué par les producteurs, par peur d'abimer les fruits et sarments qui étaient déjà trop bas pour pouvoir passer l'outil. Avec seulement 3,5 mètres de large, l'outil n'a pas permis en un passage de couvrir la totalité des rangs espacés de 5 mètres. Enfin, les producteurs ont fait remarquer que l'outil n'était pas adapté à la culture en butte et que, le cas échéant seules les dents situées sur le sol de la butte s'enfonçaient tandis qu'elles ne touchaient quasiment pas le sol au milieu de l'inter rang.

Dans le cas particulier du verger BW, le producteur a finalement décidé de ne passer le scarificateur qu'un rang sur deux en évitant ainsi les ornières tracées l'hiver précédent par les travaux de récolte. Sur les rangs concernés par ces ornières, il a alors passé une herse à disque pour niveler le terrain.

Apport de matière organique

La matière organique a été apportée le 14 février 2020 pour le verger A, et durant la deuxième semaine de mars pour les vergers B, P24, et E27. Le produit apporté est du compost de déchet vert 0/25 ITXASSOU vendu par la société LOREKI sous la forme d'une poudre (granulométrie 0/25 mm). La composition précise est décrite dans le tableau 2 ci-contre. Dans le cas des vergers P24 et E27, ce sont 20 t/ha qui ont été apportées directement sur le rang (sous la canopée). Un autre épandeur a été utilisé pour les vergers A et B où ont été apporté 40 t/ha en plein ce qui représente une dose semblable de 20 t/ha sur le rang à laquelle s'ajoute 20 t/ha dans l'inter rang (entre le passage de roue).

Tableau 2 : Caractéristique du compost apporté sur les parcelles expérimentales

Caractéristiques physico-chimiques	Teneurs moyenne sur masse brute
Matière sèche	46%
Matière organique	24%
N total	0,7%
N orga	0,6%
P2O5	0,2%
K2O	0,5%
MgO	0,2%
CaO	1,4%
C/N	17

Par manque de matière, le producteur du Tarn-et-Garonne n'a pas apporté de compost sur le verger BW. Le verger n'a donc finalement été soumis qu'à un seul traitement : scarifié non amendé. La zone travaillée avec les disques sur les autres rangs ne sera donc pas exploitable dans cette étude.

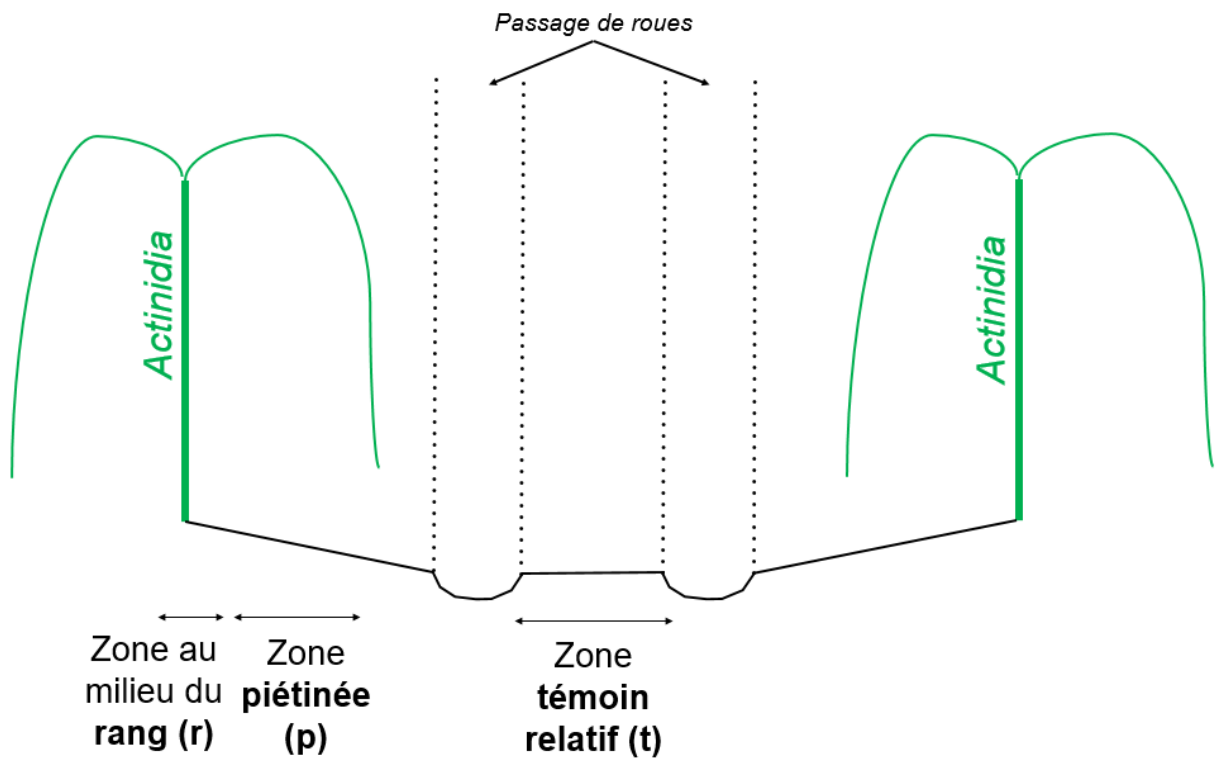


Figure 8: Représentation schématique des trois zones de tassement hypothétiques des vergers de kiwi



Figure 9 : Photo sous le rang du vergers B, 3 mois après le passage du scarificateur, et disposition du cylindre dans cette zone.

2.2.3. Variables mesurées

2.2.3.1. Plan d'échantillonnage

Trois zones de tassements différentes ont été identifiées et sont présentées sur la figure 8. La zone sous le rang, piétinée pendant la récolte est la zone d'intérêt (zone « p »), suivie d'une zone très tassée sous le passage de roues, et d'une troisième zone peu tassée au milieu de l'inter rang n'ayant subi ni passage de roue ni piétinement. Cette troisième zone représente donc hypothétiquement un témoin relatif vis-à-vis de la zone piétinée que nous voulons améliorer (zone « t »). Selon ce dispositif, les valeurs sont donc appariées. Ainsi, pour chaque analyse de sol a été prélevé un échantillon dans la zone piétinée (p) et un dans la zone témoin relatif (t). Cependant, sur la parcelle E27, il s'est avéré que cette zone d'inter rang paraissait très tassée, peut-être à cause de traces de roues multiples, il était en tout cas beaucoup plus difficile de creuser pour faire les échantillons. Nous avons donc identifié une troisième zone, au milieu du rang et entre deux arbres de kiwi (zone « r »). A la différence de la zone t, cette zone est non scarifiée, légèrement piétinée et désherbée chimiquement.

2.2.3.2. Evaluation du profil de sol des vergers

Après s'être rendu compte de la grande variabilité structurale existant dans les sols des vergers de kiwi, il a été décidé de créer des mini fosses d'observation. L'objectif est de mettre en évidence les différences qu'il existe entre les vergers, au sein même des vergers, entre les différentes zones hypothétiques de compaction, et d'observer une première variation de structure en fonction de la profondeur. Cela permet de guider la réflexion et de donner un axe de travail pour les manipulations qui suivent.

Dans l'objectif de ne pas être trop destructeur pour les vergers, ces mini fosses sont creusées à la bêche sur environ 30 cm de profondeur et 40 cm de large. Par manque de temps, ces fosses n'ont pu être effectuées que sur les vergers B et P24, en parallèle des mesures d'infiltration présentées ci-dessous.

2.2.3.3. Evaluation de la densité apparente et du taux d'humidité des sols

Le calcul de la densité apparente permet d'estimer la compaction des sols dans les vergers. Pour ceci a été appliquée la méthode des cylindres qui consiste à placer un cylindre de volume connu (100 cm^3) dans un porte-cylindre et l'enfoncer à l'aide d'un marteau à la surface du sol (figure 7). Le volume de sol prélevé est ensuite pesé, permettant d'obtenir sa pesée humide, et est normalement ensuite placé à l'étuve à $110 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 48h afin d'obtenir sa pesée sèche. En l'absence d'étuve, nous avons décidé de faire sécher les échantillons au micro-onde, en les faisant passer plusieurs fois 1 min 30 jusqu'à ce que la masse ne diminue plus. Le problème est que les échantillons, sûrement trop gros et trop humides (prélèvement fait sous la pluie), n'ont jamais réellement séchés. Après un mois et demi d'exposition à l'air libre, une pesée supposée sèche a donc été réalisée. Les relevés de pesée humide et de pesée sèche ajoutés au volume du cylindre, ont alors permis d'estimer le taux d'humidité du sol ainsi que la densité apparente.

Les manipulations ont été réalisées la semaine du 2 au 5 juin sur les quatre parcelles de l'Adour. Quatre échantillons ont été prélevés par modalité (deux en zone p et deux en zone t) soit 16 échantillons par parcelles. Afin que ce soit le plus cohérent possible, il a été décidé de

prélever les cylindres entre deux fentes de scarification (figure 7). Les manipulations ont été réalisées le 19 juin pour la parcelle BW du Tarn-et-Garonne. Sur cette parcelle 24 cylindres ont été prélevés en tout (8 en zone p, 8 en zone t, et 8 en zone r), l'objectif étant de caractériser s'il existe oui ou non des différences de tassement entre ces trois zones.

2.2.3.4. Analyse tomographique et colonnes de sol

L'objectif de cette manipulation est d'observer l'arrangement de la porosité dans le sol. L'hypothèse serait que la fente créée par la dent du scarificateur soit à l'origine de fissures plus profondes qui permettraient l'aération recherchée du sol ainsi qu'un écoulement plus rapide de l'eau, enjeu essentiel pour la culture. Cette mesure peut aussi nous permettre d'approcher une valeur de la densité apparente du sol, ce qui peut confirmer les résultats des cylindres de densité. Enfin, l'analyse tomographique permet d'estimer la longueur, l'orientation et le diamètre des galeries produites par les vers de terre, ce qui donne des informations sur la faune présente dans le sol et l'impact des populations de vers de terre sur la porosité.

Nous avons prélevé des colonnes de sols dans des cylindres en PVC de 15 cm de diamètre sur 20 cm de hauteur. Les vers de terre ont été tués par ajout de chloroforme afin de stopper la création de nouvelles galeries. Ces cylindres ont alors été analysés au rayon X dans un scanner médical sur le site INRAE de Nancy (Capowiez et al., 2003).

Les colonnes de sol ont été prélevées du 2 au 5 juin sur les parcelles de l'Adour avec deux échantillons par modalité (un en zone p et un zone t) soit 8 colonnes par parcelles. Cette fois-ci, il a été décidé de disposer les colonnes au niveau des fentes du scarificateur, en espérant pouvoir observer les fissurations créées en profondeur comme précisé ci-dessus. Les colonnes ont été tomographiées le 23 juillet suivant. Aucune colonne n'a été prélevée sur la parcelle BW du Tarn-et-Garonne.

2.2.3.5. Evaluation de la vitesse d'infiltration d'eau des sols

L'évaluation de la vitesse d'infiltration d'eau n'est pas une mesure de la porosité en tant que telle, mais plutôt de l'une de ses fonctions. Or cette fonction est très importante dans le cadre de cette étude : les vergers de kiwi du Sud-Ouest de la France étant régulièrement soumis à des inondations importantes, l'eau doit s'écouler rapidement pour éviter au maximum les phénomènes d'engorgement et d'asphyxie racinaire, d'autant plus que la culture du kiwi y est très sensible (Smith et al., 1989). De plus, l'infiltration d'eau semble être d'après la littérature un des facteurs les plus sensible au passage du scarificateur (Fin et al., 2018).

Afin d'évaluer la vitesse d'infiltration d'eau a été mis en place la méthode Beer-Kahn, à l'aide d'un infiltromètre à simple anneau de 15 cm de diamètre sur 7 cm de haut (Braud *et al.*, 2005). Comme le montre la figure 10, après avoir découpé le couvert présent à la surface, l'anneau est fixé dans le sol (enfoncé de quelques centimètres seulement) entre les fentes faites par le scarificateur. Le principe est de verser dix volumes d'eau (volume connu et fixe, à définir sur le terrain), et de noter à chaque fois le temps à partir duquel l'eau s'est totalement infiltrée dans le sol. La mesure simplifiée de la vitesse d'infiltration sera estimée par régression linéaire lorsqu'on atteint l'état stationnaire, c'est-à-dire que le temps écoulé entre deux volumes d'eau soit constant. Le taux d'infiltration en $\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ est alors estimé en calculant la pente (régression



Figure 10 : Mise en pratique du test de vitesse d'infiltration d'eau dans la zone piétinée scarifiée du verger P24

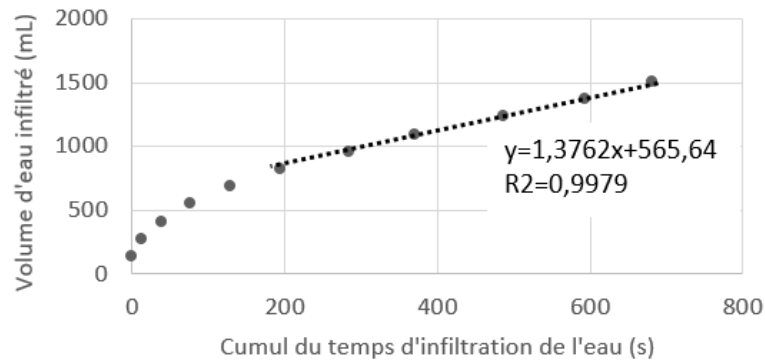


Figure 11 : Résultats d'un test d'infiltration d'eau dans le verger B. Le taux d'infiltration d'eau est calculé par régression linéaire sur les six derniers points correspondant à l'état stable



Figure 12 : Aspect du système racinaire d'une plante de trois ans affectée par la « Moria ». La dégradation des racines est évidente car les racines corticales sont pourries (C = collier et T = terminal) et on observe l'absence de racines nourricières sous le niveau du sol (Tacconi et al., 2014)

linéaire) des relations entre le temps écoulé et l'état d'équilibre (figure 11) (Capowiez et al., 2009).

Une première session a été effectuée dans le bassin de l'Adour les 16 et 17 juin 2020, le temps de prendre en main la manipulation et de passer rapidement sur les quatre vergers. Puis, afin de maximiser le nombre d'échantillon faits par verger et de limiter le temps perdu sur la route, il a finalement été choisi pour cette mesure de ne se concentrer que sur les vergers B et P24. Ces vergers ont été choisis premièrement par leur situation géographique, mais aussi parce qu'ils paraissaient, au couteau, plus tassés ce qui présente donc plus d'intérêt dans le cadre de notre étude. Une deuxième session a donc été organisée les 15 et 16 juillet sur ces deux vergers en vue de faire six tests par modalité (trois en zone p et trois en zone t).

2.2.3.6. Evaluation de la densité et de l'état sanitaire des racines des arbres

Les racines sont probablement les premiers organes impactés par la compaction et les traitements mis en place. Le but est premièrement d'obtenir un état des lieux de l'état de santé du système racinaire (entre les parcelles, entre les modalités, mais aussi l'évolution des racines dans l'espace), et d'observer d'éventuelles corrélations entre l'état sanitaire des racines et l'état de compaction des sols s'y trouvant. Deux éléments peuvent alors être observés : l'état sanitaire des racines (brunissement, pourrissement, mort des racines) et la densité de racines par arbre.

Afin de ne pas être trop destructeur pour les arbres des vergers, et sur les conseils apportés par les techniciens des coopératives, il a été choisi d'utiliser une tarière. Une tarière cylindrique de 2 cm de diamètre a permis de faire des échantillons jusqu'à 20 cm de profondeur dans les sols des vergers. Deux arbres ont alors été choisis aléatoirement par modalité ce qui fait huit arbres par parcelle. Autour de ces arbres ont été faits trois échantillons à 10 cm du tronc, trois autres à 25 cm, et encore trois à 50 cm. Sur chaque prélèvement de tarière a été noté la présence ou non de racines jugées petites (entre 0 et 1 mm de diamètre), moyennes (entre 1 et 5 mm de diamètre) et grosses (supérieure à 5 mm de diamètre) (référence de l'étude de Hughes et al., 1986). Outre la notation de présence ou non de racines dans les échantillons, a été rajoutée une appréciation de l'état sanitaire des racines selon qu'elles présentent ou non des symptômes tels qu'on le voit sur la figure 12 ci-contre dans le cas d'arbres atteints par la « Moria ».

2.3. Gestion de données et analyses statistiques des résultats

Le logiciel Excel a permis dans un premier temps de rassembler l'ensemble des données collectées, ainsi que de réaliser les graphiques présentés dans la suite du rapport. Ensuite, et lorsque cela paraissait cohérent au vu des résultats obtenus, les données ont été analysées statistiquement à l'aide du logiciel R. Pour chaque indicateur a alors été mis en place le test non paramétrique de Wilcoxon permettant d'analyser deux à deux les résultats de la zone piétinée en face de ceux de la zone témoin associée. Cela a aussi permis, pour un même amendement, d'opposer les échantillons de la zone scarifiée à ceux de la zone non scarifiée et pour un même travail du sol d'opposer les échantillons amendés à non amendés. Des méthodes statistiques plus puissantes (modèles mixtes) n'ont pas pu être mises en place à cause de la trop grande variabilité des effets des facteurs entre les vergers.

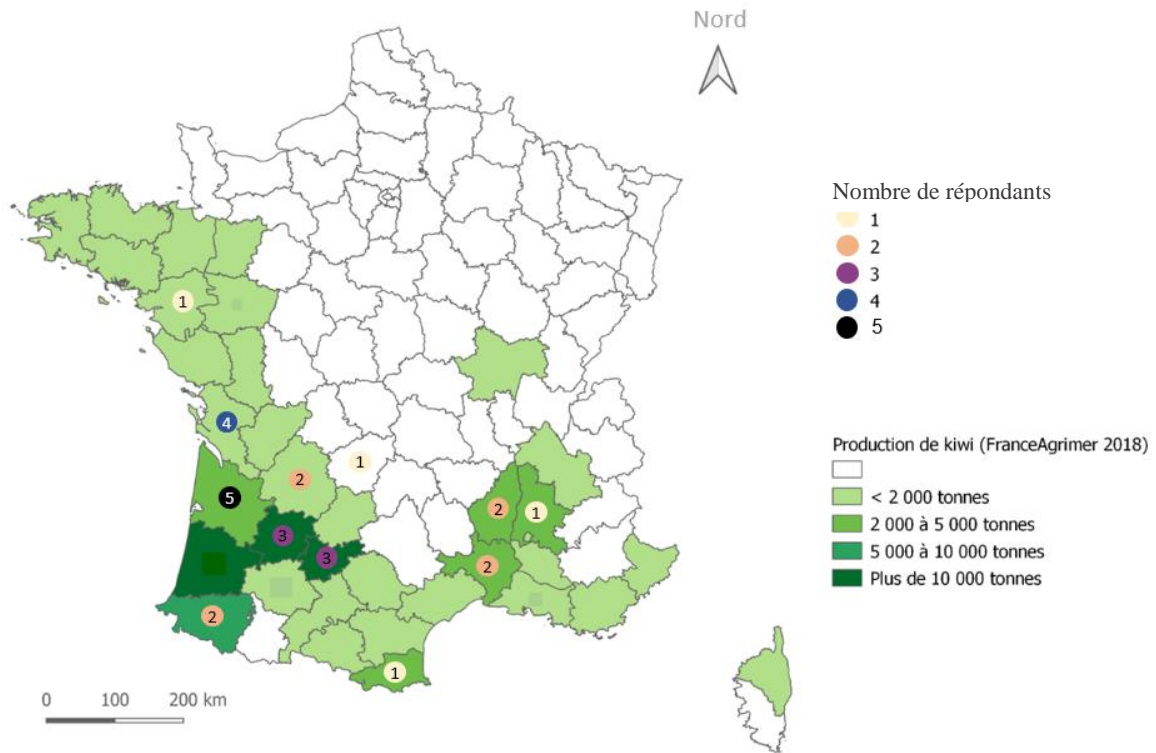


Figure 13 : Carte représentant la répartition départementale des répondants à l'enquête internet en comparaison avec les chiffres de production de 2018 (FranceAgriMer, 2018)

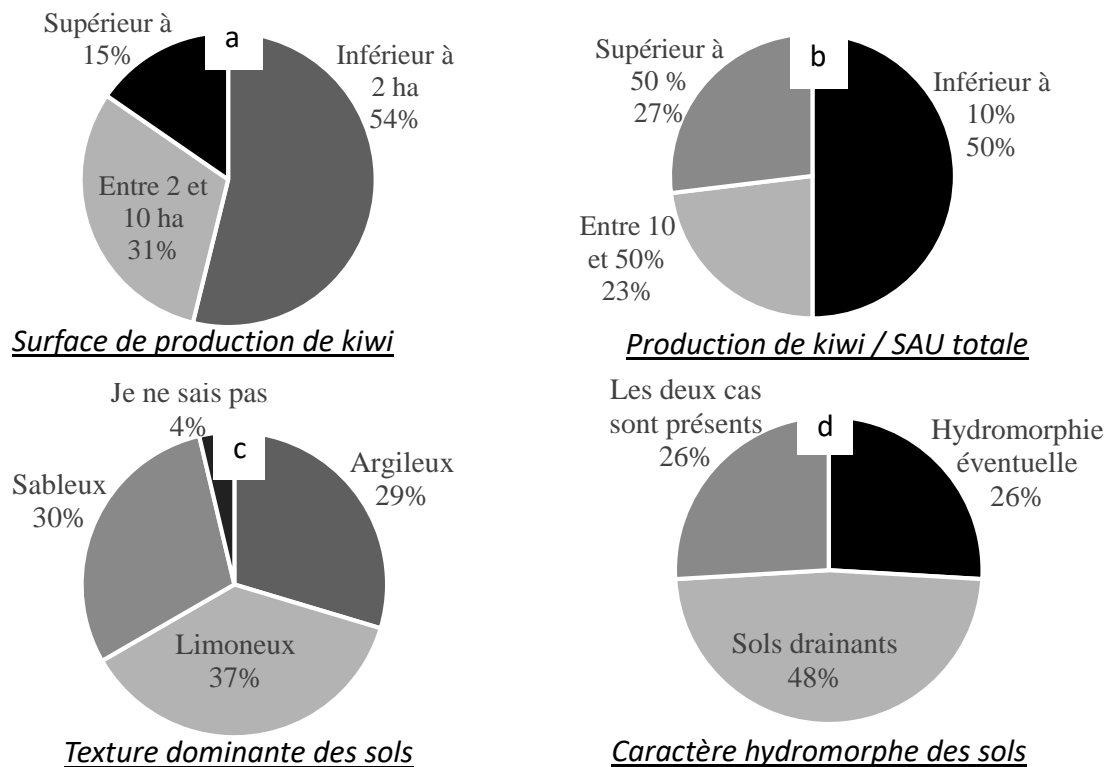


Figure 14 : Surface de production de kiwi (a), part de la production de kiwi dans la surface agricole utile totale des producteurs (b), texture dominante des sols (c) et caractère hydromorphe ou non (d) des vergers de 27 producteurs enquêtés.

3. Présentation des résultats

3.1. Résultats de l'enquête

La diffusion du questionnaire a eu lieu le 4 mai 2020, avec une relance le 27 mai. Un mois plus tard, 27 réponses de producteurs ont été récoltées. Les résultats sont présentés ci-dessous sur la base de ces 27 réponses.

3.1.1. Description de l'échantillon enquêté

Exploitations et systèmes de culture

La figure 13 compare le nombre de réponses de producteurs à la production référencée de chaque département. Cette carte révèle un faible taux de réponses dans le bassin de l'Adour avec deux réponses dans les Pyrénées-Atlantiques et aucune réponse dans les Landes alors que cette zone représente l'un des foyers majeurs de production français (en vert foncé sur la carte). Treize des vingt-sept producteurs se situent dans la vallée de la Garonne (Tarn-et-Garonne, Lot-et-Garonne, Landes, Dordogne), ce qui est cohérent pour le second gros bassin de production français. Dans une moindre mesure, cinq répondants sont installés dans la vallée du Rhône (Drome, Ardèche, Gard), ce qui correspond là aussi aux proportions nationales de productions. Enfin, de manière plus isolée, il y a quatre répondants installés dans des zones de production de moindre importance : un en Charente-Maritime, un dans les Pyrénées-Orientales, un en Corrèze et un en Loire-Atlantique.

Pour une valeur allant de 0,3 à 200 ha, la surface totale agricole utile des vingt-sept producteurs enquêtés est en moyenne de 40,5 ha. Ainsi, 22% des producteurs ont une surface inférieure à 10 ha, 41% ont une surface comprise entre 10 et 40 ha, 30% entre 30 et 100 ha, et 7% ont une surface supérieure à 100 ha. La surface de kiwi cultivée par ces mêmes producteurs varie elle de 0,3 à 30 ha pour une moyenne générale 4,9 ha. Ainsi, et comme la montre figure 14a, 54% des producteurs ont une surface de kiwi inférieure à 2 ha, 31% entre 2 et 10 ha, et 15% supérieure à 10 ha. Par ailleurs, la figure 14b montre que pour 50% des producteurs la surface en verger de kiwi est inférieure à 10% de la surface totale de leur exploitation, pour 23% des producteurs cette surface correspond de 10 à 50% de leur surface totale, et pour 27% des producteurs le kiwi est cultivé sur plus de la moitié de leur SAU totale.

Caractéristiques du sol

Concernant la texture des sols, 38% des producteurs ont indiqué posséder des vergers avec une dominance limoneuse, contre 33% sableuse et 29% argileuse (figure 14c). Vingt producteurs ont ensuite indiqué avoir des sols profonds de plus de 80 cm et sept avoir des sols moyennement profonds de 40 à 80 cm. Le pH des sols est neutre (entre 6,5 et 7,5) pour dix-sept producteurs, basique (supérieur à 7,5) pour sept producteurs et acide (inférieur à 6,5) pour trois producteurs. Dix-sept producteurs déclarent posséder une pierrosité de leur sol très faible, contre sept plutôt faible et deux plutôt forte. Sur la question traitant de l'hydromorphie des sols (figure 14d), vingt producteurs déclarent avoir des sols séchant avec une réserve utile faible et quatorze producteurs indiquent une hydromorphie éventuelle avec une réserve utile élevée. Ainsi sept producteurs ont répondu se retrouver dans les deux cas de figure sur l'ensemble de leur parcellaire. Après avoir demandé à ces sept producteurs s'ils observaient des différences sur l'état sanitaire des plants, la qualité physique et/ou la macrofaune du sol selon

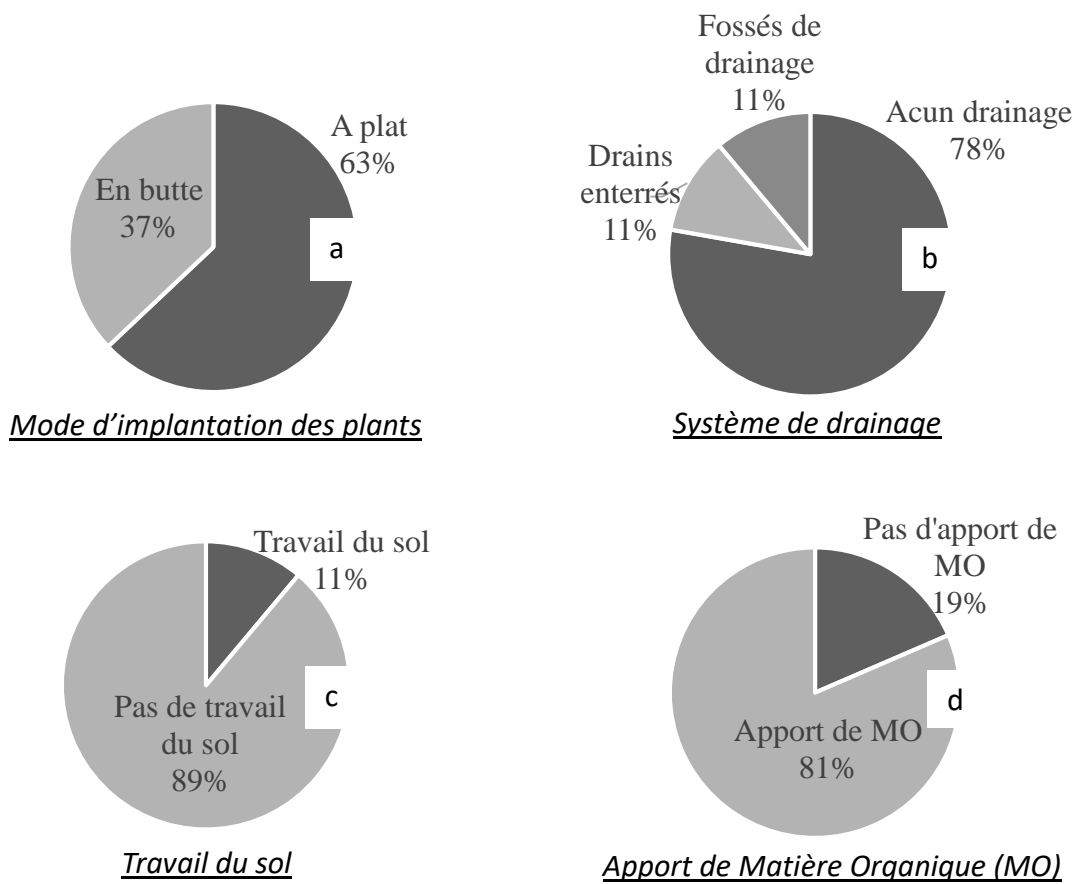


Figure 15 : Mode d'implantation de plants (a), système de drainage (b), travail du sol (c) et matière organique apportée (d) par les 27 producteurs de kiwi enquêtés

l'hydromorphie ou non de leur sol, trois ont répondu que non, et quatre ont déclaré observer une différence dont un observant des arbres fragilisés sur ses sols hydromorphes. Sur le taux de matière organique, six producteurs ont déclaré avoir des vergers entre 2 et 2,9% de matière organique. Deux autres producteurs présentent des valeurs très élevées de 3,5 et 6,5% de matière organique dans leur sol. Sans en connaître la valeur exacte, quatre autres producteurs sont satisfaits du taux de matière organique de leurs sols et deux en sont insatisfaits, six n'ont aucune information sur le sujet et cinq n'ont pas répondu.

Enfin, vingt et un producteurs déclarent ne pas posséder de parcelles sujettes aux inondations contre six producteurs concernés par le problème. Sur ces six producteurs, deux indiquent n'observer aucune différence de l'impact des inondations sur leur verger, les autres n'ont pas répondu.

3.1.2. Conduite de culture et recensement des pratiques culturales

Sur les vingt-sept répondants, dix-sept producteurs cultivent leur kiwi à plat et dix en butte (figure 15a). Sur le mode de pilotage de l'irrigation, onze producteurs ont déclaré utiliser une sonde tensiométrique contre douze qui n'en n'utilisent pas et quatre non-réponses. Enfin sur le drainage vingt et un des vingt-sept producteurs ne déclarent utiliser aucun système de drainage sur leur verger de kiwi, trois ont des drains enterrés et trois autres des fossés de drainage (figure 15b). Il existe aussi une variabilité sur la distance inter-rang des vergers avec six producteurs dont les vergers ont une distance inter-rang de 4 mètres, quatre avec une distance de 4,5 mètres, seize avec une distance de 5 mètres et un producteur à 5,5 mètres.

Les producteurs ont répondu faire en moyenne 4,4 passages pour traitements phytopharmaceutiques, valeur allant de 0 à 15 selon les producteurs. Ainsi, quatre producteurs indiquent n'effectuer aucun passage, treize font entre 1 et 5 passages et dix font plus de 5 passages. Pour les travaux de taille, broyage et récolte, la valeur moyenne est de 8,5 passages allant de 1 à 20 selon les producteurs. Cinq producteurs font moins de 5 passages, quinze font entre 5 et 10 passages et sept producteurs font plus de 10 passages.

- *Travail du sol*

Sur les vingt-sept producteurs enquêtés, seulement trois ont indiqué travailler leurs sols (figure 15c). Le premier effectue un « travail de surface (5 cm) près des pieds » une à deux fois par an dans l'objectif de désherber et d'intégrer la matière organique. Il écrit observer une amélioration de la structure du sol après avoir mis en place cette pratique, mais ne détaille pas plus. Le deuxième parle de « décompaction, cultilabour » avec deux passages par an mais ne développe pas plus. Le troisième effectue un travail de 20 cm de profondeur de chaque côté du rang et 80 cm au milieu de l'inter rang. Ses objectifs étant « d'enfouir l'herbe et le bois de taille en février et mars, et de biner pour éviter l'évaporation de l'eau ». Depuis la mise en place de cette pratique, le producteur dit observer la disparition totale des bois de taille, l'aération de ses sols et le développement de lombrics dans ses sols.

- *Apport de matière organique*

Sur les vingt-sept producteurs, vingt-deux déclarent apporter occasionnellement de la matière organique contre cinq qui n'en apportent pas (figure 15d). Dans ces vingt-deux producteurs, onze déclarent apporter de la matière organique dans l'objectif principal de fertiliser leurs cultures et onze pour améliorer la structure de leurs sols. La forme et la dose de

la matière organique appliquée est très variable selon les producteurs. Ainsi, en tentant de regrouper les informations données par les producteurs, trois apportent du fumier animal de 1 à 5 t/ha, huit du compost d'origine animale de 1 à 4 t/ha, cinq du compost de déchets verts de 0,9 à 20 t/ha, six producteurs appliquent des produits élaborés sous forme de granulé à des doses allant de 1 à 3 t/ha. Enfin, six producteurs ont déclaré apporter d'autres produits stimulateurs de la vie des sols, contre dix-neuf qui n'en n'apportent pas et deux non-réponses.

3.1.3. Observations faites par les producteurs

Etat sanitaire des vergers

A la question concernant la présence de maladie dans leur verger, dix producteurs énoncent la bactériose du kiwi (PSA), six parlent de maladie du bois avec l'*Esca* et quatre parlent de pourriture racinaire et de *Phytophthora*. Parmi eux, un seul parle de dépérissement dans ses vergers. Vingt-quatre producteurs déclarent observer des mortalités dans leurs vergers contre trois qui répondent non. Sur les vingt-quatre observant des mortalités dans leurs vergers, quatorze indiquent avoir un taux de mortalité inférieur à 5%, cinq entre 5 et 15% et trois supérieurs à 15% dont deux à 40%.

Après avoir demandé à quelle profondeur la densité racinaire était maximale dans leurs vergers, six ont répondu de 0 à 25 cm, quinze entre 25 et 80 cm, personne n'ayant répondu plus de 80 cm et cinq ne sachant pas.

Qualité physique et biologique des sols

A la question « Considérez-vous certains de vos sols comme étant compactés ? », quinze producteurs ont répondu que non, sept oui et cinq ont répondu qu'ils ne savaient pas. Parmi ceux ayant répondu oui, un d'eux a rajouté ceci : « J'ai réalisé un profil cultural ce printemps et nous avons pu observer un tassement surtout au niveau de la zone de roulement sur 40 cm de large sous chaque roue et sur 30 à 40 cm de profondeur maxi ». Sur la question traitant des vers de terre, neuf producteurs indiquent observer une présence abondante de vers de terre dans leurs vergers, dix-sept une présence moyenne. Aucun n'a répondu « pas ou peu de vers de terre ». Suite à cette question, huit producteurs ont déclaré avoir observé une évolution de la faune du sol dont quatre qui parlent d'une augmentation de vers de terre après passage en bio ou apport de compost, douze déclarent n'avoir observé aucune évolution et sept n'ont pas répondu.

3.1.4. Opinions sur la question de recherche

Onze des vingt-sept producteurs n'ont jamais entendu parler de scarification des sols contre seize qui en avait déjà entendu parlé. Parmi ces seize producteurs, à la question « Que pensez-vous de l'utilisation de cette pratique ? », six n'ont pas répondu, sept n'ont pas d'opinion, deux ont un avis négatif en jugeant cette pratique « inutile » et un producteur a un avis plutôt positif sur la question.

A la question « Que pensez-vous de l'effet de l'apport de matière organique sur la compaction des sols en vergers de kiwi ? » seize des vingt-sept producteurs n'ont pas répondu, cinq évoquent un bienfait sans rentrer dans les détails, quatre parlent d'une amélioration de la vie du sol, trois de la structure du sol et un dernier met l'accent sur le fait que si l'apport est trop faible, cela n'aura aucun effet sur la compaction des sols.

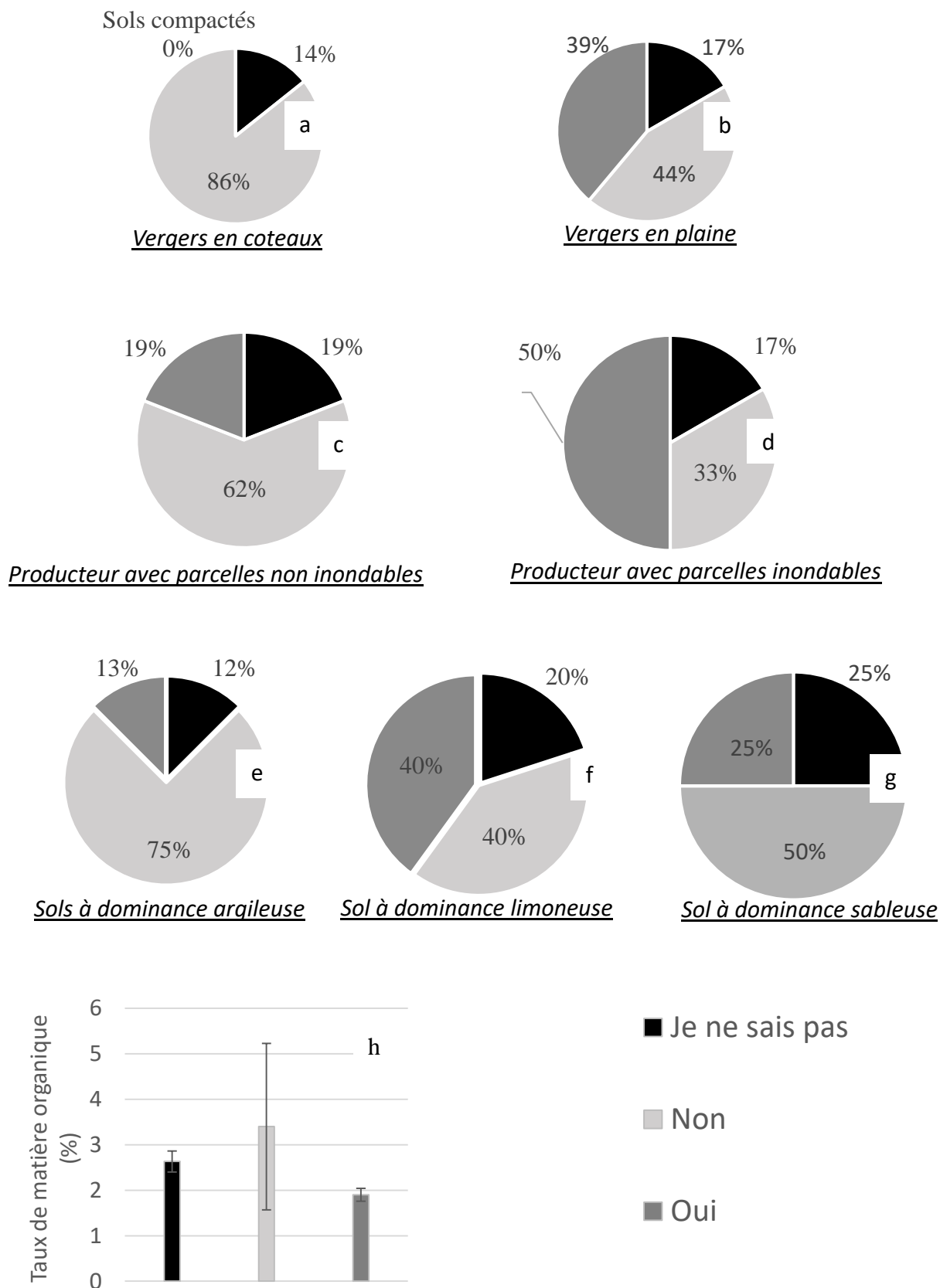


Figure 16 : Réponse à la question « Considérez-vous certains de vos sols comme étant compactés ? » selon que les producteurs aient précédemment indiqué avoir des parcelles en coteaux (a) ou en pleine (b), inondables (c) ou non (d), sur des sols à dominance argileuse (e), limoneuse (f) ou sableuse (g) et le taux de mortalité observé (h)

A la question « Pour vous, quelles seraient les causes de la compaction des sols en verger de kiwi ? », quatorze producteurs ont mis en cause le passage d'engins agricoles dont six qui ont mis l'accent sur le fait qu'ils étaient souvent faits dans de mauvaises conditions d'humidité (récolte hivernale). Huit producteurs ont mis en cause l'irrigation dans la compaction des sols de leur verger, quatre accusent une diminution de la qualité biologique des sols, quatre encore évoquent des variations de compaction selon la texture du sol. Trois producteurs énoncent un souci au niveau de l'enherbement dans les vergers qui permettrait une meilleure structure du sol, deux autres parlent d'un manque de matière organique et enfin un dernier dénonce le manque de travail du sol qui, couplé aux autres causes, participerait à la compaction des sols. A la question « Avez-vous déjà envisagé ou testé des solutions pour tenter la décompaction des sols en vergers de kiwi ? », quatorze producteurs ont répondu non, cinq ont répondu oui sans ajouter de précisions, cinq autres évoquent l'utilisation d'une sous-soleuse ou d'un décompacteur appliqué au milieu de l'inter rang des vergers, un producteur écrit avoir utilisé la mycorhization, un autre évoque son verger enherbé en totalité et enfin un dernier écrit avoir utilisé un scarificateur il y a quelques années.

3.1.5. Typologie des producteurs enquêtés

Il paraît compliqué de faire une typologie des producteurs au vu du nombre restreint d'individus et de la grande variabilité des profils enquêtés. Il a donc été décidé de coupler les réponses deux à deux en se concentrant sur les questions traitant des points forts de cette étude : la compaction des sols, le taux de matière organique, le taux de mortalité des arbres et enfin la présence abondante ou non de vers de terre annoncée par les producteurs.

Profil des producteurs ayant répondu à la question : « *Considérez-vous certains de vos sols comme étant compactés ?* »

Tout d'abord, il est intéressant d'observer que la part des producteurs considérant avoir des sols compactés est de 39% pour ceux ayant des vergers à plat (figure 16b) alors qu'elle est nulle pour ceux ayant des vergers en coteaux (figure 16a). La part des producteurs considérant avoir des sols compactés est aussi 30% plus importante chez les producteurs ayant indiqué avoir des parcelles inondables (figure 16d) face à ceux indiquant que non (figure 16c). Enfin la part des producteurs considérant avoir des sols compactés est plus grande pour ceux ayant des sols à dominance limoneuse (40% ; figure 16f), que pour ceux ayant des sols à dominance sableuse (25%, figure 16g) et encore moins pour ceux ayant des sols à dominance argileuse (13% ; figure 16e).

Profil des producteurs ayant répondu à la question : « *Connaissez-vous, ou avez-vous un avis du taux de matière organique de vos sols en vergers de kiwi ?* »

Comme le montre la figure 16h, les producteurs considérant avoir des sols compactés ont aussi indiqué avoir des sols avec un taux de matière organique plus faible que ceux qui ne rencontrent pas de problème de compaction. Aussi, les producteurs ayant indiqué observer une présence abondante de vers de terre dans leurs sols ont un taux de matière organique moyen (3,2%) plus important que ceux indiquant observer une présence normale de vers de terre (2,5%) (figure 17a). Enfin, les producteurs en agriculture biologique indiquent avoir un taux de matière organique moyen plus élevé que ceux en production conventionnelle (figure 17b).

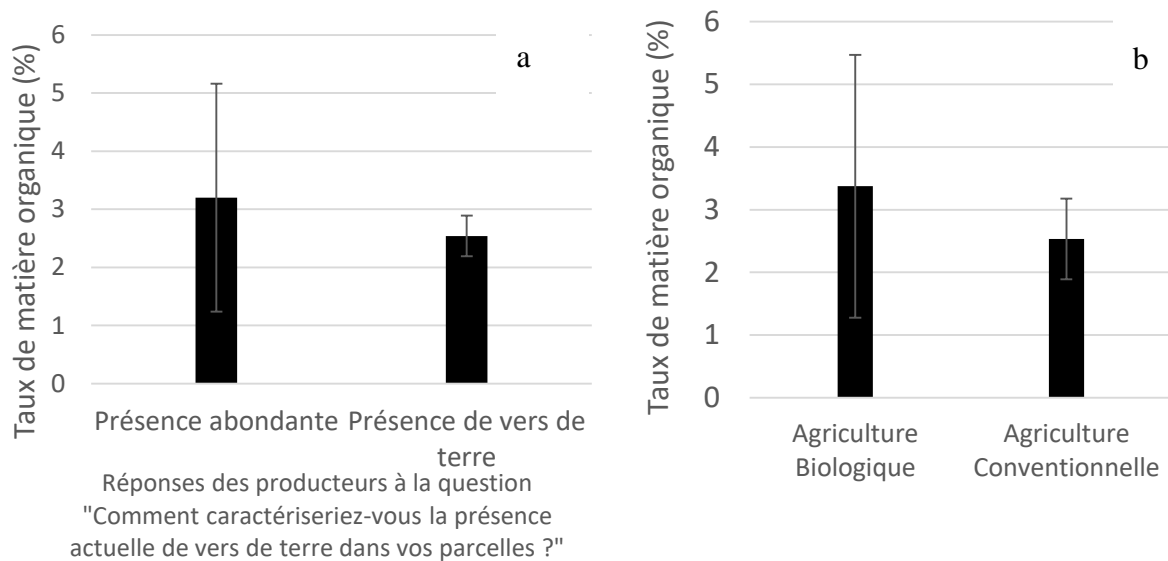


Figure 17 : Taux de matière organique moyen des sols selon que les producteurs aient précédemment indiqué observer plus ou moins de vers de terre (a) et suivre un mode de production biologique ou conventionnel (b)

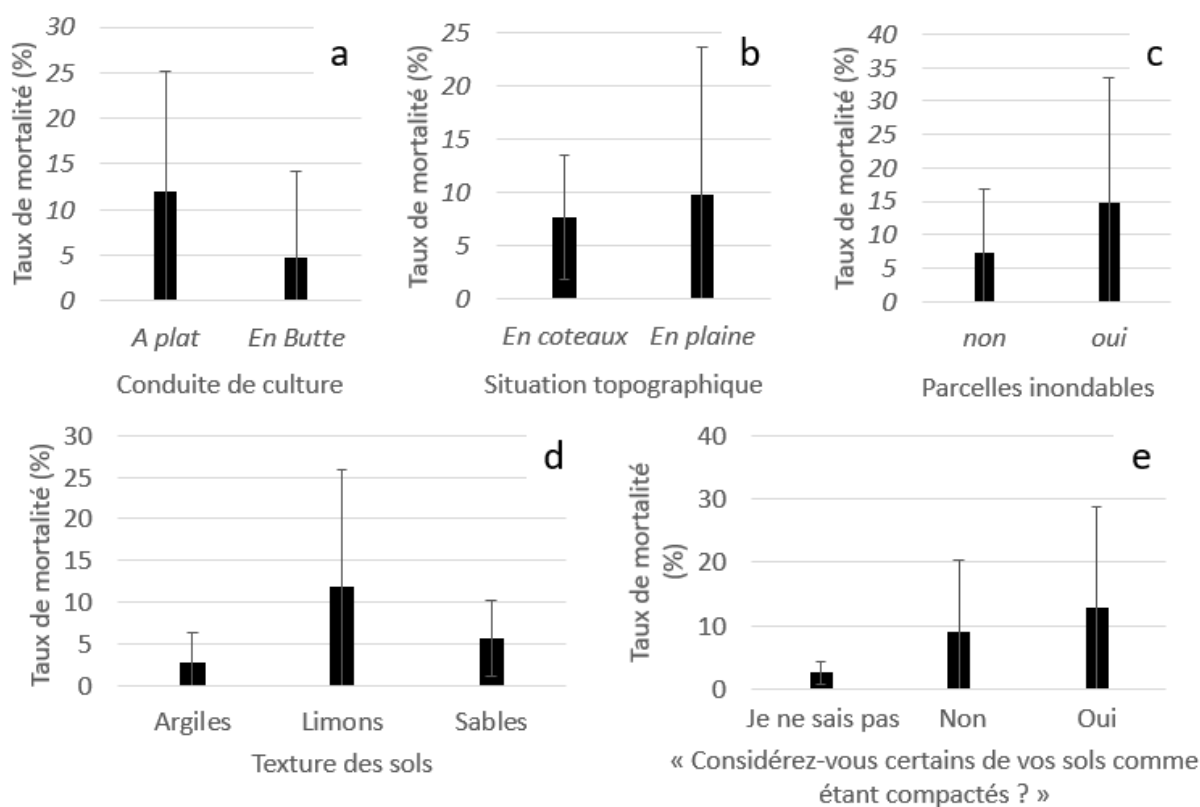


Figure 18 : Taux de mortalité moyen des arbres selon que les producteurs aient précédemment indiqué les caractéristiques d'implantation des plants (a), la situation topographique des vergers (b), l'inondabilité ou non des parcelles (c), la texture dominante de leurs sols (d), et le caractère compact ou non de leurs sols (e)

Profil des producteurs ayant répondu à la question : « Observez-vous des mortalités dans vos parcelles de kiwis ? Pouvez-vous estimer ce taux de mortalité ? »

Selon les réponses des producteurs, il semble y avoir un effet du mode de conduite de la culture sur le taux de mortalité des arbres. Il est plus faible (4,7%) lorsque que la culture est cultivée en butte alors qu'il est de 12% lorsque la culture est cultivée à plat (figure 18a). Ensuite, le taux de mortalité des plants semble être plus important selon que les producteurs indiquent avoir des sols à dominance limoneuse (11,9%), sableuse (5,7%) et argileuse (2,7%) (figure 18d). Malgré une variabilité très importante la culture des vergers en plaine semble révéler un taux de mortalité légèrement plus important que des vergers situés en coteaux (figure 18b). L'inondabilité des parcelles semble aussi jouer son rôle puisque les vergers inondables ont d'après les réponses des producteurs un taux de mortalité près de 50% plus important que les parcelles non inondables (figure 18c). Enfin les producteurs indiquant avoir des sols compactés semblent eux aussi avoir un taux de mortalité des plants plus important (12,7%) que ceux n'étant pas soumis au problème (8,9%) (figure 18e).

Profil des producteurs ayant répondu à la question : « Comment caractériseriez-vous la présence actuelle de vers de terre dans vos parcelles ? »

La part des producteurs observant une présence abondante de vers de terre dans leurs sols semble être plus importante (43%) chez les producteurs en agriculture biologique que chez les producteurs suivant un mode de production conventionnel (25%). Aussi, cette part de présence abondante en vers de terre semble être nettement plus importante chez les producteurs avec des sols à dominance argileuse (62%), que limoneuse (33%) puis sableuse (12%).

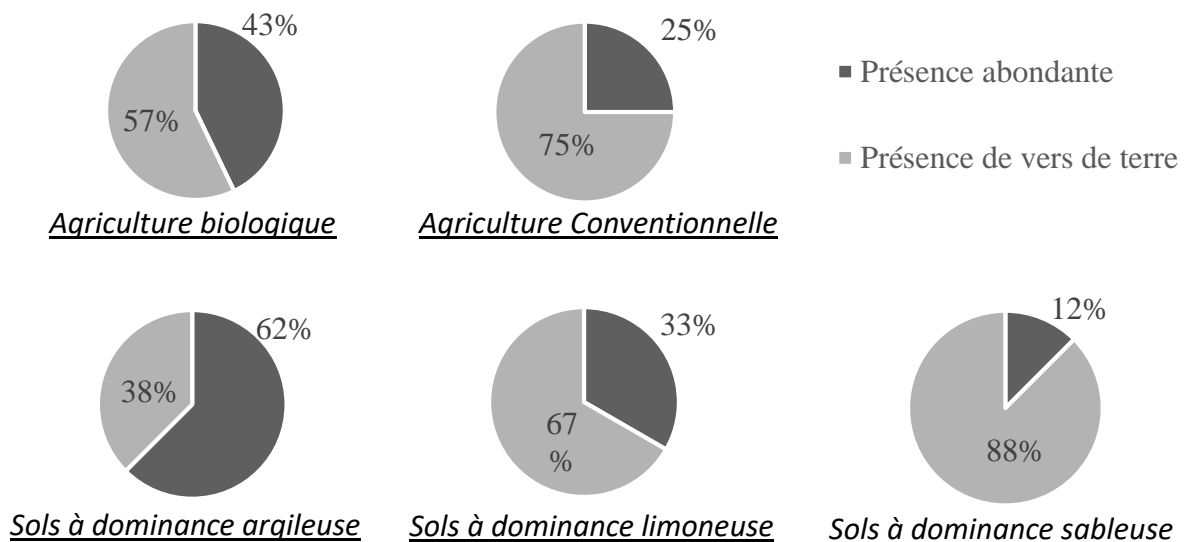


Figure 19 : Réponse à la question « Comment caractériseriez-vous la présence actuelle de vers de terre dans vos parcelles ? » selon que les producteurs aient précédemment indiqué avoir des sols à dominance argileuse, limoneuse, ou sableuse

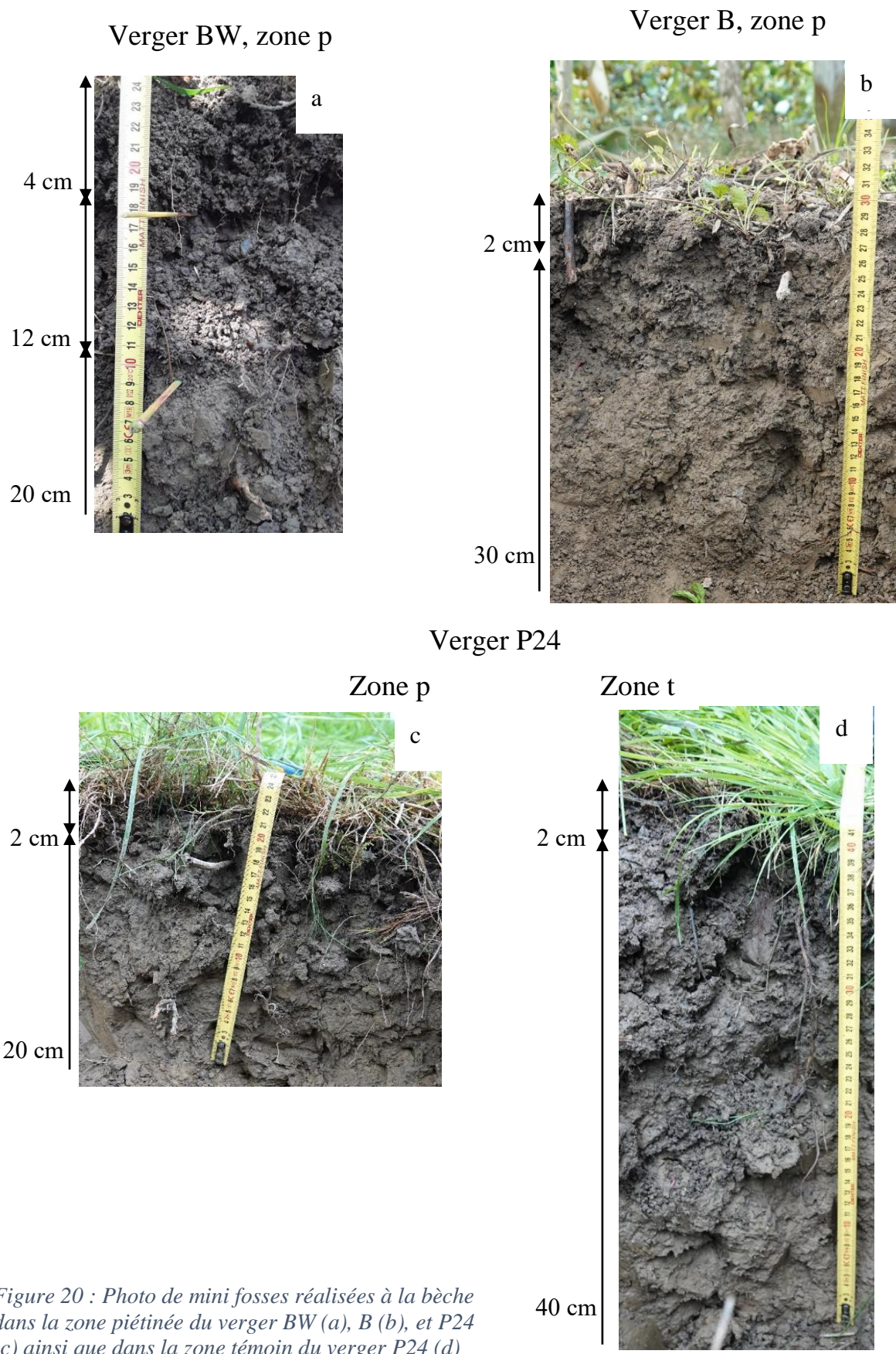


Figure 20 : Photo de mini fosses réalisées à la bêche dans la zone piétinée du verger BW (a), B (b), et P24 (c) ainsi que dans la zone témoin du verger P24 (d)

3.2. Résultats de l'expérimentation

3.2.1. Présentation des profils de sol

Les photos des mini-fosses réalisées sont représentées sur la figure 20 ci-contre. Dans le cas du verger BW, qui est un verger avec un enherbement dense allant jusque 1 mètre de haut, il est possible d'observer une première couche de surface plutôt déstructurée avec les racines du couvert jusque 4-5 cm. Cette première couche est suivie d'une couche intermédiaire entre 5 et 12 cm, puis d'une couche au-delà de 12 cm qui paraît, au couteau, beaucoup plus compacte (figure 20a).

Sur le verger B, les rangs sont désherbés, et il y a donc une absence quasi totale d'enherbement tout au long de l'année. Sur la figure 20b, il est alors possible d'observer un premier horizon de surface de 1 ou 2 cm avec les résidus de taille. Ce premier horizon est suivi d'un autre qui semble compact et uniforme allant jusqu'au fond de la fosse (30 cm).

De la même manière que le verger BW, le verger P24 a un enherbement permanent allant parfois jusque 1 mètre de haut. Que ce soit dans la zone piétinée ou dans la zone témoin, il est possible d'observer un premier horizon très superficiel d'environ 2 cm. Cet horizon est plutôt aéré et contient essentiellement les racines du couvert. Il est suivi d'un horizon qui semble plus compact et uniforme qui s'étend jusqu'au fond de la fosse. Sous la zone piétinée, cet horizon paraît très compact et il est alors très difficile de creuser à plus de 20 cm. Dans la zone piétinée cet horizon paraît, au couteau, déjà moins compact. De plus, la fosse a été faite jusque 40 cm de profondeur avec possibilité de creuser encore plus profond.

3.2.2. Analyse des indicateurs de densité apparente, colonnes de sol et vitesse d'infiltration d'eau

Les résultats des tests Wilcoxon comparant deux à deux chaque facteur (p contre t, S contre NS et A contre NA) pour les valeurs de densité apparente et de vitesse d'infiltration d'eau de chaque verger sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Probabilités résultants des tests Wilcoxon des valeurs de densité apparente et de vitesse d'infiltration d'eau en fonction de la zone d'échantillonnage, de la scarification, et de l'amendement des vergers de kiwi

Variable mesurée Unité	Densité apparente g.cm-3					Vitesse d'infiltration d'eau mL.s-1	
	VA	VB	P24	E27	BW	VB	P24
Sources de variation - P values							
zone d'échantillonnage	0.6406	0.9453	0.007813*	0.8438	0.03906*	0.8203	0.9219
Scarification	0.09249	0.25	0.07813	0.4609	-	0.1953	0.3125
Amendement	0.03906*	0.7422	0.8438	0.7422	-	0.4688	0.1563
Scarification*Amendement = que 4 échantillons, ce n'est pas assez pour faire les test statistiques							

* : P-Value significative à 0.05

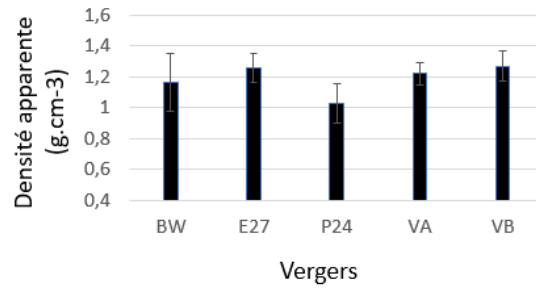


Figure 21 : Répartition de la densité apparente en fonction des vergers étudiés

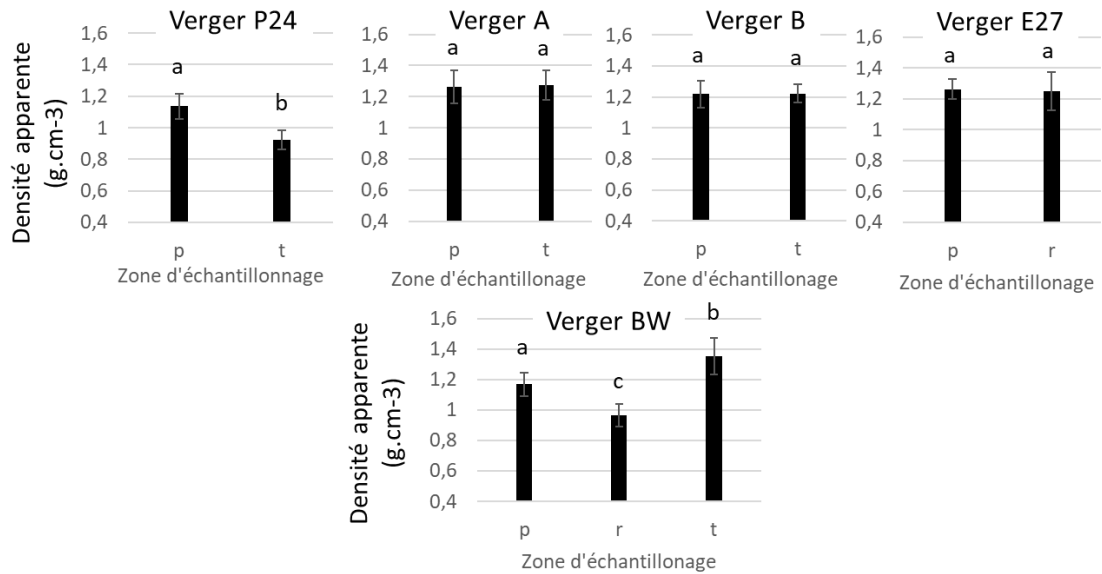


Figure 22 : Répartition de la densité apparente en fonction des vergers étudiés et de la zone de prélèvement des échantillons collectés

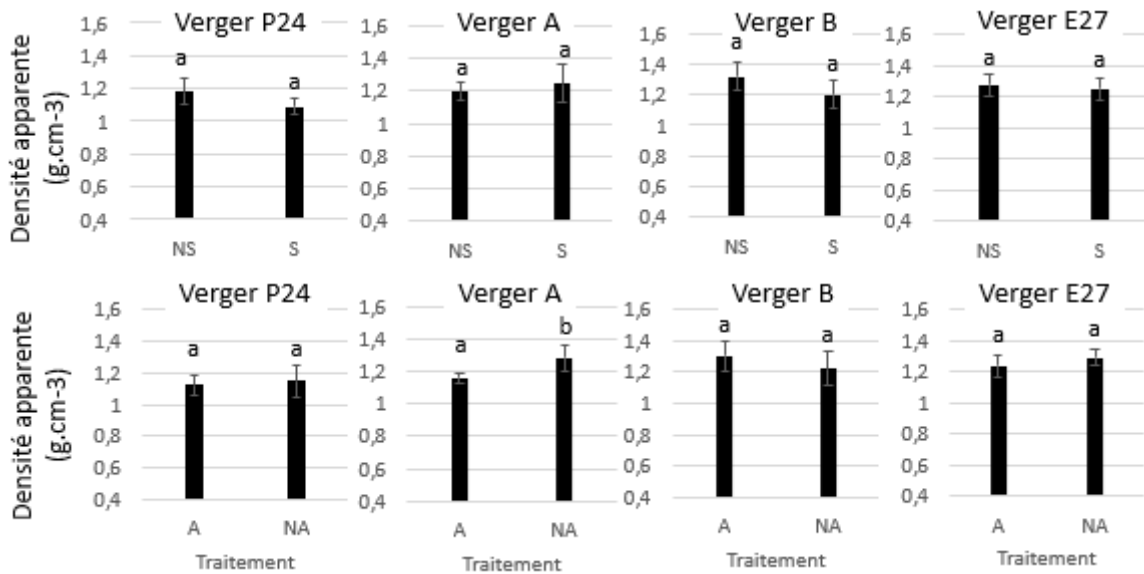


Figure 23 : Répartition de la densité apparente en fonction des vergers étudiés et du traitement scarifiés (S) et non scarifiés (NS) puis amendés (A) ou non amendés (NA) des échantillons prélevés dans la zone piétinée (p) des vergers.

3.3.2.1. Densité apparente des sols

La moyenne totale de la densité apparente des 88 cylindres effectués dans les cinq vergers est de $1,19 \text{ g.cm}^{-3}$ de sol. Cette valeur varie de $1,02 \text{ g.cm}^{-3}$ pour le verger P24 à $1,62 \text{ g.cm}^{-3}$ pour le verger BW (figure 21). Le verger P24 semble ainsi avoir une densité apparente plus faible que celle des autres vergers. Avant de rassembler les valeurs de chaque verger, il est donc préalablement nécessaire d'observer ce qu'il se passe verger par verger.

➤ Effets de la zone d'échantillonnage sur la densité apparente

Les résultats des tests Wilcoxon ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative de la zone d'échantillonnage sur la densité apparente dans les vergers A, B, et E27, alors qu'il y en a une pour les vergers P24 et BW (tableau 4). Dans le verger P24 la densité apparente des sols est significativement plus importante dans la zone piétinée que dans la zone non piétinée située juste à côté (figure 22). La valeur moyenne varie de $1,16 \text{ g.cm}^{-3}$ dans la zone piétinée à $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$ dans la zone témoin.

Dans le verger BW, la tendance est inverse. La densité apparente est significativement plus élevée dans la zone témoin ($1,35 \text{ g.cm}^{-3}$) que dans la zone piétinée ($1,17 \text{ g.cm}^{-3}$). La densité apparente des sols sous le rang, entre deux arbres, d'une valeur moyenne de $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ est encore significativement inférieure aux moyennes des deux autres zones. Dans le cas des trois autres vergers, malgré le fait que les tendances ne soient pas significatives, on observe tout de même que la densité apparente est légèrement plus importante dans la zone piétinée que témoin dans les vergers B et E27, et inversement pour le verger A.

➤ Effets du travail du sol sur la densité apparente

L'analyse statistique (tests de Wilcoxon) n'a pas permis de mettre en évidence des différences significatives au seuil de 5% de la scarification sur la densité apparente des sols (tableau 4). Cependant, la figure 23 montre que les moyennes de densité semblent légèrement plus importantes dans la modalité non scarifiée que la modalité scarifiée. Cette tendance s'inverse cependant dans le cas du verger A. Il faut tout de même remarquer dans le verger P24 que la densité apparente est, au seuil de 7%, marginalement plus élevée dans la zone non scarifiée ($1,18 \text{ g.cm}^{-3}$) que dans la zone scarifiée ($1,09 \text{ g.cm}^{-3}$).

➤ Effets de l'apport de matière organique sur la densité apparente

L'analyse statistique révèle un effet significatif de l'amendement sur la densité apparente dans le verger A, contrairement aux vergers B, P24 et E27. Dans le verger A, la densité apparente est significativement plus élevée dans les sols non amendés ($1,28 \text{ g.cm}^{-3}$ de moyenne) que dans les sols amendés ($1,16 \text{ g.cm}^{-3}$ de moyenne). Sans en avoir l'appui statistique, les tendances semblent être les mêmes pour les vergers E27 et P24, alors qu'elles s'inversent dans le verger B.

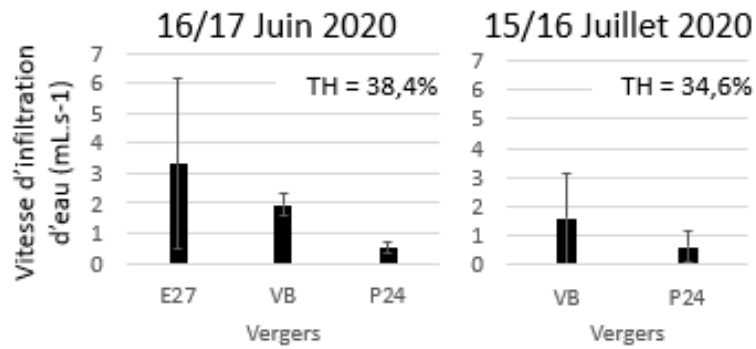


Figure 24 : Vitesse d'infiltration d'eau des sols en fonction des vergers et de la date d'échantillonnage ; TH = taux d'humidité du sol

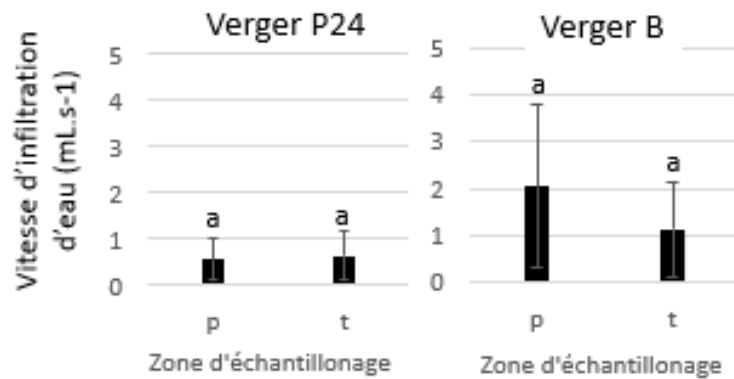


Figure 25 : Vitesse d'infiltration d'eau des sols en fonction des vergers et de la zone d'échantillonnage

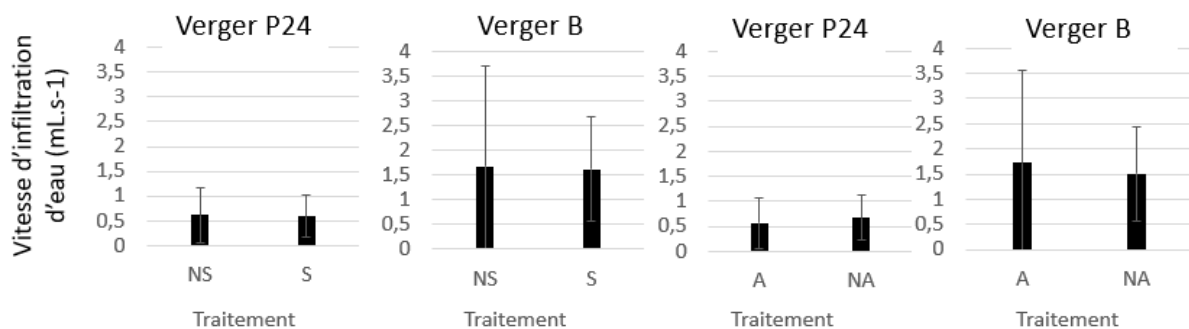


Figure 26 : Vitesse d'infiltration d'eau des sols en fonction des vergers et du traitement scarifié (S) ou non scarifié (NS)

3.2.2.2. Vitesse d'infiltration d'eau du sol

La moyenne totale des 74 tests d'infiltration d'eau effectués dans les trois vergers B, E27 et P24 est de $1,19 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$. Au 16 juin comme au 16 juillet 2020, la vitesse d'infiltration d'eau du verger P24 semble être inférieure à celle des vergers VB et E27. A savoir que, dans les deux cas, les manipulations ont été effectuées dans des conditions pluvieuses voire très pluvieuses les 16 et 17 juin.

Les tests de Wilcoxon ne révèlent aucune influence significative de la zone d'échantillonnage, de la scarification et de l'amendement sur la vitesse d'infiltration d'eau (tableau 4). Le manque d'échantillon et la grande dispersion des résultats autour de la moyenne (écart type plus grand que la moyenne elle-même) ne permettent pas de conclure quant à l'effet des traitements sur la vitesse d'infiltration d'eau, les tendances peuvent cependant permettre de soulever des hypothèses. La figure 25 montre que dans VB, l'eau s'est écoulée légèrement plus rapidement dans la zone piétinée que dans la zone témoin, ainsi que dans la zone non scarifiée que scarifiée et amendée que non amendée.

3.2.2.3. Analyse tomographique des vergers

A partir de l'analyse des colonnes de sol faites dans les vergers, deux indicateurs peuvent être retenus : une appréciation de la densité apparente des sols, et le volume de la macroporosité tubulaire créée par les vers de terre.

De la même manière qu'avec la méthode des cylindres, l'analyse tomographique de la densité apparente des sols ne révèle aucune différence remarquable des effets des facteurs en jeu dans les vergers A, B et E27. Cependant, l'effet significatif de la zone d'échantillonnage sur la densité dans le verger P24 observée par la méthode des cylindres (tableau 2) est confirmée par l'analyse tomographique (figure 27) jusqu'à 10 cm de profondeur.

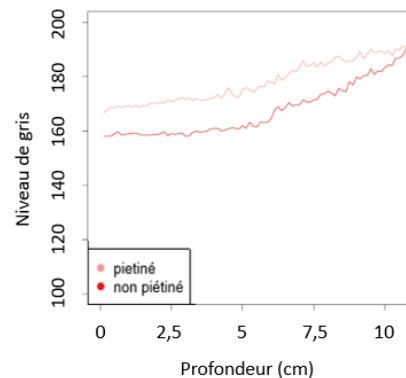
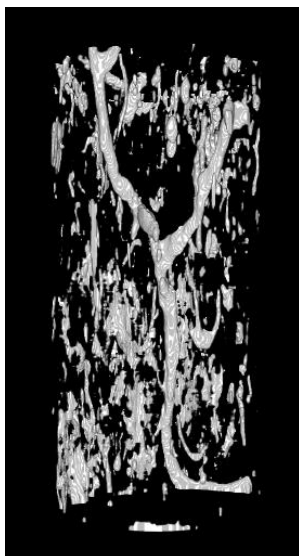


Figure 27 : Résultat de l'analyse tomographique de P24 ; les niveaux de gris traduisent la densité du sol



L'analyse du volume tubulaire créée par les vers de terre n'a pas permis de mettre en évidence des effets des facteurs sur le réseau de galeries. En effet, en dehors du verger A, il y a moins de galeries observées dans le témoin relatif non piétinée que dans la zone piétinée. Le choix du témoin relatif est donc remis en question. Une représentation en trois dimensions d'une des colonnes réalisées dans les vergers est présentée pour l'exemple dans la figure 28 ci-contre. On y voit une grande galerie continue typique de ver anécique et une multitude de fragments possiblement dus à l'activité des vers endogés.

Figure 28 : Représentation en trois dimensions du réseau de galerie créée par les vers de terre d'une colonne de sol prélevé dans la modalité Non scarifié amendé de la zone piétinée du verger P24.

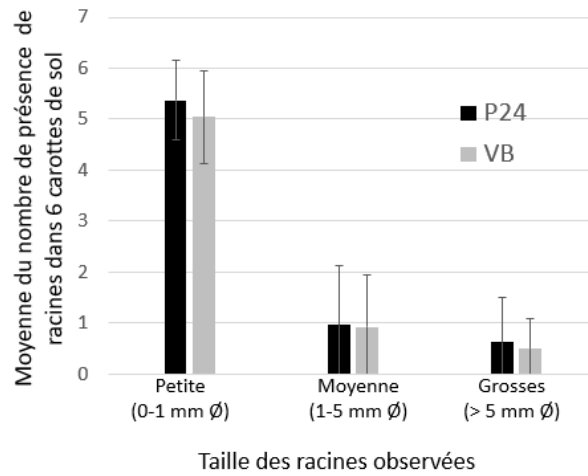


Figure 29 : Nombre de présence de petites, moyennes, et grosses racines dans six carottes de sols effectuées à 10, 25 et 50 cm de la base du tronc et à 0-10 et 10-20 cm du sol en fonction des vergers étudiés.

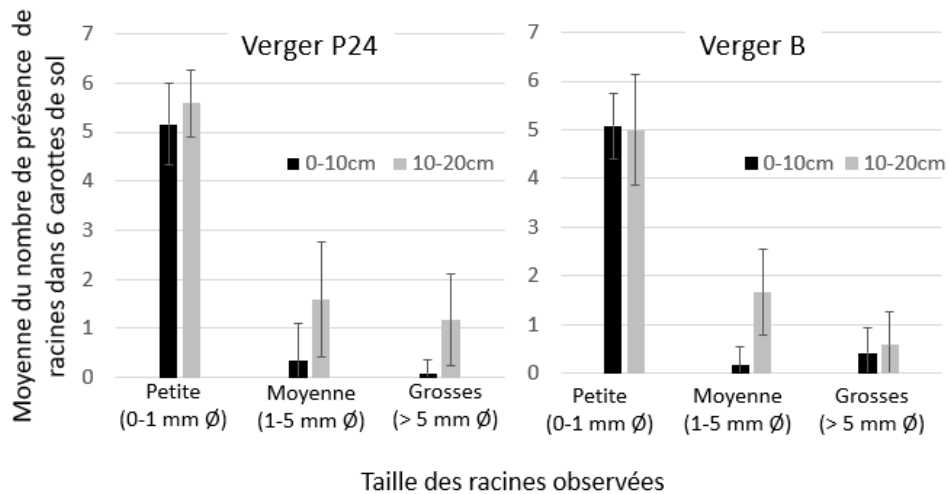


Figure 30 : Nombre de présence de petites, moyennes, et grosses racines dans six carottes de sols effectuées à 10, 25 et 50 cm de la base du tronc en fonction des vergers étudiés et de la profondeur de prélèvement

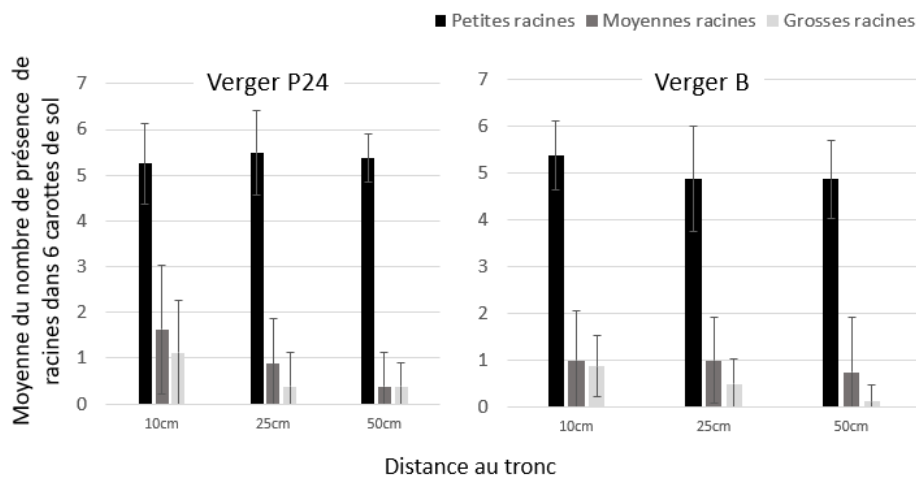


Figure 31 : Nombre de présence de petites, moyennes, et grosses racines dans six carottes de sols effectuées à 0-10 et 10-20 cm de la surface du sol en fonction des vergers étudiés et de la distance à la base du tronc

3.2.3. Présentation des résultats de l'analyse racinaire

Pour un même traitement, à une même profondeur et à la même distance du tronc, la figure 29 montre qu'en moyenne 5 des 6 carottes effectuées dans VB contiennent des radicelles inférieures à 1 mm de diamètre, 0,9 sur 6 contiennent des racines entre 1 et 5 mm de diamètre, et 0,5 sur 6 contiennent des racines de plus de 5 mm de diamètre. Ces valeurs sont légèrement supérieures dans le verger P24 (5,4 ; 0,96 ; 0,63).

La figure 30 fait valoir la présence des radicelles en même proportion dans l'horizon 0-10 cm et 10-20 cm, puis les moyennes et grosses racines qui se situeraient plutôt dans l'horizon 10-20 cm.

Enfin, la présence des radicelles semble être la même que l'on soit à 10, 25 ou 50 cm du tronc, il serait intéressant de voir ce qu'il se passe au-delà (figure 31).

➤ Etat sanitaire des racines :

Les photos de l'état sanitaire des racines observées sont présentées en figure 32. Les racines du verger P24 semblent être en moins bonne santé que les racines du verger B, information confirmée en fin de journée par le producteur du verger P24. L'intérieur des racines de ce verger reste blanc et semble bien vivant, mais les racines sont comme englobées par une épaisse écorce noire, que l'on pourrait associer à du bois mort. Les racines du verger B sont d'une couleur rouge plus vive, quasi est absente dans le verger P24 et est difficile à faire valoir sur les photos.

4. Discussion des résultats

4.1. Discussion des résultats du questionnaire

Dans cette partie, nous discuterons d'abord de la représentativité de l'échantillon enquêté ainsi que des caractéristiques globales des exploitations, puis des conduites de culture adoptées par les producteurs qui pourraient avoir un rapport avec la compaction des sols. Ensuite, nous discuterons de la perception qu'ont les producteurs autour de sujets tournant autour de la matière organique des sols ou de la compaction, et des conduites de culture s'y associant.

Le questionnaire sur la compaction des sols a récolté 27 réponses, ce qui représente approximativement 6% des personnes l'ayant reçu. En parallèle, une autre stagiaire du BIK a envoyé le même type de questionnaire sur le même réseau un peu plus tôt dans la saison, en s'intéressant au sujet de l'enherbement dans les vergers de kiwi. Ce questionnaire a récolté 44 réponses de producteurs soit 4 points de mieux. Ce nombre de réponses plus faibles pourrait s'expliquer par à un manque de disponibilité (envoi pendant les travaux d'éclaircissage) ou un manque d'accessibilité / de connaissances / d'intérêt pour le sujet. Cependant, depuis la diffusion de ce questionnaire le nombre de cas de dépérissement a considérablement augmenté en France, d'une centaine d'hectare selon les estimations du BIK. Ceci redirige les discussions de la filière sur le sol des vergers. Un questionnaire du même type diffusé aujourd'hui aurait peut-être plus de succès. Par ailleurs, il a été mis en avant un manque de données chez les producteurs du pays de l'Adour. Or, cette zone représente en moyenne 30% de la production

P24 NS A
10 cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



P24 S A
30 cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



P24 S A
30 cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



P24 S NA
10 cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



VB S NA
10 cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



VB NS A
30cm du tronc à 10-20 cm de profondeur



Figure 32 : Photos exemple de petites (1), moyennes (2), et grosses (3) racines collectées à la tarière dans les vergers B et P24

nationale, ce qui pose un problème en termes de représentativité de l'échantillon enquêté. Ceci peut s'expliquer par des différences structurelles des exploitations entre les régions concernées. A l'inverse des vergers de la Garonne, les exploitations qui ont été implantées dans l'Adour n'avait pour la plupart aucune expérience arboricole, et ont donc une approche du sol différente (Serrurier, 2013). Les profils des producteurs de kiwi sont variables et il est nécessaire de garder cela en tête dans la suite de l'analyse. Enfin, les surfaces de production de kiwi de l'échantillon enquêté suivent globalement les valeurs nationales. La part des agriculteurs produisant plus de 10 ha de kiwi est tout de même légèrement plus importante dans l'échantillon enquêté.

La texture des sols dans les vergers de kiwi semble finalement assez hétérogène, puisqu'il y a quasiment autant de producteurs avec des sols à dominance limoneuse, qu'argileuse et sableuse. Par ailleurs, les producteurs enquêtés ont globalement indiqué avoir des sols neutres à basiques, avec une pierrosité faible à très faible. La profondeur des sols est plutôt homogène chez les répondants avec une majorité de producteurs ayant déclaré avoir des sols de plus de 80 cm ce qui correspond à des sols très profonds selon les bases de données du GIS sol en France Métropolitaine. Les autres, entre 40 et 80 cm, ont des sols profonds (Gis Sol, 2020). En parallèle avec ce qui ressortait de la bibliographie néo-zélandaise (Hughes et Wilde, 1989), les producteurs français s'accordent tous à dire que les racines ne descendent pas en dessous de 80 cm de profondeur.

➤ La question de l'eau du sol et les conduites adoptées

Il n'y a au final qu'un tiers des producteurs qui déclarent avoir des parcelles sujettes à l'hydromorphie et encore moins aux inondations. A cela s'associe la faible proportion des vergers adoptant des systèmes de drainage (20%). Cependant lorsque l'hydromorphie est présente, plus de la moitié des producteurs concernés y voit une fragilisation dans la vigueur des arbres. Par ailleurs, il faut aussi souligner qu'un tiers des producteurs ont implanté leur verger en butte et près de la moitié des producteurs répondants utilisent des sondes tensiométriques pour ajuster leur irrigation.

➤ La question de la matière organique et les conduites adoptées

En dehors des deux producteurs « insatisfaits », les taux de matière organique des sols fournis par les producteurs ne révèlent pas de lacune sur ce terrain-là. Dans leur étude, Roussel et al. (2001) ont fixé à 2 % le seuil en deçà duquel la teneur en matière organique est jugée déficitaire, ce qui n'est pas le cas dans cet échantillon. Dans leurs études respectives, Tacconi et al. (2014) et Reid et al. (1991) ont observé des taux de matière organique dans des vergers italiens et néo-zélandais allant de 2,6 à 3%. Chez les producteurs, un tiers des répondants se situent en dessous de cet intervalle.

A l'inverse du travail du sol, il est intéressant de noter que la grande majorité des producteurs (80%) apportent au moins occasionnellement de la matière organique dans leurs vergers. Cependant, la grande majorité de ces producteurs (70%) apportent une dose inférieure à 5 t/ha, ce qui est faible pour une amélioration de la structure du sol (Grosbellet, 2008). La forme et l'origine de la matière organique apportée par les producteurs sont aussi très variables selon les exploitations. Sans que des liens de cause à effet ne puissent être établis, les producteurs semblent faire le lien entre le taux de matière organique sur la compaction des sols, ou la présence de vers de terre, ainsi que l'impact des modes de production sur celui-ci.

➤ La question de la compaction des sols et les conduites adoptées

L'étude révèle que les sols ne sont pour le moment que très peu travaillés en verger de kiwi. D'une moyenne de 4,4, le nombre de passage pour traitement phytopharmaceutique est nettement en dessous de celui des autres productions fruitières comme la pomme avec en moyenne de 35 passages par an, 19 pour la pêche, et 10 pour cerise, prune, et abricot (Agréste, 2014). Cependant cette moyenne de 4,4 est quasiment doublée pour les travaux de taille et de récolte. Régulièrement effectués dans des conditions trop humides, ces passages sont pour les producteurs la principale cause de tassement en verger de kiwi. Ce n'est donc pas le nombre de passages qui crée le problème de tassements dans les vergers de kiwi, mais la période à laquelle ils sont effectués, couplé à la longévité des vergers.

Il est d'abord intéressant de voir qu'un tiers des producteurs enquêtés se soucient d'avoir des sols compactés. Parmi ce tiers de producteur, tous sont situés sur des vergers à plat. Il est évidemment difficile de remettre en cause la situation topographique sur la compaction des sols, mais cela signifie peut-être que les producteurs observent les symptômes de la compaction sur leur verger à plat : mauvais écoulement de l'eau dans le sol, pourriture des racines, travaux en condition de sols plus humide et création d'ornières. Ainsi un verger en pente permettrait un meilleur écoulement d'eau et limiter ces problèmes liés à la compaction du sol. Il n'est pas étonnant au vu de la bibliographie de voir que les producteurs concernés par la compaction soient davantage ceux concernés par les inondations. Ceci montre que les producteurs ont globalement intégré le problème qu'engendrent les inondations sur la santé des sols, mais aussi l'importance de connaître son sol afin de mieux comprendre ces effets.

➤ La question de la mortalité et les conduites adoptées

La quasi-totalité des producteurs déclarent observer de la mortalité dans leurs vergers. Mais le taux de mortalité qui en découle, de 1 à 40%, est très variable selon les producteurs. De la même manière que précédemment, les résultats obtenus ne permettent pas de ressortir des liens de causalité entre des conduites de culture et la mortalité des arbres. Cependant les tendances qui ressortent, en lien avec la bibliographie, vont à l'avantage des cultures en butte, sur des parcelles en pentes et non inondables, avec un intérêt particulier pour la texture des sols (figure 18). Les tendances montrent aussi que les producteurs semblent avoir fait le lien entre la compaction des sols et le taux de mortalité qu'ils observent dans leurs vergers. Tous ces résultats ne sont pas forcément très étonnants, mais la vérification de ces tendances par les producteurs eux-mêmes redonnent du poids à cette étude.

4.2. Discussion des résultats de l'expérimentation

➤ Etat des lieux de la compaction des sols dans les vergers de kiwi français

Les photos des mini-fosses permettent déjà d'observer une grande variabilité entre les vergers avec des horizons bien distincts, et d'autres qui paraissent plus homogènes. Cette variabilité s'explique avant tout par une différence dans la texture du sol. Les conditions climatiques peuvent aussi avoir un fort impact sur ces profils en fonction par exemple que les vergers soient sujets ou non à des inondations. Sans que des liens de cause à effet ne puissent être établis, le verger BW paraît être de meilleure qualité (3 horizons bien distincts), or il ne subit quasiment pas d'inondations comparé aux deux autres qui présentent un horizon remarquablement homogène. Enfin, les différences observées dans les profils de sols peuvent

aussi être dues aux conduites de culture menées par les producteurs. L'enherbement, en opposition avec les vergers totalement désherbés, participe bien entendu à la modification des horizons de surface et la variabilité des indicateurs mesurés par la suite.

Le tableau 5 ci-dessous présente les valeurs de densité apparente de chaque verger en parallèle des valeurs de densité référence des textures de sols retenues par Roussel et al. (2001) dans leur étude.

Tableau 4 : Valeurs de densité apparente collectées dans les vergers de l'expérimentation en parallèle des valeurs de densité références à texture semblable retenues par Roussel et al (2001).

Verger	Texture du sol	Densité apparente collectée (g.cm-3)	Valeurs de densité apparente retenues en fonction de la texture des sols (Roussel et al., 2001) (g.cm-3)
A	Sablo-limoneux	1,22	1,4
B	Limono-sableux	1,27	1,35
P24	Limono-argileux	1,03	1,35
E27	Sablo-argileux	1,26	1,5
BW	Limono-argileux	1,16	1,35

Ce tableau montre que les valeurs de densité apparente collectées dans les vergers sont systématiquement en dessous des valeurs de référence par textures retenues par Roussel et al. (2001). La compaction des sols en verger de kiwi n'est donc peut-être pas si importante que ça. Cependant, des cylindres de densité prélevés dans trois études néo-zélandaise différentes à la surface de sols limoneux révèlent des valeurs encore nettement inférieures à celles de l'étude allant de 0,6 à 0,9 g.cm⁻³ (Lago et al., 2019 ; Muller et al., 2019 ; Hughes et Wilde, 1989).

En ce qui concerne les effets de la zone d'échantillonnage, un seul des cinq vergers a présenté les résultats imaginés au départ. Dans les autres vergers, le témoin, qui était censé être le témoin non compacté de la zone compacté juste à côté, est parfois plus dense que la zone d'intérêt. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il était parfois difficile d'éviter les traces de passage de roue, surtout lorsque que le couvert végétal était abondant, et donc d'obtenir ce témoin relatif souhaité au départ. Cette absence de témoin, couplé à l'absence de répétitions au sein des vergers, ne nous permet pas d'aller plus loin en tentant par exemple de regrouper les valeurs des vergers et pouvoir tester des modèles statistiques plus puissants tel que les modèles mixtes. Il est tout de même intéressant de voir que les tendances observées grâce à l'analyse des cylindres dans P24 se sont confirmées dans l'analyse tomographique, et que dans ce verger, le témoin relatif est bel et bien moins compact que le sol de la zone d'intérêt associée. Au vu de la grande variabilité des résultats et du nombre trop restreint d'échantillons collectés, il n'est pour le moment pas possible d'observer un lien entre la zone d'échantillonnage et la vitesse d'infiltration d'eau.

- Quelles sont les conséquences de la compaction des sols dans les vergers ?

Les différences de vitesses d'infiltration d'eau observées entre les vergers peuvent facilement s'expliquer par les variations de textures des vergers concernés. L'eau s'écoule ainsi plus rapidement dans les sols sablo-argileux de E27, puis dans les sols limono-sableux de VB et enfin dans les sols limono-argileux de P24. Bien qu'aucun lien statistique ne puisse être établi par cette étude, on ne peut s'empêcher au vu de la bibliographie de faire le lien entre cette vitesse d'infiltration très faible dans P24, et les racines qui me paraissait personnellement être en moins bonne santé que celles du verger B. Cependant, la tendance s'inverse concernant les

valeurs de densité apparente, car c'est dans P24 que le sol semble être le moins compact. Ceci peut s'expliquer par le fait que les échantillons de ce verger soient passés 1h30 au micro-onde dont l'objectif était alors de tenter de les sécher.

L'expérience sur l'analyse des racines ne permet pas de savoir ce qu'il se passe en dessous de 20 cm de profondeur. Toutefois ces résultats permettent déjà d'infirmier qu'il existe un chevelu racinaire important dans les 20 premiers cm du sol. D'autre part, il est difficile de mettre en relation l'absence de grosses racines avec la compaction. En effet, sur les racines trop grosses, il était impossible d'enfoncer la tarière (ce qui arrivait 1 fois sur 2 à 10 cm du tronc), et qui va à l'encontre d'une étude sur les racines, mais suit notre objectif de ne pas être trop destructeur pour les vergers.

- Effets de la compaction des sols et de l'apport de matière organique sur la qualité des sols en verger de kiwi

Malgré l'absence de différences significatives, il est tout de même encourageant de voir que les tendances de l'effet de la scarification sur la densité dans les vergers P24, E27 et B vont dans le sens attendu, tout particulièrement pour le verger P24 qui s'approche de la significativité (p -value = 0,07). Ces tendances s'inversent malheureusement dans le verger A où la densité est supérieure dans la zone scarifiée que non scarifiée. Cependant, il faut rappeler que le producteur a retravaillé le sol après le passage du scarificateur, ce qui a pu biaiser les résultats.

Il est difficile de discuter des effets de l'amendement sur la densité apparente et la vitesse d'infiltration d'eau car les tendances, non significatives, s'opposent entre chaque verger.

4.3. Critiques, perspectives et recommandations

- La scarification des sols

Les résultats de l'expérimentation n'ont pour le moment pas permis de confirmer les bienfaits de la scarification sur la compaction des sols, mais les premières tendances semblent aller dans le bon sens. Peut-être qu'en attendant un peu plus, en faisant plus d'échantillons, ou en tentant un second passage de l'outil, les résultats auraient été plus probants. Il n'y a qu'une seule façon de le savoir, le faire.

Le scarificateur présente l'avantage qu'il est peu cher, et facile d'utilisation. Il a cependant montré quelques limites dans le cadre de cette étude. Tout d'abord, l'outil n'est pas adapté à la culture en butte, ce qui concerne plus d'un tiers des répondants à l'enquête parmi lesquels ceux qui présente le plus de problème de compaction. Afin de résoudre ce problème, il faudrait par exemple qu'il soit articulé au milieu pour permettre aux dents de s'enfoncer partout. Ensuite l'outil présente le risque d'arracher les fruits et sarments qui sont trop bas. Il faudrait voir s'il est possible de construire un outil moins haut. Enfin, le scarificateur de 3 mètres 50 de large utilisé pour l'expérimentation n'a pas permis de travailler les sols jusqu'aux pieds des arbres, alors que les besoins y sont tout aussi important. Il faudrait alors un outil plus large, ou recommander de le passer en deux fois dans chaque rang. En contrario, l'enquête a révélé la variabilité assez importante qu'il existe dans la distance inter-rang selon les producteurs, point à prendre en compte dans le choix de l'outil.

En ce qui concerne l'outil en lui-même il ne présente rien de révolutionnaire, des dents fixées à un axe en rotation qui, trainées, permettent la perforation du sol. Cependant les résultats

de l'enquête ont montré que quasiment la moitié des producteurs n'avaient jamais entendu parler de scarificateur. Dans la bibliographie, le problème est le même, car il est très difficile de trouver quelconque étude, article ou magazine qui parle de l'utilisation de cet outil en arboriculture. Il existe peut-être un premier problème de vocabulaire, car en agronomie la scarification est une technique de traitement de semences, et pour les particuliers un outil utilisé sur gazon. Aussi, il faudrait peut-être organiser une synthèse des retours d'expérience autour de cet outil, car il semble être davantage utilisé en production pommicole.

➤ Apport de matière organique

Là aussi, les résultats de l'expérimentation n'ont pas permis de révéler des effets de l'apport de matière organique sur la compaction des sols. Cependant, à l'inverse de la scarification, les liens entre amendement et structure des sols ne sont plus à prouver. Dans le cas de cette étude, c'est peut-être qu'il n'y a tout simplement pas eu assez de matière apportée pour en observer les effets en 4 mois. En effet, les producteurs ont indiqué que, un jour après l'épandage des composts, le travail ne se voyait déjà plus. Dans son étude, Grosbellet (2008) est allée jusqu'à apporter une couche de 30 cm de compost au-dessus de son sol. Les résultats les plus intéressants qu'elle a observé en termes de structuration des mélanges s'associaient aux doses de compost les plus élevées. Au niveau de l'enquête, les résultats ont montré que les producteurs n'apportaient que très peu de matière organique. Si l'on veut raisonner les apports en termes d'amendement plus que de fertilisant, il est certain qu'il faudra en apporter au moins le double. Aussi, il faudra faire attention à la mise en place des modalités de l'expérimentation, de sorte d'apporter la matière organique en plein sur l'ensemble des parcelles.

➤ Dispositif expérimental

En kiwi, il n'est pour le moment pas possible de conduire des essais sur des parcelles expérimentales. Des essais sur cette culture sont donc forcement réalisés en conditions réelles ce qui, comme tout dispositif expérimental, présente des avantages et des limites. Sur cet essai, la plus grosse limite fut selon moi la distance séparant le BIK des parcelles expérimentales (250 km), ajouté à cela les temps de trajets d'une parcelle à l'autre, il ne reste plus beaucoup de temps sur les essais en question. Mais il est difficile de faire autrement, car c'est bien dans le bassin de l'Adour qu'il semble y avoir le plus de soucis de tassements de sols. Aussi, il aurait été intéressant de ranger les modalités par bloc pour avoir plus de répétitions ce qui nous aurait sans doute permis d'aller plus loin dans l'analyse statistique des données. Enfin, la mise en place des traitements fut trop variable selon les parcelles, ce qui a apporté des biais à notre étude et empêché certaines analyses. Par la suite, il serait intéressant de se concentrer sur moins de parcelles, peut-être deux, ce qui limiterait les temps de trajets. Selon le bon vouloir des producteurs, il serait utile d'organiser le dispositif expérimental sur au moins deux blocs. Aussi, peut-être qu'en travaillant avec une seule coopérative, cela limiterait le nombre d'intermédiaires et les confusions dans l'application du protocole. Enfin, si l'on veut avoir des résultats intéressants sur les indicateurs envisagés dans cette étude, il est nécessaire de passer plus de 9 jours sur les parcelles pour avoir plus de répétitions.

➤ Méthodologie appliquée

La méthode des cylindres est une méthode plutôt facile à mettre en place quelles que soient les conditions météorologiques. Le séchage des sols a cependant été très laborieux au cours de ce stage. En l'absence d'étuve, nous espérions pouvoir sécher les échantillons au

micro-ondes, il s'est avéré qu'ils étaient trop gros et trop humides pour arriver à un état totalement sec. C'est un matériel qu'il faudra selon moi indispensablement prévoir si l'expérimentation devait être reconduite. L'analyse de cet indicateur a aussi cruellement manqué de répétitions, l'objectif était d'observer les premières tendances de ces prélèvements avant de retourner en faire d'autre, peut-être aurait-il mieux fallu y retourner « à l'aveugle ». Aussi, en dehors des périodes estivales parfois trop sèches, il aurait sûrement été intéressant d'avoir une appréciation de la densité avec la profondeur. Selon Pagliali et al. (2004), c'est la compaction en sous-sol qui est responsable de l'hydromorphie des sols et elle est largement sous-estimée dans les études. Dans des vergers de kiwi néo-zélandais, Hughes et Wilde (1989) montrent que la densité est plus importante dans des sols hydromorphes à partir de 15 cm de profondeur. Si l'expérimentation devait être reconduite et que les conditions le permettent, il serait intéressant d'avoir une approche de la densité en profondeur, au moins en dessous des cinq premiers centimètres pour éviter les variations de structure causées par la présence ou non de couverts.

Concernant l'analyse des colonnes de sol, les aléas dus au covid-19 n'ont pas permis d'aller tout de suite au scanner. Durant ce laps de temps, les colonnes ont subi un léger séchage ce qui a biaisé l'analyse. Je pense personnellement que cette analyse pourrait révéler beaucoup de choses car elle donne une image des fissurations du sol plus en profondeur. En effet les résultats des cylindres ne nous montrent pas que les sols soient particulièrement tassés. Cependant, étant donné les besoins en eau et en froid de la plante, le sol ne subit pas les phénomènes de séchage/humectation et gel/dégel créant les fissures d'un sol. Outre une analyse de densité montrée par les cylindres, les colonnes peuvent permettre d'analyser ces plus grosses fissures qui favorisent l'écoulement de l'eau essentiel pour les kiwis. L'analyse des galeries de vers de terre dépend trop du type d'occupation du sol. Il a donc été compliqué d'analyser les résultats obtenus sans avoir pu recenser les populations de vers de terre au préalable.

Les manipulations de vitesse d'infiltration d'eau, faites-en autonomie dans des conditions pluvieuses à très pluvieuses se sont révélées laborieuses. Il a là aussi manqué cruellement de répétitions pour pouvoir mettre en place une analyse statistique fiable. Ces mesures sont intéressantes au vu des enjeux de l'étude, mais très chronophages et je pense qu'il est compliqué de les mettre en place en étant aussi loin des parcelles de l'expérimentation.

Il faudrait bien entendu faire quelque chose de plus destructeur si l'on veut réellement comprendre le système racinaire des arbres, et affirmer un lien de causalité entre la compaction des sols et le développement racinaire des vergers. Malheureusement, en conditions réelles, cette option n'est pas envisageable. Le test à la tarière permet tout de même le diagnostic rapide de l'état de santé du verger. Comme l'avait fait Hughes et Wilde (1989) en creusant des fosses à la bêche, l'analyse à la tarière ne permet pas d'obtenir une approche assez intéressante des moyennes et grosses racines. Il serait cependant possible de pousser un peu plus l'analyse sur les radicelles de moins d'un millimètre de diamètre. Dans leur étude, Gandar et Hughes (1988) mesurent la somme des longueurs de toutes les radicelles par unité de volume. Cela prend du temps, mais pourrait permettre de faire le lien entre des zones compactées et des densités plus faible de radicelles.

Conclusions

L'analyse statistique et le nombre trop restreint de répétitions ne permettent pas de tirer scientifiquement des conclusions mais les résultats couplés de l'essai et du questionnaire permettent déjà de soulever bon nombre de questions. Il serait intéressant, en apportant les améliorations énoncées dans ce rapport, d'approfondir chacune des méthodes mises en place durant l'étude. Ce stage n'est donc pas une fin en soi mais permet d'ouvrir le large sur d'autres travaux à venir. Ci-dessous sont reprises les hypothèses de départ :

H1 : « *Les pratiques et opinions diverses des producteurs de kiwi permettent de mieux comprendre les enjeux, les causes et les conséquences de la compaction des sols.* »

Le questionnaire diffusé en ligne a permis de révéler les pratiques très variables mises en place aujourd'hui dans les exploitations. Cependant, bien que beaucoup se soucient de l'état de compaction de leur sol, la plupart n'osent pas le travailler pour ne pas abimer le système racinaire réputé très sensible. Il est donc nécessaire de mettre en place des expérimentations pour tenter les choses que les producteurs n'osent pas faire.

H2 : « *Il existe une variabilité mesurable de la compaction des sols au sein des vergers de kiwi, et entre les vergers de kiwi selon la texture du sol et la conduite des producteurs des vergers.* »

En photo, la variabilité est flagrante, mais l'analyse des résultats des cylindres de densité n'a pas permis de mettre en évidence une compaction particulière à la surface du sol. Il faudra sûrement observer ce qu'il se passe plus en profondeur si l'on veut caractériser la compaction des sols en verger de kiwi.

H3 : « *Il est possible d'observer les conséquences de la compaction des sols sur l'état des vergers.* »

Les conséquences de la compaction des sols dans les vergers de kiwi ne sont pas à remettre en cause car ils ont été largement observés et prouvés dans la littérature. Sur la partie expérimentale, il faudra passer plus de temps sur ces manipulations pour établir un lien de causalité entre la compaction des sols et la vitesse d'infiltration, la densité et l'état sanitaire des racines ou encore les populations de vers de terre.

H4 : « *Quatre mois après le passage des traitements, il est possible d'observer des premiers effets de la scarification et de l'apport de matière organique sur des indicateurs de la qualité physique des sols.* »

Quatre mois, c'est peut-être un peu court pour affirmer que les tendances observées sont réellement dues aux traitements. Mais la discussion de cette étude a permis de mettre en avant les points qui seront à ajuster si le BIK veut continuer de mettre en place des essais.

Au vu de l'évolution effrayante des symptômes de dépérissement dans les vergers français au cours même de ce stage, il sera nécessaire de mener les futures études par cette approche, en prenant compte des résultats et limites de ce travail préliminaire. Bien que la compaction des sols soit largement mise en cause dans le monde en tant que responsable du dépérissement des vergers de kiwis, les liens restent encore à prouver, évaluer et solutionner.

Bibliographie

- Alliaume F., Olivera G., Franco J., Arias M., 2007. Organic matter amendments to a silt loam and a loam soil on 'O'Neal' blueberry orchards in South Uruguay. Dans : *VIII International Symposium on Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics*, 872, 339-348.
- Ampoorter E., De Schrijver A., De Frenne P., Hermy M., Verheyen K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*, 37(11), 1734-1746.
- Baudry A., Vaysse P., Mazolier J., Hutin C., Floc'hlay F., Hennion B., Fournier J-M., 2003. Monographie – Le kiwi. *Centre technique professionnel des fruits et légumes (CTIFL)*, 239 p.
- Beylich A., Oberholzer H.R., Schrader S., Höper H., Wilke B.M., 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 133-143.
- Bottinelli N., Capowiez Y., Ranger J., 2014. Slow recovery of earthworm populations after heavy traffic in two forest soils in northern France. *Applied soil ecology*, 73, 130-133.
- Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils : A review. *Forest ecology and management*, 338, 124-138.
- Capowiez Y., Bastardie F., Costagliola G., 2006. Sublethal effects of imidacloprid on the burrowing behaviour of two earthworm species: modifications of the 3D burrow systems in artificial cores and consequences on gas diffusion in soil. *Soil biology and biochemistry*, 38(2), 285-293.
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchant P., Ruy S., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 209-216.
- Chan K.Y., Barchia I., 2007. Soil compaction controls the abundance, biomass and distribution of earthworms in a single dairy farm in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research*, 94(1), 75-82.
- Cho Y., Cho H., Ma K., Park M., Kim B., 2013. Effect of subsoiling on soil physical properties and fruit quality in organic conversion kiwifruit (*Actinidia chinensis* 'Haegeum'). *Acta horticulturae*, 1001, 347-352.
- Dassot M., Frauenfelder A., Wehrlen L., Collet C., 2017. La scarification du sol et le dosage du couvert forestier permettent de lever des blocages de régénération naturelle. *Rendez-vous Techniques ONF*, 54, 3-8.
- Domínguez A., Bedano J.C., Becker A.R., 2010. Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 51-59.

- Drescher M.S., Reinert D.J., Denardin J.E., Gubiani P.I., Faganello A., Drescher G.L., 2016. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(2), 159-168.
- FAOSTAT, 2018. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture – Données Cultures [en ligne]. Disponible sur : <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>. Consulté le 15 mai 2020.
- Fell V., Matter A., Keller T., Boivin P., 2018. Patterns and factors of soil structure recovery as revealed from a tillage and cover-crop experiment in a compacted orchard. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 134 p.
- Fin S.S., Marchesan E., Gubiani P.I., Farenzena J.A.P., Murari M.S., Coelho L.L., Filho A.C., Aramburu B.B., 2018. Duration of the effects of scarification and raised bed associated with vegetation cover on soybean yield on an Alfisol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(11), 1230-1238.
- France AgriMer, 2018. Les filières des fruits et légumes - données 2017. 94 p.
- Gandar P.W., Hughes K.A., 1988. Kiwifruit root systems 1. Root-length densities. *New Zealand journal of experimental agriculture*, 16(1), 35-46.
- GIS Fruits, 2020. Présentation du GIS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gis-fruits.org/Presentation-du-GIS>. Consulté le 19 août 2020.
- GIS Fruits, 2020. Journée d'échange sur la valorisation des sols de vergers [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gis-fruits.org/Actualites/Journee-d-echange-sur-la-valorisation-des-sols-de-vergers>. Consulté le 19 août 2020
- GIS Sol, 2020. La profondeur des sols en France métropolitaine [en ligne]. Disponible sur : <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-profondeur-des-sols-en-france-metropolitaine-1493>. Consulté le 24 août 2020.
- Goutines C., Guillermin P., Coureau C., Fourrié L., Gilles Y., Guérin A., Leclanche X., Parveaud C-E., Varlet P., Vergneaud M-C., Collet S., 2019. Gestion des sols de vergers : panorama des outils et travaux, pistes pour la recherche. *Institut National de Recherche Agronomique (INRA)*, 48 p.
- Grosbellet, C., 2008. Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. Thèse de doctorat de l'université d'Angers. Spécialité : Sciences Agronomiques. 240 p.
- Hughes K.A., Gandar P.W., Menalda P.H., Snow V.O., 1986. A survey of kiwifruit root systems. *Technical Reports*, 22, 48 p.
- Hughes K.A., Wilde R.H., 1989. The effect of poor drainage on the root distribution of kiwifruit vines. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 17(3), 239-244.

- Jordan D., Hubbard V.C., Ponder Jr F., Berry E.C., 2000. The influence of soil compaction and the removal of organic matter on two native earthworms and soil properties in an oak-hickory forest. *Biology and Fertility of soils*, 31(3-4), 323-328.
- Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A., Or D., 2017. Long-term soil structure observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. *Vadose Zone Journal*, 16(4), 1-16.
- Khaleel, R., Reddy, K.R. & Overcash, M.R.. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. *Journal of Environmental Quality*, 10, 133-141.
- Lago M.C.F., Gallego P.P., Briones M.J.I., 2019. Intensive Cultivation of Kiwifruit Alters the Detrital Foodweb and Accelerates Soil C and N Losses. *Frontiers in microbiology*, 10 (686), 10 p.
- Lang B., Russell D.J., 2019. Effects of earthworms on bulk density: A meta-analysis. *European Journal of Soil Science*, 1-4.
- Langmaack M., Schrader S., Rapp-Bernhardt U., Kotzke K., 2002. Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. *Geoderma*, 105(1-2), 141-152.
- Latorre B.A., Alvarez C., Ribeiro O.K., 1991. Phytophthora root rot of kiwifruit in Chile. *Plant Disease*, 75(9), 949-952.
- Le Corre M., 2017. Eviter la fatigue des sols. *Réussir fruits et légumes*, 369, 22-24.
- Lee Y.H., Jee H.J., Cha K.H., Ko S.J., Park K.B., 2001. Occurrence of Phytophthora root rot on kiwifruit in Korea. *The Plant Pathology Journal*, 17(3), 154-158.
- McAneney K.J., Judd M.J., 1983. Observations on kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) root exploration, root pressure, hydraulic conductivity, and water uptake. *New Zealand journal of agricultural research*, 26(4), 507-510.
- Müller K., Duwig C., Tinet A.J., Strozzi A.G., Spadini L., Morel M.C., Charrier P., 2019. Orchard management and preferential flow in Andosols—comparing two kiwifruit orchards in New Zealand. *Soil Research*, 57(6), 615-628.
- Pagliai M., Vignozzi N., Pellegrini S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131-143.
- Petry H.B., Mazurana M., Marodin G.A.B., Levien R., Anghinoni I., Gianello C., Schwarz S.F., 2016. Root Distribution of Peach Rootstocks Affected by Soil Compaction and Acidity. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, 11 p.
- Reid J.B., Brown N.S., Tate K.G., Howartson I.R., Cheah L.H., 1998. Soil properties and the effects of Cyclone Bola on survival and performance of kiwifruit vines. *New Zealand Society of Soil Science Conference*, 12 p.
- Reid J.B., Sorensen I., Petrie R.A., 1993. Root demography in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Plant, Cell & Environment*, 16(8), 949-957.

- Reid J.B., Tate K.G., Brown N.S., 1992. Effects of flooding and alluvium deposition on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) 2. Vine performance the following season. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 20(3), 283-288.
- Reid J.B., Tate K.G., Brown N.S., Cheah L.H., 1991. Effects of flooding and alluvium deposition on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*): 1. Early vine decline. *New Zealand journal of crop and horticultural science*, 19(3), 247-257.
- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guéri J., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58.
- Roussel O., Bourmeau E., Walter C., 2001. Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et gestion des sols*, 8(1), 65-81.
- Schon N.L., Mackay A.D., Gray R.A., Minor M.A., 2011. Earthworms in New Zealand sheep- and dairy-grazed pastures with focus on anecic *Aporrectodea longa*. *Pedobiologia*, 54, 131-137.
- Serrurier M., 2013. Structure des exploitations fruitières et légumières : évolutions entre les recensements agricoles de 2000 et 2010. *Agreste Les Dossiers*, 16, 97 p.
- Smith G.S., Buwalda J.G., Green T.G.A., Clark C.J., 1989. Effect of oxygen supply and temperature at the root on the physiology of kiwifruit vines. *New phytologist*, 113, 431-437.
- Smith G.S., Judd M.J., Miller S.A., Buwalda J.G., 1990. Recovery of kiwifruit vines from transient waterlogging of the root system. *New phytologist*, 115, 325-333.
- Soane B.D., Van Ouwerkerk C., 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil & Tillage Research*, 35, 5-22.
- Sorrenti G., Toselli M., Reggidori G., Spinelli F., Tosi L., Giacopini A., Tacconi G., 2016. Implicazioni della gestione idrica nella “Moria del kiwi” del veronese. *Frutticoltura*, 3, 7 p.
- Tacconi G., Giacopini A., Vittone G., Nari L., Spadaro D., Savian F., Ermacora P., Saro S., Morone C., Bardi L., Tosi L., 2019. Il punto sulla Moria del kiwi a 8 anni dalla sua comparsa. *L'Informatore Agrario*, 21, 34-37.
- Tacconi G., Tosi L., Giacopini A., Bertaccini A., Mazzucchi U., Favaron F., Sella L., Bertaiola F., Paltrinieri S., Fuentealba SP., Mejia J., 2014. Vine decline in kiwifruit: climate change and effect on waterlogging and *Phytophthora* in North Italy. *The 8th International Symposium on Kiwifruit, China, 22 September 2014*, 93-98.
- Van Dijck S.J.E., Van Asch T.W., 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil and Tillage Research*, 63, 141-153.

Annexe

Questionnaire sur la compaction des sols en verger de kiwi

Italique : Texte de présentation du questionnaire et des différentes parties

= Questions à choix uniques

O = Questions ouvertes

1. Présentation

Ce questionnaire est réalisé dans le cadre d'un programme de recherche sur la compaction des sols en vergers de kiwi, issu de la collaboration entre le Bureau Interprofessionnel du Kiwi (B.I.K.) et l'INRAE. Nous cherchons à réaliser un état des lieux des pratiques d'entretien du sol au sein des vergers de nos adhérents. Il ne vous prendra pas plus de 15 minutes.

- Vos données sont personnelles, aussi elles ne sortiront pas du B.I.K et ne seront utilisées que dans le cadre de cette étude -

2. Exploitation et système de culture

Nous voulons tout d'abord en savoir un peu plus sur votre exploitation.

2.1 - Quelle est la surface agricole utile de votre exploitation (en ha) ? O

2.2 - Sur quelle surface produisez-vous des kiwis (en ha) ? O

2.3 - Quelle est votre mode de production en vergers de kiwi ?

Agriculture Conventiionnelle

Agriculture Biologique

2.4 - Quelle est la densité de plantation dans vos vergers de kiwi ? O

2.5 - Quelle distance sépare 2 rangs de kiwis dans vos vergers (distance inter rang) ? O

2.6 - Avec quel système conduisez-vous vos vergers ?

T barre

Pergola

Autre

2.7 - Dans quelle situation démographique se trouve majoritairement vos vergers de kiwi ?

En coteaux

En plaine

Les deux

Dans ce cas, observez-vous des différences sur l'état sanitaire des plants, ainsi que sur la qualité physique et/ou la macrofaune du sol, selon que vos parcelles soient en plaine ou en coteaux ?

2.8 - Vos vergers de kiwi sont-ils cultivés à plat ou en butte ?

A plat

En Butte

2.9 - Quel est votre système d'irrigation ?

Goutte à goutte

Micro jet

Micro aspersion

Aspersion par frondaison

2.10 - Quelle est votre stratégie d'irrigation ? Utilisez-vous du matériel particulier (sondes capacitatives...) ?

2.11 - Un système de drainage est-il mis en place sur votre exploitation ?

Non, aucun système de drainage

Oui, Fossé de drainage

Oui, Drains enterrés

2.12 - Observez-vous des maladies particulières sur vos kiwis, et en quelles proportions (Phytophthora, Esca...) ?

2.13 - Observez-vous des mortalités dans vos parcelles de kiwis ? Pouvez-vous estimer le taux de mortalité ?

2.14 - Avez-vous des informations complémentaires sur votre système d'exploitation et l'état sanitaire de vos cultures ?

3. Milieu biophysique

3.1 - Quelle est la texture dominante de vos sols ?

Argiles

Limons

Sables

3.2 - Comment qualifiez-vous le pH de votre sol ?

Acide (pH < 6.5)

Neutre (6.5 < pH < 7.5)

Basique (pH > 7.5)

3.3 - Certains de vos sols sont-ils hydromorphes ou asphyxiant ?

Réserve utile faible, sols séchants
Réserve utile élevée, hydromorphie éventuelle
Les deux cas sont présents

Dans ce cas, observez-vous des différences sur l'état sanitaire des plants, ainsi que sur la qualité physique et/ou la macrofaune du sol, selon que vos parcelles soient plutôt hydromorphes ou drainantes ?

3.4 - Quelle est la profondeur majoritaire de vos sols ? Si vous creusez une fosse, c'est la profondeur sur laquelle vous buter car la roche est trop dure pour aller plus bas.

Très superficiel (<20 cm)

Superficiel (<40 cm)

Profond (<60 cm)

Très profond (>80 cm)

3.5 - A quelle profondeur la densité racinaire est-elle maximale ?

0-50 cm

50-100 cm

> 100 cm

3.6 - Quel est la pluviométrie moyenne annuelle sur votre exploitation (en mm d'eau) ?

< 600 mm

Entre 600 mm et 800 mm

Entre 800 mm et 1000 mm

Entre 1000 mm et 1200 mm

> 1200 mm

3.7 - Certaines de vos parcelles sont-elles sujettes à des inondations ?

Oui

Non

Si oui, observez des différences sur l'état sanitaire des plants, ainsi que sur la qualité physique et/ou la macrofaune du sol, selon que vos parcelles aient été inondées ou non ?

3.8 - Comment caractériseriez-vous la présence actuelle de vers de terre dans vos parcelles ?

Présence abondante

Présence de vers de terre

Peu de vers de terre

Pas de vers de terre

3.9 - Avez-vous observez une évolution de la faune du sol depuis votre installation, et si oui laquelle ? O

3.10 - Considérez-vous certains de vos sols comme étant compactés ?

Oui

Non

Je ne sais pas

3.11 - Connaissez-vous, ou avez-vous un avis du taux de matière organique de vos sols en vergers de kiwi ? O

3.12 - Connaissez-vous, ou avez-vous un avis de la densité apparente de vos sols en vergers de kiwi ? O

3.13 - Avez-vous d'autres données, indicateurs, ou informations complémentaires sur le sujet ? O

4. Conduite de culture

4.1 - Combien de passages de traitements phytosanitaires effectuez-vous en moyenne chaque année (fongicide, herbicide, insecticide) ? O

4.2 - Combien de passages de tracteurs effectuez-vous en moyenne chaque année pour les travaux de taille (extraction des sarments ou broyage) et de récoltes ? O

4.3 - Travaillez-vous vos sols ?

Oui

Non

4.4 - Combien de passages de tracteurs effectuez-vous en moyenne chaque année pour travailler vos sols en vergers de kiwi ? O

4.5 - Quels sont vos pratiques de travail du sol sur kiwi, à quelle fréquence effectuez-vous ces pratiques, et pourquoi (objectif principal : désherber, décompacter..) ? O

4.6 - Observez des différences sur l'état sanitaire des plants, ainsi que sur la qualité physique et/ou la macrofaune du sol, depuis que vous utilisez certaines pratiques de travail du sol ? O

4.7 - Avez-vous déjà entendu parlé de scarification des sols ?

Oui

Non

4.8 - Si oui, que pensez-vous de l'utilisation de cette pratique ? O

4.9 - Vous arrive-t-il d'apporter de la matière organique dans vos vergers de kiwi ?

Oui

Non

4.10 - Quel type de matière organique apportez-vous dans vos vergers, si possible précisez la forme (fumier, compost...) et l'origine (bovins, caprins, maraichage...) ? O

4.11 - Quelle dose de matière organique apportez-vous sur vos vergers de kiwi (t/an/ha) ?

4.12 - Quel est l'objectif principal de cet apport ?

Écouler le stock d'effluents d'élevage

Fertiliser vos cultures

Améliorer la structure de vos sols

Autres

4.13 - Que pensez-vous de l'effet de l'apport de matière organique sur la compaction des sols en vergers de kiwi ?

5. Sujet de recherche

5.1 - Pour vous, quelles seraient les causes de la compaction des sols en vergers de kiwi ?

5.2 - Avez-vous déjà envisagé ou testé des solutions pour tenter la décompaction des sols en vergers de kiwi ?

5.3 - Que pensez-vous de l'effet de la scarification et de l'apport de matière organique sur la qualité physique et biologique des sols en vergers de kiwi ? Quels sont vos avis et intérêts sur la question ?

6. Informations complémentaire

6.1 - Nom, Prénom.

6.2 - Quel est votre numéro d'adhérent B.I.K. ?

6.3 - Si vous n'êtes pas directement adhérent au BIK, à quelle structure apportez-vous vos kiwis ?

Je souhaite approfondir les réponses par téléphone lors d'un rendez-vous de 30 min environ.

6.4 - Avez-vous des commentaires généraux ? Une dernière idée ?

Merci d'avoir pris le temps de répondre à toutes nos questions. Nous reviendrons vers vous prochainement. Si vous souhaitez plus d'informations ou échanger davantage par rapport à la compaction des sols en verger de kiwi, vous pouvez me contacter à l'adresse suivante : quentin.girard@kiwidefrance.fr

Ces données ne seront pas utilisées à d'autres fins que pour cette étude