

Etude de l'influence d'un changement d'itinéraire technique sur la fertilité d'un sol de verger d'agrumes



Camille Grigis, Etudiante en année de césure Montpellier SupAgro

Du 11 mars au 7 aout 2015

Résumé

Les sols de Nouvelle Calédonie sont naturellement peu fertiles. L'agriculture, pratiquée de manière conventionnelle, ne fait qu'accentuer le phénomène de dégradation de leur qualité. Dans ce contexte, il s'agit d'adopter des pratiques culturales plus respectueuses de l'environnement en utilisant moins d'intrants de synthèse afin d'optimiser les services rendus par l'agrosystème (plante de couverture fixatrice d'azote, brise-vent, apport de MO...). Cette étude consiste à mesurer, grâce à des indicateurs physiques, chimiques et biologiques, la fertilité globale d'un sol géré de manière conventionnelle ou raisonnée dans le cadre de l'exploitation d'un verger d'agrumes.

Des analyses ont été réalisées sur le terrain (humidité, infiltrométrie, vers de terre, densité apparente, potentiel hydrique, stabilité structurale) et d'autres en laboratoire (mesures des propriétés physico-chimiques et microbiologiques). La comparaison des deux itinéraires techniques montre une augmentation de l'activité biologique, dont la minéralisation de l'azote et le nombre de vers de terre, en faveur de la modalité raisonnée. Les facteurs les plus explicatifs sont le pH (amélioration des conditions du milieu), la MO libre (augmentation de la ressource énergétique) et la porosité (meilleure oxygénation du sol).

Ainsi l'ensemble des pratiques culturales développées, à savoir le broyage et l'enfouissement du précédent cultural, l'apport d'un engrais vert, la réalisation d'un amendement du sol, d'un sous-solage, d'un billonnage, d'un paillage et la mise en place d'une plante de couverture, sont recommandées pour l'exploitation durable du verger d'agrumes.

Mots clés : fertilité physique, chimique et biologique, itinéraire technique, agriculture conventionnelle et raisonnée, indicateurs, intrants, agrumes.

Resume

The New Caledonian soils are naturally poor. Intensive farming worsen this phenomenon. In this context, a sustainable agriculture has to be set up in order to use less synthetic input and optimize ecosystem services (leguminous cover crop, shelter belt). This study aims to measure the global fertility of a soil in intensive and responsible farming in citrus orchard. Different indicators are used to describe physical, chemical and biological properties of the soil.

The analysis was done in the field (humidity, infiltrometer and earthworms, soil density, water potential and structural stability) and in laboratory (measurement of physical, chemical and microbiological properties). Comparison of the two agricultural systems shows an increase of the biological activity, with stronger nitrogen mineralization and more earthworms in responsible orchard. The explanatory factors are pH (improvement of environmental conditions), the free organic matter (greater available energy source) and porosity (soil available oxygen). Therefore, the whole agricultural practices developed as grinding and ploughing the previous crop, input of green manure, realization of amendment, subsoiling, mounding, mulching and seedling of cover crop, are recommended for sustainable cultivation of citrus orchard.

Keywords: physical, chemical and biological fertility, agricultural practices, intensive and responsible farming, indicators, inputs, citrus

Remerciements

Je tiens à remercier Laurent L'huillier, directeur de l'IAC, qui m'a accueillie au sein de son institut.

Je remercie également Cédric Le Guillou et Zacharie Lemerre Desprez, mes maîtres de stage, pour leur disponibilité à mon égard, leur encadrement et leur aide tout au long de mon stage.

Je remercie également Stéphane Lebegin pour ses conseils.

Merci aussi à Sylvie Cazères, Carole Martin pour la formation qu'elles m'ont apportée lors des analyses de nématodes et mycorhizes.

Enfin, j'adresse un merci à Laureen Mazurier, Bertha Nare, Thierry Nugues, Solange Nemebreux et les autres employés de la station pour leur accueil et leur aide précieuse.

Liste des abréviations

ACP : Analyses en Composantes Principales

C : conventionnel

CI : conventionnel inter-rang

CR : conventionnel rang

Carb : carbone

C/N : rapport des concentrations en carbone sur celles d'azote

Ca : calcium

CaO : oxyde de calcium ou calcaire actif

CEC : Capacité d'Echange Cationique

FD : Flying Dragon

IAC : Institut Agronomique néo-Calédonien

K : potassium

Mg : magnésium

MO : Matière Organique

MWD : Mean Weight Diameter, diamètre moyen pondéré

N : azote

Na : sodium

P : phosphore

PC : physico-chimique

pF : unité logarithmique d'une valeur de pression de rétention d'eau (analogie au pH).

pH : potentiel hydrogène

R : raisonné

RR : raisonné rang

RI : raisonné inter-rang

RU : Réserve Utile

TDR : Time Domain Reflectometry

Liste des figures

Figure 1: frise chronologique de l'historique des pratiques culturales de la parcelle Tazard Jeune et des analyses physico-chimiques effectuées.....	15
Figure 2: protocole de mesure de la stabilité structurale (Bielder et al, 2012)	19
Figure 3: ACP de variables physiques, chimiques et biologiques.....	25
Figure 4: triangle des textures.....	25
Figure 5: densité apparente et pénétrométrie entre 0-10 et 10-20 cm de profondeur sur les modalités CR, RR, CI et RI. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.....	27
Figure 6: humidité volumique, stabilité structurale et vitesse d'infiltration sur les modalités CR, RR, CI et RI. Les bâtons indiquent les écart-types. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités	29
Figure 7: réserve utile pour les modalités CR, RR, CI et RI.	30
Figure 8 : courbes de rétention d'eau pour les modalités CR, RR, CI et RI.....	30
Figure 9: pourcentage de MO totale, libre et liée, et quantité d'azote totale des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.	33
Figure 10: pourcentage d'ions calcium dans la CEC, pH eau, quantité d'oxyde de calcium et CEC en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.	34
Figure 11: quantité de phosphore, potassium, biomasse microbienne en % de carbone et carbone minéralisé en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.....	35
Figure 12: quantité d'azote minéralisé total, fourniture en azote annuelle et abondance en nématodes totaux en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.....	37
Figure 13: abondance en vers de terre pour les modalités CR, RR, CI et RI.....	37
Figure 14: guide de détermination du taux d'endomycorhization selon la méthode de Trouvelot et al., 1984.....	62
Figure 15: méthode d'extraction des spores du sol (Martin, 2013).....	63
Figure 16: taux de mycorhization des racines et nombre de spores /g de sol sec pour les modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités	64

Liste des tableaux

Tableau 1: dose de fertilisation en azote, phosphore, potassium et calcium et des apports de glysphosate sur verger conventionnel et raisonné	17
Tableau 2: historique des analyses PC sur verger conventionnel et raisonné	17
Tableau 3: matrice de corrélation	39

Liste des photographies

Photographie 1: prélèvement de sol et de racines sur un oranger du verger raisonné	13
Photographie 2: pénétromètre Eijkelkamp (www.metagrhyd.com)	17
Photographie 3: infiltromètre Décagon, (www.metagrhyd.com)	19
Photographie 4: observation d'un nématode à la loupe binoculaire X6.2	21
Photographie 5: observation d'un nématode au microscope X400.....	21
Photographie 6: passage au tamis de 38µm d'un échantillon de sol pour extraire les nématodes	21
Photographie 7: vers de terre récupérés à partir de 50litres de sol dans le verger raisonné	23
Photographie 8: prélèvement à la pelle mécanique d'un godet (50 L) de sol pour le dénombrement des vers de terre.....	23
Photographie 9: prélèvement de racines pour déterminer le taux de mycorhization et mise en évidence de la présence de mycorhizes (grossissement X400).	23
Photographie 10: observation au microscope (X400) d'endomycorhizes (filaments bleus).	62
Photographie 11: Oservation des spores (entourés en rouge) à la loupe binoculaire (X6.2).	64

Sommaire

1.	Introduction.....	14
2.	Matériel et Méthodes.....	16
2.1	Le dispositif expérimental	16
2.1.1	La situation géographique.....	16
2.1.2	Le type de sol	16
2.1.3	La parcelle actuelle et son historique de conduite.....	16
2.1.3	Le dispositif expérimental	16
2.2	Les analyses	18
2.2.1	Les propriétés physiques.....	18
2.2.2	Les propriétés chimiques	22
2.2.3	Les propriétés biologiques	22
2.3	L'analyse statistique	24
3.	Résultats	26
3.1	Analyse globale des variables mesurées	26
3.2	Les propriétés physiques.....	26
3.2.1	La granulométrie	26
3.2.2	La densité apparente.....	26
3.2.3	La pénétrométrie.....	26
3.2.4	L'humidité volumique au champ (TDR)	28
3.2.5	La stabilité structurale sur sol sec	28
3.2.6	La conductivité hydrique (infiltrométrie)	28
3.2.7	Le potentiel hydrique	28
3.3	Les propriétés chimiques	32
3.3.1	Les matières organiques	32
3.3.2	Le statut acido-basique	32
3.3.3	Les éléments majeurs.....	32
3.4	Les propriétés biologiques	36
3.4.1	Les microorganismes.....	36
3.4.2	Les nématodes	36
3.4.3	Les vers de terre	36
3.4.4	Les relations entre variables	38
4.	Discussion	41
4.1	Comparaison du verger « conventionnel » et « raisonné »	41
4.1.1	Les propriétés physiques.....	41
4.1.2	Les propriétés chimiques	43
4.1.3	Les propriétés biologiques	45
5.	Conclusion et Perspectives	49
6.	Bibliographie.....	51
7.	Annexes	57



Photographie 1: prélèvement de sol et de racines sur un oranger du verger raisonné

1. Introduction

La pauvreté chimique des sols dans les pays tropicaux est un problème majeur pour les agriculteurs. La raison est d'abord naturelle. Le climat caractérisé par des températures élevées et une forte pluviométrie, accentue l'érosion et le lessivage naturel des nutriments (Fox *et al*, 2008). L'agriculture pratiquée de manière conventionnelle (selon les principes de la révolution verte) accentue encore ce phénomène (Chitrit et Gautronneau 2011). Or ces sols servent à la fois de support et de réserve en eau et nutriments pour les plantes cultivées. La Nouvelle Calédonie, malgré une grande variété de substrats, ne fait pas exception à la règle et cela se traduit directement par une perte de fertilité et à terme par des pertes économiques (Moreau 1983).

L'utilisation en grande quantité d'engrais minéraux et de pesticides fragilise l'agrosystème en détruisant la vie du sol. Cet effet, conjugué à l'exportation des récoltes et résidus de cultures sans restitution de matière organique, finit par rendre le sol incapable de nourrir une culture. Il s'agit donc d'adopter de nouvelles pratiques culturales afin de conserver, voire d'améliorer, la fertilité du sol, sans impact négatif sur l'environnement et en continuant de produire en quantité suffisante des denrées alimentaires.

Le but de cette étude est de mesurer l'effet sur le sol du passage d'un itinéraire technique, dit conventionnel, avec application d'engrais minéraux et d'herbicide, à un itinéraire, dit raisonné, avec apport d'engrais vert, mise en place d'une légumineuse en couverture végétale et plantation des arbres sur billon. Le système de culture choisi est un verger d'agrumes ; ce type de culture est bien adapté au climat de Nouvelle Calédonie et représente une part importante de la production agricole (30% de la production de fruits et légumes en 2013 (ISEE)).

Afin de caractériser au mieux la fertilité d'un sol, il faut décrire les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Le sol étant un écosystème complexe composé de plusieurs compartiments en interaction, il est indispensable d'en comprendre le fonctionnement en distinguant ces trois types de propriétés (Berner *et al*, 2013).

La fertilité physique est définie par la structure du sol qui correspond à l'organisation des agrégats. Elle est évaluée selon plusieurs critères comme la porosité où aura lieu les échanges gazeux avec l'atmosphère et la circulation de l'eau, la texture qui est déterminée par la proportion en argiles, limons et sables et la stabilité structurale qui correspond à la résistance à la déstructuration par l'eau et donc la résistance à l'érosion.

La fertilité chimique se traduit non seulement par la présence dans la solution du sol des éléments nutritifs pour la plante (azote, phosphore, potassium...) mais aussi de la disponibilité de ces éléments sous l'influence du pH et du complexe argilo-humique.

Enfin la fertilité biologique est dépendante de la présence et de l'activité des organismes vivant dans le sol. Ceux-ci participent aux cycles biogéochimiques grâce, principalement, à la minéralisation de l'azote et la décomposition de la matière organique (Védie 2003).

De nombreuses variables seront donc mesurées dans cette étude et leurs relations entre elles seront testées afin d'avoir une vision d'ensemble de la fertilité du sol.

Dans ce rapport, nous présenterons les résultats de l'étude comparant deux systèmes de culture en verger, conduite à la Station de Recherche Agronomique de Pocquereux. Ce travail permettra d'évaluer les différents niveaux de fertilité et la capacité d'un sol à évoluer et d'identifier les indicateurs les plus sensibles à utiliser pour mesurer un changement de fertilité sur du moyen terme.

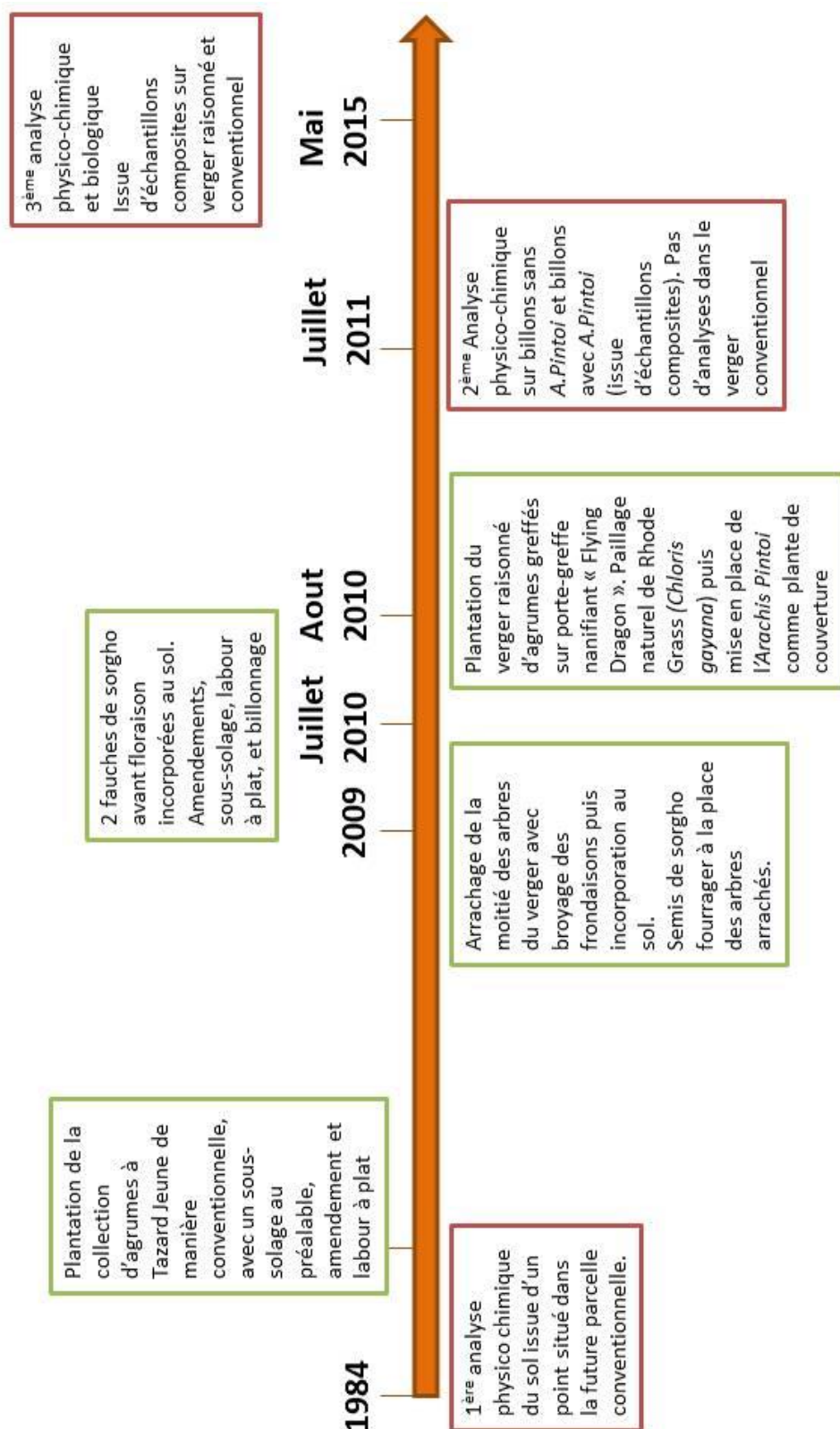


Figure 1: frise chronologique de l'historique des pratiques culturales de la parcelle Tazard Jeune et des analyses physico-chimiques effectuées

2. Matériel et Méthodes

2.1 Le dispositif expérimental

2.1.1 La situation géographique

Le site d'étude est une parcelle nommée «Tazard Jeune » localisée à la SRA Pocquereux (commune de La Foa, 21°43 '46' S; 165°53'53' E ; 20 m altitude). La station est située sur la côte Ouest, dans la vallée de la rivière Pocquereux, à proximité de la Chaîne Centrale (annexe 1). Le climat néo calédonien est tropical, la température moyenne annuelle est de 22,9°C et la pluviométrie moyenne annuelle est de 1244 mm (annexe 2).

2.1.2 Le type de sol

Le sol est de type colluvial/alluvial, limono-argilo-sableux (Deligne, 2011). La parcelle n'est pas homogène. On distingue trois zones selon leur qualité agronomique. Une zone de bonne qualité agronomique, où sont plantés les jeunes agrumes sur porte-greffe nanifiant Flying Dragon, se caractérise par une zone d'accumulation d'alluvions et de colluvions. Une seconde, zone de qualité agronomique moyenne, comprend le verger d'avocatiers et la moitié de la collection d'agrumes. Dans cette zone, les sols sont évolués et la proportion d'éléments fins est plus élevée que dans la zone précédente. Enfin, une troisième zone de qualité agronomique médiocre se situe en partie sur le verger conventionnel (composé de la collection d'agrumes et de porte-greffes de 23 ans) et en partie sur le verger raisonné (composé d'agrumes sur porte-greffe Flying Dragon). Cette zone est hydromorphe. Il a fallu creuser les inter-rangs pour permettre à l'eau de mieux s'écouler. La zone accumule fortement des éléments fins rendant le sol lourd. Ces zones vont déterminer l'échantillonnage qui va être réalisé sur la zone de qualité agronomique moyenne, homogène aux deux vergers.

2.1.3 La parcelle actuelle et son historique de conduite

Aujourd'hui, la parcelle d'étude est divisée en trois vergers, un verger de 0,97 hectare occupé par une ancienne collection d'agrumes (variétés et porte-greffes) conduite de manière conventionnelle, un verger de 0,64 hectare occupé par un verger plus récent d'agrumes conduit de manière raisonnée et un dernier verger de 0,61 hectare occupé par une collection d'avocatiers (que nous n'étudierons pas). Initialement, l'intégralité de la parcelle était occupée par la collection d'agrumes, les arbres étaient plantés à plat à une densité de plantation de 285 pieds/ha. Régulièrement les rangs étaient désherbés avec du glyphosate et fertilisés en fonction des carences du sol et des besoins des plantes (tableau 1). En 2009, la moitié du verger fut arrachée pour replanter le verger d'avocatier et celui d'agrumes sur porte-greffe nanifiant. Les frondaisons des arbres ont été broyées (correspondant à 2800 kg de matières sèches de feuilles et 4800 kg de bois) et incorporées au sol à l'aide d'un pulvérisateur à disques. Du sorgho fourrager a été planté comme engrais vert. Deux fauches ont été effectuées et enfouies dans le sol pour apporter de la matière organique fraîche. Un amendement de phosphore, potassium et calcium a été réalisé et suivi d'un sous-solage à 60 cm de profondeur en conditions sèches. Le sol a ensuite été labouré puis billonné avec une charrue à socs. Enfin, les jeunes agrumes ont été plantés sur les billons qui ont été préalablement paillés avec la graminée Rhode Grass (*Chloris gayana*). Une légumineuse (*Arachis pintoï*), utilisée comme plante de couverture, a été plantée (boutures) sur les billons conséquemment à la plantation des arbres (figure 1). Au cours du temps, plusieurs analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées (tableau 2).

2.1.3 Le dispositif expérimental

Afin de comparer les deux itinéraires techniques, nous avons choisi une zone *a priori* homogène aux

Tableau 1: dose de fertilisation en azote, phosphore, potassium et calcium et des apports de glyphosate sur verger conventionnel et raisonné

Intrants	Total cumulé en kg N/ha 2008 à 2015	Total cumulé en kg P ₂ O ₅ /ha 2008 à 2015	Total cumulé en kg K ₂ O/ha 2008 à 2015	Total cumulé en kg CaO/ha 2008 à 2015	Total cumulé en Litres glyphosate/ha 2008 à 2015
Conventionnel	1029	274	1248	807	84
Raisonné	238	416	278	3052	0

Tableau 2: historique des analyses PC sur verger conventionnel et raisonné

	Analyses 1984 verger conventionnel	Analyses 2015 verger conventionnel
pH eau	5,4	5
CEC	14,6	13,8
C (g/kg)	10,2	17,3
MO (%)	1,76	2,97
N (g/kg)	1,01	1,5
C/N	10,1	11,5
	Analyses 2011 verger raisonné	Analyses 2015 verger raisonné
pH eau	4,7	6,8
CEC	16,9	13,8
C (g/kg)	17	18,3
MO (%)	3	3,17
N (g/kg)	1,1	1,7
C/N	15,9	10,8

Photographie 2: pénétromètre Eijkelkamp (www.metagrhyd.com)

deux vergers. Quatre répétitions ont été réalisées sur les rangs pour les mesures chimiques et biologiques. Huit répétitions ont été réalisées pour les mesures physiques (DA, pénétrométrie, humidité au champ, potentiel hydrique, conductivité hydrique, stabilité structurale et les vers de terre) décomposées en quatre répétitions sur les rangs et quatre répétitions sur les inter-rangs (annexe 3).

2.2 Les analyses

2.2.1 Les propriétés physiques

La granulométrie

La granulométrie est la mesure de la taille des particules minérales constituant le sol. Elle permet de déterminer sa texture (Verger, Encyclopédia Universalis). Cette mesure est faite en même temps que les mesures chimiques et microbiologiques par le laboratoire d'analyse de sol Celesta Lab, selon la méthode à la pipette (AFNOR X 31-107). L'analyse a été réalisée sur les quatre échantillons des rangs (quatre répétitions par système).

La densité apparente

La densité apparente du sol correspond à la masse de sol sec par unité de volume. Elle varie de 1,0 à 1,6 g/cm³ pour les sols minéraux et de 0,16 à 0,45 g/cm³ pour les sols organiques. Cette mesure permet d'évaluer la compaction du sol. La méthode de mesure consiste à utiliser des cylindres métalliques de volume donné. Ces cylindres sont enfoncés à diverses profondeurs du sol et sont retirés en minimisant le remaniement des sols. Les échantillons sont ensuite séchés dans une étuve pendant 24 heures à 105°C pour déterminer leur masse sèche. Connaissant le volume de sol recueilli (cm³) et sa masse sèche (g), il est donc possible de calculer la densité apparente du sol échantillonné (g/cm³). La mesure de la densité apparente du sol permet de confirmer un diagnostic de compaction (Carter, 1989). Sur des vergers où l'enracinement est profond, il faut effectuer les prélèvements à quatre profondeurs, 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm et 15-20 cm à l'aide des cylindres d'un volume de 250 mL (Deligne, 2011). Les prélèvements effectués entre 0 et 10 cm de profondeur sont par la suite mélangés et utilisés pour mesurer le potentiel hydrique du sol avec l'analyseur WP4C®.

La pénétrométrie

L'appareil utilisé est un pénétromètre manuel de la marque Eijkelkamp (photographie 2). Lors de la mesure, l'appareil est poussé manuellement dans le sol à une vitesse constante (2 cm/s). La force verticale est transmise à la pointe par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure hydraulique (manomètre) qui est lu à une profondeur donnée (ici à 5, 10, 15 et 20 cm) en condition de sol ressuyé. Cet effort rapporté à la section maximale de la pointe, est lu comme une pression en Newton, c'est la résistance à la pénétration (Billot, 1982). La surface du cône choisi pour effectuer la mesure servira au calcul de la résistance en N/cm² (guide d'utilisation « hand penetrometer EIJKELKAMP »). Cette mesure permet également d'évaluer la compaction du sol.

L'humidité volumique au champ

Elle est mesurée directement sur le terrain grâce à l'humidimètre TDR 300 FieldScout® qui donne une valeur d'humidité volumique sur le principe de la réflectométrie temporelle. L'humidité est mesurée à 7 cm de profondeur.

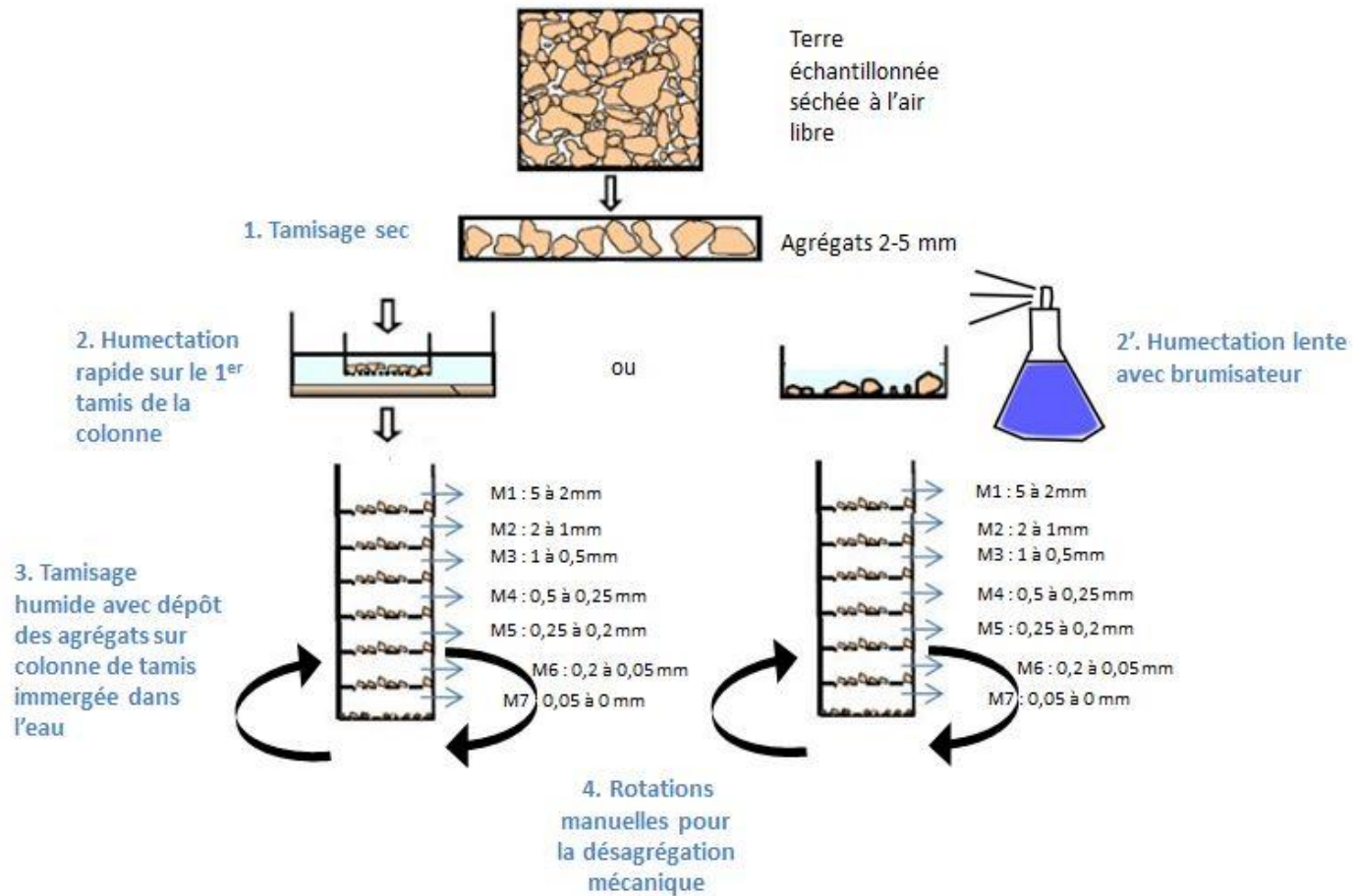


Figure 2: protocole de mesure de la stabilité structurale (Bielder et al, 2012)



Photographie 3: infiltromètre Décagon, (www.metagrhyd.com)

La stabilité structurale du sol

La stabilité structurale, aussi appelée stabilité des agrégats, est un indicateur de la cohésion des agrégats d'un sol. C'est un paramètre qui exprime la capacité des agrégats d'un sol à résister à une dégradation due à l'impact de la pluie ou un excès d'eau (Combeau et Monnier, 1960). On la mesure en soumettant un échantillon de sol tamisé à plusieurs traitements mimant différents effets d'une pluie.

Traitement 1 : humectation rapide mimant l'action d'une forte précipitation sur un sol sec inspiré de la méthode Le Bissonnais (1995).

Après un séchage à température ambiante et tamisage à 5 mm du sol prélevé en surface, 25 g de sol ont été pesés et versés sur une colonne de tamis de différentes mailles (2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,25 mm ; 0,2 mm et 0,05 mm) qui doivent être immergés dans l'eau. La colonne va subir 15 rotations à la main d'une amplitude de 5 cm. Le sol contenu sur chaque tamis est ensuite récupéré, séché à l'étuve (105°C pendant 24 h) et pesé pour connaître le poids de chaque fraction de sol et calculer le diamètre moyen pondéré (MWD) ainsi calculé :

$$MWD = \frac{3,5 \times M1 + 1,5 \times M2 + 0,75 \times M3 + 0,375 \times M4 + 0,125 \times M5}{M_{tot}} [mm]$$

Ces coefficients correspondent à la moyenne des mailles de deux tamis successifs (ex : 5 mm et 2 mm donc la moyenne est 3,5 mm). M1, M2, M3, M4 et M5 correspondent aux masses sèches des agrégats retenus sur les tamis et M_{tot} la masse totale des agrégats (figure 2).

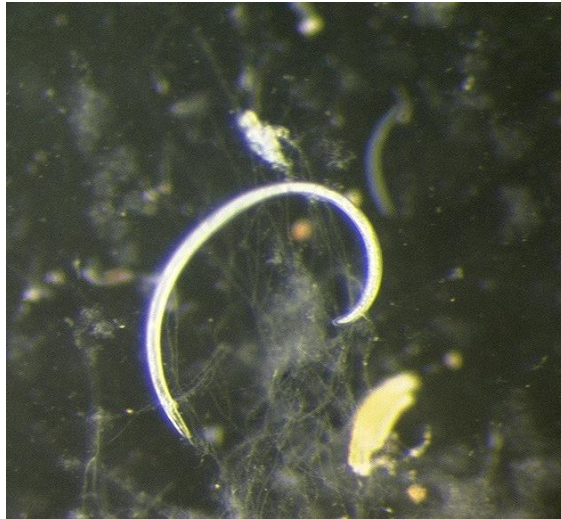
Traitement 2 : humectation lente et désagrégation mécanique mimant l'action d'une forte précipitation sur un sol ressuyé. Le protocole est le même que pour le traitement 1, mais le sol est réhumecté à l'aide d'un brumisateur avant d'être placé sur la colonne de tamis.

La conductivité hydraulique du sol (infiltrométrie)

Cette grandeur exprime l'aptitude d'un milieu poreux à laisser passer un fluide (dans notre cas l'eau) sous l'effet d'un gradient de pression (Mermoud, 2006). La conductivité hydraulique dépend des propriétés du milieu poreux et de son degré de saturation. La texture, la structure et l'état hydrique du sol vont fortement influencer cette conductivité. On la mesure directement sur le terrain grâce à un infiltromètre multi disques (m³/s). L'appareil doit préalablement être rempli d'eau dans ses parties supérieure et inférieure avant d'être placé directement sur le sol (où l'on aura disposé une fine couche de sable tamisé à 1 µm) (annexe 4). Le niveau de succion est choisi à 2 cm (conseillé pour les sols moyens). L'eau va progressivement s'écouler dans le sol et il faudra noter le niveau d'eau à intervalle de temps régulier (30 secondes)(Infiltrometer Decagon Manual).

Le potentiel hydrique

C'est l'état énergétique de l'eau dans le sol, ce qui correspond à l'énergie à fournir pour extraire l'eau du sol. On l'exprime en pression (MPa) ou en pF (valeur logarithmique de la pression exprimée en cm d'eau). Cette grandeur dépend de la quantité d'eau dans le sol, de sa texture (les argiles vont mieux retenir l'eau que les sables), de sa teneur en MO et de sa structure. Le potentiel hydrique est mesuré grâce à l'appareil WP4C®. Il utilise la technique de la détermination du point de rosée par miroir refroidi pour mesurer le potentiel de l'eau dans un échantillon de sol (Deligne, 2011).



Photographie 4: observation d'un nématode à la loupe binoculaire X6.2



Photographie 5: observation d'un nématode au microscope X400



Photographie 6: passage au tamis de 38µm d'un échantillon de sol pour extraire les nématodes

L'analyseur WP4C® affiche directement la mesure en MPa et en pF. Le sol est tamisé à 2 mm puis séché à 105 °C pendant 24 h. Il est ensuite réhumecté à différentes humidités (0, 5, 10, 15, 20 %). Il est ensuite pesé puis placé dans des cupules adaptées à l'appareil afin de lire le pF. Il est enfin placé à l'étuve pendant 24 h à 105 °C pour connaître l'humidité exacte des échantillons. On considère que pF 4,2 correspond au point de flétrissement permanent de la plante, et pF 2,5, au confort hydrique. La réserve utile d'un sol est donc l'eau contenue dans le sol entre ces deux états hydriques. Dans le cadre de cette étude, l'appareil de mesure n'étant pas précis en-deçà de pF 2,8, nous avons calculé la réserve utile en pourcentage entre pF 2,8 et pF 4,2.

2.2.2 Les propriétés chimiques

Toutes les analyses chimiques ont été réalisées par le laboratoire d'analyse de sol Celesta Lab.

Les matières organiques

Le carbone organique est déterminé selon la méthode par oxydation sulfochromique puis converti en pourcentage de matière organique par l'équation : $MO = \text{carbone organique} \times 1,72$. Les autres fractions de la MO (libre et liée) sont dosées de la même manière après les avoir isolées par fractionnement physique granulométrique (NF X 31-516).

Le statut acido-basique

Le pH eau est déterminé en plongeant une électrode dans une solution de sol dilué à 1:5 dans de l'eau. Le calcium actif (CaO) est déterminé selon la méthode de Drouineau et la CEC par la méthode de Metson. Le taux d'occupation de la CEC par les cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et Na^+ est déterminé après extraction par l'acétate d'ammonium avec agitation.

Les éléments majeurs

Le phosphore est quantifié par la méthode de Joret et Hébert. L'azote total est dosé selon la méthode de combustion sèche (NF ISO 13878).

2.2.3 Les propriétés biologiques

Les microorganismes

La biomasse microbienne totale est évaluée à partir de la quantité de carbone microbien présent dans le sol qui est dosé par la méthode de fumigation-extraction (FD ISO 14240-2). Cette méthode consiste à traiter l'échantillon de terre avec des vapeurs de chloroforme qui solubilisent la quasi-totalité des microorganismes. La différence de carbone organique soluble entre un échantillon fumigé et un témoin non fumigé est la quantité de carbone extractible d'origine microbienne (Guilbault, 2006). Les activités minéralisatrices de C et N sont mesurées selon la méthode interne de l'INRA de Dijon. Les échantillons subissent une incubation contrôlée à un optimum de température (28 °C) et d'humidité pendant 28 jours. Pour l'azote, le $N-NH_4^+$ et $N-NO_3^-$ sont dosés aux jours 0 et 28 par colorimétrie en flux continu. Pour le carbone, le $C-CO_2$ est dosé par titration après piégeage du $C-CO_2$ dans de la soude au jour 28.

Les nématodes

Les nématodes sont des vers ronds, de taille microscopique (1 mm de longueur). Ils vivent dans le sol et sont libres ou phytoparasitaires. Ces vers sont de bons indicateurs car on les retrouve dans tous les types de milieux. Ils sont abondants, d'une grande diversité fonctionnelle et sont sensibles aux perturbations environnementales (Garcia-Ruiz et al, 2009).



Photographie 7: vers de terre récupérés à partir de 50 litres de sol dans le verger raisonné



Photographie 8: prélèvement à la pelle mécanique d'un godet (50 L) de sol pour le dénombrement des vers de terre



Photographie 9: prélèvement de racines pour déterminer le taux de mycorhization et mise en évidence de la présence de mycorhizes (grossissement X400).

On les distingue selon leur comportement alimentaire entre phytophages et décomposeurs (Villenave, 2012). La méthode de mesure se fait au laboratoire, le sol est tamisé à 2 mm et les nématodes sont extraits des échantillons de sol par un tamisage humide sur tamis de 0,5 mm puis 38 μm . Les nématodes restés sur le tamis subissent deux passages à la centrifugeuse (3600 T/min) dans une solution sucrée à 50 % afin de les séparer des particules de sol plus lourdes (les nématodes flottent dans la solution sucrée). Les nématodes sont conservés dans de l'eau et dénombrés sous loupe binoculaire. Leur identification à partir des critères morphologiques ne peut pas être faite car nous n'avons pas encore l'expertise requise.

Les vers de terre

Les vers de terre sont révélateurs des états et des usages du sol. Ils sont intimement liés aux constituants du sol et ils réagissent ainsi aux modifications que subit leur environnement. Ils agissent dans les processus de décomposition des matières organiques, de structuration et de fonctionnement hydrique des sols. Les vers de terre sont classés en trois groupes selon leurs caractéristiques écologiques, morphologiques et physiologiques : les épigés, les anéciques, et les endogés. Ainsi ces trois groupes ont des rôles différents dans le fonctionnement du sol (Beduneau, 2014). Il est donc important de connaître leur abondance et leur fonction dans le sol. La méthode de mesure choisie est le tri manuel qui consiste à prélever le sol à 30 cm de profondeur à l'aide d'une pelle mécanique. Le volume du godet de la pelle mécanique vaut 50 L, soit 0,05 m^3 de sol. La terre est déposée sur une bâche pour trier les vers de terre présents. Ils sont ensuite disposés dans des piluliers dans de l'eau, dénombrés, identifiés puis conservés dans l'alcool à 90 °. Le nombre de vers de terre est reporté en m^3 de sol et l'identification se fait au niveau fonctionnel en différenciant les épigés, les anéciques et les endogés (Cluzeau, 2011). A l'inverse des propriétés chimiques et biologiques, cette mesure est réalisée sur les rangs et inter-rangs car, les vers de terre étant des organismes très mobiles, il est intéressant d'observer leur présence à l'échelle de la parcelle entière.

Les mycorhizes

La méthode d'évaluation de la mycorhization a fait l'objet d'une mise au point dans le cadre de ce stage. Le protocole élaboré pour l'échantillonnage et le dénombrement des mycorhizes et spores est présenté en annexe 5.

2.3 L'analyse statistique

Afin de tester si une différence significative existe entre les modalités C et R pour les variables chimiques et biologiques mesurées sur les rangs, plusieurs tests ont été effectués avec le logiciel XLstat. Tout d'abord, un test de Shapiro pour connaître la distribution des données (H_0 : les données suivent une loi normale, avec p choisi à 0,05). Ce test permet de savoir s'il faut appliquer des tests paramétriques dans le cas où les échantillons suivent une loi normale, ou des tests non paramétriques dans le cas contraire. Lorsque les échantillons suivent une loi normale, un test de Fisher est réalisé pour tester l'homoscédasticité des variances. Si ces deux conditions sont validées, un test de Student permet de mesurer une différence significative entre deux échantillons pour une variable donnée. Dans le cas où les échantillons ne suivent pas de loi normale et/ou leurs variances ne sont pas homogènes, un test de Wilcoxon est utilisé (H_0 : les données appartiennent à la même population, avec $p=0,05$). Dans le cas des variables physiques (et des vers de terre) mesurées sur les rangs et les inter-rangs, une ANOVA est réalisée (en ayant testé au préalable la normalité des données et l'homoscédasticité). L'ANOVA suivie d'un test de Tukey permettent de tester si une différence significative existe entre les modalités C et R, entre les modalités « Rang » et « Inter-rang » et entre les interactions CR, CI, RR et RI. Il est également intéressant de tester si des variables sont reliées entre elles. Pour cela une ACP comprenant huit variables physiques, chimiques et biologiques et une matrice de corrélation entre toutes les variables par le modèle de Pearson ont été réalisées.

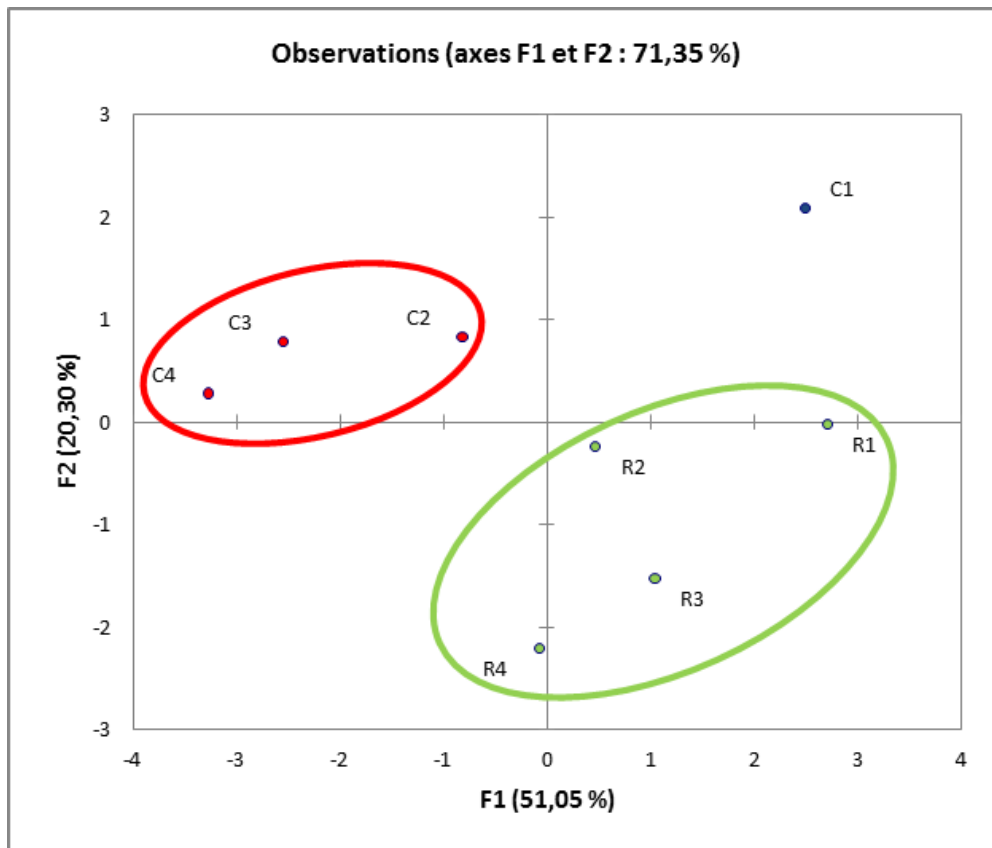


Figure 3: ACP de variables physiques, chimiques et biologiques

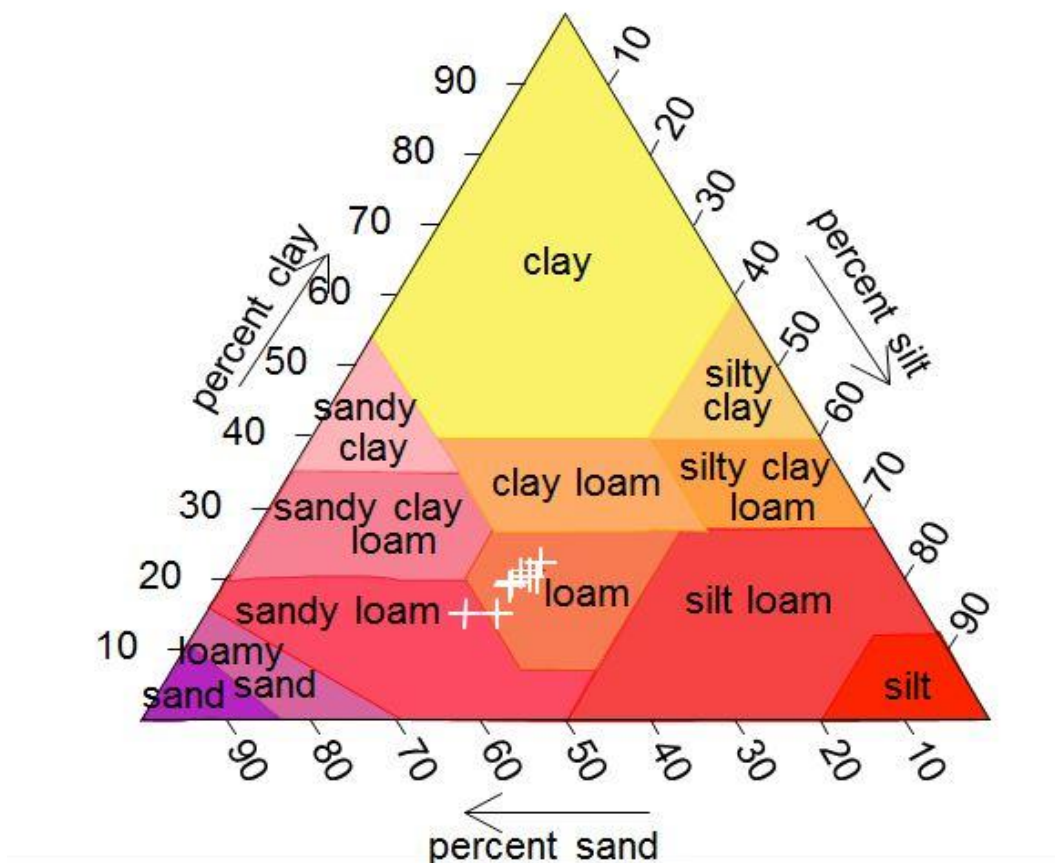


Figure 4: triangle des textures

3. Résultats

3.1 Analyse globale des variables mesurées

L'ACP, réalisée sur une sélection de huit variables physiques, chimiques et biologiques, représente 71,3 % de la variabilité sur les deux premiers axes. L'ACP montre qu'il y a deux groupes distincts d'individus (figure 3) : le groupe « conventionnel » représenté par une ellipse rouge composé des points C2, C3, C4 situés sur la partie négative de l'axe F1 et positive de l'axe F2, et le groupe « raisonné » représenté par une ellipse verte composé des points R1, R2, R3, R4 situés sur la partie positive de l'axe F1 et négative de l'axe F2. Le point C1 se distingue des deux groupes, il a été échantillonné dans la parcelle conventionnelle. Il ne sera pas pris en compte dans les tests de comparaison des modalités car il est un point considéré aberrant (d'après ses valeurs sur l'ensemble des variables mesurées).

3.2 Les propriétés physiques

Ces mesures ont été faites sur les rangs et les inter-rangs, ainsi les modalités C et R sont comparées de même que les modalités rangs et inter-rangs et leur interaction.

3.2.1 La granulométrie

Les proportions en argile, limon et sable sont équivalentes pour tous les échantillons. Il n'y a pas de différence significative entre les modalités C et R. Lorsque ces valeurs sont reportées sur un triangle des textures (figure 4), il apparaît que les échantillons (représentés sous forme de croix blanches) appartiennent à la même classe texturale « loam » de la classification américaine. On peut donc considérer que les vergers étudiés sont bien dans une zone homogène.

3.2.2 La densité apparente

Comparaison des modalités C et R

Entre 0-10 et 10-20 cm de profondeur, il n'y a pas de différence significative entre les échantillons appartenant aux modalités C et R (figure 5).

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Entre 0-10 et 10-20 cm de profondeur, en moyenne, il y a une différence significative entre les rangs et les inter-rangs. Les inter-rangs ont des densités apparentes plus élevées que les rangs (1,38 sur les inter-rangs contre 1,24 sur les rangs).

Interaction entre les modalités C, R, Rang, Inter-rang

Entre 0 et 10 cm de profondeur, les densités apparentes de CR et RR sont significativement plus faibles que celle du RI. Cependant le CI ne se distingue pas des autres modalités. Entre 10 et 20 cm de profondeur, on n'observe aucune différence significative entre ces 4 modalités.

3.2.3 La pénétrométrie

Comparaison des modalités C et R

Les mesures de pénétrométrie ont seulement été réalisées sur les rangs (figure 5). Entre 0-10 et 10-20 cm de profondeur, une différence significative existe entre les modalités C et R. Les rangs du verger raisonné sont plus meubles que ceux du verger conventionnel (150 N/m² contre 440 N/m² respectivement).

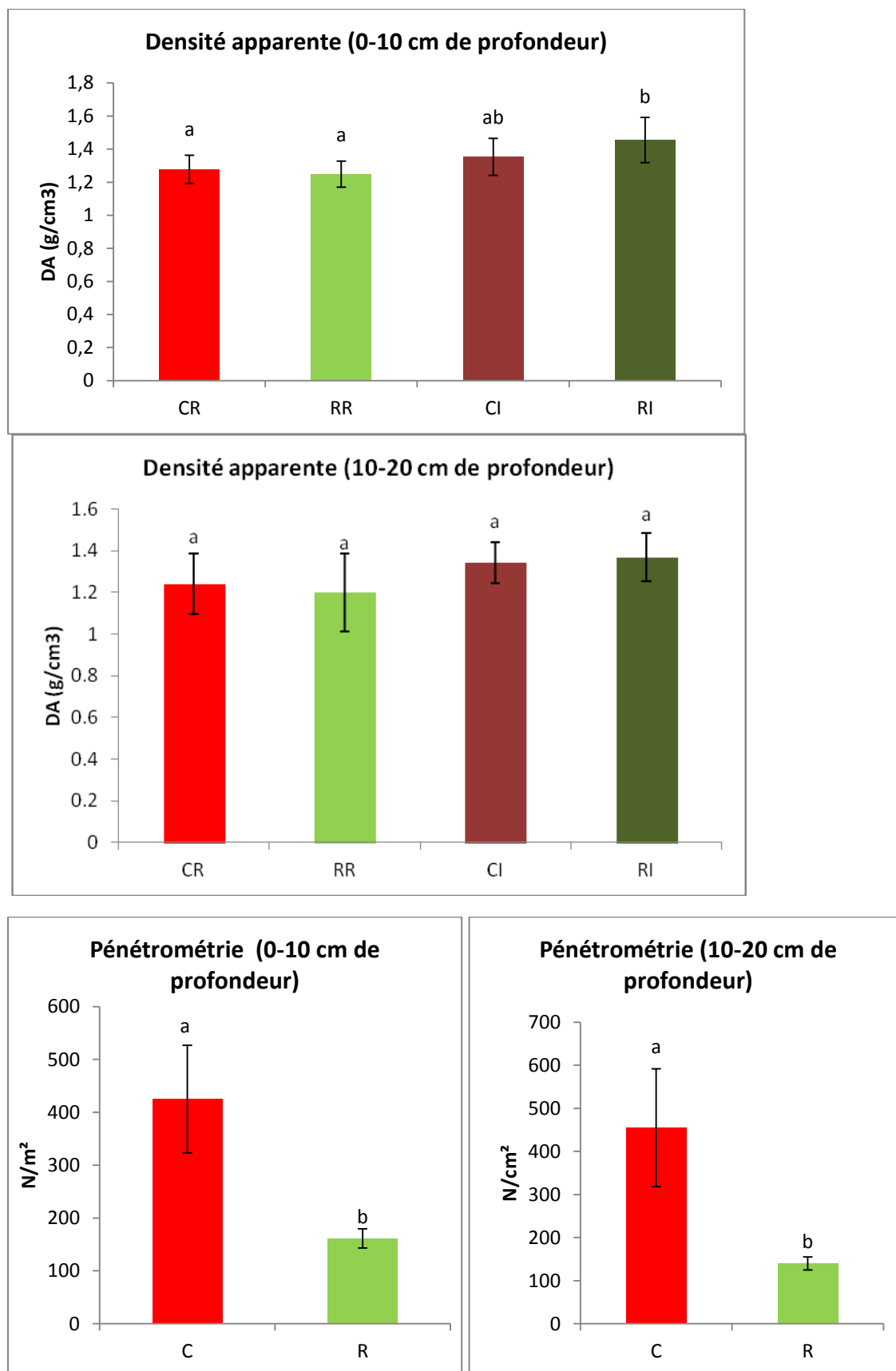


Figure 5: densité apparente et pénétrométrie entre 0-10 et 10-20 cm de profondeur sur les modalités CR, RR, CI et RI. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.

3.2.4 L'humidité volumique au champ (TDR)

Comparaison des modalités C et R

Une différence significative existe entre les modalités C et R (figure 6). Les échantillons de la parcelle conventionnelle sont plus humides que ceux de la parcelle raisonnée (35,8 % contre 31,8 % respectivement).

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Une différence significative existe entre les modalités « Rang » et « Inter-rang », les échantillons des inter-rangs sont plus humides que ceux des rangs (36,8 % contre 30,8 % respectivement).

Interaction pour les modalités CR, RR, CI et RI

Il y a une différence significative entre les RR et le CI (29 % contre 39 % d'humidité respectivement), les rangs du verger raisonné sont significativement plus secs que les inter-rangs du verger conventionnel. Les modalités RI et CR ne se distinguent pas du reste.

3.2.5 La stabilité structurale sur sol sec

Seuls les résultats du traitement 1 sont présentés (figure 6), les autres n'étant pas cohérents.

Comparaison des modalités C et R

Il n'y a pas de différence significative entre les modalités C et R.

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Il n'y a pas de différence significative entre les rangs et les inter-rangs, les échantillons ont donc une stabilité structurale similaire.

Interaction pour les modalités CR, RR, CI et RI

Le MWD du RR est significativement plus faible que le CR (1,99 mm contre 2,25 mm respectivement). En revanche, les modalités RI et CI ne se distinguent pas du CR.

3.2.6 La conductivité hydrique (infiltrométrie)

La vitesse d'infiltration d'eau dans le sol est très variable entre les échantillons et on observe de grands écart-types (figure 6).

Comparaison des modalités C et R

Il n'y a pas de différence significative entre modalités.

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Il n'y a pas de différence significative entre les rangs et les inter-rangs malgré des vitesses d'infiltration plus grandes dans les rangs.

Interaction pour les modalités CR, RR, CI et RI

Il n'y a pas de différence significative entre les quatre modalités.

3.2.7 Le potentiel hydrique

Les résultats sont comparés sur la base des réserves utiles (figure 7) calculées à partir des courbes de rétention en eau (figure 8).

Comparaison des modalités C et R

La réserve utile de la parcelle conventionnelle est significativement plus grande que la parcelle raisonnée (16 % contre 12 % d'eau entre 0 et 10 cm de profondeur respectivement).

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Il n'y a pas de différences significatives entre les rangs et les inter-rangs.

Interaction pour les modalités CR, RR, CI et RI

Il n'y a pas de différence significative entre les quatre modalités.

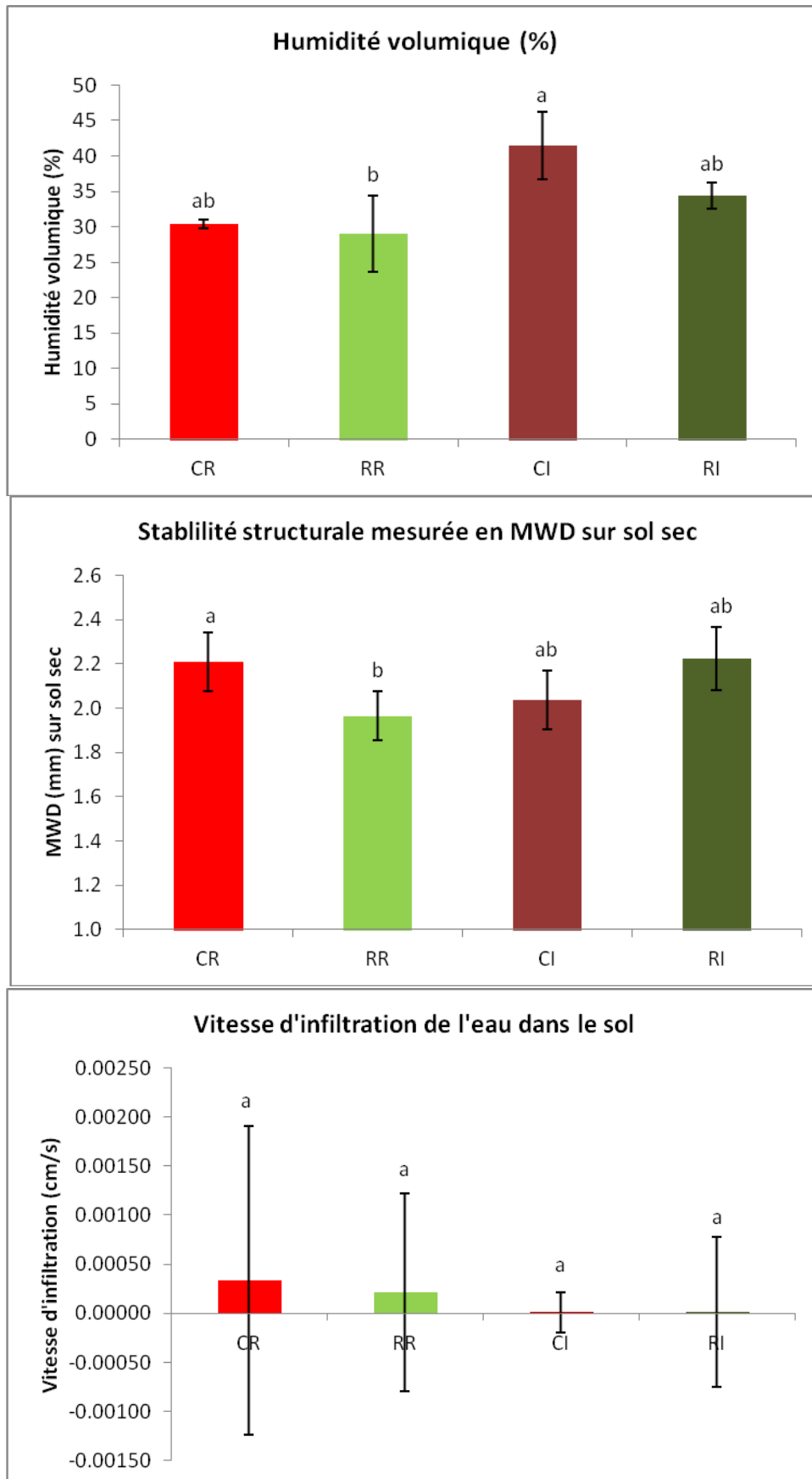


Figure 6: humidité volumique, stabilité structurale et vitesse d'infiltration sur les modalités CR, RR, CI et RI. Les bâtons indiquent les écart-types. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités

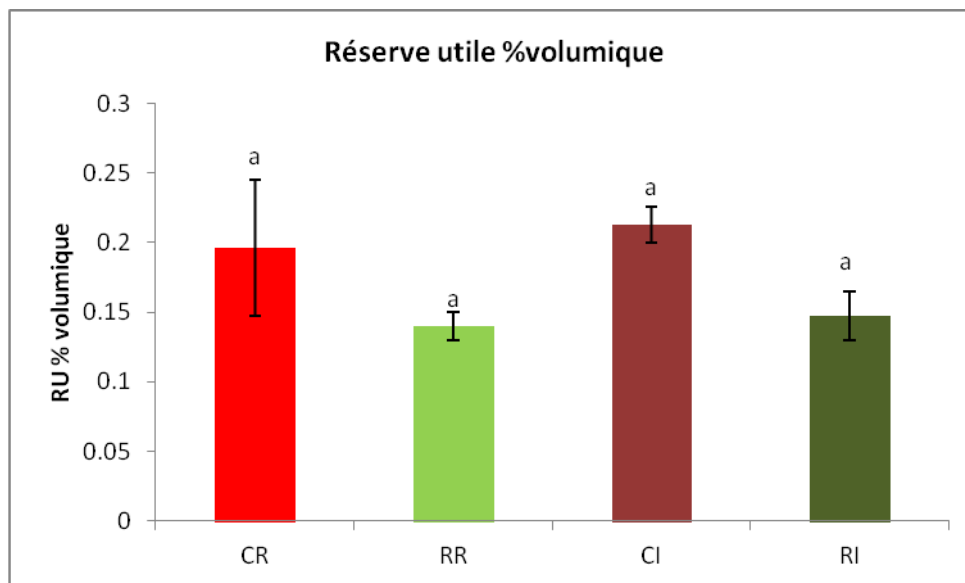


Figure 7: réserve utile pour les modalités CR, RR, CI et RI.

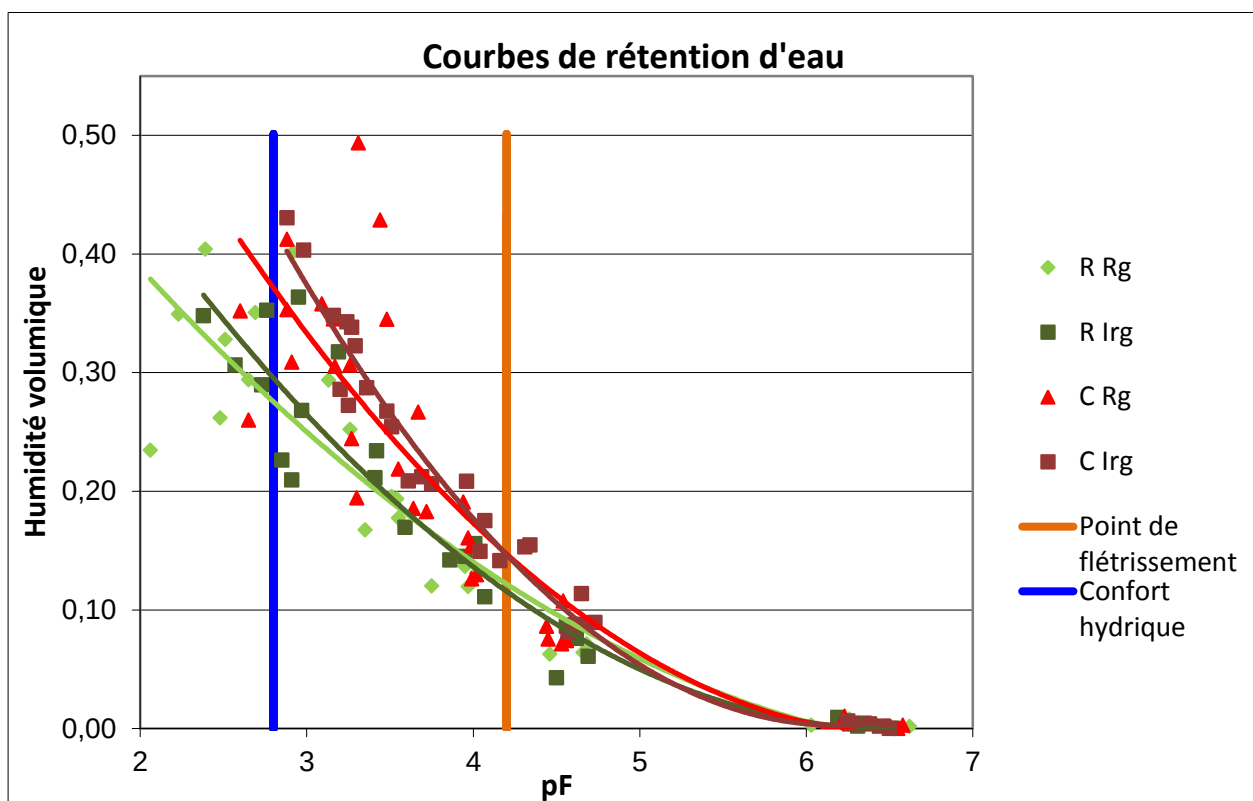


Figure 8 : courbes de rétention d'eau pour les modalités CR, RR, CI et RI

3.3 Les propriétés chimiques

Les propriétés sont uniquement mesurées sur les rangs donc seules les modalités C et R sont comparées.

3.3.1 Les matières organiques

La teneur en matière organique totale (et carbone) est légèrement plus élevée dans le verger raisonné que dans le verger conventionnel (3,17 % contre 2,97 % de MO et 18,35 g contre 17,27 g C/kg respectivement), bien que l'on n'observe pas de différence significative entre ces deux modalités (figure 9). Cependant, les proportions de MO libre sont significativement supérieures dans le verger raisonné (0,97 % contre 0,63 % de MO libre respectivement) et inversement pour la MO liée (2,19 % contre 2,33 % de MO liée respectivement). Il en est de même pour la proportion de carbone et d'azote libre qui est plus grande dans le verger raisonné (résultats non présentés).

3.3.2 Le statut acido-basique

La modalité R a un pH eau significativement supérieur à celui de la modalité C (6,80 contre 4,97 respectivement) (figure 10). La quantité d'oxyde de calcium et la proportion de calcium dans la CEC sont également significativement plus élevées dans le verger raisonné (3,4 g contre 1,3 g de CaO/kg de sol et 85 % contre 35 % de saturation en Ca respectivement). En revanche, la valeur de la CEC n'est pas significativement différente entre les deux modalités.

3.3.3 Les éléments majeurs

La quantité d'azote totale est plus élevée dans le verger raisonné (1,69 g contre 1,5 g de N/kg) mais cette différence n'est pas significative (figure 11). En revanche, les quantités de phosphore et potassium sont plus importantes dans le verger conventionnel que dans le verger raisonné (0,28 contre 0,20 g de P_2O_5 /kg et 0,40 g contre 0,35 g de K_2O /kg respectivement). Cette différence est seulement significative pour le phosphore.

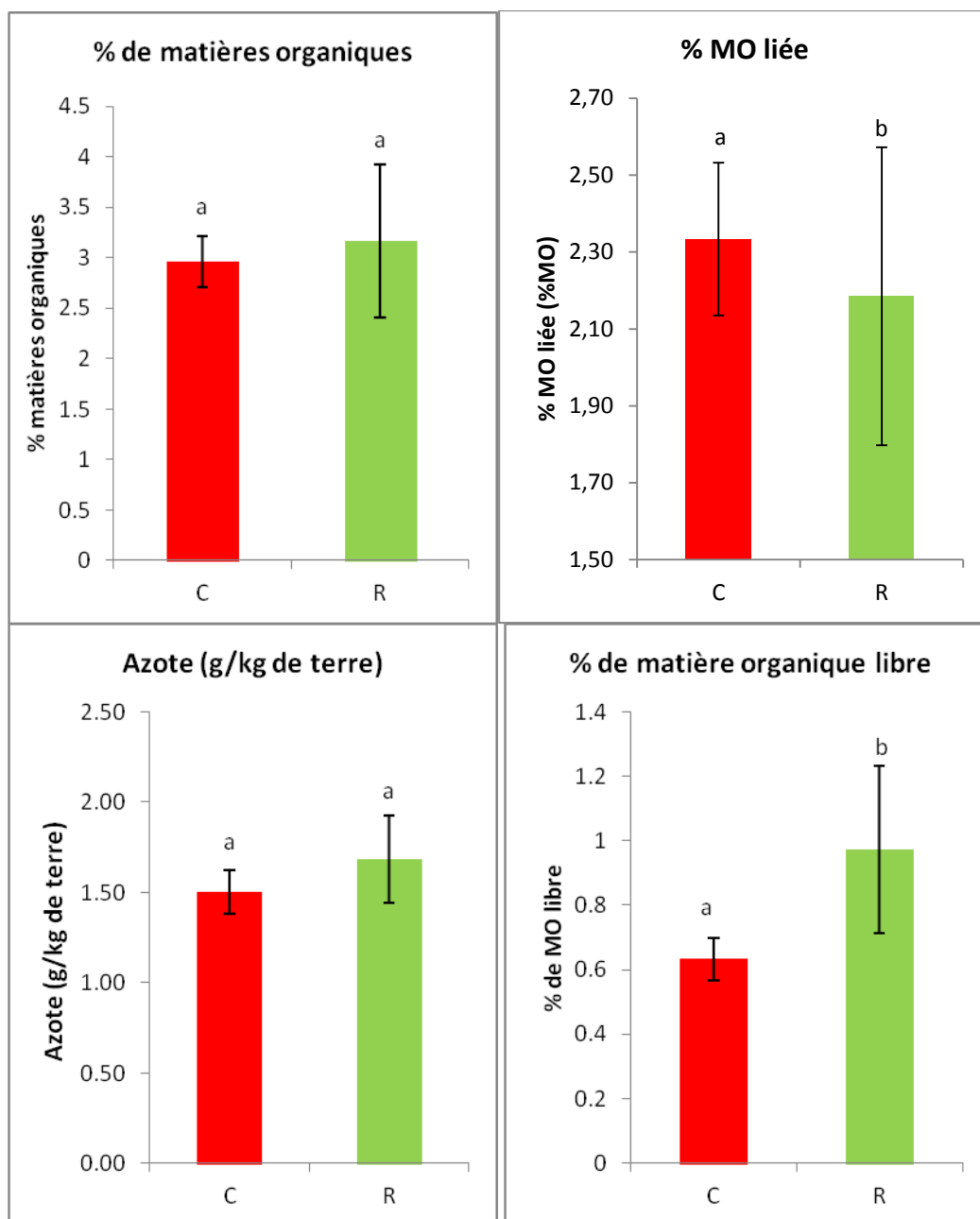


Figure 9: pourcentage de MO totale, libre et liée, et quantité d'azote totale des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.

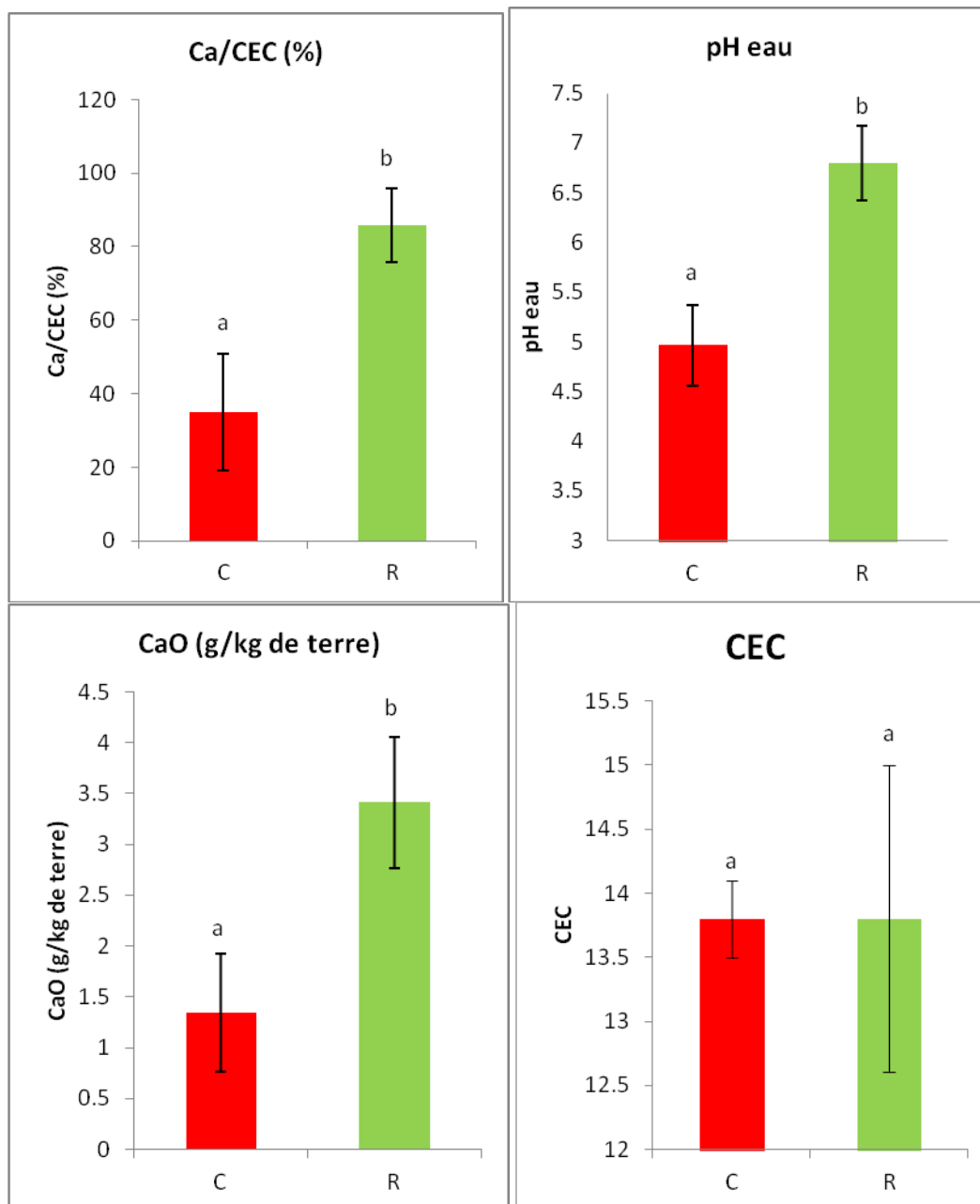


Figure 10: pourcentage d'ions calcium dans la CEC, pH eau, quantité d'oxyde de calcium et CEC en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.

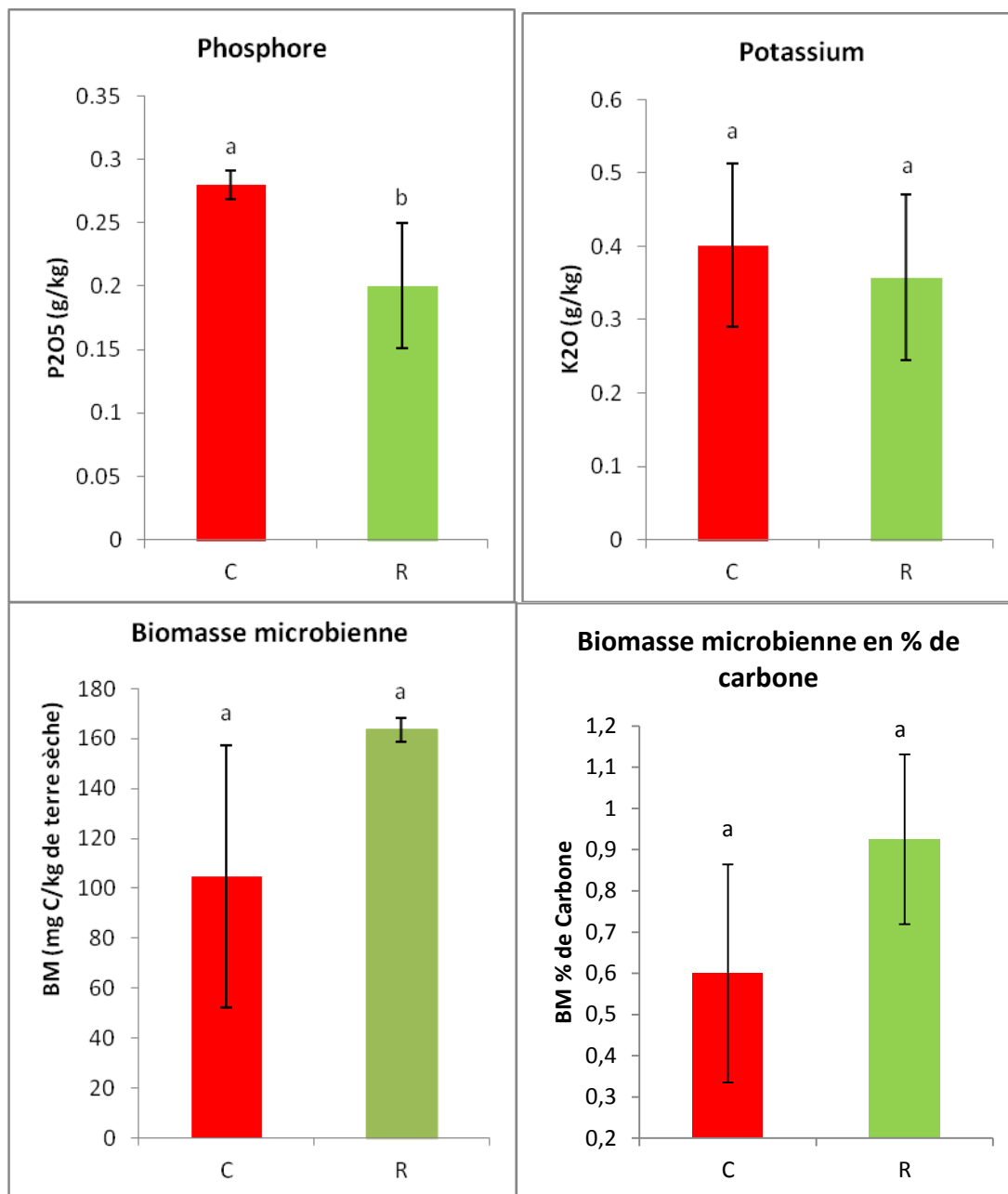


Figure 11: quantité de phosphore, potassium, biomasse microbienne en % de carbone et carbone minéralisé en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités.

3.4 Les propriétés biologiques

Les propriétés sont uniquement mesurées sur les rangs donc seules les modalités C et R sont comparées, à l'exception des vers de terre.

3.4.1 Les microorganismes

La quantité de biomasse microbienne n'est pas significativement différente entre les deux vergers (figure 11), cependant, on remarque que cette quantité tend à être plus élevée dans le verger raisonné (163,5 mg contre 104,7 mg C/kg respectivement). La part relative de biomasse par rapport à la MO totale est plus importante dans le verger raisonné que dans le conventionnel (0,92 % contre 0,60 % de la MO totale respectivement).

Les activités de minéralisation du carbone et de l'azote sont plus élevées dans le verger raisonné (426 mg contre 320 mg de C/kg/28 j et 73 mg contre 36 mg de N/kg/28 j) mais non significativement différentes (figure 12). Néanmoins, la fourniture annuelle d'azote est 58 % plus grande dans le verger raisonné que dans le conventionnel (152 U contre 96 U d'azote respectivement) et cette fois la différence est significative.

3.4.2 Les nématodes

Le nombre de nématodes totaux est supérieur dans le verger conventionnel (360 contre 217) sans que cela soit significatif (figure 12).

3.4.3 Les vers de terre

Comparaison des modalités C et R

Le nombre de vers de terre est plus élevé dans les rangs du verger raisonné que dans les rangs du verger conventionnel (1 855 contre 1 060 vers de terre/ m³ de terre respectivement) (figure 13). Il y a donc environ 1,5 fois plus de vers de terre, mais la différence n'est pas significative entre les deux modalités.

Comparaison des modalités Rang et Inter-rang

Il n'y a pas de différence significative entre les rangs et inter-rangs, on remarque cependant qu'il y a moins de vers dans les inter-rangs que dans les rangs (815 vers/m³ de terre en verger conventionnel et 470 vers/m³ en verger raisonné).

Interaction pour les modalités CR, RR, CI et RI

Pour le RR et le CR, le nombre de vers de terre est significativement supérieur au CI. Le RI ne se distingue pas des autres modalités.

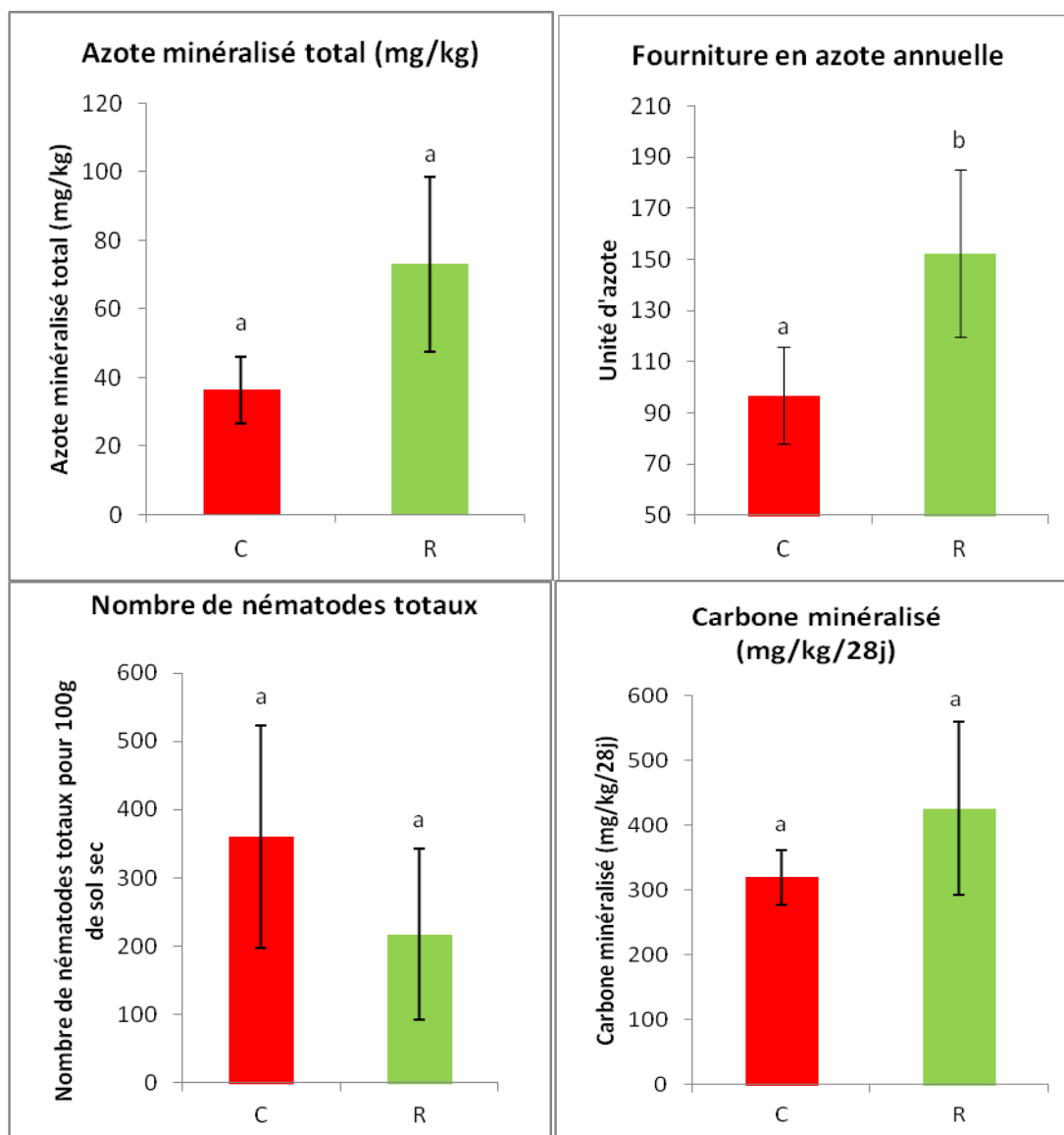


Figure 12: quantité d'azote minéralisé total, fourniture en azote annuelle et abondance en nématodes totaux en fonction des modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités

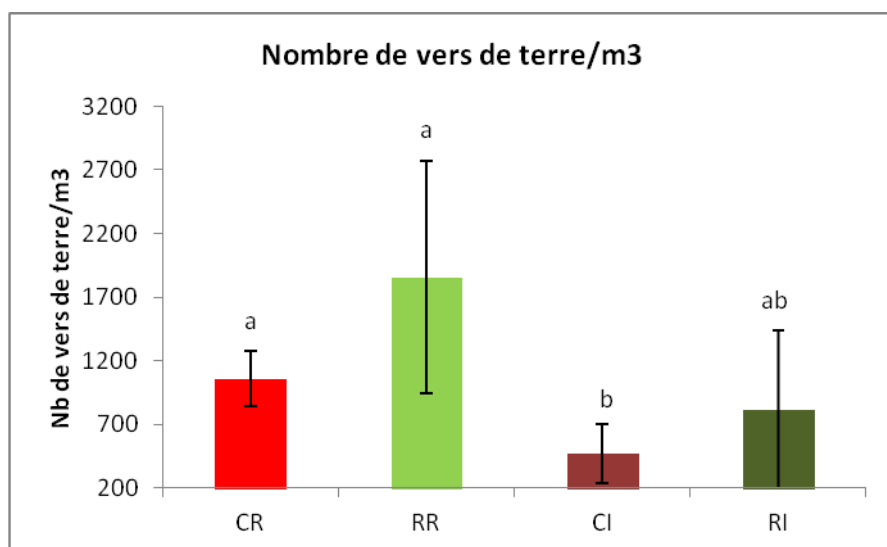


Figure 13: abondance en vers de terre pour les modalités CR, RR, CI et RI

3.4.4 Les relations entre variables

La matrice a permis de mettre en évidence des corrélations positives entre le pH, la CaO et le Ca/CEC (avec des R^2 de 0,87 et 0,90 respectivement) (tableau 3).

Le pH est également corrélé positivement avec la BM en pourcentage de carbone et la minéralisation de l'azote (avec des R^2 de 0,70 et 0,71 respectivement).

La RU est reliée à la MO liée ($R^2 = 0,78$). Les vers de terre sont négativement corrélés avec les nématodes ($R^2 = -0,65$) (tableau 3).

Tableau 3: matrice de corrélation

Matrice de corrélation	pH eau	RU	Vers de terre
N min	0,71		
BM en % de carbone	0,70		
CaO	0,87		
Ca/CEC	0,90		
% MO liée		0,78	
Nématodes			-0,65

4. Discussion

4.1 Comparaison du verger « conventionnel » et « raisonné »

4.1.1 Les propriétés physiques

La granulométrie

Les deux vergers sont mis en place dans des conditions limono-argilo-sableuses ou « loam » d'après le triangle des textures. Cette texture satisfait les exigences physiques de la production d'agrumes, même si la teneur en limons est supérieure aux données de références, situées entre 15-20 % d'argiles, 15-20 % de limons et 60-70 % de sables (Loussert, 1989).

La compaction du sol

Elle est estimée par la densité apparente et la pénétrométrie. Ce paramètre dépend de la texture du sol, de sa structure et de sa teneur en MO (Lahlou, 2005). Les données relatives à la texture et la MO totale étant similaires entre les deux vergers, les variations de compaction observées ne sont donc liées qu'à la structure du sol. Globalement, il n'y a pas de différence significative entre les deux modalités C et R (mesure de DA). On observe une différence significative entre la DA des rangs et des inter-rangs, ce constat est cohérent dans la mesure où les inter-rangs subissent le compactage par le passage des roues des engins agricoles.

S'il n'est pas constaté de différence significative de DA entre les rangs des deux modalités, l'aspect du sol au moment des prélèvements dans les cylindres pouvait laisser suggérer le contraire. Cela serait d'autant plus cohérent que l'aménagement en billons et les stolons du couvert d'*A. pintoï* sont susceptibles de maintenir un état durable de porosité (Durand, 2013). Lors des prélèvements, un biais a pu être induit car il était difficile de maintenir le sol trop meuble dans les cylindres et donc d'avoir la masse exacte de sol servant à calculer la DA.

Les mesures de résistance mécanique par pénétrométrie confirment notre hypothèse. Les rangs du verger raisonné sont significativement plus meubles que ceux du verger conventionnel. Il est difficile de statuer, avec ces deux variables, des valeurs absolues indiquant la compaction. Dans notre cas, les valeurs de pénétrométrie varient du simple au triple entre C et R. Afin de vérifier des problèmes de compaction du sol il faudrait envisager une observation type fosse pédologique avec évaluation du développement racinaire des arbres du verger conventionnel. Cependant, il apparaît nettement que la gestion raisonnée du verger permet de maintenir un sol plus meuble cinq ans après plantation qu'en gestion conventionnelle, ce qui a des conséquences potentielles positives sur le fonctionnement hydrique et biogéochimique du sol.

La stabilité structurale

Les stabilités structurales mesurées montrent des MWD d'agrégats supérieurs ou égaux à 2, soit des indices calculés caractérisant un sol stable (Mathieu et Pielain, 2003). Le sol peut résister à la déstructuration provoquée par l'eau lors des précipitations (Le Bissonnais, 1995). On observe cependant des différences entre les modalités : les rangs conventionnels sont plus stables que les rangs raisonnés. Ce résultat ne peut pas s'expliquer par l'effet de la texture et de la MO totale (qui sont similaires dans les deux vergers). On peut évoquer l'hypothèse d'une différence de micro- et mésoporosité entre les deux modalités d'exploitation potentiellement due au couvert végétal et son développement racinaire. Des erreurs ont aussi pu être commises durant les manipulations au laboratoire. Lors de la récupération des agrégats humides restés sur le tamis, certains grains restent coincés dans les mailles du tamis, il y a ainsi des pertes de sol qui peuvent ensuite affecter le calcul

du MWD. Cependant, il apparaît donc globalement que le risque d'érosion dans ce contexte de sol est faible quel que soit le système conventionnel ou raisonné.

Le potentiel hydrique

Les réserves utiles calculées à partir des valeurs de pression de rétention (pF) sont comprises entre 140 mm/m² et 180 mm/m². Dans ce type de sol, il est beaucoup plus aisé de gérer ce différentiel de potentiel que dans un sol sableux où la RU s'élève à 30 mm/m² (Dembele et Some, 1991). Ces valeurs ont été mesurées à partir d'échantillons remaniés (tamisé à 2 mm et séchés à 105 °C). Or, Bruand *et al* (1996) ont montré que cette méthode peut surestimer la RU par rapport à des mesures faites sur des échantillons non remaniés. Lorsque l'on compare les deux vergers, on remarque que la RU est plus importante dans le verger conventionnel. On émet l'hypothèse que la différence observée est due à une microporosité plus élevée dans le sol du verger conventionnel, à relier avec les observations de stabilité structurale. La teneur en MO liée, associée à la structure du sol, est positivement corrélée avec la réserve utile. Cela signifierait qu'une structure plus stable (et contenant plus de MO liée) permettrait au sol de mieux retenir l'eau. Cependant, il apparaît que dans ce type de sol, quel que soit le système, la réserve utile est comprise dans une échelle d'humidité induisant une gestion relativement aisée de l'irrigation.

L'humidité au champ (TDR)

Dans l'ensemble, les inter-rangs sont plus humides que les rangs. Ces observations sont cohérentes avec les compactions évaluées. De plus, l'aménagement des billons et le couvert d'*Arachis pintoï* dans le verger raisonné induisent à la fois un drainage plus efficace et / ou une absorption de l'eau par le couvert végétal. Dans le verger conventionnel, le sol nu du rang géré avec l'herbicide subit une évaporation plus importante.

La conductivité hydrique

Elle est définie comme la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol. Elle est également un indicateur de la porosité du sol. Malgré une grande variabilité des données et des différences non significatives, la conductivité hydrique est plus élevée dans les rangs que dans les inter-rangs. Cela rejoint l'évaluation de la compaction qui est plus faibles dans les rangs des deux modalités. Le sol, plus poreux, permet donc à l'eau de mieux s'infiltrer. En revanche, l'itinéraire technique ne semble pas impacter cette variable.

4.1.2 Les propriétés chimiques

Les matières organiques

La MO totale (environ 3 %) est en quantité satisfaisante pour la culture d'agrumes (Loussert, 1989). Elle est similaire dans les deux modalités, malgré des valeurs légèrement plus élevées en condition raisonnée. Les apports de diverses matières organiques (broyage / enfouissement des frondaisons, engrais vert, paillage et couverture d'*Arachis pintoï*) ont permis de maintenir, voire augmenter la teneur en MO du sol.

D'un point de vue qualitatif, la MO libre (correspondant à la MO fraîche accessible par les organismes du sol et qui leur sert de source énergétique (Mathieu et Pieltain, 2003)) est plus élevée dans le verger raisonné. Inversement, la MO liée formant le complexe argilo-humique est plus élevée dans le verger conventionnel. Les apports de MO récents et continus dans le verger raisonné expliqueraient la teneur élevée en MO libre, avec comme corollaire un impact favorable sur la vie du sol (Gobat *et al.*, 2010).

Le statut acido-basique

Le pH est un paramètre très important pour la fertilité car il a une influence sur la disponibilité des nutriments (en modifiant leur forme, les nutriments comme le phosphore, le potassium ou le fer sont assimilables ou non par les plantes), mais aussi sur les microorganismes et leur activité (Mortreux, 2008).

Le pH a fortement augmenté dans le verger raisonné, il est passé de 4,7 en 2011 à 6,8 en 2015, alors que celui du verger conventionnel est toujours très acide (5). L'amendement calcique a été plus important dans le verger raisonné du fait de sa mise en place en 2010 (3052 kg/ha entre 2008 et 2015 contre 807 kg/ha respectivement entre verger raisonné et conventionnel). Cet amendement (forme CaO), apporté grâce au lithotamne (poudre d'algues calcifiées), va permettre la neutralisation des protons (H^+) par les ions OH^- (augmentation du pH) et l'adsorption consécutive du cation Ca^{2+} sur le complexe argilo-humique (Soltner, 2014). Les valeurs de CaO et la proportion de Ca dans la CEC sont, d'ailleurs, positivement corrélées au pH, ce qui confirme nos hypothèses.

Les éléments majeurs

La quantité d'azote total est similaire entre les deux vergers et satisfaisante. Cependant, la proportion d'azote organique libre est plus importante dans le verger raisonné. Etant une ressource nutritive pour les microorganismes, l'azote pourra stimuler leur activité.

Les quantités de phosphore et de potassium sont plus élevées dans le verger conventionnel. La fertilisation potassique est d'ailleurs plus grande dans ce verger (1240 kg/ha) que dans le verger raisonné (178 kg/ha) du fait de l'âge des arbres. Mais ce n'est pas le cas pour la fertilisation phosphorique qui est deux fois plus importante en raisonné, du fait de l'amendement pratiqué en 2010 à la mise en place du verger. On peut supposer que les arbres ainsi que la couverture d'*Arachis pintoï* consomment plus de phosphore pour leur croissance que les arbres sans couverture ayant déjà atteint leur taille adulte. C'est ce qui expliquerait la faible teneur en phosphore dans le sol. Il faut noter que le phosphore n'est pas un élément déterminant pour les agrumes, à l'inverse de l'azote qui joue un rôle très important pour la croissance et la fructification des arbres (Jackson et Davies, 1999).

4.1.3 Les propriétés biologiques

Les microorganismes

Les quantités de biomasse microbienne sont similaires entre les deux vergers. Cependant, la quantité relative de biomasse microbienne est supérieure dans le verger raisonné. De plus l'activité minéralisatrice est plus importante dans la modalité raisonnée. Ainsi, la fourniture annuelle en azote par le sol est 58 % plus élevée. Un environnement favorable caractérisé par un pH proche de la neutralité couplé à la présence d'une ressource énergétique (grande quantité de MO libre) favorise l'activité biologique et à terme la fertilité biologique (Chantigny et Angers, 2005). Ces trois variables sont d'ailleurs positivement corrélées. L'amendement calcique, l'apport d'engrais organique ainsi que la mise en place d'une légumineuse comme plante de couverture, sont des pratiques raisonnées qui ont favorisé la fertilité du sol. Si l'on souhaite maintenir durablement l'activité biologique du sol, il faut cependant veiller à appliquer régulièrement de la matière organique pour ne pas laisser les microorganismes sans source de carbone et d'azote. Les microorganismes en pleine croissance vont également participer à améliorer la structure du sol grâce à la sécrétion d'un mucilage collant qui aura tendance à s'agglutiner aux particules du sol (Chantigny et Angers, 2005).

Les nématodes

En l'état, nos mesures n'apportent pas d'informations assez précises pour évaluer leur impact sur l'état de fertilité du sol. Le nombre de nématodes tend à être plus élevé en conventionnel.

Ces organismes peuvent être bénéfiques pour le sol s'ils font partie de la famille des décomposeurs (bactérovores, fongivores, omnivores) ou néfastes pour les plantes s'ils sont phytoparasites (Villenave, 2012 et Neher, 2001). Or il n'a pas été possible d'identifier les genres et donc les fonctions des nématodes extraits du sol et des racines. Il faudrait par la suite procéder à cette identification afin d'acquérir ce type d'informations.

Les vers de terre

Les vers de terre jouent un rôle très important dans la fertilité physique mais aussi biologique du sol. Par leur mode de déplacement, ils produisent des galeries horizontales et verticales qui créent de la porosité ; ils rejettent des turricules qui améliorent la structure du sol et certains types de vers (épigés et anéciques) participent à l'enfouissement et la décomposition de la matière organique (Alvarez, 2002). On les retrouve en plus grand nombre dans les rangs du verger raisonné, soit 1,5 fois plus que dans les rangs du verger conventionnel. Les pratiques culturales, comme la mise en place d'*Arachis pintoï* ou le redressement du pH, ont pu les favoriser. Dans les inter-rangs, le constat est inverse, les vers sont plus nombreux dans les inter-rangs conventionnels que raisonnés. Cela peut s'expliquer par le fait que la couverture végétale est plus importante dans l'inter-rang conventionnel avec un enracinement plus profond. Les vers étant majoritairement des épigés vivants à la surface du sol (dans l'horizon humifère), il est possible que ce couvert d'inter-rang plus important en conventionnel entraîne une plus forte présence de vers de terre.

5. Conclusion et Perspectives

Cette étude montre que le verger raisonné a principalement une meilleure fertilité biologique et chimique. En effet, l'activité de minéralisation de l'azote par les microorganismes est plus importante que dans le verger conventionnel (+ 58 %). Cela se traduit par une plus grande fourniture en azote disponible pour les arbres et des besoins en fertilisation moindres. Les vers de terre, aussi appelés ingénieurs du sol, sont également plus abondants dans les rangs du verger raisonné. Ces deux résultats sont fortement corrélés à une augmentation du pH du sol et à la quantité de MO libre (potentiellement décomposable). Un pH proche de la neutralité (6,8) est à la fois meilleur pour les agrumes et offre aux organismes des conditions optimales de croissance. La matière organique libre est leur principale source énergétique, c'est pourquoi elle contribue aussi à leur forte activité. Un environnement favorable et une source de carbone en quantité suffisante sont les facteurs déterminants de l'amélioration de la qualité biologique du sol.

D'un point de vue agronomique, les pratiques culturales incriminées dans ces changements concernent le redressement du pH (chaulage) et l'augmentation des ressources nutritives pour l'activité biologique (enfouissement d'engrais vert, résidus d'arbres arrachés, couvert d'*Arachis pintoï*).

Il faut ajouter qu'une bonne porosité (due à une structure plus meuble) permet une meilleure oxygénation du sol qui est également indispensable à l'activité biologique. Cette porosité peut être créée par un sous-solage, la création de billons de plantation à partir des premiers horizons de sol et la mise en place d'une plante de couverture. La porosité est un enjeu d'autant plus important dans les sols lourds qu'ils ont naturellement tendance à se recompacter (cas des inter-rangs du verger raisonné qui sont aussi denses que ceux du verger conventionnel).

Les autres propriétés physiques et chimiques n'ont pas significativement évolué entre les deux vergers, cela signifie qu'ils ne sont pas influencés par les pratiques culturales ou qu'il est encore trop tôt pour observer une variation. Les indicateurs biologiques sont donc les plus sensibles à un changement rapide de l'état du sol. Les mesures d'activités de minéralisation sont précises mais nécessitent des analyses en laboratoire alors que le comptage des vers de terre directement sur le terrain est une mesure facile à effectuer et peu coûteuse.

D'autres caractéristiques chimiques spécifiques aux sols calédoniens auraient pu être mesurées telles que la toxicité aluminique dans les sols acides, avec comme corollaire le lessivage des cations, ou encore l'azote fixé spécifiquement par l'*Arachis pintoï* et restitué au sol grâce à la mesure des nodosités et des indices foliaires. En ce qui concerne les propriétés biologiques, l'identification des familles de nématodes aurait pu donner des informations précieuses sur leur rôle bénéfique ou non selon s'ils sont décomposeurs ou phytoparasites.

Cette étude a été réalisée selon une approche systémique car elle compare deux ensembles de pratiques culturales. Il serait maintenant intéressant, pour mieux comprendre les processus améliorant la fertilité, d'identifier l'importance relative des pratiques culturales mises en œuvre (par exemple l'effet de l'*Arachis pintoï* et l'effet de la formation de billons).

Cet essai s'est montré concluant du fait de l'amélioration notable de la fertilité du sol, et il serait intéressant de renouveler ce type d'analyses dans 5 ans pour évaluer l'effet des pratiques sur le long terme.

6. Bibliographie

- Alvarez G. 2002. « Activités biologiques et fertilité des sols. » ITAB.
- Beduneau J. 2014. « Impacts de facteurs pédologiques, de pratiques culturales et de leurs interactions sur les lombriciens dans les vignobles français. » Agrocampus Ouest.
- Berner, Herwart, Alfred, Bohm. 2013. « Les principes de la fertilité des sols. » Institut de recherche de l'agriculture biologique FIBL, BioSuisse.
- Biielders C., Hieln M.P., Cambier J.F., Aniset J. 2012. « Impact des techniques culturales sur le taux de carbone organique du sol et la stabilité des agrégats dans la province du Hainaut. » Université catholique de Louvain.
- Billot J-F. 1982. « Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés. » Afes, CEMAGREF.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M., 1996. « Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. » *Etude et Gestions des Sols* 3 (1): 27-40.
- Carter M.R. 1989. « Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams », Can. J. Soil, 70 : 425-33.
- Chantigny M., Angers D. 2005. « Activité microbiologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds ? » CRAAQ.
- Chitrit J.J., Gautronneau Y. 2011. « Pratiques agricoles et fertilité des sols en France », Sciences Eaux et Territoires, la revue Cemagref édition.
- Cluzeau D. 2011. « Mieux connaître les vers de terre. » Ecobiosol, Université de Rennes 1.
- Combeau, Monnier. 1960. « Méthode d'étude de la stabilité structurale, application aux sols tropicaux. » ORSTOM.
- Coquet, Boucher, Labat, Vachier, Oger-Estrad. 2000. « Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. » Etudes et gestions des sols.
- Dabin, B. 1984. « Les sols tropicaux acides. » Cahier ORSTOM, sér. Pédol., vol XXI, n°1.
- Deligne C. 2011. Optimisation de la fertilisation de cultures fruitières pérennes en Nouvelle Calédonie. Institut Agronomique Néo Calédonien, ISTOM, 100 pages.
- Dembele Y., Some L.1991. « Propriétés hydrodynamiques des principaux types de sol du Burkina Faso. » *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*, n° 199.
- Durand M. 2013. « Effet des plantes de services sur la structuration du sol, cas du *Stylosanthes guianensis* pour la décompaction du sol. » Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II.

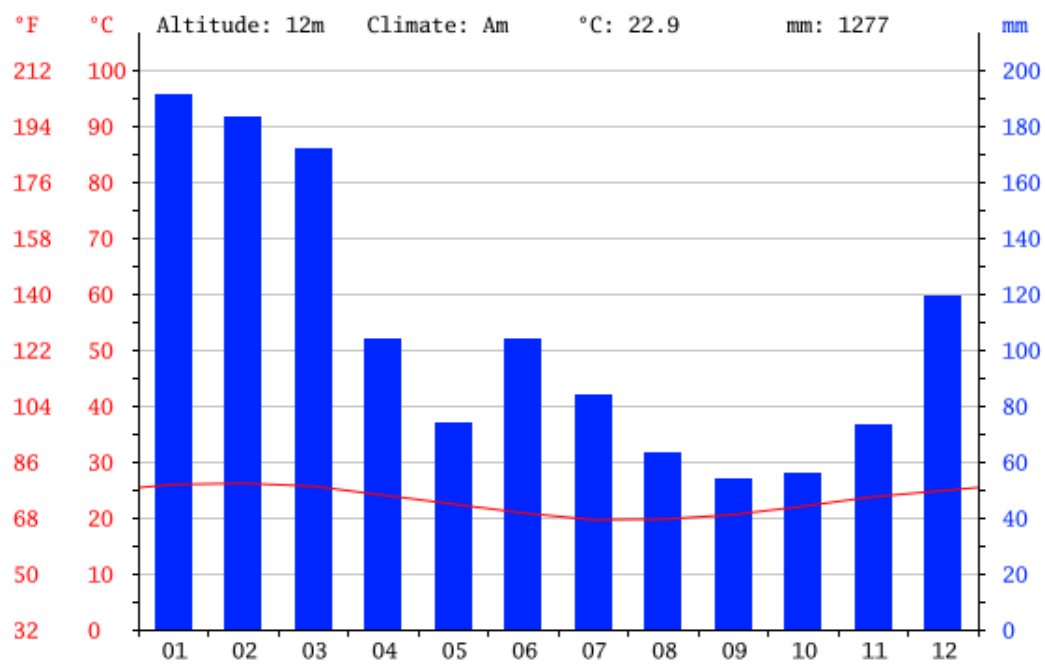
- Fox D., Carrega P., Morschel J., Emsellem K. 2008. « La dégradation des sols dans le monde. » Université Nice Sophia Antipolis.
- Garcia-Ruiz R., Ochoa V., Vinegla B., Hinojosa M.B., Pena-Santiago R., Liébanas G., Linares J.C., Carreira J.A. 2009. « Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. » *Applied Soil Ecology*, Elsevier, 41 (3): 305-14.
- Gobat J.M, Aragno M., Matthey V. 2010. *Le sol vivant, Bases de pédologie-Biologie des sols*. Les Presses polytechniques et universitaires romandes. Science et ingénierie de l'environnement.
- Guilbault P. 2006. « Impact des pratiques culturales sur la vie du sol. » Chambre d'Agriculture de la Gironde, service Vigne et Vin.
- « Humidimètre de sol portable TDR 300. » s. d. SDEC France.
- ISEE. 2013 « Institut de la statistique et des études économiques de Nouvelle Calédonie ».
- Jackson L., Davies F. 1999. *Citrus Growing in Florida*. University Press of Florida.
- Jansa J., Wiemken A., Frossard E. 2006. « The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. » *Geological Society London Special Publications*, n° 10 : 89-115.
- Kormanik P.P., McGraw A.C., 1982. « Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. » *The American Phytopathological Society, Methods and principles of mycorrhizal research*, , 37-42.
- Le Bissonnais Y., Le Souder C. 1995. « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. » *Etude et Gestion des Sols* 2,1: 56.
- Loussert R. 1989. *Les Agrumes 1 Arboriculture*. Lavoisier Tec&Doc. Technique Agricole méditerranéennes 1. Editions Scientifiques Universitaires.
- Martin C. 2013. « Diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules associés à l'espèce *Acacia spirorbis*, variation selon les substrats naturels. » Université de la Nouvelle-Calédonie, Master 2 Biologie des Plantes et des Microorganismes, Biotechnologies, Bioprocédés, Université Montpellier II.
- Mathieu C., Pieltain F. 2003. *Analyses chimiques des sols*. Lavoisier. Tec&Doc. Lavoisier.
- Mermoud. 2006. « Dynamique de l'eau dans le sol. » Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
« Mesurer le taux d'acidité du sol, théorie B2. » 2008. Prosensols, interreg.
- Moreau, R. 1983. « Evolution des sols sous différents modes de mise en culture, en Côte d'Ivoire forestière et préforestière. » ORSTOM.
- Mortreux P. 2011. « Compaction : "Ne pas hésiter à creuser la question" », Le syndicat agricole édition, sect. Travail du sol.
- Neher D. 2001. « Role of Nematodes in soil health and their use as indicators. » *Journal of nematology*, The society of nematologists, 33 (4): 161-68.

- Pérès, Guénola. 2003. « Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol. » *Ecology, environment*. Université Rennes 1.
- Phillips J.M., Hayman D.S. 1970. « Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. » *Transactions of the British Mycological Society*, 157-60.
- Rasolo F., Raunet M. 1999. « Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. » *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar*, collection Colloques, 658.
- Soltner D. 2014. *Les bases de la production végétale*. Vol. Le sol et son amélioration. Science et Techniques agricoles 1. Soltner.
- Trouvelot A., Kough V., Gianinazzi Pearson J.L. 1986. « Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. » *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae INRA Press*, 217-21.
- Védie H. 2003. « Evaluer la fertilité des sols. » ITAB.
- Verger F.. s. d. « Granulométrie. » *Encyclopaedia Universalis*.
- Villenave C. 2012. « La nématofaune. » *Elisol Environnement, IRD UMR ECO&SOLS, ADEME*.
- Zaher H. 2010. « Conservation des sols et de l'eau, le diagnostic de compaction. » *Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs Département Sol Eau Biodiversité*.

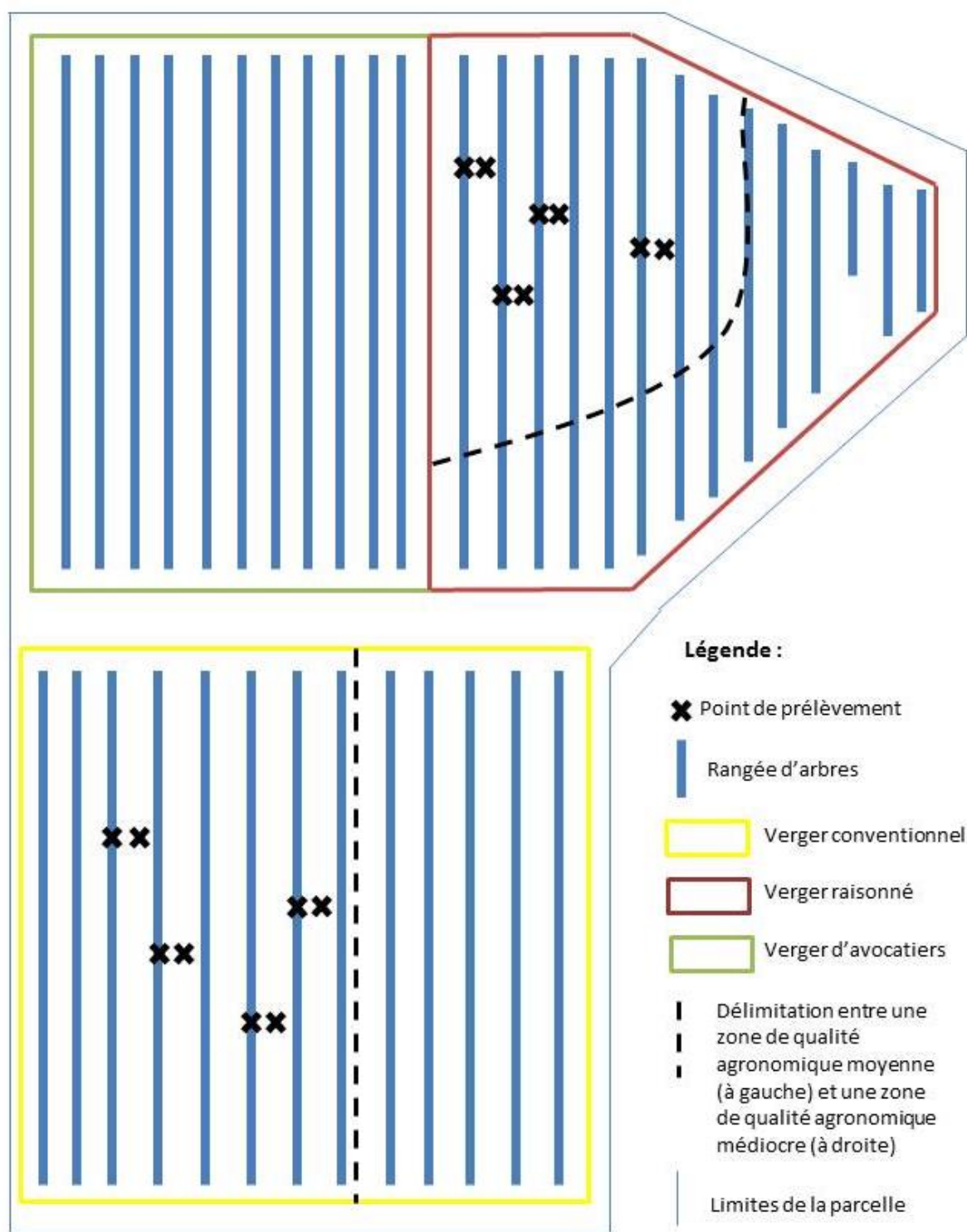
7. Annexes

Annexe 1 Le plan parcellaire de la SRA de Pocquereux

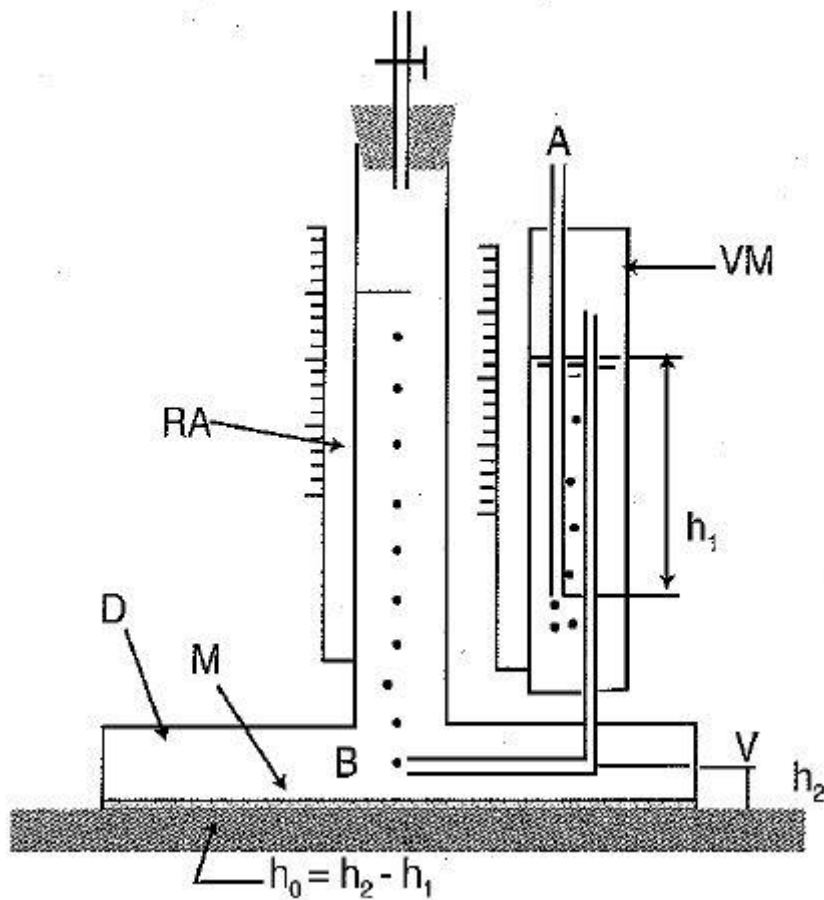


Annexe 2 : Diagramme ombrothermique de La Foa

Annexe 3 : Le plan d'échantillonnage



Annexe 4 : Le principe de fonctionnement de l'infiltromètre multi disques



Cet appareil est constitué d'un disque creux (D) muni d'une membrane (M) à sa base en contact avec le sol. Le disque est alimenté en eau par un réservoir (RA) gradué, amovible et fermé à sa partie supérieure par une pince de Mohr. L'entrée de l'air dans le réservoir d'alimentation se fait par un tube (B) relié à un vase de Mariotte (VM) permettant de régler le potentiel de l'eau au niveau de la surface du sol. Pour que l'eau quitte l'infiltromètre et s'infilte dans le sol, elle doit être remplacée dans le réservoir d'alimentation par un volume identique d'air. Cet air transite à travers le vase de Mariotte de A jusqu'à B. L'air entre dans le vase de Mariotte par le tube A à la pression atmosphérique. Les bulles d'air ainsi formées à la base du tube A remontent dans le vase de Mariotte et rejoignent le volume d'air contenu dans celui-ci. Lors de l'infiltration de l'eau, l'air quitte le vase de Mariotte par le tube B à la pression de l'air du tube de Mariotte pour rejoindre le réservoir d'alimentation. L'eau située juste à la sortie du tube B a donc une pression égale à celle de l'air qui sort du tube, si l'on néglige l'effet de la tension superficielle de l'eau dans l'air à la sortie de ce tube (remarque valable aussi pour le tube A). On en déduit la pression de l'eau p_0 à la sortie du disque de l'infiltromètre. Soit, si l'on exprime les pressions en unité de hauteur de colonne d'eau, un potentiel de l'eau h_0 à la sortie de l'infiltromètre: $h_0 = h_2 - h_1$. (Coquet *et al*, 2000).

Annexe 4 : Les mycorhizes

Les mycorhizes sont estimées grâce à deux indicateurs : le taux de mycorhization des racines et le nombre de spores viables dans la rhizosphère. Le premier indicateur permet de connaître la mycorhization au temps t du prélèvement alors que les spores viables (fortement résistante dans le sol) donnent une information sur l'historique des mycorhizes du sol (Martin, 2013).

PROTOCOLE D'ECHANTILLONNAGE ET DE COMPTAGE

Quatre arbres ont été analysés par verger, sur les quatre répétitions déjà établies. Trois échantillons de terre et de racines sont prélevés par arbre puis mélangés. Ces trois échantillons sont prélevés à trois emplacements différents autour de l'arbre.

1. Détermination des taux d'endomycorhizes

1.1 Prélèvements

Les extractions de racines s'effectuent par "root tracking" afin de s'assurer que la racine prélevée provient bien de l'arbre étudié. Cela consiste à creuser à partir du collet de la plante vers les racines, jusqu'à trouver de fines racines qu'il faut extraire délicatement, au pinceau. Celles-ci ainsi que les radicules (moins d'1 mm de diamètre) sont susceptibles d'être davantage mycorhizées et plus facilement observables au microscope.

1.2 Lavage

L'expérience montre que plus les échantillons sont propres, plus l'évaluation est rapide et précise. Pour cela, les racines sont débarrassées des particules de terre au moyen d'un rinçage abondant à l'eau courante dans une passoire. Elles peuvent être conservées ainsi dans une solution tampon de conservation pendant un mois.

1.3 Dépigmentation et coloration des mycorhizes

Les racines sont systématiquement éclaircies et colorées avant toute observation microscopique. Elles sont d'abord placées dans des piluliers contenant une solution de KOH à 10 % et mises dans une étuve à 90 °C pendant 45 minutes selon la méthode adaptée de Phillips et Hayman (1970) pour être dépigmentées. Ensuite, elles sont abondamment rincées sous l'eau courante, égouttées et remises dans les piluliers où elles sont recouvertes avec une solution colorant les mycorhizes (bleu trypan à 0,05 % dans du lactophénol). Les piluliers sont placés à l'étuve à 90 °C pendant 20 minutes. Les racines sont ensuite rincées abondamment et conservées dans de l'eau distillée avant le montage.

1.4 Montage

On prélève des segments de racine de quelques centimètres seulement choisis au hasard. Ces segments sont montés parallèlement entre lame et lamelle, dans de la glycérine, par groupe de 10 (Kormanik et McGraw, 1982). En cas de besoin, les racines restantes sont conservées dans de l'eau distillée à 4 °C. Chaque échantillon prélevé correspond à une lame de 10 fragments. Pour la quantification des endomycorhizes, Kormanik et McGraw (1982) jugent nécessaire l'examen par plante de 30 segments racinaires d'une longueur de 1 à 3 cm par plant.

1.5 Lecture et interprétation

Les lames sont observées au microscope optique ($\times 400$) et chaque fragment est observé sur toute sa longueur. Le système de notation de Trouvelot *et al.*, (1986) est utilisé pour évaluer l'importance de l'infection mycorhizienne. Il repose sur l'appréciation globale de 10 fragments racinaires par échantillon étudié, soit 30 fragments par plant. Les organes fongiques (hyphes, arbuscules et

vésicules) sont colorés en bleu (photographie 10). Une note comprise entre 0 et 5 est attribuée à chaque

fragment racinaire. Cette note correspond à l'estimation de la proportion de cortex colonisée par les arbuscules et les vésicules (figure 14).

L'intensité globale de la mycorhization M (%) se calcul selon la formule :

$$M(\%) = \frac{95n_5 + 70n_4 + 5n_2 + n_1}{\text{Nombre de fragments}}$$

Sachant que n5 est le nombre de fragment noté 5, n4 le nombre de fragment noté 4, etc...

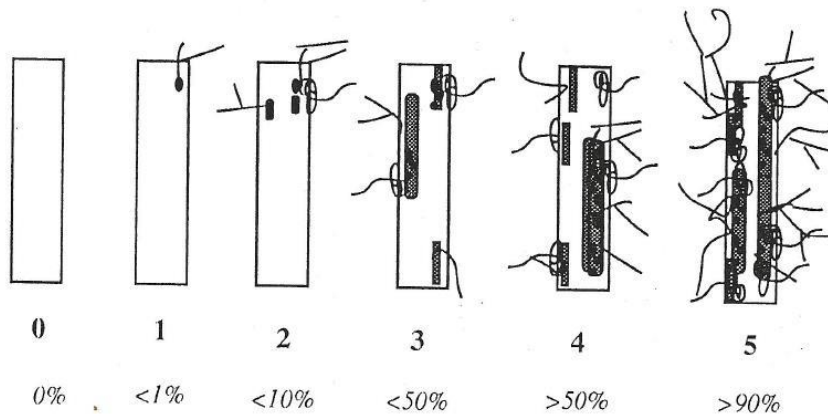
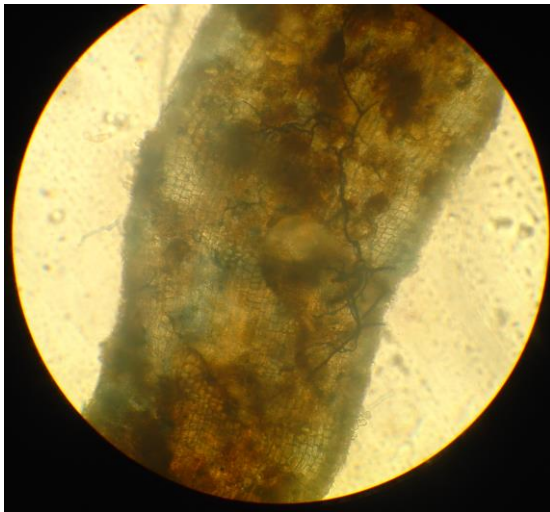


Figure 14: guide de détermination du taux d'endomycorhization selon la méthode de Trouvelot et al., 1984



Photographie 10: observation au microscope (X400) d'endomycorhizes (filaments bleus).

2. Détermination du nombre de spores viables

2.1 Prélèvement du sol

Le sol à étudier est celui de la rhizosphère, c'est-à-dire dans un volume de 1 cm³ autour des racines. La quantité prélevée doit être supérieure à 300 g par échantillon.

2.2 Manipulations

L'extraction des spores produites par les mycorhizes du sol se fait selon le protocole de Walker (1982). Un premier tamisage sur maille de 2 mm de diamètre est réalisé afin de casser les agrégats et d'enlever les cailloux qui pourraient gêner la suite de la manipulation. Il faut ensuite peser 50 g de ce sol tamisé. Un tamisage humide est effectué sur les 50 g de sol. Il est réalisé à l'aide d'une colonne de

tamis de 200 µm, 50 µm et 38 µm. Les refus des deux derniers tamis sont prélevés et centrifugés (5 minutes à 1000 rpm) avec une solution de saccharose et d'eau (50 % V/V). Le refus du tamis et la solution de saccharose doivent être en quantité égale.

La solution de saccharose doit être insérée à l'aide d'une seringue avec embout en dessous du reflux afin que tout celui-ci soit imprégné. Après centrifugation, l'interphase contenant les spores obtenue par le gradient de densité est récupérée avec une pipette et mis dans un pilulier où on y ajoute de l'eau distillée pour obtenir un volume final de 10 mL. Il y a donc deux piluliers de 10 mL pour chaque tamis (38 µm et 50 µm) par échantillon de sol de 50 g.

Les résultats obtenus doivent être comparés en fonction de la matière sèche du sol. Pour cela, on met une quantité de sol dans une cupule et on pèse l'ensemble. La cupule sera ensuite mise pendant 24 h à l'étuve à 90 °C afin de la dessécher. A la sortie de l'étuve, il faut repeser l'ensemble.

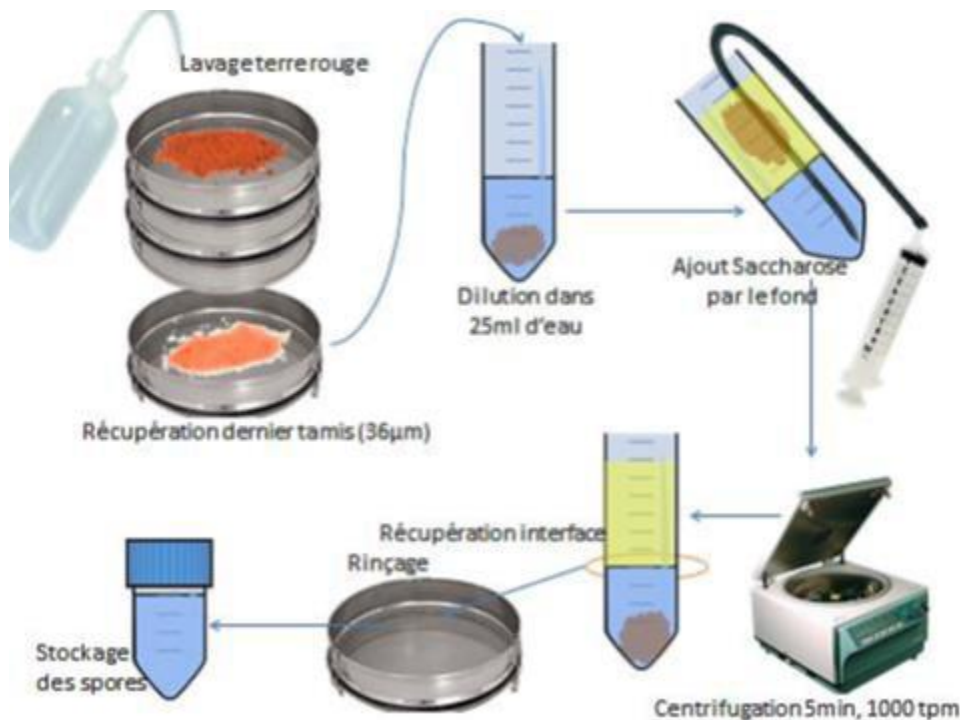


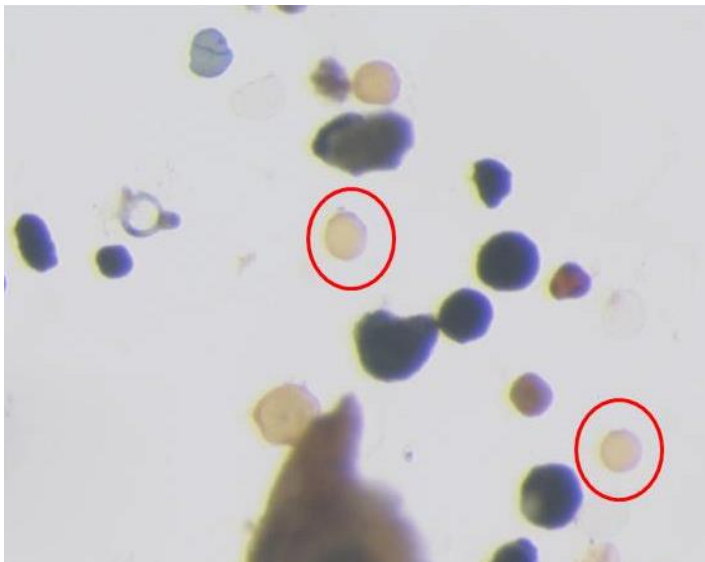
Figure 15: méthode d'extraction des spores du sol (Martin, 2013)

2.3 Lecture

Seules les spores viables sont dénombrées à la loupe binoculaire (×6.2) dans un volume de 100 µL, à raison de quatre répétitions par pilulier. Les répétitions du tamis 38 µm sont additionnées avec les répétitions du tamis 50 µm du même échantillon, afin d'avoir quatre données totales par échantillon. Les résultats obtenus sont ensuite transposés, tel que :

$$X \text{ (pour 100g de sol sec)} = \frac{(\text{Nombre de spores observées} \times 100) \times 100g}{50g \times (\text{Taux de matière sèche})}$$

Les résultats sont donc comparés pour 100 g de sol sec.



Photographie 11: Observation des spores (entourés en rouge) à la loupe binoculaire (X6.2).

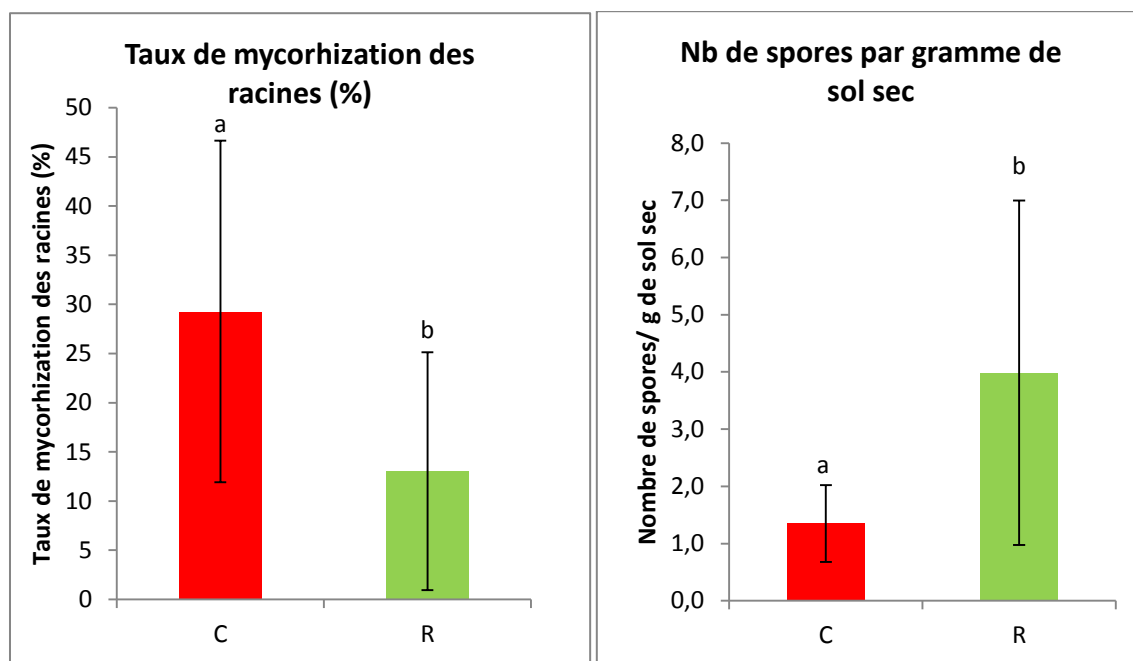


Figure 16: taux de mycorhization des racines et nombre de spores /g de sol sec pour les modalités C et R. Les bâtons indiquent les écart-types de la moyenne. Les lettres différentes signifient des différences significatives entre les modalités

RESULTATS

Le taux de mycorhization du verger conventionnel est significativement supérieur à celui du verger raisonné (29 % contre 13 %). Le nombre de spores est quant à lui significativement plus important dans le verger raisonné (4 contre 1,3).

DISCUSSION

La symbiose mycorhizienne est une stratégie d'association entre un champignon (groupe des Glomérormycètes) et les racines d'une plante. Cette symbiose permet à la plante d'absorber plus de

nutriments et d'eau grâce aux hyphes des champignons explorant un grand volume de sol. En échange, le champignon reçoit de la sève élaborée chargée en sucre de la plante. Les sols pauvres en phosphore incitent les plantes à former des mycorhizes afin d'éviter les carences. Les mycorhizes ont également un rôle dans la stabilité des agrégats car leurs hyphes sécrètent une substance collante qui agrège les particules du sol (Jansa *et al*, 2006).

Les résultats des taux de mycorhization des racines d'agrumes et du nombre de spores présents dans le sol de la rhizosphère ne sont pas interprétables. De nombreux facteurs pourraient expliquer les écarts entre les échantillons : l'espèce du porte-greffe diffère selon les vergers (*Poncirus trifoliata* en raisonné et Citrange Troyer en conventionnel), l'âge des arbres (25 ans en conventionnel et 5 ans en raisonné) et les pratiques culturales.