



HAL
open science

Étude de l'impact des engrais verts sur les qualités physiques et biologiques des sols sableux en cultures maraîchères nantaises

Dustin Lloyd

► **To cite this version:**

Dustin Lloyd. Étude de l'impact des engrais verts sur les qualités physiques et biologiques des sols sableux en cultures maraîchères nantaises. Sciences agricoles. 2013. dumas-00907284

HAL Id: dumas-00907284

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00907284>

Submitted on 21 Nov 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Agrocampus-ouest
Centre d'Angers**
2 rue André Le Nôtre
49045 Angers cedex 01
tél. : 02 41 22 54 54

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Am Hofgarten 4
85354 Freising
Allemagne

**Comité Départemental de
Développement Maraîcher**
6, Rue de la Flamme
Olympique – ZA Viais
44860 Pont St Martin
Tél : 02 28 27 03 03

Mémoire de Fin d'Etudes

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques,
Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2012-2013

Spécialité : Horticulture

Spécialisation ou option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés

**Etude de l'impact des engrais verts sur les qualités physiques et biologiques des sols
sableux en cultures maraîchères nantaises**

Par : Dustin LLOYD

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation*
ou son représentant

Date :/.../... Signature

Bon pour dépôt (version définitive)

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Angers le : 9 septembre 2013

Sous la présidence de : Pr Mickaël Delaire

Maître de stage : Serge Mével (Conseiller en cultures de plein champ)

Enseignant référent : Pr Virginie Forget, Pr Elke Meinken

Autres membres du jury : Maëlle Krzyzanowski (Conseillère en cultures de plein champ), Laure Vidal-Beaudet,
(Maître de conférences Département Milieu physique, Paysage et Territoire Agrocampus ouest centre d'Angers)

*"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".*

Cadre lié à la confidentialité :

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité⁽²⁾ :

➤ Confidentialité absolue : oui non

(ni consultation, ni prêt)

➤ Si oui 1 an 5 ans 10 ans

Le maître de stage⁽⁴⁾,

Cadre lié à la diffusion du mémoire :

A l'issue de la période de confidentialité et/ou si le mémoire est validé diffusable sur la page de couverture, il sera diffusé sur les bases de données documentaires nationales et internationales selon les règles définies ci-dessous :

Diffusion de la version numérique **du mémoire** : oui non

Référence bibliographique diffusable⁽³⁾ : oui non

Résumé diffusable : oui non

Mémoire papier consultable sur place : oui non

Reproduction autorisée du mémoire : oui non

Prêt autorisé du mémoire papier : oui non

.....

Diffusion de la version numérique **du résumé** : oui non

☞ Si oui, l'auteur⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné(e) _____, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date :

Signature :

Rennes/Angers, le

L'auteur⁽¹⁾,

**L'enseignant référent
ou son représentant**

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme

Remerciements

Je remercie chaleureusement mon maître de stage Serge Mével pour m'avoir accompagné tout au long du stage. Une demi-année ne se résume pas dans une seule page de remerciements !

Je remercie Brigitte Pelletier pour m'avoir donné la possibilité de faire un stage aussi polyvalent et intéressant.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe du CDDM qui m'a accueilli lors de ce stage. Je sais maintenant qu'il y a plus que des poivrons, carottes et choucroute.

Je remercie tout l'équipe Plein Champ, Edwige Billy et Apolline Prat pour leur bon esprit d'humour qui a fait de ce stage un temps inoubliable!

Je remercie Sylvain Gérard pour sa logique.

Je remercie Patrick Verron pour son esprit docteur de retrouver le fil rouge.

Je remercie Apolline Prat et Edwige Billy parce qu'elles sont presque ubiquistes concernant de l'aide et des questions.

Je remercie Emilie et Amélie pour leur aide français et plus. Sinon, ça aurait été louche !

Je remercie Kathy et Aurélien pour leur aide durant les expérimentations et leur compagnie dans le bungalow.

Je remercie Isabelle Mével pour m'avoir dépanné plusieurs fois en voiture.

Je vous remercie pour toutes les expériences que je ne peux pas citer à cause de mon sérieux.

Je remercie Mme Forget pour m'avoir rassuré et motivé à la fin.

Je remercie Christoph Felgentreu et Nicolas Le Labourier pour m'avoir aidé à choisir des espèces des engrais verts et de m'avoir fourni des semences gratuitement.

Je remercie Vincent Hallaire pour m'avoir aidé à analyser la structure du sol.

Je remercie Dr Mark Judson pour avoir sacrifié pas mal de son temps précieux pour m'aider à identifier les différentes espèces d'acariens.

Je remercie Cécile Villenave et Emanuel Bourguignon pour m'avoir allumé les mystères de la micro- et mésofaune du sol.

Table des matières

Remerciements	
Table des matières	
Glossaire et acronymes	
Liste des annexes.....	
Liste des illustrations	
Liste des tableaux.....	
Avant-propos	
I. Introduction.....	1
A. La perte de terres arables et les conséquences pour les terres restantes.....	1
B. La France et la production légumière.....	1
C. Contexte	2
1. Situation nantaise.....	2
2. Projet PATHOSOL.....	3
3. Problématique	3
4. Plan du mémoire	3
II. Recherches bibliographiques	4
A. La structure physique et biologique du sol	4
1. La structure physique	4
2. La structure biologique.....	4
B. Possibilités pour améliorer la structure du sol et stimuler la vie du sol	5
1. L'application des catalyseurs.....	5
2. L'apport de matière organique	5
C. Importance de la matière organique	6
D. Analyse de l'effet d'apport de matière organique	6
E. Méthodes pour apporter de la matière organique.....	7
F. Les engrais verts	7
1. L'histoire des engrais vert	7
2. Définition d'un engrais vert.....	8
3. Objectifs d'utilisation des engrais vert.....	8
4. Différentes familles d'engrais verts utilisables.....	10
5. Semer en mélanges	11
6. Effets des engrais verts.....	11

G.	Bio-indicateurs.....	12
1.	L'activité des microorganismes et le potentiel de minéralisation du carbone	12
2.	Activités enzymiques.....	12
3.	La biomasse fongique.....	12
4.	Les communautés de nématodes du sol.....	12
5.	Les acariens	13
6.	Les collemboles	13
7.	La communauté de vers	13
III.	Objectifs du mémoire.....	14
IV.	Matériel et Méthodes	15
A.	Les parcelles expérimentales et les mélanges testés.....	15
1.	Critères de choix.....	15
2.	Choix et densité de semis des espèces	15
3.	Evaluation de la production en matière verte	17
4.	Evaluation d'enracinement	17
B.	Tests d'analyses de l'efficacité des engrais verts	17
1.	Analyse de la structure du sol	18
2.	Analyse de l'activité biologique du sol selon trois bioindicateurs	20
3.	Mesure de l'effet sanitaire	22
V.	Résultats.....	24
A.	Culture des engrais verts.....	24
1.	Evaluation des différents mélanges testés sur la parcelle A et parcelle B.....	24
2.	Rendement en fresh matter et dry matter	24
3.	Rendement en minéraux azote (N), phosphore (P) et potassium (K)	24
4.	Apport en carbone organique	25
5.	Rapport C/N.....	25
B.	Tests de la structure du sol (uniquement pour la parcelle A).....	25
1.	Résultats du test de la conductivité hydraulique du P0.....	25
2.	Résultats du test de la conductivité hydraulique du P1.....	26
3.	Résultats du P0 du test de la caractérisation des macropores par analyse d'image	26
1.	Résultats de la porosité totale du sol.....	27
C.	Evolution de la vie biologique du sol (uniquement pour la parcelle A)	27
1.	Analyse des populations de collemboles et d'acariens.....	27

VI. Discussion	29
A. Le développement des engrais verts	29
1. Bilan des mélanges testés sur la parcelle de recherche	29
2. Rendement en matière organique verte et en matière sèche.....	29
3. Apport en carbone organique et rapport C/N	30
4. Bilan des mélanges testés sur la parcelle de développement.....	30
5. Comparaison entre la parcelle de recherche et la parcelle de développement.....	31
B. L'effet des engrais verts sur la structure du sol de la parcelle A	32
1. Analyse de la porosité du sol au point zéro	32
2. Influence du système racinaire des engrais vert sur la structure du sol.....	32
C. L'effet des engrais verts sur la vie du sol	33
1. Evolution des populations d'acariens de l'ordre astigmata et de la famille des gamasidae ..	34
2. La différence des populations des bioindicateurs dépendant des modalités.....	35
3. Les populations de nématodes.....	35
D. L'évolution de la santé du sol.....	36
Conclusion	37
Bibliographie.....	38
Annexes	42

Glossaire et acronymes

1. **Humus** : matière d'une composition complexe et encore mal connue. Elle est constituée par de longues molécules polymérisées, des acides humiques et fulviques (= composés humiques), qui forment entre autres des complexes argilo-humiques

2. **Complexe argilo-humique** : association de particules d'argile et d'humus

3. **Fertilité effective**: analyser la capacité du sol à mobiliser les éléments nutritifs et à les mettre à la disposition des végétaux

4. **Agrosystème intensif** : système d'exploitation agricole conventionnel, cherchant à s'émanciper des contraintes environnementales, dans le but d'assurer un revenu sécurisé et croissant à l'agriculteur

5. **Ecosystème** : communauté d'êtres interdépendants, vivant dans un même milieu appelé biotope

6. **Exsudats racinaires** : les exsudats racinaires sont des fluides qui diffusent dans la zone méristématique et la zone où les cellules s'allongent et se différencient de l'intérieur de la racine dans le milieu extérieur. Il s'agit par exemple d'une excrétion de protons qui est capable de baisser le pH autour de la jeune racine pour attirer des bactéries ou solubiliser des éléments nutritifs

Acronymes

CDDM = Comité Départemental de Développement Maraîcher

DM = Dry Matter

FM = Fresh Matter

FS = Fallow Soil

P0 = point zéro, prélevé avant la mise en place des engrais verts

P1 = point récolte, prélevé à la récolte des engrais verts

P2 = point dégradation, sera prélevé avant la récolte de la culture suivante des engrais verts

Liste des annexes

Annexe I :	Liste des engrais verts possibles selon l'ITAB
Annexe II :	La méthode de Newman
Annexe III :	Exemples d'analyse l'activité enzymique
Annexe IV :	Site des exploitations
Annexe V :	Plan d'essai, parcelle de recherche
Annexe VI :	Plan d'essai parcelle de développement
Annexe VII :	Schéma d'un infiltromètre:
Annexe VIII :	Démarche d'un test d'e la conductivité hydraulique en non saturé
Annexe IX :	Schéma d'une Berlèse
Annexe X :	Résultats d'analyse de la nématofaune par le laboratoire ELISOL

Liste des illustrations

Figure 1 : Crop rotation in the Pays de la Loire	7
Figure 2 : Soil food web of a shortgrass steppe (Cheek, 2013)	11
Figure 3 : Frise chronologique du projet Pathosol. Tous les actions effectués concernant les quatre points analysés, engrais verts, vie du sol, structure du sol et santé du sol sont indiquées.	21
Figure 5 : Parcel B: Quantity of fresh and dry matter	23
Figure 4 : Parcel A: Quantity of fresh and dry matter	23
Figure 6 : Parcel A : Quantity of nitrogen (N), phosphor (P) and potassium mobilisation through the green manure assortments	23
Figure 7 : Parcel B : Quantity of nitrogen (N), phosphor (P) and potassium (K) mobilisation through the green manure assortments.....	23
Figure 8 : Parcel A : Deposition of organic carbon.....	24
Figure 9 : Parcel B : Deposition of organic carbon.....	24
Figure 10: Parcel A : Carbon-to-nitrogen ratio (C/N).....	24
Figure 11 : Parcel B : Carbon-to-nitrogen (C/N) ratio.....	24
Figure 12 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of the soil at P0	24
Figure 13 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of O – Mi – V	25
Figure 14 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of IRG – B	25
Figure 15 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of the fallow soil.....	25
Figure 16 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of S – P	25
Figure 17 : Parcel A : Macropores distribution of bed edge 0 cm	25
Figure 18 : Parcel A : Macropores distribution of bed center 0 cm	25
Figure 19 : Parcel A : Macropores distribution of bed edge 30 cm	25
Figure 20 : Parcel A : Macropores distribution of bed center 30 cm.....	50
Figure 21 : Parcel A : Soil porosity of P0 according to bed edge 0 cm and 30 cm and bed center 0cm and 30 cm	26
Figure 22 : Parcel A : Dependency of hydraulic soil perviousness on soil porosity at a pressure of 0,05 kPa	26
Figure 23 : Parcel A : Evolution of springtails between the mean of P0 and P1 according to assortment	26
Figure 24 : Parcel A : Evolution of different soil life between the mean of P0 and P1	26
Figure 25 : Parcel A : Evolution of gamasidae mites between the mean of P0 and P1 according to assortment	26
Figure 26 : Parcel A : Evolution of astigmata mites between the mean P0 and P1 according to assortment	26
Figure 27 : Parcel A : Fusarium dispersion among different assortments during the growing period 15.04.2013-24.06.2013.....	27
Figure 28 : Parcel A : Fusarium dispersion among different assortments during the growing period 25.06.2013-25.07.2013.....	27
Figure 29 : Distribution of macropores according to total soil porosity in bed edge 0 cm and 30 cm and bed center 0 cm and 30 cm.....	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Criterion of selection and ten chosen species for green manure assortments according to literature (Felgentreu 2013 (communication personnelle), Renaudat 2012, Pousset 2011, Chambre d'Agriculture 2011, Sirjean 1997, Abergel 1997, [7]	14
Tableau 2 : Research parcel : Sown quantity and surface compared to literature (Felgentreu, 2013) and composition of the three green manure assortments oat – millet – vetch, Italian raygrass – nuckwheat and sorghum – lacy phacelia	15
Tableau 3: Research parcel : Cultivation and soil working during the last three years	15
Tableau 4 : Screening : Sown quantity and surface according to subunits and composition of ten green manure assortments	16
Tableau 5 : Pores classification according to size and shape (Hallaire, 2013)	18
Tableau 6 : Results of the evaluation of the ten green manure assortments according to different criterion of evaluation. The assortments O – Mi – V and F mi p – V seem to be the most interesting The assortments L – B, O – B and IRG – B seem to be the less interesting.	22
Tableau 7 : Relation key between capillary potential and pore size and size class	31

Avant-propos

« The earth's soil resources are limited both in area and in quality. Up to 70% of the available land is not ideal for agriculture. The total area of destroyed and degraded soils which were once biologically productive is estimated to be the colossal figure of about 20 million km², or more than the entire arable area used for agricultural purposes at the present time (14 or 15 million km²), whereas the global area of lands potentially fit for farming totals about 32 million km². » (Kodova, 1977).

« Les ressources en sols sont limitées, à la fois par leur quantité et leur qualité. Presque 70 % des terres disponibles ne sont pas idéales pour l'agriculture. La surface totale des sols dégradés et détruits ayant eu un jour une fertilité biologique est estimée à approximativement le chiffre astronomique de 20 million de km². Autrement dit, c'est plus que la totalité des terres arables actuellement exploitées par l'agriculture (14 à 15 million km²), tandis que la superficie des terres potentiellement utilisables en agriculture est d'environ 32 millions km² » (Kodova, 1977).

I. Introduction

A. La perte de terres arables et les conséquences pour les terres restantes

La surface destinée aux grandes cultures et à la production de fruits et légumes est limitée. Elle est d'environ 44 millions de km², dont 16 millions de km² utilisés actuellement [1]. Avec une démographie croissante (+ 13,11% entre 2000 et 2010, [1]), la demande en produits agricoles tels que les fruits et légumes augmente continuellement. De fait, la production doit se faire sur les terres arables restantes (augmentation de production fruits et légumes entre 2000 et 2010 : +32% [1]). Par conséquent, l'agriculture a assisté, depuis quelques décennies, à une rapide évolution des techniques de production en négligeant la qualité des sols (Chaussod, 1996). Une intensification de l'utilisation des sols est mise en œuvre par les producteurs, ce qui entraîne la fatigue des sols et une diminution de la fertilité des terres arables (Chaussod, 1996). La fatigue du sol s'exprime à travers une pression phytopathogène croissante, causée par une accumulation de nématodes nuisibles et de champignons du groupe des actinomycètes. L'implication des *pythium*, *rhizoctonia* et *pseudomonas* reste à confirmer (Spethmann et Otto, 2003).

Au-delà des grandes cultures, c'est surtout le maraîchage qui est concerné du fait des cycles de cultures généralement plus courts qu'en production fruitière. Même si l'intensification de la production reste toujours importante, avec pour objectif l'augmentation de rendement, dès les années 1990 l'objectif prioritaire de la recherche en agronomie change. Une sensibilisation du consommateur a alors commencé à se mettre en place. Il est devenu de plus en plus important de comprendre les effets d'une agriculture mécanisée sur l'environnement : le sol, la nature et les hommes. Ceci se met en place, afin obtenir un développement durable avec pour objectif la préservation de la fertilité des sols et la lutte contre une fatigue du sol (Day et Field, 2009).

Comme la dégradation des sols est un phénomène mondial, les terres arables en France sont également touchées par le phénomène de fatigue du sol. « *L'état des sols en France, en Europe et dans le monde est assez désastreux. Nous avons connu une chute extrêmement importante* » (Rousseaux 2011 [2]). « *Elles [les chambres d'agriculture] parlent de "fatigue des sols", pour pudiquement dire "mort des sols"* » (Rousseaux 2011 [2]).

B. La France et la production légumière

La France fait parti des principaux pays producteurs de légumes en Europe. En 2011, la France a produit 5,8 millions de tonnes de légumes, 7% de plus qu'en 2010 sur 6% de terres en plus [1]. Dans les 30 dernières années, la production en légumes a diminué de 15,2%. Dans le même temps, la surface de production a diminué de 43,9% [1]. Même sans prendre en compte la production hors sol, cela signifie une intensification de la production et par conséquent de l'utilisation du sol. Les producteurs essaient de maintenir la fertilité du sol pour éviter une baisse du rendement. Ils luttent contre une pression des agents phytopathogènes en utilisant par exemple, des fongicides comme le métham sodium (Mével, 2013 (communication personnelle)). Une utilisation au long terme de ces produits n'est pas une solution. En effet, des essais au long terme, 13 ans, ont montré que la désinfection des sols par le métham sodium a seulement un effet positif les 5 premières années. Ensuite, l'augmentation du rendement n'est plus significative. Plus encore, et à partir de la 11^{ème} année, on observe des chutes de rendements (Höflich et Steinbrenner, 1988, Höflich, 1977).

En parallèle des traitements du sol, les producteurs protègent leurs cultures en appliquant des traitements chimiques. En 2009, 67700 tonnes de produits phytosanitaires ont été utilisés en France, c'est le 1^{er} utilisateur en Europe, devant l'Italie avec 47981 tonnes et l'Allemagne avec 26716 tonnes [1]. Ce type de produit n'est pas sans risques pour l'environnement et la qualité de vie humaine.

Dans ce contexte, la France a mis en place le plan Ecophyto 2018. Celui-ci vise à diminuer l'utilisation de produits phytosanitaires d'au moins 50% entre 2008 et 2018 [3]. Ce programme comprend la recherche de solutions alternatives, plus particulièrement dans les grands bassins de production maraîchère comme Nantes et plus largement dans la région des Pays de la Loire.

C. Contexte

1. Situation nantaise

Le bassin de production nantais, dans le département de la Loire-Atlantique, est formé par les dépôts alluvionnaires de la Loire. De ce fait, les sols y sont très sableux mais pauvres en matière organique (< 1%, Hallaire, 2013 (communication personnelle)). Les sols sont très drainants et se réchauffent facilement et relativement tôt dans l'année. De plus, le climat y est océanique, c'est-à-dire humide (les précipitations oscillent entre 600 et 800 mm par an) et tempéré, il s'adouci par la proximité de la mer. Les températures moyennes annuelles se situent entre 11 et 13°C avec une faible amplitude thermique entre l'été et l'hiver [4]. En conséquence, les producteurs du bassin se sont majoritairement tournés vers la production maraîchère et primeur de contre saison. Cette dernière représente une niche (Verron, 2013 (communication personnelle)).

Une intensification et une spécialisation dans des cultures adaptées ont pris place entraînant la disparition de certaines cultures emblématiques telles que la carotte. Aujourd'hui le département est le leader français dans la production d'au moins cinq produits. Il s'agit de la mâche, du poireau de primeur, du concombre, du radis et du muguet [5]. On y enregistre la plus grosse production de mâche d'Europe avec 34000t/an, soit 60% de la production européenne et 80% de la production française [6]. D'autres produits y sont également cultivés, c'est le cas notamment du navet, des jeunes pousses de salades ou de la roquette.

L'intensification des cultures est permise par un système de production avec rotations courtes ou inexistantes. La conséquence en est le développement et l'augmentation des pressions de maladies liées aux agents telluriques, bactérioses et fusarioses. Cette contamination est également due à des applications d'intrants chimiques utilisés contre des phytopathogènes du sol pour protéger les cultures. Ils induisent une résistance et une sélection des ravageurs (Soltner, 1975). Ainsi, la fusariose, *Fusarium* sp., touche la production des radis (Mével, 2013 (communication personnelle)) et le *Thielaviopsis basicola* la production de mâche (Gérard, 2013 (communication personnelle)).

Le travail intensif du sol, engendré par un système de culture à rotations courtes et des traitements phytosanitaires, perturbe l'équilibre physico-chimique et biologique du sol (Soltner, 1975). La conséquence en est une diminution de la présence d'auxiliaires naturels tels les nématodes ou les acariens qui se nourrissent des mycophages (Judson, 2013 (communication personnelle)). Avec la mise en place du plan Ecophyto 2018, une solution chimique contre une pression des agents phytopathogènes croissante devient moins envisageable. Pour améliorer l'état sanitaire du sol, augmenter sa fertilité et lutter contre sa dégradation, de nouvelles méthodes sont alors recherchées.

En 2013, l'ARELPAL (Association Régionale d'expérimentation Légumière des Pays de la Loire) qui coordonne l'ensemble des actions de recherche et d'expérimentation légumières régionales en Pays de la Loire a initiée le projet « Pathosol ».

2. **Projet PATHOSOL**

Il s'agit d'un projet de lutte contre les agents pathogènes du sol en cultures légumières. L'objectif de ce projet est d'assainir le sol. Pour cela, diverses méthodes de luttés alternatives à la protection phytosanitaire chimique sont envisagées. Ces méthodes comprennent la mise en place de nouveaux itinéraires culturaux, intégrant des couverts végétaux dans les rotations annuelles, l'utilisation des techniques de solarisation et de biodésinfection, dans le but de réduire la pression des agents pathogènes telluriques, et également la stimulation de l'activité microbienne des sols. Ce projet, prévu sur trois ans et débutant en 2013, se décompose en quatre actions :

1. Etat des lieux des connaissances sur les modes de régénération des sols par les méthodes alternatives (indicateurs de la qualité biologique et agronomique des sols, méthode d'identification, de mesure et de contrôle des pathogènes dans le sol de certaines cultures légumières concernées par l'étude, entre autres pour la mâche et le radis)
2. Optimisation de mise en place des différentes techniques connues (ex. désinfection à vapeur)
3. Validation de méthodes de lutte contre les pathogènes par la régénération des sols (mise en place d'engrais verts en interculture, solarisation, apport d'intrants alternatifs, biofumigation, combinaison de méthodes alternatives)
4. Communication avec les partenaires et les producteurs

Les actions se limitent au plein champ et aux cultures sous abris froids. Elles sont portées par différents maîtres d'œuvre comme le CDDM, le CDDL, le GDM, Ctifl.

Le CDDM travaille actuellement sur les actions 2 et 3 avec la mise en place en plein champ d'engrais verts en interculture, ce qui constitue le noyau de ce stage. Il s'intègre entièrement dans la troisième action. La problématique traitée fait partie des recherches pour répondre aux objectifs du projet.

3. **Problématique**

La problématique est à considérer dans le contexte du maraîchage nantais en culture de plein champ :

Est-ce qu'une culture d'engrais verts est capable d'améliorer l'état sanitaire du sol à moyen terme en diminuant la pression des agents phytopathogènes via des influences positives sur la structure du sol et sa vie biologique ?

Vu que le projet est mis en place pour trois ans, seuls les premiers résultats concernant des influences des engrais vert sur la structure du sol et la vie du sol seront abordés. En effet, la diminution de la pression des phytopathogènes est surtout visible dans le moyen terme.

4. **Plan du mémoire**

Dans une première partie de bibliographie, la structure du sol et les moyens de l'améliorer, des engrais vert et leurs effets sur le sol ainsi que des bio-indicateurs seront présentés. La partie « matériels et méthodes » présentera les essais et tests qui ont été mis en place pour répondre à la problématique. Puis, les résultats seront présentés et discutés.

II. Recherches bibliographiques

A. La structure physique et biologique du sol

L'évaluation de l'état d'un sol implique de considérer son fonctionnement au regard de sa structure physique et biologique (Laval, 2009).

1. La structure physique

La structure physique du sol est influencée par la nature de la roche mère, le climat, l'inclinaison et l'exposition du terrain ainsi que par l'homme (travail du sol) (Bertrand et Renaud, 2009). Ces éléments réunis façonnent une macrostructure et une microstructure (Pusset, 2011) :

- La microstructure correspond à l'assemblage des particules élémentaires qui constituent le sol. Elle résulte le plus souvent de la floculation d'éléments fins colloïdaux provenant de la destruction des roches et de l'évolution des matières organiques. Il s'agit surtout de deux colloïdes essentiels : l'humus (glossaire 1) et l'argile. Ils forment ensemble des complexes argilo-humiques (glossaire 2) qui jouent un rôle important dans la fertilité des sols. Ceci est dû à leur capacité d'adsorber les éléments nutritifs comme le potassium et d'augmenter la rétention de l'eau (Pousset, 2011).
- La macrostructure désigne surtout la répartition, la forme et l'importance de diverses cavités présentes dans le sol (fissures, canaux de vers de terre, traces de racines...). Elle dépend en grande partie de l'activité biologique présente dans la terre. Elle crée ainsi la porosité du sol (Pousset, 2011). Cette dernière est très sensible aux travaux du sol et est donc utilisable comme indicateur sur l'évolution de celui-ci (Hallaire, 2013).
- Un sol sableux a peu de structure car les éléments qui le constituent sont peu liés entre eux (Pousset, 2011).

2. La structure biologique

Plusieurs paramètres sont importants au regard de la qualité biologique du sol (Bertrand et Renaud, 2009).

a) La fertilité du sol

La fertilité du sol est la capacité d'un sol à transformer les apports de matière organique vivante ou morte en nutriments assimilables par les végétaux et donc en biomasse végétale pour créer des ponts entre le sol minéral et la plante (= fertilité effective (glossaire3))(Bertrand et Renaud, 2009). Elle dépend de la capacité du sol de retenir l'eau et les éléments nutritifs qui impliquent une bonne structure physique du sol. La perte de la fertilité du sol est causée par :

- Un manque de biodiversité dans l'agrosystème (glossaire 4) à cause de l'intensification de certaines cultures (Bertrand et Renaud, 2009).
- La perte de vie du sol, surtout dans les sols sableux car ils sont pauvres en matière organique (Hallaire 2013 et Bourguignon 2013 (communication personnelle)).
- La destruction de la structure du sol via un travail trop exigeant.
- Une mise à nu des sols.

L'utilisation modérée du labour, l'installation des inter-rangs, la mise en place de couverts végétaux, l'introduction des rotations culturales qui cassent les cycles des phytopathogènes, et l'apport en matière organique diminuent la perte de fertilité du sol (Bertrand et Renaud, 2009). L'entretien de la fertilité du sol dépend également de l'activité des organismes du sol (Kautz, 2004).

b) La vie du sol

La faune du sol représente jusqu'à 5 % de la biomasse du sol (Pousset, 2011). Elle se différencie en microfaune (< 0,2 mm, surtout des Protozoaires et des Nématodes, vie dépendante de l'humidité), mésofaune (0,2 mm – 4 mm, surtout des collemboles et des acariens, dépendent ou non de l'humidité), macrofaune (4 mm – 80 mm, surtout des lombrics, myriapodes, arachnides) et la mégafaune (> 80 mm, animaux des grandes tailles (taupes et autres)) (Bachelier, 1963). Une diversité de la vie maintient l'équilibre du sol et empêche l'installation d'un groupe dominant (nématodes phytoparasitaires, *Fusarium oxysporum*, etc.).

La perturbation de la faune du sol est causée par le travail du sol, une immersion en milieu anaérobie (Bertrand et Renaud, 2009), l'utilisation des traitements chimiques désinfectant le sol (Kodova, 1977) comme le métham sodium... De suite la consommation de matière organique est limitée. Le reste s'accumule de façon à ce que les plantes n'aient plus accès aux nutriments. De ce fait, le sol perd sa fertilité.

Il existe d'autres causes de la perte d'activité microbiologique du sol. Parmi ces dernières on note : la dégradation de la structure physique du sol et la réduction de l'activité de la vie du sol, qui sont essentiellement causées par un manque de matière organique. Une conséquence directe de ce phénomène est une augmentation des pathogènes telluriques ce qui se traduit par la fatigue du sol (Gamliel, 2000, Calvet, 2011). Deux solutions sont retenues pour améliorer la qualité du sol.

1. L'amélioration de la structure du sol	2. La stimulation de la vie du sol
---	---

B. Possibilités pour améliorer la structure du sol et stimuler la vie du sol

1. L'application des catalyseurs

La stabilité de la structure du sol peut être améliorée par l'application de catalyseurs aux porphyrines de fer : ils favorisent une photo-polymérisation des composants aromatiques des substances moléculaires humiques du sol. Ceci augmente la liaison entre les particules du sol et stabilise sa structure. Cette méthode reste cependant encore innovante et récente (Spaccini et Piccolo, 2012).

2. L'apport de matière organique

"Farming is a joke without manuring"(proverbe chinois, (Yang, 2006)

En chine, on sait depuis longtemps que l'apport de matière organique est essentiel pour maintenir la fertilité et la productivité du sol. Il est un facteur clef dans la nutrition des plantes cultivées. L'apport de matière organique est également une solution aux problèmes tels que la pression phytosanitaire (Yang, 2006). Il est considéré aujourd'hui comme l'un des indicateurs le plus important de la qualité du sol (Riley, 2008). L'apport de matière organique, qui contient du carbone organique, stimule la vie du sol. Le carbone organique est une ressource importante pour les microorganismes du sol (Elfstrand, 2007).

En la dégradant, ils libèrent des éléments nécessaires pour les plantes. Le taux des microorganismes augmente en fonction du taux de carbone organique disponible (Elfstrand, 2007).

La solution choisie est la matière organique. Elle est importante pour entretenir et améliorer la structure du sol et pour fournir sa vie biologique.

C. Importance de la matière organique

La matière organique est composée d'hydrates de carbone organique (sucre soluble, amidon, cellulose, lignine), de matières azotées (protéines), de matières grasses, de sels minéraux et de substances spéciales (vitamines, chlorophylle) (Pousset, 2011). Ces composants sont impliqués dans la formation des complexes organo-minéraux basiques jusqu'à la stabilisation de la plus grande taille des agrégats du sol. Ils influencent donc la porosité et la conductivité hydraulique (capacité d'infiltration de l'eau) du sol (Spaccini et Piccolo, 2012).

Une bonne circulation de l'eau et de l'air stimule la vie du sol (Pousset, 2011). Concernant les sols sableux en particulier, l'apport de matière organique a un faible impact sur la structure du sol s'il n'y a pas de vie microbologique (Soltner, 1975). Cette activité est stimulée par les ressources nutritives et dégrade la matière organique en humus. La matière organique détermine donc indirectement le montant et la disponibilité de l'eau, des éléments nutritifs et le taux d'échanges gazeux (Spaccini et Piccolo, 2012). Elle augmente le niveau de fertilité du sol qui aide à retrouver un équilibre biologique (Coutin, 1982 ; Davet, 1996 ; Vannier, 2009).

D. Analyse de l'effet d'apport de matière organique

1. L'évolution du taux et des différentes formes de matière organique peut-être mesuré en utilisant la méthode Hérody (Riou, 2013 (communication personnelle)). Elle permet de distinguer plusieurs fractions de Matière Organique

- La matière organique active (= matière organique totalement oxydable, elle se compose de l'humus stable (= chaînes carbonées longues) et de la matière organique fugitive/fraîche (= chaînes carbonées courtes))
- La matière organique inactive (= partiellement oxydable, elle est composée des matières organiques non évoluées, ni minéralisées, ni humifiées)

La méthode Hérody est un diagnostic de sol basé sur l'observation du terrain et des analyses de sol spécifiques. Les paramètres analysés sont:

- La capacité du sol à retenir et fixer les éléments minéraux
- La sensibilité du sol au tassement
- La matière organique et ses différentes formes
- La capacité du sol à « digérer » la matière organique

2. Une autre méthode est l'analyse de la conductivité hydraulique en surface, à 0 cm et en profondeur, à 30 cm (Mandal, 2003). La conductivité hydraulique peut être évaluée par la méthode de Klute de 1965 qui mesure la vitesse avec laquelle l'eau passe à travers un prélèvement de sol (Mandal, 2003).

3. La distribution des différentes tailles de particules est mesurée pour analyser la structure du sol. La méthode de Yoder de 1936 peut être une méthode utilisable à cet effet. En tamisant le prélèvement du sol dans l'eau les différentes tailles d'agrégats se séparent. Les différentes fractions sont pesées après le tamisage pour calculer les proportions des différentes catégories des tailles des agrégats (Mandal, 2003).

4. Le taux de carbone organique dans le sol peut être utilisé pour estimer la quantité de microorganismes dans le sol qui dégradent la matière organique. Pour calculer le taux de carbone organique dans le sol, la méthode Walkley – Black est utilisée (Mandal, 2003).

E. Méthodes pour apporter de la matière organique

La matière organique peut être apportée sous plusieurs formes :

- En Chine rurale, tous les déchets organiques sont recyclés en les utilisant comme matière organique dans les champs (résidus des animaux, déchets organiques de la cuisine, résidus d'épuration des étangs, boue, compost, résidus du jardinage...) (Yang, 2006).
- Les résidus de récoltes peuvent être apportés comme mulch sur les champs (Yang, 2006).
- Sous forme d'apport de sciure (Elfstrand, 2007).
- Une autre forme d'apport en matière organique peut être l'application de paille ce qui a un effet stimulant sur la vie du sol et sa structure (Kautz, 2004).
- Un apport de toutes formes de matière organique (animaux, tourbe, matière verte, bois etc.) est possible sous forme de débouchons comprimés (Gérard et Thoument 2013)
- L'amélioration de la structure du sol et de sa vie biologique sont assurées en majeure partie par l'apport de matière organique qui est fait avec la mise en place d'engrais verts (Pousset, 2011 ; Kautz, 2004 ; Soltner, 1975).

En 2004, selon Kautz l'apport en matière organique sous forme d'enfouissement des engrais verts est préférable afin de maintenir et d'augmenter la qualité des sols sableux.

L'apport de la matière organique sous forme des engrais verts est donc poursuivi.

F. Les engrais verts

Il est constaté que les engrais verts peuvent être une technique de lutte ou une technique prophylactique contre des ravageurs et les pathogènes telluriques (Soltner, 1975). Ils sont donc une des solutions qui est mise en place pour réduire la fatigue du sol sous abris ou en plein champ.

1. L'histoire des engrais vert

L'utilisation d'engrais verts entre les cultures est probablement née en Chine il y a 3000 ans, avec le début des installations des systèmes agricoles sédentaires. L'utilisation en inter-culture d'engrais verts rend la production plus extensive (Delgin, 2002). En 1700 les paysans utilisaient déjà les engrais verts comme le lupin, le pois fourrager et les trèfles grâce, notamment à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique.

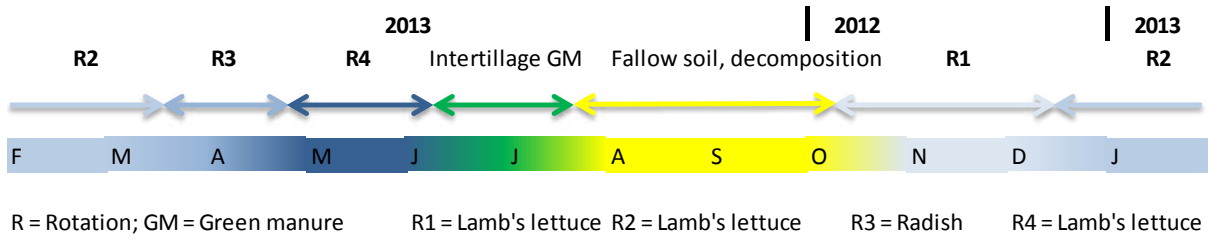


Figure 1 : Crop rotation in the Pays de la Loire

Ceci permettait d'améliorer la fertilité du sol pour les cultures suivantes (Joffe, 1955 ; Allison, 1973). Les engrais vert sont particulièrement utilisés en Allemagne, en Chine et au Japon, où ils sont intégrés dans les rotations, plus particulièrement sur les sols sableux qui sont moins fertiles.

2. Définition d'un engrais vert

Selon le Soil Science Society de 1965, un engrais vert est un matériel végétal incorporé vert dans le sol, après le stade de maturité, avec le but d'améliorer le sol dans sa fertilité. Il peut s'agir de toute sortes de matière végétale (brindilles, feuilles, plantes...). Les résidus de récolte sont, selon Allison en 1973 exclus car ils n'apportent aucune matière extérieure au champ. La culture d'une légumineuse apporte par contre de l'azote. De nos jours, les engrais verts sont des cultures souvent insérées dans les plannings de rotation en tant qu'inter-culture. Ceci a pour but de créer une couverture végétale sur le sol jusqu'à leur destruction, par broyage ou gel, et leur enfouissement (Pousset, 2011).

3. Objectifs d'utilisation des engrais vert

Le projet « Pathosol » vise différents objectifs par le biais de la mise en place d'engrais verts et en tenant compte du contexte de la région Pays de la Loire.

a) Amélioration de l'état sanitaire du sol et des cultures

Les couverts végétaux peuvent participer à la maîtrise des bio-agresseurs. Certains couverts montrent des effets biocides sur quelques maladies. Le sorgho par exemple libère pendant sa dégradation l'acide cyanhydrique une molécule qui a des propriétés fongicides (Dufils et Goillon, 2011). Les couverts végétaux favorisant la biodiversité, ils permettent la venue d'auxiliaires de cultures (la phacélie attire par exemple les carabes ou d'autres auxiliaires prédateurs de pucerons).

Une mise en place d'engrais verts permet aussi de casser le cycle cultural en intercalant une espèce d'une famille botanique différente. Ceci a pour effet de stopper le développement des agents pathogènes. Pour la région Pays de la Loire cela implique de choisir des plantes n'appartenant pas aux brassicacées, aux valérienacées et aux liliacées.

Les engrais verts permettent une meilleure croissance de la culture par la suite en améliorant la structure du sol. Une meilleure croissance des plantes signifie un meilleur état sanitaire et donc une meilleure résistance aux maladies.

b) Stimulation de la vie dans le sol

Lorsqu'un débris végétal atteint le sol, il est rapidement colonisé par des bactéries et des champignons qui attirent d'autres acteurs de la mésofaune du sol. En fournissant de la matière organique, les engrais verts stimulent la vie du sol. Pour un maximum d'animation, il faut enfouir les plantes lorsque l'activité biologique est à son maximum soit, au printemps ou en été. Pour la région Pays de la Loire, cela signifie l'installation d'engrais vert lors de cycles de croissance courts, pendant l'été. Les engrais verts entrent dans les rotations culturelles des producteurs (figure 1).

c) Amélioration et stabilisation de la structure du sol

Les engrais verts tels que les graminées ont un système racinaire puissant permettant de fractionner le sol et d'améliorer sa porosité. Dans les sols avec une texture fine comme les sols sableux, les engrais verts sont capables d'agglomérer le sol, pour le rendre plus grumeleux (Allison, 1973). Les bactéries et les autres organismes dégradant la matière organique sécrètent des exsudats (glossaire 5). Ceux-ci collent les particules du sol et créent des micro-granulats qui vont donner une structure grumeleuse à la terre et améliorer également la perméabilité du sol (Bertrand et Renaud, 2009). Sans renouvellement d'apport de matières organiques, les micro-agrégats vont disparaître, car les populations bactériennes utilisent le peu de matière organique restant pour leur maintien.

En stabilisant la structure du sol, les engrais verts contribuent à la protection contre l'érosion en fixant la couche superficielle du sol (Allison, 1973). L'ombre produite par les feuilles protège la surface des sols du dessèchement et des impacts de la pluie. Cela réduit donc la formation d'une croûte (Allison, 1973).

d) Création de matière organique

Selon Allison, plus la production d'humus est grande, plus le taux de la matière fraîche dégradable incorporée est grande (Allison, 1973).

Les engrais verts ne permettent pas d'augmenter le taux de matière organique de manière durable car ils sont très peu lignifiés et donc leur matière organique est très peu humifiable. Par contre, ils assurent la disponibilité en matière organique vite dégradable.

Selon Löhnis en 1926, la mise en place des engrais verts ne sert pas à augmenter la quantité de matière organique, mais à la diminuer parce que la culture des engrais verts implique des perturbations du sol ce qui favorise une oxydation accélérée et donc une dégradation accélérée de la matière organique.

e) Pièges et sources d'éléments nutritifs

Les engrais piègent les éléments en profondeur dans le sol et les remontent en surface, ce qui facilite leur accès pour la culture suivante.

Les capacités à piéger l'azote sont différentes d'une espèce à l'autre. Les brassicacées ont une forte puissance à piéger l'azote, ceci, grâce à leur développement rapide. Les légumineuses elles, captent d'abord l'azote du sol avant de capter l'azote atmosphérique (Ghesquière et Cadillon, 2012).

A côté de ces objectifs il y en a d'autres, qui sont pris en compte avec une installation d'engrais verts : ils sont pris en compte dans la partie « matériels et méthodes ».

Tous les objectifs ont influencé le choix des espèces utilisées comme engrais vert.

4. Différentes familles d'engrais verts utilisables

Il y a une grande variété d'espèces utilisées comme engrais verts (Annexe I)
Les familles les plus utilisées sont présentées ci-après.

a) *Graminées*

Les graminées comportent les céréales (avoine, orge, seigle, millet, etc.) et d'autres plantes comme le raygrass italien, le moha, le sorgho etc. Elles ont des systèmes racinaires plutôt fasciculés. Elles sont particulièrement bien adaptées et efficaces pour structurer le sol en surface. Après l'enfouissement des plantes, il y a une amélioration des agrégats dans les sols sableux par l'accumulation des grains de sable qui se combinent avec de la matière organique fraîche (Allison, 1973). Ces structures durent six mois avant que la matière organique « collante » soit complètement dégradée et les agrégats dissolus (Mével, 2013 (communication personnelle)).

Les racines des graminées sont également capables de sécréter des exsudats (acides, vitamines, enzymes). Ces exsudats permettent d'attirer les bactéries libres fixatrices d'azote (*Azospirillum*, *Azobacter*, *Bacillus*, etc.) (Davet, 1996), champignons et algues. Ils sont consommés par des organismes qui produisent des hormones, des composés azotés, substances médicamenteuses qui servent finalement à la plante comme protection ou nourriture et aident ainsi à diminuer la pression phytosanitaire (Pousset, 2011)

b) *Légumineuses*

Les légumineuses regroupent des espèces comme les trèfles, les lupins, les vesces, les pois. Avec des systèmes racinaires plutôt pivotants, elles sont capables de percer des couches dures du sol. Après la dégradation, les racines laissent des petites fissures et des pores tubulaires. Les racines des cultures suivantes sont capables de suivre ces espaces créés, en utilisant les éléments nutritifs qui ont été dégagés (Allison, 1973).

Leur symbiose avec les cyanobactéries du genre *Rhizobium* leur permet de capter l'azote de l'air (Girault et Turbeaux, 2012). Elles vivent dans des nodules créés par les racines des légumineuses. Ces bactéries lient l'azote atmosphérique et le mettent à disposition des légumineuses en tant qu'azote élémentaire. En échange, la plante leur fournit des molécules pour les nourrir. Pour les sols pauvres, il est supposé que deux tiers de l'azote total des légumineuses sont fixés à partir de l'air et qu'un tiers vient du sol (Allison, 1973).

c) *Brassicacées*

Les brassicacées regroupent des espèces comme les radis, les moutardes, les navets ou les choux. Elles se développent rapidement et produisent beaucoup de biomasse (Ghesquière et Cadillon, 2012). Leur croissance, par contre, est facilement bloquée par un stress hydrique ou un manque d'azote (Thomas, 2005). Elles produisent et diffusent des glucosinolates dans la terre par leurs racines, lorsqu'elles sont vivantes ou par décomposition de leurs tissus après leur mort. Ces molécules se dégradent en donnant des isothiocyanates. Elles ont une action dépressive sur de nombreuses espèces vivant dans le sol, comme les champignons, les bactéries, les microbes ... (Pousset, 2011 ; Felgentreu, 2013 (communication personnelle)).

Comme plusieurs brassicacées sont cultivées dans la région nantaise, radis, roquette et navet, elles sont bien exclues du choix à cause de leur biologie trop proche de celles des espèces cultivées.

5. Semer en mélanges

Les mélanges d'espèces réunissent les atouts de chaque espèce. La mise en place de plusieurs espèces simultanément accroît les chances d'une bonne couverture végétale. L'action des ravageurs est freinée (Ghesquière et Cadillon, 2012). Un mélange favorise l'établissement d'une concurrence positive entre les plantes qui initie une augmentation de la biomasse. La compétition initiée dans le sol favorise, avec des systèmes racinaires différents, une structuration plus complète et beaucoup plus profonde (Thomas, 2005). A sa destruction, le couvert laisse un réseau racinaire facilement utilisable par les cultures suivantes.

Des plantes élancées peuvent être combinées avec des plantes buissonnantes, des plantes grimpantes avec des plantes rases pour obtenir une bonne couverture du sol. Selon l'essai de Thomas, les mélanges contrôlent beaucoup mieux le salissement d'une parcelle qu'une espèce seule (Thomas, 2005). Les densités de chacune des espèces choisies doivent être optimisées afin d'éviter une surdensité et une trop forte concurrence qui ne permet pas le développement harmonieux et optimal des plantes. Il n'existe pas de mélange type. Un mélange avec trop d'espèces devient trop concurrentiel et est moins efficace (Ghesquière et Cadillon, 2012).

6. Effets des engrais verts

Bertrand et Renaud en 2009 proposent de prendre en compte plusieurs facteurs pour analyser l'impact des engrais verts sur le sol :

- Le profil pédologique, surtout l'horizon humifère où les plantes prennent racine. Cela est réalisable en prenant un profil d'enracinement du sol ou la mesure de la densité d'enracinement.
Une méthode pour analyser l'effet de la structuration du sol est la méthode de Newman de 1966 (Annexes II) qui mesure la densité d'enracinement (Mandal, 2003).
- La texture du sol en analysant la friabilité du sol créée par un équilibre des proportions de sable, de limon et d'argile.
- La structure en faisant des tests d'analyse de la conductivité hydraulique, la répartition et caractérisation des macro- et micropores et en calculant la porosité totale.
- Le teneur en éléments nutritifs : azote, potasse, phosphore en effectuant des prélèvements du sol qui vont être analysés en laboratoire.
- La teneur en matières organiques, mesurée par une analyse Hérody et une analyse du rendement des engrais verts.
- L'activité biologique du sol par analyse des bio-indicateurs.

Des analyses de la structure du sol et des bio-indicateurs sont choisies pour analyser l'effet des engrais verts

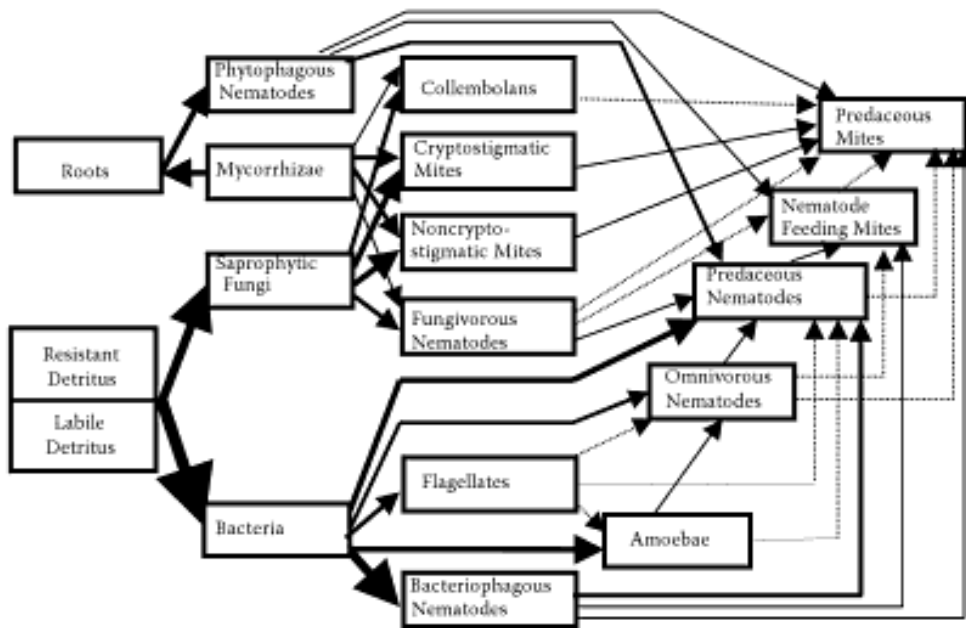


Figure 2 : Soil food web of a shortgrass steppe (Cheek, 2013)

G. Bio-indicateurs

Pour mettre en place, suivre et assurer les actions de protection et de gestion des sols comme l'implantation des engrais verts, il convient de définir des indicateurs qui permettent d'identifier et de quantifier les perturbations, les transformations du sol et leurs impacts sur les écosystèmes (glossaire 6). Les indicateurs utilisés usuellement reposent essentiellement sur des propriétés physiques et chimiques du sol. Les paramètres biologiques, les bio-indicateurs, quant à eux intègrent l'ensemble des stress environnementaux (pollution chimique, état physique du sol, variations climatiques, modifications biologiques...) et renseignent d'avantage sur l'état global du sol (Bispo *et al.*, 2009). Ces indicateurs doivent être pertinents, simples à utiliser, fiables, peu onéreux et faciles à interpréter (Bispo *et al.*, 2009).

Différentes parties de la vie du sol sont utilisables comme bio-indicateur pour analyser l'impact de l'apport de matière organique, notamment sur les sols sableux qui sont sensibles aux apports de matière organique (Kautz, 2004).

1. L'activité des microorganismes et le potentiel de minéralisation du carbone

L'activité des microorganismes peut être mesurée par la capacité de respiration basale.

La production de dioxyde de carbone du sol est mesurée via l'analyse infrarouge de gaz en utilisant la méthode d'Anderson et Domsch (Kautz, 2004)

L'analyse du potentiel de minéralisation du carbone (C_{min}) par la biomasse microbienne est également utilisable comme bio-indicateur potentiel (Devillers, 2009).

2. Activités enzymatiques

Une large gamme d'activités enzymatiques, résultant des nombreux processus métaboliques de la diversité fonctionnelle microbienne, peut être mesurée. Selon des études qui ont été faites sur les activités enzymatiques (activités hydrolases par exemple), celles-ci sont sensibles aux pratiques culturales, aux contaminants, aux pesticides, aux éléments traces métalliques et à l'apport de matière organique (Laval, 2009). Des exemples sont présentés dans les annexes (Annexe III).

3. La biomasse fongique

La biomasse fongique peut être considérée à part de la biomasse microbienne. L'écologie des champignons est surtout conditionnée par les caractéristiques globales du sol et moins par celles de leur micro-environnement. La biomasse fongique répond rapidement aux changements de pratiques culturales des sols (Laval, 2009). Cela permet une analyse rapide en mesurant la longueur ou/et le nombre d'hyphes par microscopie avant et après le changement de la culture. Cette méthode comporte une certaine difficulté car les hyphes sont très fins et le temps consacré à l'observation très long.

4. Les communautés de nématodes du sol

Les nématodes font parti de la microfaune du sol. Ils appartiennent à l'embranchement des némathelminthes (Davet, 1996). Ils apportent un grand nombre d'informations sur l'état de la microchaîne trophique du sol (compartiment microbien, microfaune et mésofaune) car ils sont des décomposeurs secondaires (bactérovores, fongivores, omnivores) (figure 2) et donc sont responsables de la décomposition et de la minéralisation des nutriments. Ainsi la connaissance de la structure de la communauté de nématodes renseigne sur la décomposition et la minéralisation de la matière organique. Elle renseigne également sur la structure du réseau trophique dans le sol, sur les compartiments bactériens et fongiques et donc sur la situation sanitaire du sol et sa capacité de résistance et de résilience (Villenave, 2009).

Ainsi *Pratylenchus penetrans*, *P. crenatus* et *P. neglectus* ont été retrouvés dans des sols fatigués et identifiés comme un vecteur de la fatigue du sol (Spethmann et Otto, 2003).

Les nématodes sont ubiquistes. Ils sont présents surtout dans les deux premiers décimètres de sol (Davet, 1996). A cause de la diversité d'espèces et du nombre d'individus, les nématodes sont les constituants les plus importants de la biomasse animale du sol. Leur nombre peut dépasser 200 milliards/ha (Davet, 1996). De ce fait, il y a une forte probabilité d'en trouver dans des sols sableux cultivés, même si les conditions ne sont pas optimales (sol drainant, alors que les nématodes préfèrent de l'eau libre pour migrer) (Davet, 1996).

5. Les acariens

Les acariens font parti des microarthropodes, dans l'ordre des arachnides. Les acariens sont le groupe d'arthropodes le mieux représenté dans tous les types des sols (Davet, 1996). Ils se trouvent dans les premiers centimètres du sol (0 cm – 5 cm). Ils supportent bien la sécheresse ce qui est important pour un sol sableux bien drainant (Davet, 1996). Ils demeurent actifs surtout en été. Les acariens du sol sont des consommateurs très actifs de débris végétaux, d'algues et de champignons. Ils jouent un rôle important dans les premiers stades de décomposition de la matière végétale (Davet, 1996). A côté des espèces détritivores, il y a aussi des acariens carnivores qui se nourrissent de collemboles et de nématodes (Coineau., 1997) (figure 2), ainsi que des nématodes phytophages. Une augmentation de la population des acariens aide à diminuer la pression sanitaire du sol.

L'identification des acariens nécessite une expertise particulière. Actuellement il n'existe pas d'acarologue sur le sol français (Judson, 2013 (communication personnelle)). Pour voir l'impact de la matière organique apportée par les engrais verts dégradés il est important de différencier les acariens détritivores des acariens carnivores.

6. Les collemboles

Les collemboles sont également des microarthropodes qui font parti des insectes ou crustacées, selon le point de vue des scientifiques. Ils se nourrissent surtout des débris végétaux, mais aussi de bactéries, d'algues, de filaments et de spores de champignons. Ils jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique (figure 2) (Davet, 1996).

Les collemboles aiment les habitats humides et supportent moins bien les temps chauds et secs (Davet, 1996). Ils préfèrent généralement les températures modérées de 10 à 30°C. Les espèces proprement terricoles des collemboles vivent dans les premiers 15 cm du sol. Leurs périodes de haute activité sont le printemps et l'automne (Davet, 1996).

Les collemboles constituent, après les acariens, le groupe d'arthropodes le plus représenté dans les sols (10.000 – 200.000/m² (Davet, 1996)). Ils supportent mieux que les acariens le travail du sol et, d'une façon générale, les perturbations de l'environnement.

7. La communauté de vers

L'activité de reproduction et le nombre de vers de différentes générations sont regardés avant le changement des pratiques culturales et après. Selon Capowiezen 2009, un fort impact des communautés de vers peut avoir des conséquences sur le fonctionnement du sol et son écosystème. Des épandages par exemple ont des effets bénéfiques sur les communautés de vers, ce qui est lié à l'apport de matière organique souvent considéré comme le principal facteur limitant les populations de vers dans les sols agricoles. L'apport de matière organique sous forme des engrais verts a un effet positif sur les communautés de vers (Capowiez, 2009). L'espèce *Lumbricus terrestris* est connue pour être particulièrement sensible à la quantité de matière organique. Par contre il est reconnu que la biodiversité des lombrics est relativement faible sur un site de maraîchage avec un travail du sol intensif.

Les collemboles, acariens et nématodes sont retenus comme bio-indicateurs
--

III. Objectifs du mémoire

L'objectif du mémoire est de créer des références bibliographiques en répondant à la problématique par l'installation et analyse des essais. L'autre objectif est de répondre aux hypothèses suivantes :

- L'introduction des engrais verts dans le cycle de production aide à maîtriser les phytopathogènes notamment la fusariose en culture des radis.
- Les engrais verts améliorent la structure du sol avec leur système racinaire et l'amendement en matière verte. Cela se vérifie par une augmentation de la rétention d'eau ainsi que des éléments nutritifs, une augmentation de la quantité des macropores et une augmentation de la porosité totale en diminuant la densité apparente.
- Les engrais verts stimulent la vie du sol. Leur culture et enfouissement augmentent la densité des populations de certains acariens, collemboles et nématodes.

Concernant les trois objectifs, la plus grande partie des résultats relative à l'effet de l'enfouissement des engrais verts va être obtenue après la fin du stage et n'est donc pas traitée dans ce mémoire. Les objectifs vont être poursuivis tout au long du projet Pathosol. Ils sont à regarder au long terme.

Tableau 1 : Criterion of selection and ten chosen species for green manure assortments according to literature (Felgentreu 2013 (communication personnelle), Renaudat 2012, Pousset 2011, Chambre d'Agriculture 2011, Sirjean 1997, Abergel 1997, [7])

	Poaceae				
Chosen species →	Oat (<i>Avena strigosa</i>)	Italian ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>)	Millet (<i>Panicum miliaceum</i>)	Foxtail millet (<i>Setaria italica</i> subsp. <i>Moharia</i>)	Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)
Criterion of selection ↓					
Suitability for sandy soils	++	+	++	++	++
Suitability for climate and season	+++	++	+++	+++	+++
Fast growing (growing period of 7 weeks) for high biomass production	+++	+++	++	+++	++
Simple in destruction	+++	+++	+++	+++	+++
Fast degradation	++	++	+++	++	+++
Weeds suppressive/ground covering	++	++	+	++	+
Adequate root penetration	Shallow rooting, good structuration capacities in topsoil	Shallow rooting, excellent structuration capacities in topsoil, light structuration effect on deeper soil levels	Taprooting, good structuration capacities in lower soil quite similar to sorghum	Shallow rooting, good structuration capacities in topsoil	Taprooting, excellent structuration capacities in lower soil, roots till 1,5 m depth, 60 cm in a few months
Mineral trapping	Nitrogen trapping	Nitrogen trapping		Nitrogen trapping	Nitrogen, potassium and phosphate trapping
Disadvantages/negative characteristics	Problems with aphids	Homogenous broadcasting sowing difficult because of the low weight, risk of regrowing	Needs constantly high temperatures for germination (15°C)	Slug sensibility	Needs constantly high temperatures for germination (15°C)
Other characteristics	Beneficial effect on nematodes Allelopathic effect against weeds	Positive phytopathogenic effect		Repressive effect against sclerotinia	Positive effect against nematodes
	Hydrophyllaceae	Polygonaceae	Fabaceae		
Chosen species →	Lacy phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	Buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	Spring vetch (<i>Vicia sativa</i>)	Crimson clover (<i>Trifolium incarnatum</i>)	White lupine (<i>Lupinus alba</i>)
Criterion of selection ↓					
Suitability for sandy soils	+++	+++	+	++	++
Suitability for climate and season	++	++	+	+++	+++
Fast growing (growing period of 7 weeks) for high biomass production	+++	+++	+++	++	++
Simple in destruction	+++	++	+++	+++	+++
Fast degradation	++	++	++	++	++
Weeds suppressive/ground covering	+++	+++	+++	+	+
Adequate root penetration	Shallow rooting, excellent structuration capacities in topsoil	Taprooting, good structuration capacities in lower soil	Shallow rooting, low structuration effect	Shallow rooting, good structuration effect in top soil	Taprooting (till 2 m), very good structuration in lower soil
Mineral trapping	Nitrogen trapping, calcium and potassium trapping	Phosphate trapping	Nitrogen accumulation from the air	Nitrogen accumulation from the air	Nitrogen accumulation from the air
Disadvantages/negative characteristics	Problems with aphids, expensive seeds, needs good soil preparation, dominance might cause problems with sowing in assortment with other species	Grows very fast, difficult for other species to compete for being harvested at the same time, risk of flowering and seed development	Sandy soil not most liked	Long in growing	Long in growing
Other characteristics	Bee friendly	Fast germination (< 1 week), bee friendly	Bee friendly Positive effect against turnip nematodes	Bee friendly, root exudates soil life stimulative Positive effect against turnip nematodes	Bee friendly

IV. Matériel et Méthodes

A. Les parcelles expérimentales et les mélanges testés

1. Critères de choix

Les espèces ont été choisies selon les critères suivants :

1. Choix de familles différentes des cultures maraîchères pour éviter la présence des ravageurs et des maladies. La mâche de la famille des valerianaceae est sensible au *Phoma valerianella*, *Rhizoctonia* sp., et *Thielaviopsis basicola*. Le radis, une brassicacée est sensible au *Fusarium oxysporum*. Un effet phytosanitaire sur ces maladies est souhaité avec les engrais verts.
2. Effet stimulant pour la vie du sol
3. Structuration du sol grâce aux forts systèmes racinaires, pour contrer un tassement du sol par les tracteurs
4. Croissance rapide de cinq à six semaines
5. Destruction et enfouissement faciles, sans repousses et avec une dégradation rapide en six à huit semaines : la mâche comme culture suivante, semée début octobre, est très sensible vis-à-vis de la présence de corps étrangers dans la culture à la récolte
6. Décomposition sans lignification avancée pour garantir un maximum de production de matière végétale (supérieure à 90 %)
7. Capacité de couverture du sol et germination rapide avec taux de germination fiable et homogène pour limiter les adventives
8. Adaptation au sol sableux, drainant et avec un taux de matière organique < 1% (teneur faible)
9. Adaptation au climat et à la saison: les espèces doivent pousser en juin et juillet dans un climat océanique avec des périodes de températures élevées (> 30°C) et des périodes sèches (absence de pluviométrie)
10. Piégeage des minéraux descendus dans les couches de terre inférieures
11. Disponibilité des espèces en grande quantité chez les fournisseurs de semences

2. Choix et densité de semis des espèces

Selon ces critères, onze espèces ont été choisies (tableau 1). Elles répondent, selon la littérature, à la majorité des critères en respectant le ciblage du CDDM : utiliser en priorité la famille des graminées.

Les espèces sont combinées en treize mélanges (tableaux 2 et 4). Les mélanges sont combinés de telle façon qu'il y a des espèces avec des systèmes racinaires pivotants et fasciculaires ensemble. Cela permet d'explorer et d'améliorer les horizons profonds et superficiels du sol.

Tableau 2 : Research parcel : Sown quantity and surface compared to literature (Felgentreu, 2013) and composition of the three green manure assortments oat – millet – vetch, Italian raygrass – buckwheat and sorghum – lacy phacelia

Modality	Surface	Seed quantity corresponding to literature	Really sown quantity
Modality 1 : Oat (<i>Avena strigosa</i>) – Millet (<i>Panicum miliaceum</i>) – Spring vetch (<i>Vicia sativa</i>) (O – Mi – V)	3411m ²	Oat : 20 kg/ha → 6,8 kg Millet : 10 kg/ha → 3,4 kg Spring vetch : 25 kg/ha → 8,5 kg	→ 10 kg → 4 kg → 9 kg
Modality 2 : Italian ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>) – Buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>) (IRG – B)	3411m ²	Italian ryegrass : 25 kg/ha → 8,5 kg Buckwheat : 15 kg/ha → 5,1 kg	→ 10 kg → 11 kg
Modality 3 : Fallow soil	1622m ²	Fallow soil control	→ 4 kg
Modality 4 : Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>) – Lacy phacelia (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)(S – P)	3369m ²	Sorghum : 15 kg/ha → 5 kg Lacy phacelia : 5 kg/ha → 1,7 kg	→ 7 kg → 11 kg

Tableau 3: Research parcel : Cultivation and soil working during the last three years

	Cultivation	Soil working
End 2011	Lamb's lettuce	Deep soil working (60 cm depth), rake (6 cm depth)
2012	Radish – lamb's lettuce – green manure – lamb's lettuce – lamb's lettuce	3x deep soil working, 3x rake, 2x grubber (40 cm depth), 1x harrow (4 cm depth)
2013	Radish – lamb's lettuce	1x rake, 1x grubber

Les mélanges sont repartis sur une parcelle de recherche (A) et une parcelle de développement (B) qui se trouvent dans le bassin nantais (Annexes IV). Ils se caractérisent par un sol sableux avec peu de matière organique (<1 %).

Parcelle A. La parcelle de recherche se trouve sur la commune de Petit Mars. On y trouve les mélanges qui semblent les plus prometteurs et qui ont déjà été retenus par le CDDM de l'an dernier, par rapport à l'objectif envisagé sur cette parcelle, trouver des espèces utilisables comme engrais verts qui :

- améliorent par leur système racinaire la structure du sol sableux, tassé en profondeur
- entretiennent la structure en surface du sol pour créer un environnement favorable à la vie biologique du sol
- ont un effet stimulant sur la vie du sol (augmentation des populations et probablement du nombre des espèces telles que les collemboles, les acariens...)
- ne perturbe pas la rotation de production (croissance et dégradation rapide)
- apportent de la matière organique fraîche afin :
 - d'avoir un effet inhibant sur les phytopathogènes (*Fusarium oxysporum*)
 - d'améliorer la fertilité du sol

La parcelle représente une surface de 1,44 ha. Elle est divisée en quatre modalités et trois répétitions qui sont reparties en trois blocs (Annexes V). Chaque répétition est divisée en deux sous-parcelles.

Il s'agit d'une parcelle cultivée avec quatre rotations par an (radis – mâche – mâche - mâche) (tableau 3), donc une parcelle est sollicitée de façon intensive. Le sol est travaillé régulièrement. D'autre part, des traitements phytosanitaires (herbicide et insecticide) ont été effectués sous forme de granulés sur les cultures précédentes (radis et mâche). Les effets sur la vie du sol sont pris en compte dans la discussion des résultats.

L'interculture d'engrais vert en 2012 dans cette parcelle est le premier essai d'engrais verts avant la mise en place du projet Pathosol (figure 3). La répartition des modalités a été conservée, avec la même localisation du témoin sol nu pour gagner un effet biannuel et cohérent aussi pour les années suivantes.

Les mélanges ont été semés le 12.06.2013 et le 13.06.2013 (tableau 2) (figure 3) avec des conditions météorologiques peu favorables (vent fort). Le sarrasin et la phacélie ont été semés au semoir mécanique. Un mauvais ajustement du semoir au début explique la grande différence entre les données de la littérature et la quantité semée. Le sorgho, la vesce et le millet ont été semés à la main ce qui explique une certaine hétérogénéité dans la densité des peuplements dans les répétitions. L'avoine et le raygrass italien ont été semés par un semoir amateur à pelouse manuel. A cause du vent et de la légèreté des semences, des kilos de graines supplémentaires ont été semés et il y a une distribution plus large. C'est pour cela que les graines ont aussi germé dans les passes pieds.

Les mélanges ont été arrosés 3 mm par jour et fertilisé avec un engrais en granulés : 265 kg/ha de NPK (12N-6P-19K) le 12.06.2013 et 245 kg/ha de « Entec Perfect » (14N-7P-17K) le 12.07.2013

Les mélanges sont récoltés et broyés le 25.07.2013 et enfouis le 31.07.2013 (figure 3).

Tableau 4 : Screening : Sown quantity and surface according to subunits and composition of ten green manure assortments

Subunit	Surface	Sown seed quantity corresponding to the experience at the CDDM
<p>Subunit 1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>) – millet (<i>Panicum miliaceum</i>)(Mi – B) Buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>) – oat (<i>Avena strigosa</i>)(O – B) Buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>) – white lupine (<i>Lupinus alba</i>) (L – B) 	<p>81 m²</p> <p>81 m²</p> <p>81 m²</p>	<p>Buckwheat : 10 kg/ha → 80 g Millet : 20 kg/ha → 160 g</p> <p>Buckwheat : 10 kg/ha → 80 g Oat : 20 kg/ha → 160 g</p> <p>Buckwheat : 10 kg/ha → 80 g White lupine : 80 kg/ha → 650 g</p>
<p>Subunit 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Spring vetch (<i>Vicia sativa</i>) – foxtail millet (<i>Setaria italica</i> subsp. Moharia) « tardivo » (F Mi t – V) Spring vetch (<i>Vicia sativa</i>) – foxtail millet (<i>Setaria italica</i> subsp. Moharia) « presto »(F Mi p – V) 	<p>105 m²</p> <p>105 m²</p>	<p>Spring vetch : 25 kg/ha → 260 g Foxtail millet « tardivo » : 25 kg/ha → 260 g</p> <p>Spring vetch : 25 kg/ha → 260 g Foxtail millet « presto » : 25 kg/ha → 260 g</p>
<p>Subunit 3 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Landsberger Gemenge : mix of vetch (<i>Vicia sativa</i>), crimson clover (<i>Trifolium incarnatum</i>) and italian ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>) 	<p>50 m²</p>	<p>Landsberger Gemenge : 50 kg/ha → 250 g</p>
<p>Subunit 4 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Italian ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>) – millet (<i>Panicum miliaceum</i>) – oat (<i>Avena strigosa</i>) (IRG – Mi – O) Crimson clover (<i>Trifolium incarnatum</i>) – millet (<i>Panicum miliaceum</i>) Crimson clover (<i>Trifolium incarnatum</i>) – italian ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>) (IRG – C) Crimson clover (<i>Trifolium incarnatum</i>) – oat (<i>Avena strigosa</i>) 	<p>100 m²</p> <p>100 m²</p> <p>100 m²</p> <p>100 m²</p>	<p>Italian ryegrass : 25 kg/ha → 250 g Millet : 20 kg/ha → 200 g Oat : 20 kg/ha → 200 g</p> <p>Crimson clover : 10 kg/ha → 100 g Millet : 20 kg/ha → 200 g</p> <p>Crimson clover : 10 kg/ha → 100 g Italian ryegrass : 25 kg/ha → 250 g</p> <p>Crimson clover : 10 kg/ha → 100 g Oat : 20 kg/ha → 200 g</p>

Parcelle B. La parcelle de développement se trouve à Machecoul. Elle comprend des mélanges encore jamais expérimentés par le CDDM. Les mélanges sont analysés selon leur croissance et leur rendement. Leur effet sur la structure et la vie du sol n'est pas regardé. L'objectif est de trouver des espèces adaptées à la parcelle de recherche pour l'année prochaine et de voir leur aptitude comme engrais verts plus précisément. La parcelle de développement représente 671 m². Elle est divisée en quatre sous-parcelles (Annexes VI).

Les mélanges ont été semés (tableau 4) à la main le 06.06.2013 (figure 3). Les engrais verts de la parcelle de développement ne sont pas irrigués. Ils sont fertilisés le 27.06.2013 avec 298 kg/ha d'ammonitrat dosant 33 % d'azote.

Les mélanges engrais verts expérimentaux sont récoltés le 23.07.2013 et enfouis début août.

3. Evaluation de la production en matière verte

Pour chaque modalité sauf le témoin, 1 mètre linéaire de planche est récolté en plusieurs deux répétitions.

Les mélanges sont lavés, pour enlever la terre entre les racines, égouttés, puis pesés pour mesurer le taux de matière verte (Fresh Matter = FM). Un échantillon de plantes de chaque modalité est analysé en laboratoire. Les caractéristiques suivantes sont analysées :

- Le taux de matière sèche (Dry Matter = DM)
- Le taux des minéraux apportés: azote (N), phosphore (P), potassium (K)
- Le taux de carbone organique
- Le rapport C/N

Les mélanges sont comparés selon ces caractéristiques. Les résultats sont vérifiés avec le test Newman - Keuls sur un intervalle de confiance de 5 %

4. Evaluation d'enracinement

Pour évaluer le développement du système racinaire, la longueur des racines des plantes représentatives de chaque espèce est mesurée. Un profil du sol est fait à la bêche. L'enracinement est noté de façon visuelle.

B. Tests d'analyses de l'efficacité des engrais verts

Les tests sont faits uniquement sur la parcelle de recherche.

Pour analyser la structure du sol, l'activité biologique du sol et l'état sanitaire du sol, quatre paramètres sont analysés :

- La structure du sol
- Prospection racinaire des engrais verts
- L'activité biologique du sol
- L'effet phytosanitaire sur le *Fusarium oxysporum* en culture de radis

1. Analyse de la structure du sol

Trois tests sont réalisés pour acquérir des informations sur la structure du sol :

- La conductivité hydraulique – test d’infiltrométrie
- Les types de macropore – caractérisation des macropores par analyse d’image
- La porosité – porosité totale

Les trois tests sont réalisés dans le bloc n° 2. Pour chaque modalité, quatre prélèvements sont effectués:

- Au milieu de la planche ;
- Au bord de la planche pour mesurer l’effet du tassement par les ondes de choc, inhérent à la vitesse de travail et engendrées par les passages des roues d’engins agricoles dans les passes pieds
- En surface afin d’analyser l’effet d’enracinement des engrais verts
- A 30 cm de profondeur, pour analyser un tassement du sol en profondeur

L’analyse des propriétés physiques du sol est faite pour les différentes modalités et à différentes dates :

Le test d’infiltrométrie est fait :

- Avant le semis des engrais verts (= point 0, P0)
- Pendant les engrais verts (=pendant la récolte, P1)
- Après la dégradation des engrais verts (= point dégradation, avant la récolte de la culture suivante, P2 (figure 3)

La caractérisation des macropores et l’analyse de la porosité totale sont faites :

- Avant le semis des engrais verts, en même temps que le test d’infiltrométrie
- Après la dégradation des engrais verts, en même temps que le test d’infiltrométrie

Pour le P0, la moyenne des quatre modalités est réalisée (possible grâce au précédent cultural identique).

a) Le test d’infiltrométrie

Le test d’infiltrométrie analyse la conductivité hydraulique $K(h)$ du sol en conditions non saturées. Il permet de décrire la perméabilité du sol sous des potentiels hydriques proches de la saturation du sol. Il rend compte des conditions de transfert d’eau dans le sol, selon sa structure. La répartition des macropores dans le sol est analysée selon leur taille : rayon > 3 mm, rayon de 750 μm à 3 mm et rayon de 300 μm à 750 μm .

Les mesures sont effectuées à l’aide d’un infiltromètre DECAGON® (Annexes VII). L’effet de la capillarité est utilisé : trois pressions différentes sont appliquées au sol, elles sont réglables avec le tube du petit compartiment d’eau du DECAGON®. Les pressions correspondent aux potentiels capillaires du sol h : 0,6 ; 0,2 et 0,05 kPa. La pression de 0,6 kPa permet de solliciter les plus petits macropores (300 – 750 μm) qui absorbent l’eau du DECAGON®. Leur petite taille leur permet de développer une force capillaire suffisamment grande pour tirer l’eau du DECAGON®. La force capillaire des autres macropores n’est pas suffisante pour absorber l’eau à cause de leurs plus grandes tailles. Selon leur taille, les macropores de 750 μm – 3 mm développent une force capillaire suffisamment grande pour tirer l’eau pour une pression appliquée du DECAGON® au sol de 0,2 kPa.

Tableau 5 : Pores classification according to size and shape (Hallaire, 2013)

Shape classes	Size classes (μm)			
	1 [< 300]	2 [$300 - 750$]	3 [$750 - 3000$]	4 [> 3000]
Tubular void (A) $IE < 5$	A1	A2	A3	A4
Crack (B) $5 < IE < 10$	B1	B2	B3	B4
Packing void (C) $IE > 10$	C1	C2	C3	C4

A partir d'une pression de 0,05 kPa, la taille des plus grands macropores (> 3 mm) est suffisante pour développer une force capillaire supérieure à la pression du DECAGON® qui retient l'eau, ce qui leur permet de tirer l'eau du DECAGON®.

Les données collectées sont calculées en utilisant la méthode fournie par DECAGON (Decagon devices, 2012)

Le test de Newman-Keuls pour comparer les moyennes est fait pour un intervalle de confiance de 5 %.

Le déroulement d'un test d'infiltrométrie est décrit dans l'annexe VIII

b) Caractérisation des macropores par analyse d'image

Ce test permet d'analyser la morphologie des pores de taille supérieure à 30 µm pour déterminer un tassement du sol par analyse d'image. Généralement il est fait après le test d'infiltration.

Un bloc du sol non perturbé de 8 cm sur 5 cm de côté et 3 cm d'épaisseur est prélevé à l'endroit du test d'infiltrométrie. L'échantillon est séché et imprégné avec de la résine polyester contenant un pigment fluorescent à la lumière UV. Après séchage, le bloc est coupé en trois tranches de 1 cm d'épaisseur. Seule la tranche centrale est conservée pour être analysée sous lumière UV avec une CCD caméra de 1600 x 1200 pixels. La hauteur de prise de vue permet de définir une zone d'analyse de 48 mm x 36 mm au milieu de la tranche, correspondant à une résolution spatiale de 30 µm par pixel. Elle a été choisie pour pouvoir être comparée aux tailles des pores sollicités dans le test d'infiltrométrie (rayons équivalents compris entre 300 µm à 3 mm). Les micropores (< 30 µm) ne sont pas analysés.

L'image prise par la caméra est transférée sur l'ordinateur. Les pores remplis de résine photosensibles apparaissent en bleu, la substance solide en noir. Le logiciel VISILOG© convertit l'image en format binaire où chaque pixel prend la valeur 0 s'il appartient à un pore et la valeur 1, s'il appartient à la matière solide. L'image est « nettoyée » pour enlever le bruit de fond. Les pores restant sont classifiés selon leur forme et leur taille (tableau 5). Quatre tailles sont déterminées. Elles correspondent à la taille des pores du test d'infiltrométrie : moins de 300 µm, 300 µm à 750 µm, 750 µm à 3000 µm et 3000 µm et plus. L'index d'élongation *IE* est calculé pour mesurer la forme des pores avec la formule :

$$IE = \frac{P^2}{4\pi S} \quad P = \text{périmètre}, S = \text{surface}$$

Les formes sont classées en trois groupes :

- pores tubulaires des racines et vers
- fissures
- pores d'assemblage.

c) La porosité totale

La porosité totale du sol renseigne sur l'état de compacité du sol. La mesure de la densité apparente permet de calculer sa porosité totale. Tous les pores sont pris en compte. Le test permet aussi de calculer l'équivalent en eau qui est retenu par les pores du sol et de renseigner sur la capacité de rétention d'eau du sol.

Un prélèvement de terre non perturbée a été effectué avec un cylindre d'un volume de 98 cm³ (rayon de 2,5 cm, hauteur de 5 cm) à proximité du lieu de réalisation des deux tests précédents. Pour calculer l'humidité du sol, le volume de terre prélevé est pesé. Après un séchage pendant 48 h dans une étuve à 105 °C l'échantillon est de nouveau pesé. La quantité d'eau retenue par les pores (Δm) est calculée avec la formule suivante :

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

Δm = taux d'eau, m_0 = masse humide de l'échantillon, m_1 = masse sèche de l'échantillon

La densité apparente ρ a été calculée avec la formule :

$$\rho = \frac{m_1}{V}$$

m_1 = masse (masse sèche de l'échantillon), V = volume du cylindre

Avec la densité apparente, la porosité totale (Φ) en pourcentage est estimée en utilisant la formule :

$$\Phi = \left(1 - \frac{\rho}{2.65}\right) * 100$$

2,65 = facteur d'estimation de la densité réelle des sols sableux

Le test de Newman-Keuls est fait pour comparer les moyennes avec un intervalle de confiance de 5 %.

2. Analyse de l'activité biologique du sol selon trois bioindicateurs

Des organismes de la vie du sol appartenant à différentes classes et genres sont utilisés comme bioindicateurs analysés :

- Deux groupes de la mésofaune (0,1 mm – 2 mm) :
 - les collemboles qui sont détritivores/microbivores
 - les acariens qui sont plutôt carnivores
- Un groupe de la microfaune : les nématodes qui sont bactériovores, fongivores, omnivores, carnivores, phytophages facultatif ou phytoparasites

Ces trois bioindicateurs s'influencent directement dans la chaîne alimentaire ce qui permet de montrer l'apport de la matière organique au sol via l'effet d'implantation des engrais verts et l'effet stimulant du système racinaire des engrais verts.

a) Les collemboles

Les collemboles sont choisis comme représentants du genre des insectes d'un groupe de la mésofaune. Ils sont choisis comme bioindicateur car ils consomment les débris végétaux accumulés à la surface du sol. Les collemboles ne digèrent pas la cellulose et la lignine. Comme les engrais verts sont enfouis avant un stade de lignification, ce fait reste négligeable.

Pour être sûr que la plupart des collemboles vont être pris en compte, les échantillons de terre sont pris dans une profondeur de 0 à 20 cm avec une tarière. Plusieurs prélèvements sont pris dans chaque parcelle élémentaire pour avoir un demi-litre de terre, qui correspond au volume maximum pour une installation Berlèse (Annexes IX) par échantillon.

Le P0 est pris quand le sol est en période de repos et non travaillée depuis un mois. Ainsi la vie du sol n'est pas perturbée. Le P1 est effectuée après la récolte des engrais verts. Le P2 est réalisé après trois semaines de dégradation de l'engrais vert. Les autres prélèvements seront pris avant le semis de la culture suivante en septembre et à sa récolte début octobre (figure 3).

Après l'extraction en Berlèse, les collemboles sont comptés sous une loupe binoculaire.

Les résultats sont comparés avec ceux d'autres bioindicateurs.

b) Les acariens

Comme bioindicateurs supplémentaires du groupe de la mésofaune, différentes espèces d'acariens sont choisies.

Le prélèvement des acariens se fait de la même façon et aux même moments que pour les collemboles.

Après l'extraction, les acariens sont analysés sous une loupe binoculaire. Avec la clef d'identification « Ces animaux minuscules qui nous entourent » (Coineau *et al.*, 1997) et l'expérience de Dr Mark Judson, les acariens ont été séparés en :

Espèces carnivores :

- Acariens de la famille des Gamasidae
- Acariens de la famille des Penthalodidae

Espèces détritivores :

- Acariens de l'ordre des Astigmata

Les résultats des comptages ont été mis en parallèle avec ceux des déterminations de nématodes et de comptages des collemboles.

Concernant les collemboles et les acariens, pour le P0, la moyenne des quatre modalités est réalisée (possible grâce au précédent cultural identique). Concernant le P1, le test de Newman-Keuls est fait pour comparer les moyennes avec un intervalle de confiance de 5 %.

Une absence de flèche dans les figures indique une absence de test statistique à cause du manque de répétition. Les lettres a et b montrent une différence significative, les lettres NS une différence non significative.

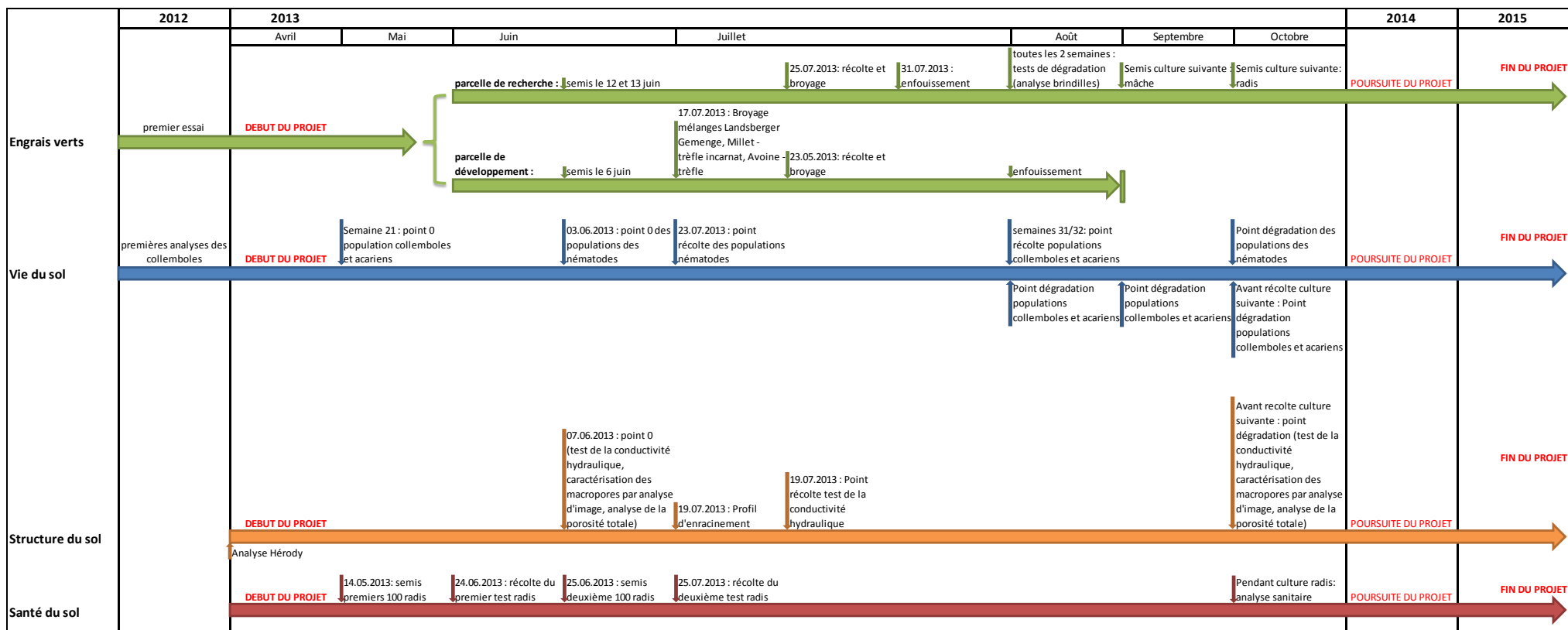


Figure 3 : Frise chronologique du projet Pathosol. Tous les actions effectués concernant les quatre points analysés, engrais verts, vie du sol, structure du sol et santé du sol sont indiquées.

c) Les nématodes

P0 et P1 sont pris au même moment que les P0 et P1 des collemboles et des acariens. Le P2 sera réalisé à la récolte de la culture suivante (figure 3). Les échantillons sont pris dans une profondeur de 0 à 25cm. Pour le point 0, un échantillon de 500 g de terre dans toutes les parcelles est pris simultanément et envoyé au laboratoire. Pour le deuxième prélèvement de 500 g de terre, quatre échantillons sont pris dans chaque modalité puis mélangés pour n'en conserver que 500 g qui sont envoyés au laboratoire ELISOL (Villenave, 2013 (communication personnelle)).

Pour identifier les différents groupes de nématodes et les classer en bactérivores, fongivores, omnivores et carnivores, phytophages facultatifs et phytoparasites le savoir-faire d'un laboratoire est utilisé.

Les résultats des identifications et différenciations des nématodes ont été mis en parallèle avec les résultats des comptages et différenciations des collemboles et acariens.

3. Mesure de l'effet sanitaire

Pour savoir si dans le sol il y a des germes de fusariose, responsables de dégâts sur radis, cent radis sont semés en douze caissettes dans le sol prélevé avant semis des engrais verts dans chaque parcelle élémentaire (essai 1) (figure 3). Après 6 semaines de culture les radis sont récoltés le 24.06.2013 et leur racines sont analysées pour détecter la fusariose à l'intérieure de la racine. Des radis suspects sont analysés au laboratoire. Un deuxième lot de radis est semé (essai 2) en conditions plus chaudes pour favoriser le développement des maladies le 25.06.2013 et récolté le 25.07.2013. Les radis sont régulièrement arrosés et fertilisés comme les engrais verts (figure 3).

La fusariose sera observée dans la culture de radis suivante.

2.3 Déroulement des essais, frise chronologique

La figure 3 précise les différentes actions mises en place concernant le projet Pathosol.

Tableau 6 : Results of the evaluation of the ten green manure assortments according to different criterion of evaluation. The assortments O – Mi – V and F mi p – V seem to be the most interesting The assortments L – B, O – B and IRG – B seem to be the less interesting.

+ = low; ++ = okay; +++ = high Assortment →	Researche parcel			Screening						
	O - Mi - V	IRG - B	S - P	F mi t - V	F mi p - V	O - B	L - B	Mi - B	IRG - C	IRG - Mi - O
Criterion of evaluation ↓										
Assortment homogeneity	+++	+	++	+++	+++	+	+	+++	++	++
Suitability for sandy soils	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++
Need of irrigation	+++	++	+	+++	+++	++	++	++	++	+
Suitability for high temperatures	+++	++	+++	+++	+++	++	++	++	+++	+++
Suitability for low temperatures	++	+++	+	++	++	+++	+++	+++	+++	+++
Period of growing cyclus	+	++	+	+++	+	++	++	++	+++	++
Ability of weeds suppression and ground covering	+++	++	+++	++	+++	++	+	++	++	+++
Adequate root penetration	+++	+	+++	+++	+++	++	+	++	++	++
Ability for drilling	+	++	+++	+	+	++	+	+++	++	++
Regrowing after destruction	study in progress									
Secondary seed germination	study in progress									
Decomposition rate	study in progress									
Other characteristics	Vetch shrivels without irrigation in the beginning	IRG completely overgrown through B	Huge inhomogeneity between different parcels	Vetch shrivels without irrigation in the beginning	Vetch shrivels without irrigation in the beginning	O nearly overgrown through B	B very dominant	Mi very competitive	IRG flowering	IRG flowering

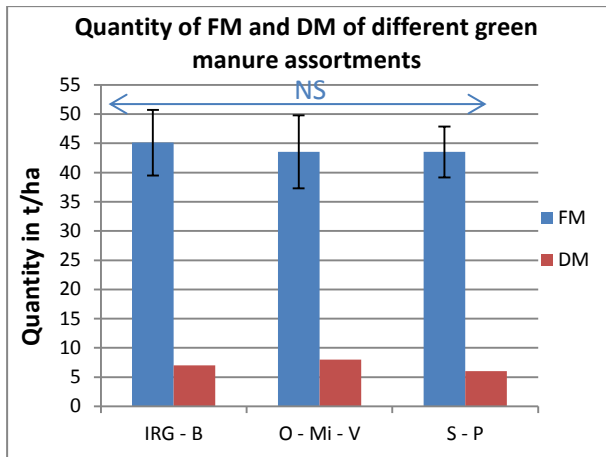


Figure 4 : Parcel A: Quantity of fresh and dry matter

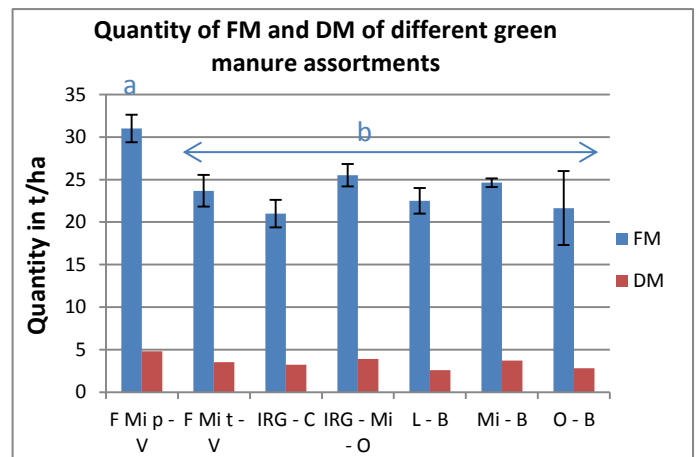


Figure 5 : Parcel B: Quantity of fresh and dry matter

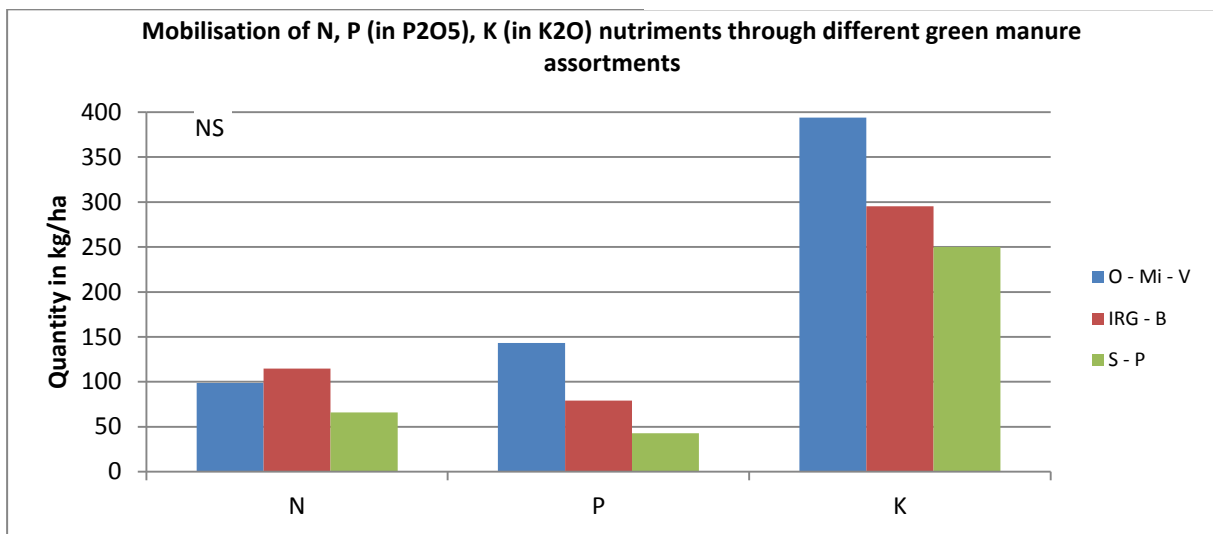


Figure 4 : Parcel A : Quantity of nitrogen (N), phosphor (P) and potassium mobilisation through the green manure assortments

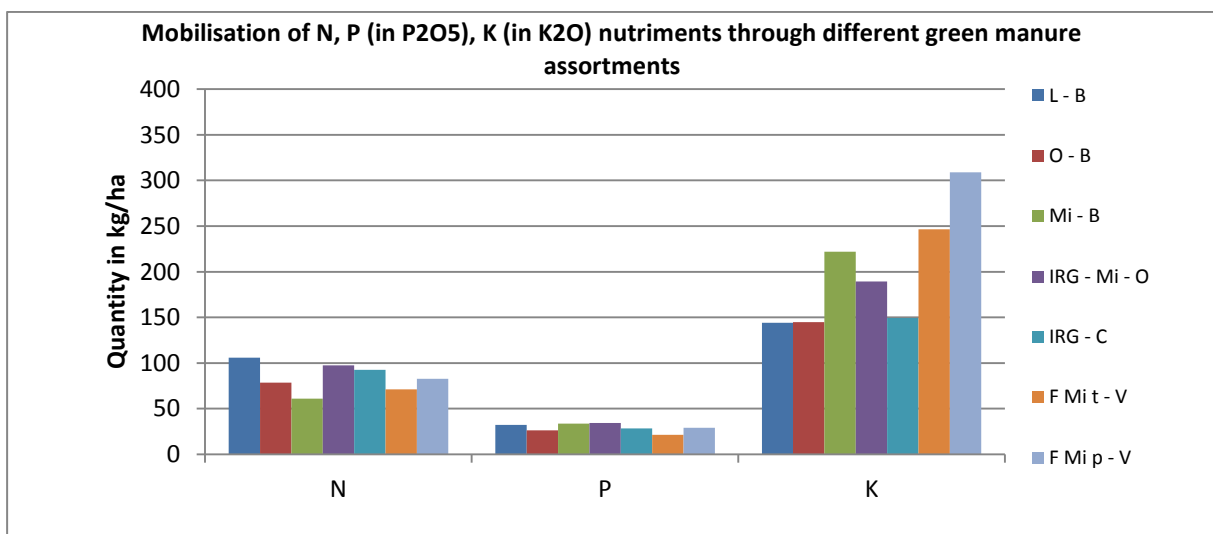


Figure 5 : Parcel B : Quantity of nitrogen (N), phosphor (P) and potassium (K) mobilisation through the green manure assortments

V. Résultats

A. Culture des engrais verts

1. Evaluation des différents mélanges testés sur la parcelle A et parcelle B

Presque tous les mélanges sont adaptés aux conditions climatique et au sol sableux (tableau 6). Les mélanges O – Mi – V, F mi t – V et F mi p – V répondent les plus aux critères d'évaluation. Les mélanges L – B, O – B et IRG – B sont le moins compatibles avec les critères de choix.

2. Rendement en fresh matter et dry matter

Parcelle A :

Les rendements des différents mélanges en FM et DM ne sont pas différents (figure 4).

- AVM : 44 t/ha en FM et 8 t/ha en DM
- RGIS : 45 t/ha en FM et 7 t/ha en DM
- SP : 44 t/ha en FM et 6 t/ha en DM

Parcelle B :

Les mélanges Landsberger Gemenge, millet – trèfle incarnat et avoine – trèfle incarnat sont broyés sans être analysés à cause d'un envahissement par les adventices trop important.

Les rendements des différents mélanges en FM sont significativement différents (figure 5) :

Le mélange F Mi p – V produit avec une valeur de 31 t/ha en FM et 5 t/ha en DM significativement plus que les autres mélanges qui donnent un rendement sensiblement égal : 23 t/ha en FM et 3 t/ha en DM.

3. Rendement en minéraux azote (N), phosphore (P) et potassium (K)

Parcelle A :

Les résultats des rendements en minéraux N, P, K (figure 6) présentent des différences :

- Le mélange IRG – B apporte le plus en azote, soit 115 kg/ha, par rapport à 99 kg/ha du mélange O – Mi – V et 66 kg/ha du mélange S – P
- Le mélange O – Mi – V apporte le plus en phosphore, 143 kg/ha, par rapport à 79 kg/ha du mélange RGIS et 43 kg/ha du mélange S – P
- Le mélange O – Mi – V apporte le plus en potassium, soit 394 kg/ha, par rapport à 295 kg/ha du mélange IRG – B et 250 kg/ha du mélange S – P

Parcelle B :

Le mélange L – B apporte le plus en azote (106 kg/ha) suivi par le mélange IRG – Mi – O (98 kg/ha) (figure 7). Les mélanges Mi – B (61 kg/ha) et F Mi t – V (78 kg/ha) apportent le moins en azote. En phosphore (en P₂O₅) les valeurs de tous les mélanges sont sensiblement égales. Ils apportent en moyenne 30 kg/ha. Le mélange F Mi p – V apporte le plus en potassium (en K₂O) (309 kg/ha), le double des mélanges L – B, O – B et IRG – C. Il est suivi par le mélange F Mi t – V (247 kg/ha).

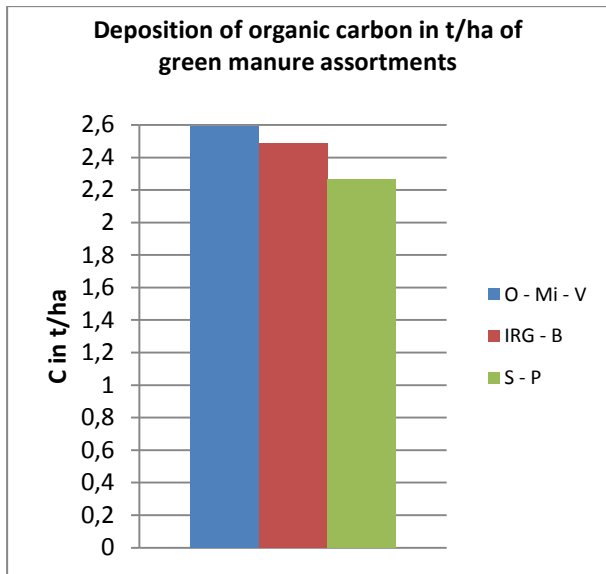


Figure 8 : Parcel A : Deposition of organic carbon

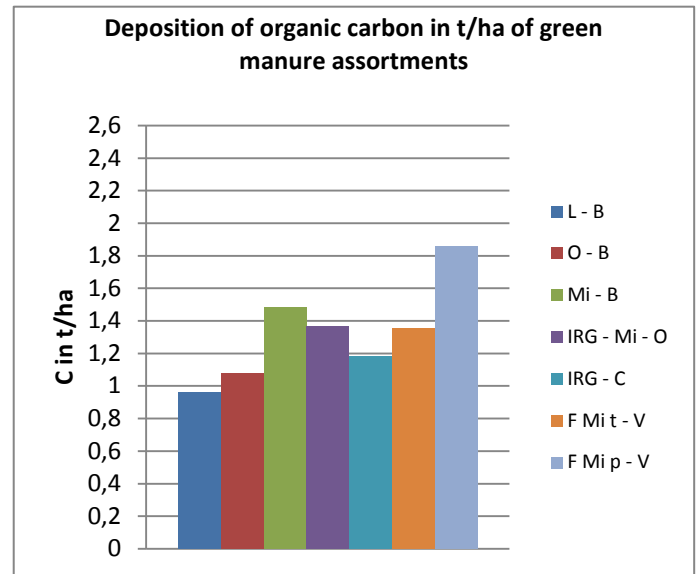


Figure 9 : Parcel B : Deposition of organic carbon

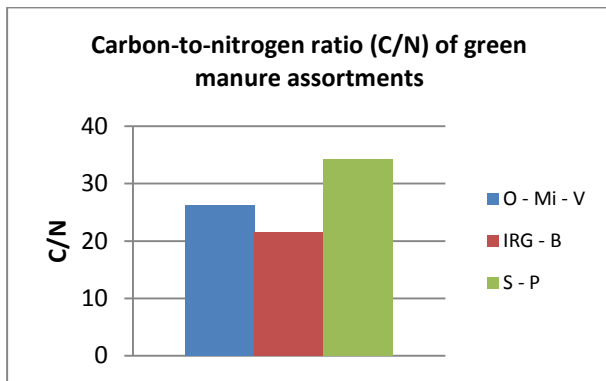


Figure 10 : Parcel A : Carbon-to-nitrogen (C/N) ratio

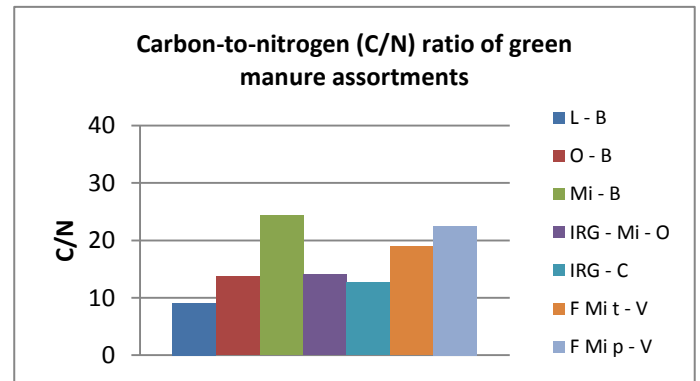


Figure 11 : Parcel B : Carbon-to-nitrogen (C/N) ratio

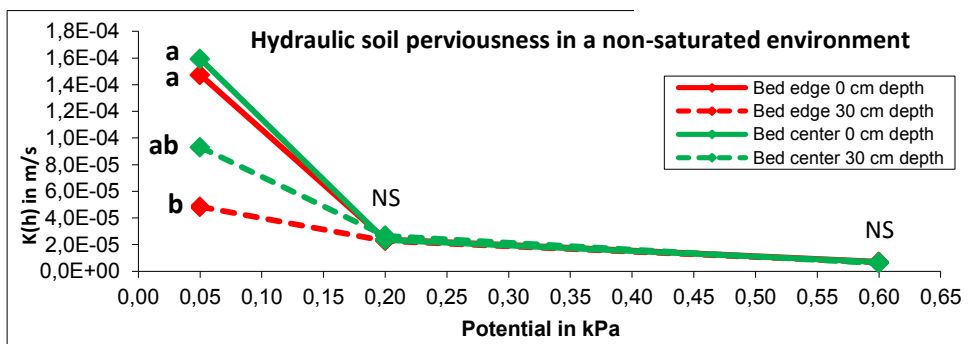


Figure 12 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of the soil at P0

4. Apport en carbone organique

L'apport en carbone de l'engrais vert donne des indications sur les ressources de nutrition pour la vie du sol.

A :

Le mélange O – Mi – V apporte avec 2,59 t/ha le plus en carbone organique. Le mélange IRG –B apporte 2,49 t/ha et le mélange S – P donne 2,26 t/ha.(figure 8).

B :

Concernant l'apport en carbone organique, le mélange F Mi p – V apporte le plus (1,86 t/ha)(figure 9). Les autres résultats varient entre 0,96 t/ha (L – B) et 1,48 t/ha (Mi – B).

5. Rapport C/N

Le rapport C/N donne des indications sur le niveau de maturité de la matière organique. Plus la valeur est grande, plus d'azote est nécessaire pour dégrader la matière organique. Beaucoup d'azote sera donc fixé et ne sera plus disponible pour la culture suivante.

A :

Le rapport C/N est le plus haut dans le mélange S – P avec une valeur de 34,2. Le rapport C/N du mélange AMV a une valeur de 26,3, le rapport du mélange RGIS une valeur de 21,6 (figure 10).

B :

Concernant le rapport C/N des mélanges récoltés, ils diffèrent entre 9,1 pour le mélange L - S et 24,3 pour le mélange Mi – S (figure 11).

Dans le cadre de la prolongation du projet « Pathosol » la dégradation des différentes espèces sera analysée une fois par mois. En même temps seront notées les repousses de graines n'ayant pas germées dans l'essai.

B. Tests de la structure du sol (uniquement pour la parcelle A)

1. Résultats du test de la conductivité hydraulique du P0

Les quatre courbes (figure 12) montrent la conductivité hydraulique $K(h)$, qui représente la vitesse en m/s avec laquelle les macropores du sol absorbent l'eau. Elle est dépendante des trois potentiels capillaires des pores h : 0,6 ; 0,2 et 0,05 kPa.

Les résultats du test Newman-Keuls montrent qu'il y a qu'une différence significative entre les conductivités hydrauliques pour un K de 0,05 kPa. Les conductivités hydrauliques à la surface au bord et au milieu de la planche sont significativement plus hautes qu'à 30 cm de profondeur et bord. La conductivité hydraulique à 30 cm de profondeur du milieu de la planche n'est pas significativement différente des autres. Cela est représenté par les lettres AB. Les valeurs de K pour les potentiels capillaires 0,2 et 0,6 kPa ne sont pas différentes.

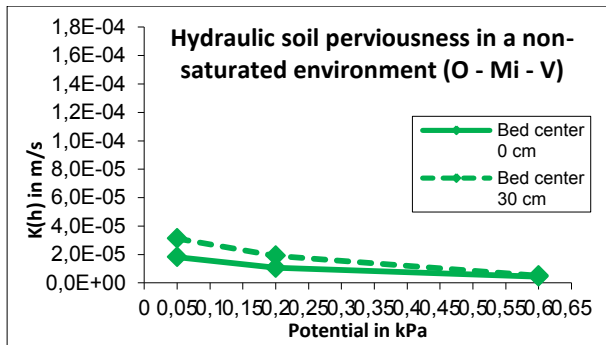


Figure 13 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of O – Mi – V

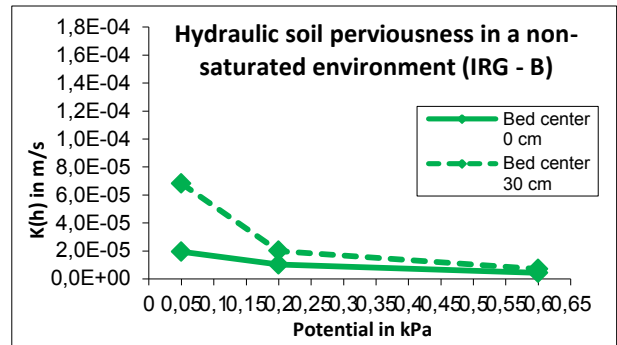


Figure 14 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of IRG – B

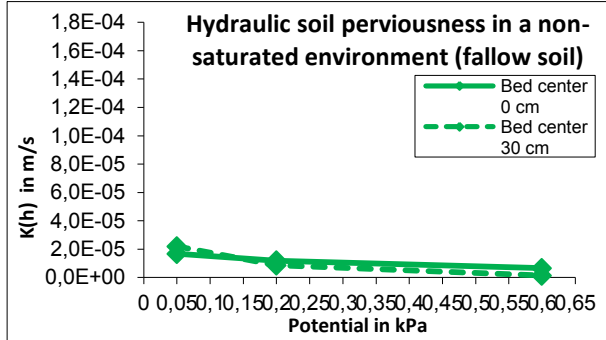


Figure 75 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of the fallow soil

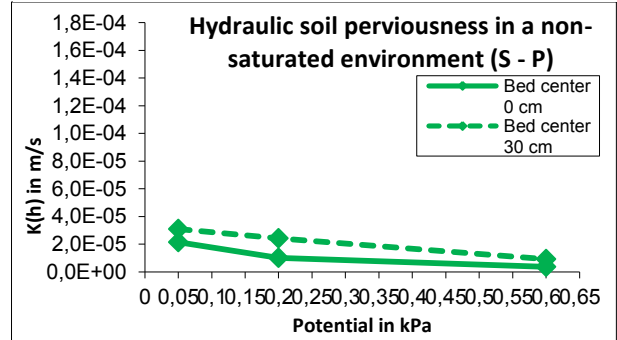


Figure 66 : Parcel A : Hydraulic soil perviousness of S – P

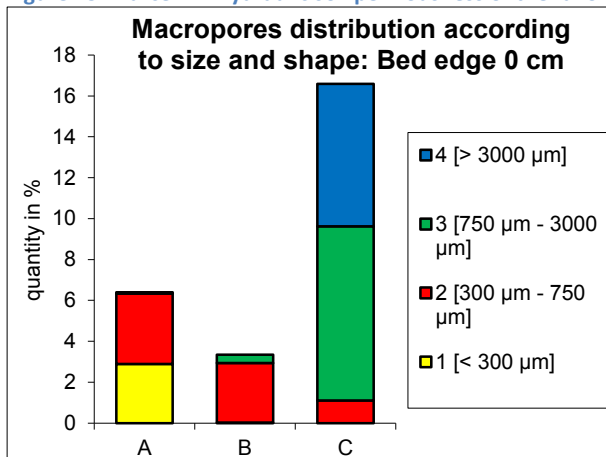


Figure 17 : Parcel A : Macropores distribution of bed edge 0 cm

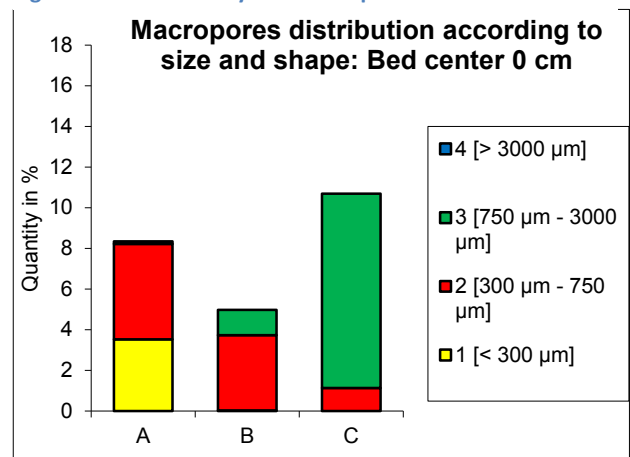


Figure 88 : Parcel A : Macropores distribution of bed center 0 cm

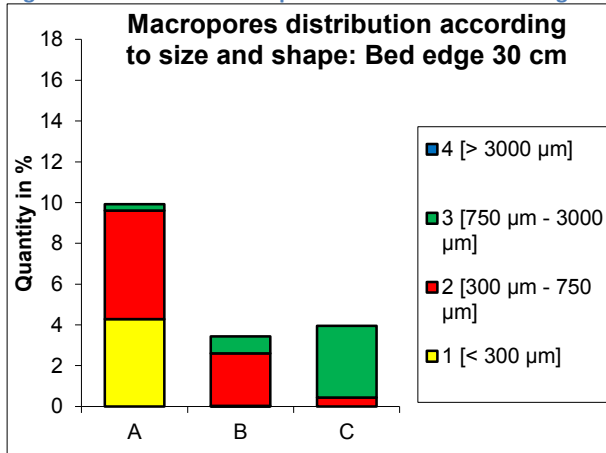


Figure 19 : Parcel A : Macropores distribution of bed edge 30 cm

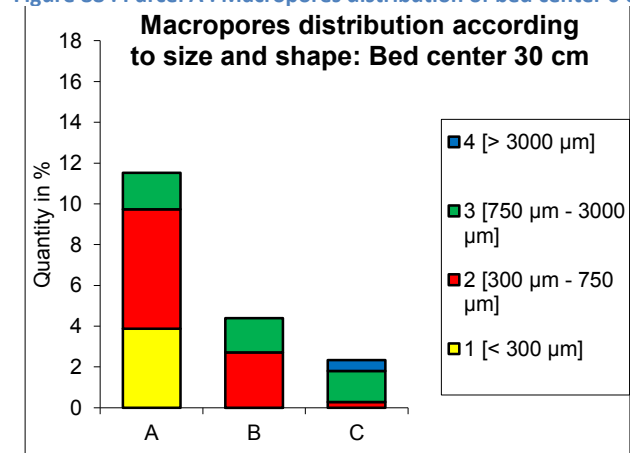


Figure 20 : Parcel A : Macropores distribution of bed center 30 cm

2. Résultats du test de la conductivité hydraulique du P1

Deux différences sont visibles :

1. Les conductivités hydrauliques pour les trois potentiels capillaires 0,6 ; 0,2 et 0,05 kPa ne diffèrent pas dans les modalités O – Mi - V et S–P (figure 13, 16). Elles sont linéaires pour les trois pressions. La valeur de la conductivité hydraulique du mélange RGI - B, est plus élevée en profondeur pour un potentiel capillaire de 0,05 kPa (figure 14).

Par rapport au P0, une diminution de la conductivité hydraulique de 0,05 kPa est visible dans tous les mélanges. Les conductivités hydrauliques pour les potentiels K de 0,2 et 0,6 kPa ne montrent pas des différences.

2. Dans les mélanges O – Mi – V, RGI - B et S - P, la conductivité hydraulique à 30 cm de profondeur est plus élevée qu'en surface pour les trois potentiels capillaires.

La conductivité hydraulique en profondeur pour les potentiels capillaires 0,2 et 0,6 kPa dans le témoin est inférieure aux valeurs en surface (figure 15).

Comparé avec le P0, il y a une inversion de la conductivité hydraulique par rapport à la profondeur : dans le P0, l'eau s'infiltré plus vite en surface qu'à 30 cm, tandis qu'au P1 c'est l'inverse.

Une seule répétition par bloc ayant été prise, un test statistique est inapplicable.

3. Résultats du P0 du test de la caractérisation des macropores par analyse d'image

La répartition des macropores est présentée en pourcentage selon leurs tailles et leurs formes.

Deux différences sont visibles :

1. Différence des structures des macropores entre surface et profondeur :

En surface le taux de la macroporosité (24 % au milieu (figure 18), 26,3% au bord (figure 17)) plus élevé qu'en profondeur (18,2 % au milieu (figure 20), 17,3 % au bord (figure 19)).

Cette différence est causée par une différence des types A et type C des macropores :

- En profondeur des pores tubulaires/racinaires (type A) sont plus présents (11,5 % en milieu et 9,9 % au bord) qu'en surface (8,3 % en milieu, 6,4 % au bord).
- En profondeur les pores d'assemblage (type C) sont moins présents (2,3 % en milieu, 3,9 % au bord) qu'en surface (10,7 % en milieu, 16,6 % au bord)

Les pourcentages des tailles des macropores sont également différents :

- Les tailles 1 et 2 changent peu (taille 1 : 8,2 % en profondeur à 6,5 % en surface ; taille 2 : 17,2 % en profondeur à 17 % en surface)
- La taille 3 est moins présente en profondeur (5 % en milieu, 4,6 % au bord) qu'en surface (10,9 % en milieu, 9 % au bord)
- La taille 4 est moins présente en profondeur (0,5 % en milieu, absence au bord) qu'en surface (absence en milieu, 7 % au bord)

2. Différence des structures des macropores entre bord et milieu :

La surface du bord contient plus de macropores (26,3 %) que la surface du milieu (24 %). En profondeur le pourcentage des macropores change peu (18,2 % au milieu, 17,3% au bord)

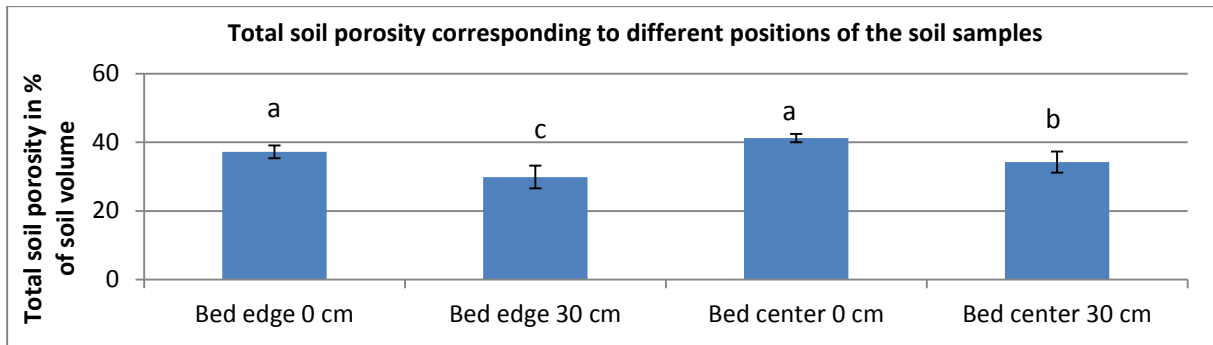


Figure 219 : Parcel A : Soil porosity of P0 according to bed edge 0 cm and 30 cm and bed center 0cm and 30 cm

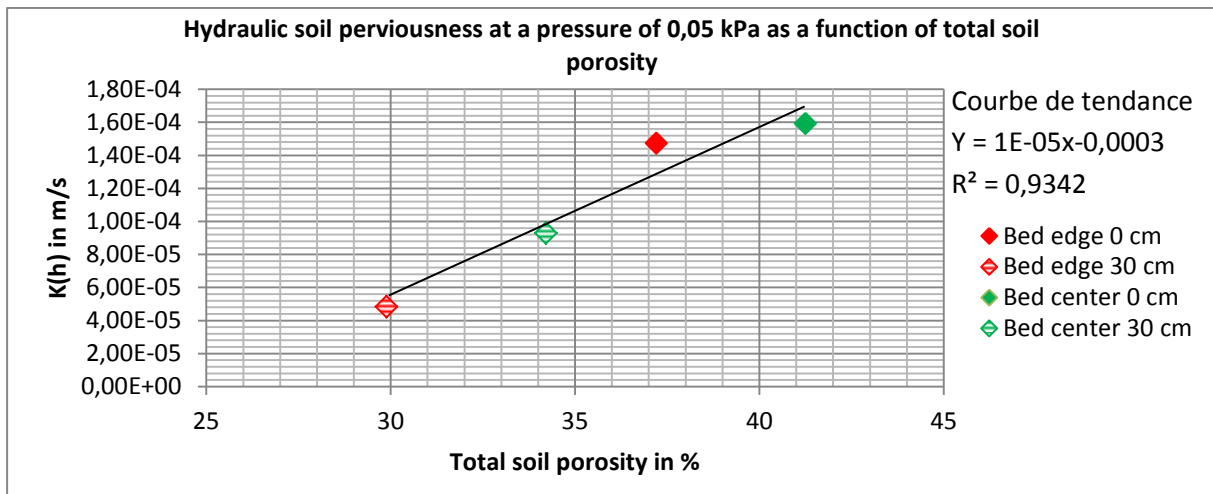


Figure 22 : Parcel A :Dependency of hydraulic soil perviousness on soil porosity at a pressure of 0,05 kPa

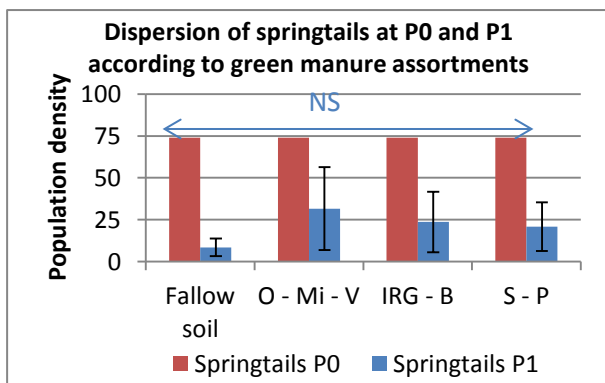


Figure 23 : Parcel A : Evolution of springtails between the mean of P0 and P1 according to assortment

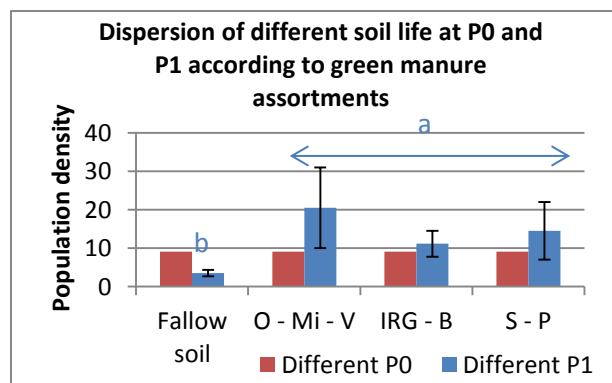


Figure 24 : Parcel A : Evolution of different soil life between the mean of P0 and P1

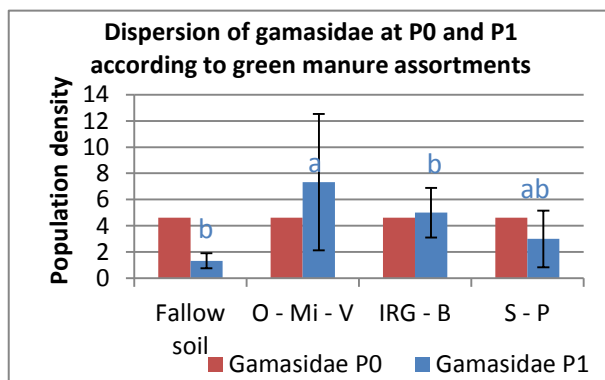


Figure 25 : Parcel A : Evolution of gamasidae mites between the mean of P0 and P1 according to assortment

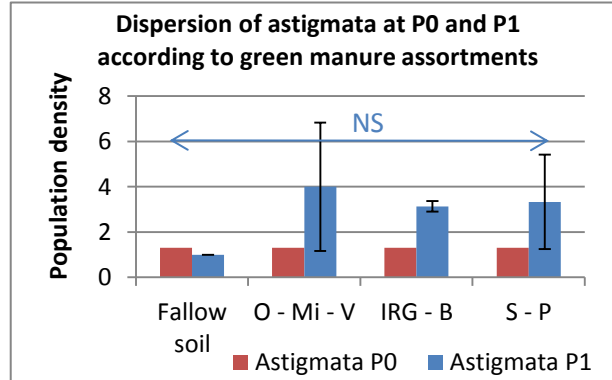


Figure 26 : Parcel A : Evolution of astigmata mites between the mean P0 and P1 according to assortment

1. Résultats de la porosité totale du sol

La porosité totale du sol la plus élevée est obtenue à la surface au milieu de la planche, comme attendu (figure 21). A 30 cm profondeur au bord de la planche, le sol est le moins poreux.

Les résultats du test de Newman-Keuls montrent qu'il y a une différence significative qui est indiquée par les lettres a, b et c. La porosité totale du sol de la surface au milieu de la planche (a) est significativement différente des porosités du sol de la surface du bord et du milieu de la planche à 30 cm (b). Il n'y a pas de différence significative entre la surface du bord et le milieu de la planche à 30 cm (b). a et b sont significativement différents de la porosité du sol du bord à la surface de la planche.

Une corrélation entre la porosité totale du sol et la conductivité hydraulique est visible (figure 22) : la vitesse d'infiltration d'eau dans le sol pour une pression de 0,05 kPa est dépendante de la porosité du sol. Plus le sol est poreux, plus la conductivité hydraulique est haute. Ceci est montré par la courbe de tendance.

C. Evolution de la vie biologique du sol (uniquement pour la parcelle A)

1. Analyse des populations de collemboles et d'acariens

Les densités des populations des bioindicateurs changent entre le prélèvement P0 et P1 :

- Les populations de collemboles (springtails) dans chaque modalité sont plus faibles au P1 (moyenne de 21 collemboles/500g du sol (= 42.000 collemboles/m³ du sol)) qu'au P0 (moyen de 74 collemboles/500g du sol (= 148.000 collemboles/m³ du sol)) (figure 23).
- La catégorie « autres » contient surtout des larves, vers, mouches et autres acariens non identifiables. Leur densité augmente entre P0 (moyen de 9 « autres »/500g du sol (=18.000 « autres »/1m³ du sol)) et P1 (moyen de 12 « autres »/500g du sol (= 24.000 « autres »/1m³ du sol))(figure 24).
- La population des gamasidae ne change pas entre P0 (moyen de 4 gamasidae/500g du sol (= 8.000 gamasidae/m³ du sol)) et P1 (moyen de 4 gamasidae/500g du sol) (figure 25).
- La densité des acariens de l'ordre astigmata est plus haute en P1 (moyen de 3 astigmatas/500g du sol (= 6.000 astigmatas/m³ du sol)) qu'en P0 (moyen de 1 astigmata/500g du sol (= 2.000 astigmatas/m³ du sol)) (figure 26).
- Une population des acariens penthalodidae est trouvée au P0 (moyen de 6 penthalodidae/500g du sol (= 12.000 penthalodidae/1m³ du sol). Elle est absente ou la quantité trop petite pour être détectée au P1.

EnP0, les collemboles présentent une densité de population dix fois plus haute que les autres bioindicateurs. Ils sont les plus nombreux suivi par les acariens penthalodidae et les acariens gamasidae. Les acariens astigmata sont peu présents en P0 avec en moyenne un individu par modalité.

Au P1, la densité de population des collemboles est la plus hautes suivie par les densités des acariens gamasidae et des acariens astigmata.

Toutes les populations des bioindicateurs diminuent dans le sol nu.

Les différents mélanges des engrais verts ont un effet sur les densités des populations des collemboles et acariens.

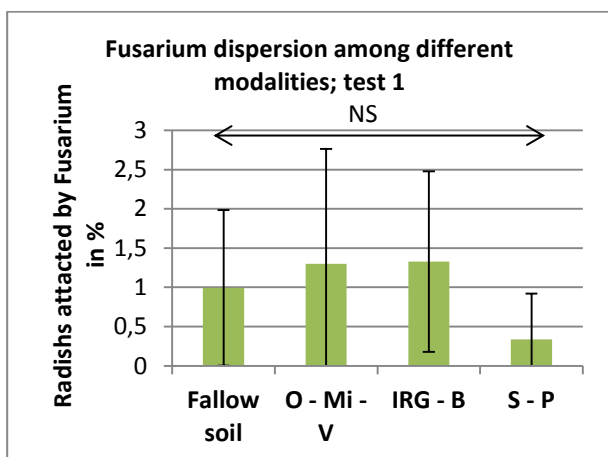


Figure 27 : Parcel A : Fusarium dispersion among different assortments during the growing period 15.04.2013-24.06.2013

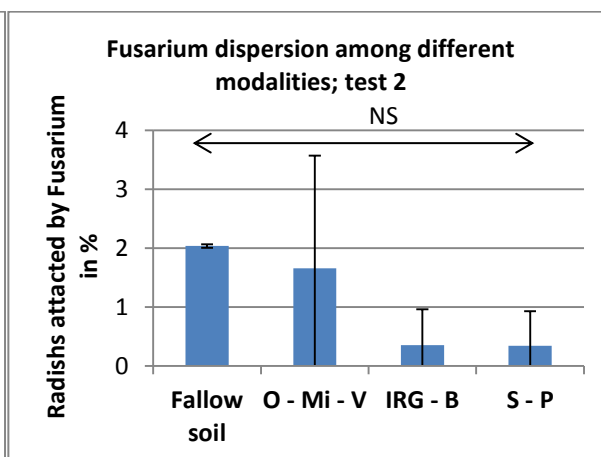


Figure 28 : Parcel A : Fusarium dispersion among different assortments during the growing period 25.06.2013-25.07.2013

Résultats des analyses des nématodes du sol du point 0 (Annexes X)

Les échantillons sont analysés par un laboratoire ELISOL selon la composition de la nématofaune et leur conséquence sur le réseau trophique du sol.

Indice des Voies de Décomposition de la matière organique (IVD):

L'IVD est noté sur une échelle de 0 à 100. Une valeur proche de 0 signifie une voie de décomposition fongique dominante. Une valeur proche de 100 signifie une voie de décomposition bactérienne dominante.

Le résultat de la parcelle est proche de 100. La communauté des microbivores est composée quasi uniquement des nématodes bactériovores, les nématodes fongivores sont presque absents.

Abondance des différents groupes de nématodes :

Le groupe des nématodes bactériovores est dominant : 350 nématodes/100 g de sol secs ont été retrouvés. Le nombre des nématodes fongivores, omnivores et carnivores est faible : 23 individus/100 g de sol sec dont 20 omnivores et carnivores. Des nématodes des groupes phytophages facultatifs et phytoparasites sont absents ou bien sous le seuil de détection de 2 nématodes/100 g de sol. Les nématodes non phytoparasitaires représentent les nématodes libres. Leur densité renseigne sur la qualité de l'habitat et la teneur en matière organique. Par gramme de sol, 4 nématodes libres ont été trouvés.

Diagnostic du réseau trophique du sol :

Le réseau trophique du sol est caractérisé selon son indice de structure et son indice d'enrichissement. Les indices sont estimés sur une échelle de 0 à 100.

L'indice de structure est un indicateur de la stabilité du sol. Une valeur proche de 0 montre un sol perturbé : il est dégradé et moins fertile. Une valeur proche de 100 montre un sol non perturbé : il est fertile. Le sol de la parcelle d'essais montre une valeur de 39. Il est donc perturbé et peu fertile.

L'indice d'enrichissement donne une indication sur la dynamique des nutriments. Il augmente avec la disponibilité en éléments nutritifs. Une valeur proche de 0 montre un sol pauvre. Une valeur proche de 100 indique un sol enrichi en N minérale. Le sol possède une valeur de 88.

Les résultats du point récolte ont été obtenus après la fin de la rédaction du mémoire.

Test de la santé du sol :

En analysant les radis des deux essais, de la fusariose est détectée. Le pourcentage d'attaque de fusariose reste pour les deux essais en dessous 2 %. Une différence significative ne s'est pas montrée (test Newman-Keuls non validé) (figures 27, 28).

VI. Discussion

A. Le développement des engrais verts

1. Bilan des mélanges testés sur la parcelle de recherche

Avoine – Millet – Vesce : O – Mi - V

Le mélange est dans son développement homogène. Les trois composants poussent à la même vitesse. Pour une période supérieure à six semaines, il y a un risque que le millet soit plus végétatif. La vesce a commencé à fleurir en sixième semaine. Pour une période plus longue elle risque de monter à graines. Le millet et l'avoine tallent bien. Ils produisent huit à dix tiges à partir d'une graine grain. Le mélange couvre bien le sol dès le début jusqu'au broyage. Par rapport aux systèmes racinaires, le mélange structure bien le sol. L'avoine crée un système racinaire fasciculé, comme le millet. Le millet fait un léger pivot, mais moins que la vesce. Le sol est donc exploré en surface et en profondeur. Probablement grâce aux trois composants, ce mélange est à retenir concernant son apport en N, P, K. Comparé avec les résultats d'autres essais du CDDM, il donne le double en P et K (Prat, 2013 (communication personnelle)). Pour expliquer la raison, il faut tester les composants en monoculture. La composition du mélange est une réussite.

Raygrass italien – Sarrasin : IRG - B

Le sarrasin s'est développé trop vite. Il est semé trop dense et a étouffé le raygrass. Le raygrass n'est pas retenu, il n'a pas supporté la concurrence. Il a poussé surtout dans les passes pieds avec la tendance de monter trop vite en graines. Son système racinaire semble moins profond et moins fasciculé que les autres graminées. Au début le mélange couvre bien le sol, après le sarrasin s'éclairci en bas de la tige. La composition du mélange n'est pas une réussite.

Sorgho – Phacélie : S – P

Probablement à cause du semis réalisé à la main, la quantité du sorgho s'est exprimée d'une façon différente d'une répétition à l'autre. Semé en quantité faible, il est étouffé par la phacélie. Il y a éventuellement un problème de concurrence en nutriments : la phacélie supporte mieux la concurrence et prive le sorgho de nourriture. Le sorgho pousse dans les passes pieds et particulièrement bien dans les bouts de parcelles où il n'y a pas de phacélie. Semé à plus forte densité, le sorgho se développe en hauteur, la phacélie se développe au-dessous et couvre bien le sol. Le mélange structure bien le sol en surface et en profondeur. Semé en haute quantité (+ 5 kg/ha de sorgho), la composition du mélange est une réussite.

2. Rendement en matière organique verte et en matière sèche

Les rendements des différents mélanges en matière verte et matière sèche ne sont pas différents. Tous les mélanges donnent un taux de matière verte et matière sèche plus élevé que les autres essais du CDDM réalisés dans les mêmes conditions (Prat, 2013 (communication personnelle)).

Le rendement en matière organique aurait été probablement plus élevé, si la fertilisation avait été appliquée à un autre moment. Étant donné que les engrais verts sont semés le 12.06.2013, une application d'engrais le même jour est trop tôt.

Un lessivage a eu lieu à cause des intempéries et le manque d'un système racinaire développé et puissant. L'application aurait été mieux placée deux semaines plus tard pour fournir plus d'éléments nutritifs. Ils auraient mieux stimulé la croissance des mélanges (Allison, 1973).

Les résultats montrent que les engrais verts sont capables d'être utilisés pour produire de la matière verte. Cela est confirmé dans la littérature (Mandal, 2003). Des analyses en cours vont permettre d'estimer le taux de matière organique produit après leur enfouissement.

3. **Apport en carbone organique et rapport C/N**

Les engrais verts augmentent la concentration du carbone organique du sol (Mandal, 2003). Le mélange O – Mi – V apporte plus de carbone organique que les autres mélanges testés. Une explication est probablement donnée par Riley qui dit que les systèmes racinaires fasciculaires des graminées apportent de la matière organique riche en carbone organique (Riley, 2008). Ce mélange est composé de deux graminées alors qu'il y en a seulement une dans les autres mélanges. Le mélange stimule donc potentiellement plus la vie du sol. Des analyses en cours vont probablement confirmer cette hypothèse.

Le rapport C/N a une influence sur la disponibilité en azote minérale. Plus le rapport C/N est élevé, moins la plante reléguera d'azote pour la culture suivante (Ghesquière et Cadillon, 2012) car la vie du sol utilise l'azote pour dégrader le carbone. Ainsi, le mélange S – P avec un C/N de 34 provoquera les deux premiers mois un effet dépressif sur la culture suivante (Mével, 2013 (communication personnelle)). Le sorgho probablement un peu lignifié explique un rapport élevé en C/N. Un équilibre entre carbone organique et azote normal se trouve entre 12 et 20 (Gérard, 2013 (communication personnelle)). Le mélange IRG – B va donc stimuler la vie du sol plus vite car il y a assez d'azote libre pour la faune du sol pour se reproduire et dégrader le carbone organique et grâce à son apport en azote élevé. Concernant la culture suivante et en animant la vie du sol, l'enfouissement des engrais verts avec une proportion de C/N haute doit être accompagné par une fertilisation d'azote pour relancer la dégradation de l'engrais vert (Joffe, 1955).

4. **Bilan des mélanges testés sur la parcelle de développement**

Lupin – Sarrasin et Avoine – Sarrasin : L - B et O – B

Le sarrasin se développe trop vite par rapport à l'avoine et le lupin. Il risque de les étouffer. La capacité à couvrir le sol est moyenne. Le lupin et le sarrasin sont morphologiquement trop identiques. Les systèmes racinaires n'exploitent pas bien le sol. L'intérêt des mélanges concernant l'apport en P et K est faible comparé avec les autres mélanges. Il reste à prouver que le lupin apporte de l'azote pour les cultures suivantes. La composition des mélanges n'est pas à retenir.

Millet – Sarrasin : Mi – B

La densité de semis est trop faible. Une bonne densité du sarrasin en mélange est probablement comprise entre 10 et 15 kg/ha. Le sarrasin est ramifié et est devenu buissonneux. Le millet a développé un thalle assez compact, avec 5 à 10 tiges. Il supporte bien la haute concurrence du sarrasin vu qu'il a développé des feuilles longues qui dépassent le sarrasin en hauteur. Le mélange couvre bien le sol. A la longue il est possible, que le millet prenne le dessus. Le système racinaire est bien différent et exploite le sol aussi bien en surface (surtout millet) qu'en profondeur (surtout sarrasin). Le millet est la seule espèce testée qui est assez compétitive pour être semée avec le sarrasin sans être étouffée. Le mélange mérite d'être retesté avec une densité plus élevée des deux composants.

Raygrass italien – Millet – Avoine : IRG – Mi – O

Le mélange des graminées se développe d'une façon homogène. Le raygrass se développe au début moins vite que le millet et l'avoine. Il monte plus tôt à graines. Il supporte la concurrence d'avoine et du millet. Le millet se développe plutôt en hauteur, l'avoine et le raygrass forment une deuxième couche dense et couvrent bien le sol. A la longue il est possible que le millet devienne plus végétatif. Le système racinaire fasciculaire est assez dense. Le millet exploite aussi un peu le sol en profondeur. La composition du mélange est réussite. Il faut probablement changer raygrass et le remplacer par une autre graminée (moha).

Raygrass italien – Trèfle incarnat : IRG - C

Le mélange se développe trop lentement et le raygrass monte trop vite en graines. Cela est confirmée par la littérature (Thomas, 2005). Le trèfle semble ne pas être adapté aux conditions, il démarre trop tard. La composition du mélange est réussite, mais le mélange n'est pas utilisable dans les conditions nantaises.

Moha « presto » - Vesce : F Mi p – V et Moha « tardivo » - Vesce : F Mi t - V :

Le développement des deux mélanges est homogène. Même si le moha produit des tiges fines et compactes, la vesce se développe bien. La variante moha « presto » et la vesce se développe rapidement. Le moha produit des thalles moins épais que le millet. Il produit 5 à 10 tiges. Les systèmes racinaires sont compatibles. Le moha exploite avec son système racinaire fasciculaire la surface du sol, la vesce développe des racines pivotantes. La capacité du type moha « presto » et vesce à couvrir le sol est très bien du début jusqu'à l'enfouissement. Le rendement en matière organique est avec 31 t/ha le plus élevé. Le moha semble donc très productif (Thomas, 2005).

Le seul problème avec ce mélange est que la vesce a besoin continuellement d'eau pendant et après la germination car sinon les germes risquent de flétrir et de mourir. Ce mélange n'est donc pas utilisable sans irrigation. Le moha semble très résistant à la sécheresse.

Ce mélange mérite d'être retesté sous irrigation et avec une densité plus élevée en vesce pour augmenter la production en azote. La variante moha « tardivo » se développe trop tardivement et n'est pas retenue.

Dans tous les mélanges, le sarrasin et le raygrass ne supportent probablement pas les conditions arides. Ils montent vite à fleur ou à graines probablement suite à un stress hydrique.

5. Comparaison entre la parcelle de recherche et la parcelle de développement

L'apport en matière verte et en nutriments N, P, K est différent. Cette différence est surtout attribuée au manque d'irrigation de la parcelle de développement. Particulièrement le piégeage du phosphore est limité. L'irrigation joue alors un rôle important dans la production de la matière verte (Pousset, 2011). Un choix des engrais vert, qui ont un besoin d'eau relativement bas et qui résistent bien la sécheresse est donc important. Les graminées sont donc privilégiées. Selon les observations elles résistent bien à la chaleur et à la sécheresse. La densité plus élevée de semis que prévu sur la parcelle de recherche n'est pas à exclure. Elle a certainement aussi une influence sur l'apport en matière verte. Des futurs essais plus précis pourraient le confirmer.

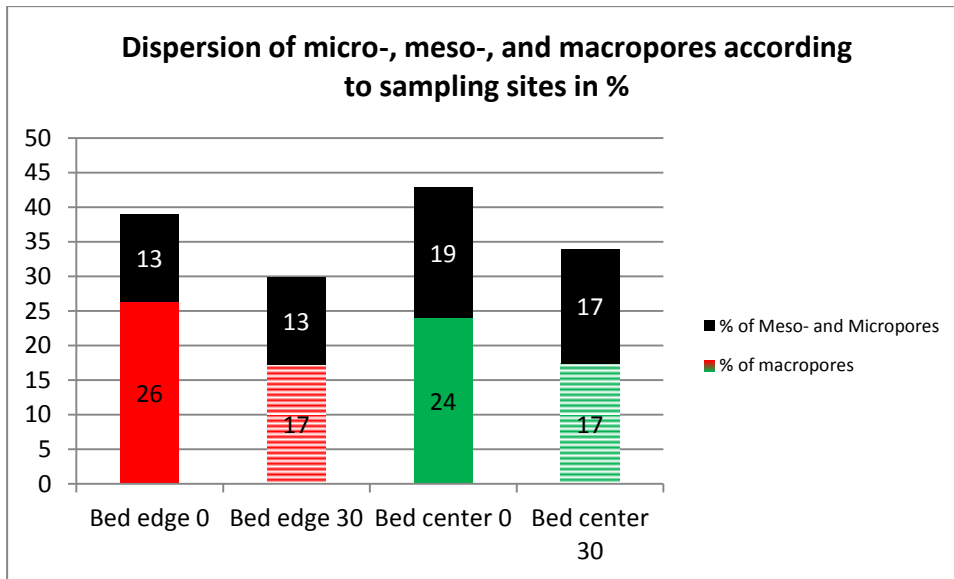


Figure 10 : Distribution of macropores according to total soil porosity in bed edge 0 cm and 30 cm and bed center 0 cm and 30 cm

Tableau 7 : Relation key between capillary potential and pore size and size class

Capillary potential	Pore size	Size class
0,6 kPa	300 - 750 μ m	2
0,2 kPa	750 μ m - 3 mm	3
0,05 kPa	> 3 mm	4

B. L'effet des engrais verts sur la structure du sol de la parcelle A

1. Analyse de la porosité du sol au point zéro

Les valeurs de la porosité totale sont faibles mais concernant des sols sableux dans la norme (Forget, 2013 (communication personnelle)). La porosité du sol est largement déterminée par les macropores (figure 29). Ils donnent au sol son aération et sa perméabilité (Hallaire, 2013). Ils expliquent la fragilité de la structure du sol. Les résultats de Day et Field montrent que les macropores sont les plus fragiles et les premiers à être endommagés par des ondes de choc des roues de tracteurs. Leurs mesures ont confirmé qu'il y avait plus de macropores au centre des planches (Day et Field, 2009). Le sol est plus tassé au bord de la planche qu'au milieu. Les résultats décrits par Day et Field ne correspondent pas aux résultats obtenus. Concernant l'analyse de la macroporosité, le bord ne présente pas plus de tassement que le milieu de la planche. L'effet des ondes chocs des passages de tracteurs n'est pas aussi important qu'attendu. Le passage des utiles aux dents (tableau 1) aide donc à améliorer la porosité du sol.

L'analyse de la conductivité hydraulique au P0 confirme ça. En profondeur, il n'y a pas de différence entre bord et milieu de la planche. En profondeur il n'y a pas de différence significative non plus.

Les pores d'assemblage (type C) dominent la porosité en surface du sol, la zone la plus travaillée (figures 17 et 18) (tableau 1). C'est aussi la zone d'enracinement des cultures, et donc la zone avec les problèmes de haute pression phytosanitaire et où il y a aussi la plupart de la vie du sol qui peut lutter contre cette pression (Davet, 1996). Une perturbation de cette zone est donc risquée et n'aide pas à « soigner » le sol.

Une analyse des macropores après la dégradation des engrais verts devrait permettre d'observer une diminution des pores d'assemblage. En effet, les substances organiques issues de la dégradation de la matière verte sont capables de coller les particules du sol (Mandal, 2003) diminuant la taille de pores d'assemblage. Cela devrait aboutir à une stabilisation de la structure du sol.

2. Influence du système racinaire des engrais vert sur la structure du sol

La stabilité de la structure du sol est améliorée par les systèmes racinaires (Joffe, 1955). Particulièrement dans les sols sableux les systèmes racinaires pivotants, créent des grands biopores en surface et profondeur après leur dégradation et améliorent ainsi la porosité du sol (Riley, 2008). De plus, les systèmes racinaires fasciculés ont un effet collant sur les agrégats du sol. Ils améliorent la stabilité de la structure du sol, et réduisent le lessivage en améliorant la rétention d'eau. Le lessivage des petites particules comme l'argile de la surface du sol vers la profondeur, explique que la porosité du sol est plus élevée en surface qu'en profondeur.

Pour expliquer l'effet de lessivage il faut comparer le P0 du test de la conductivité hydraulique avec le P0 de la caractérisation des macropores. Le groupe 4 des pores correspond au potentiel capillaire de 0,05 kPa (tableau 7). Ils causent ainsi une différence de la conductivité hydraulique entre bord/milieu 0 et bord/milieu 30 (figures 12) et (figures 17, 18, 19, 20). Donc si le groupe 4 serait responsable pour l'effet de lessivage, ils devraient être plus présents en bord/milieu 0 qu'en bord/milieu 30 (figures 17, 18, 19, 20).

Ce n'est pas le cas. Tandis que la répartition de différentes tailles des macropores du bord 0 (figure 18) suit cette hypothèse, le milieu 0 (figure 17) présente une absence des pores de la taille 4. Si l'absence du groupe 4 en milieu 0 n'est pas une faute de mesure, l'effet de lessivage ne peut pas être expliqué uniquement avec la distribution des différentes tailles des macropores.

En deuxième, la distribution des différents types des pores est regardée. En comparant les conductivités hydrauliques des bord/milieu 0 avec la distribution des macropores de bord/milieu 0, il devient visible, que le taux des macropores du type C est élevé (figure 12 et figures 17, 18). Sur l'autre côté, les conductivités hydrauliques des bord/milieu 30 et la distribution des macropores de bord/milieu 30 sont caractérisées par un taux élevé des macropores type A, qui correspondent aux pores tubulaires/racinaires (tableau 5). Les pores du type C, les pores d'assemblage, permettent alors une augmentation de la conductivité hydraulique et probablement un effet lessivage. Les pores du type A diminuent la conductivité hydraulique et permettent probablement de ralentir le lessivage.

Un bon enracinement baisse alors l'effet de drainage et lessivage d'un sol sableux. Des engrais verts avec un fort système racinaire sont donc avantageux pour garder l'humidité du sol. Cette conclusion est confirmée par l'analyse de la conductivité hydraulique à la récolte des différents engrais verts. La conductivité hydraulique du sol occupé par un engrais vert est plus élevée en profondeur qu'en surface. Selon Mandal en 2003, ce fait changera après la dégradation des engrais verts : la densité apparente diminue en surface et en profondeur, la porosité totale augmente, la conductivité hydraulique augmente et la rétention d'eau augmente (Mandal, 2003). Calculer le taux d'humidité en surface en profondeur pourrait également confirmer cette conclusion.

Le sol nu présente pour une pression capillaire de 0,5 kPa une conductivité hydraulique inversée. Un sol nu soumis à une période aride est beaucoup influencé dans sa conductivité hydraulique. Les agrégats du sol sont contractés empêchant la perméabilité. A long terme le changement entre contraction et décontraction détruit la structure du sol. Laisser le sol non occupé diminuera donc sa qualité et sa fertilité. L'équilibre biologique est perturbé ce qui augmente la pression phytosanitaire.

Pour avoir une évolution plus précise de l'effet de l'enracinement sur la distribution des types et tailles des macropores, des prélèvements pour une analyse d'image des macropores et pour le calcul de la porosité totale, devraient être pris pas seulement au P0, mais aussi au P1.

Perspectives

En analysant la vie du sol séparément au bord et au milieu de la planche, une relation entre la porosité/tassement et l'abondance de la vie du sol pourrait apparaître. En allant plus loin, avec une vie biologique du sol moins riche en bord et donc une perturbation plus grande de l'équilibre biologique du sol, une pression phytosanitaire plus haute aux bords des planches se montrera probablement.

C. L'effet des engrais verts sur la vie du sol

Lors de l'échantillonnage au moment de la récolte (P1) les prélèvements de terre étaient secs. Au cours de l'extraction des bioindicateurs, une grande quantité de particules de terre a pollué les échantillons. Malgré tout, quelques-uns ont pu être analysés et ils sont nommés P1.1. Afin de pouvoir observer une éventuelle évolution entre P0 et P1, une seconde série d'échantillonnage a été réalisée (P1.2) après l'enfouissement des engrais verts. Cela ayant induit une perturbation du sol, une vérification a été effectuée afin de savoir si ce travail du sol avait un impact sur les résultats. Il s'est avéré que les résultats obtenus entre P1.1 et P1.2 n'étaient pas différents. Ainsi, la diffusion des bioindicateurs ne semble pas être dépendante du travail du sol. La comparaison entre P0 et P1 (P1.1+P1.2) peut donc être faite.

Une perturbation du sol semble avoir peu d'influence sur la densité des populations des collemboles et des acariens penthalodidae. Cela est contradictoire à la littérature (Bertrand et Renaud, 2009).

La diminution des collemboles est probablement explicable par la période aride. Ils résistent moins bien que les acariens à la sécheresse (Bourguignon, 2013 (communication personnelle)). Ils se sont probablement cachés plus en profondeur. De plus ils n'ont pas eu beaucoup de matière organique à leur disposition et donc peu des ressources nutritives. Ils ne se nourrissent apparemment pas des exsudats racinaires des engrais verts (Bourguignon, 2013 (communication personnelle)).

L'absence des penthalodidae n'était pas attendue. Une sensibilité aux températures élevées et à une humidité basse est possible. Ils se sont probablement cachés plus en profondeur. Généralement ils sont peu actifs en été (Bourguignon, 2013 (communication personnelle)). Avec la diminution des collemboles mais la stagnation des acariens carnivores de la famille gamasidae la concurrence concernant des ressources nutritives était probablement trop grande. Concernant la sensibilité des collemboles et des acariens à la température et à l'humidité du sol, l'installation de sondes de température et d'humidité combinée avec des prélèvements Berlèses permettrait d'obtenir plus d'informations.

1. Evolution des populations d'acariens de l'ordre astigmata et de la famille des gamasidae

Astigmata

La population des acariens décomposeurs de l'ordre astigmata augmente entre les prélèvements du point 0 et les prélèvements de P1. Leur croissance est donc stimulée par les engrais verts. Vu que pendant la croissance des engrais verts peu de détritiques sont produits, ils se nourrissent forcément des algues, champignons et bactéries attirées par les exsudats des engrais verts. Cela confirme l'hypothèse de Bourguignon en 2013 (communication personnelle) et de Cheek en 2013 : une augmentation des astigmata signifie surtout une augmentation d'activité des bactéries et des champignons. Les acariens astigmata sont des acariens non cryptostigmatic (Gressitt, 1967). Ils se nourrissent donc des champignons saprophytiques et des mycorhizes (figure 2). Une augmentation des champignons pourrait être confirmée par les résultats du point de récolte des communautés de nématodes. La microfaune est apparemment peu perturbée par un manque d'humidité et des hautes températures. Cela est confirmé par Kautz en 2004

L'enfouissement des engrais verts augmente la biomasse microbienne (Mandal, 2003) et l'activité enzymique des microorganismes (Elfstrand, 2007). Avec la dégradation des racines, tiges et feuilles et des exsudats racinaires ils produisent de la matière organique facilement accessible pour la faune du sol (Riley, 2008). Une augmentation de la diversité et de l'activité de la microfaune et mésofaune par les engrais verts (Dufils et Goillon, 2011) a probablement un effet positif sur la diminution de la pression phytosanitaire : ainsi, des essais ont montré que des combinaisons de graminées ont montré des effets antagonistiques : le nombre de microorganismes qui sont des antagonistes aux champignons pathogènes a augmenté (Naumann et Lange – de la Campe, 1976 et 1977). Une analyse de P2 va probablement confirmer la littérature.

Gamasidae

La population des acariens gamasidae ne change pas beaucoup entre P0 et P1. Il semble qu'ils trouvent assez de ressources pour se nourrir. Ils se nourrissent aussi des autres acariens (Bourgignon, 2013 (communication personnelle)) et diminuent ainsi probablement la population des panthalodidae.

En comparant les différents mélanges d'engrais verts, les gamasidae sont le seul bioindicateur (à partir des acariens penthalodidae) qui montre des différences significatives par rapport à la stimulation de la densité de la population. La parcelle du mélange O – Mi – V présente significativement plus d'acariens gamasidae que le mélange S – P et le sol nu. Ce fait est inattendu. Vu que les acariens gamasidae sont carnivores (Judson, 2013 (communication personnelle)), ce fait ne peut pas tenir compte directement des engrais vert.

2. La différence des populations des bioindicateurs dépendant des modalités

Tous les engrais verts mis en place ont en comparaison avec le témoin du sol nu un effet positif sur la vie du sol. Les densités des populations de collemboles et d'acariens sont sur les parcelles non occupées par les engrais verts les plus faibles. Les engrais verts entretiennent la vie du sol. A partir du mélange O – Mi – V les mélanges ne présentent pas d'effet significatif de stimulation des collemboles et des acariens. Il semble, que le mélange O – Mi – Va plus d'effet stimulant sur tous les acariens et collemboles (sauf les acariens penthalodidae). C'est en même temps le seul mélange qui est composé de trois partenaires et le seul mélange qui contient une légumineuse. La diversité des composants et des légumineuses peuvent être des facteurs avantageux pour la vie du sol.

Limites

Des difficultés qui peuvent avoir une influence sur les résultats sont apparues :

Des fluctuations légères concernant la profondeur et le volume des prélèvements sont également possibles. L'analyse avec une loupe binoculaire pose une limite. Il est possible que certain individus aient été oubliés.

Vu que les collemboles sont sensibles à la sécheresse, leur choix comme bioindicateur pour analyser l'effet des engrais verts sur la vie du sol se limite probablement sur l'effet de la matière verte des engrais verts enfouis dans le sol. Ils ne sont pas stimulés par les systèmes racinaires.

3. Les populations de nématodes

Abondance des différents groupes de nématodes :

La communauté des nématodes du sol du point 0 se caractérise par une domination des nématodes libres (bactérovores, peu de nématodes fongivores) et une absence des nématodes phytophages. Le sol est donc très peu actif.

Le nombre de nématodes libres reste faible. Les nématodes libres sont bénéfiques pour la qualité du sol (Villenave, 2013 (communication personnelle)). Peu de nématode libre signifie une teneur en matière organique faible, vu que les nématodes n'ont pas de ressources pour se nourrir. Un taux faible de nématodes libres est également un indicateur pour un habitat perturbé. Selon Villenave en 2009, l'absence de travail du sol simultanément à la restitution des résidus de récolte, ainsi que la fertilisation minérale et organique comme des engrais verts, induira une augmentation de la densité de nématodes de l'ensemble des groupes trophiques.

En même temps le régime hydrique du sol est pour les nématodes très important. Une culture des engrais verts, qui est bénéfique pour l'humidité du sol est avantageuse pour la communauté des nématodes (Villenave, 2009). Les résultats des prélèvements pendant la récolte et la dégradation montreront probablement une croissance des communautés des nématodes libres stimulée par les exsudats des racines.

Point densité des nématodes phytophages :

La présence des nématodes phytophages ne sera pas bénéfique pour le sol et fait parti d'un mauvais état sanitaire d'un sol fatigué. Une absence des nématodes phytoparasites est rare et inattendue (Villenave, 2013 (communication personnelle)). Leur nombre est au-dessus du seuil de détection de 2 nématodes /100g de sol sec. A la date du prélèvement le sol était en état non couvert. Les nématodes n'ont rien trouvé pour manger. Une forte possibilité est, selon Villenave 2013 (communication personnelle), qu'après la mise en place des engrais verts leur nombre va augmenter vu qu'ils peuvent se nourrir des systèmes racinaires. Cela ne signifiera pas que les engrais verts attirent les nématodes. Une communauté de nématodes phytophages est normale si elle reste sous un seuil de risque pour la culture.

Diagnostic du réseau trophique du sol :

L'indice d'enrichissement élevé est explicable avec un haut flux d'azote et autres minéraux dans le sol. Avec un manque de couverture végétale, il y a un manque des consommateurs de ces éléments. La culture précédente n'a pas piégé tous les éléments. Le nombre élevé des bactéries fonde probablement aussi sur ce flux d'éléments car ils dégradent les minéraux. La valeur va certainement baisser avec une couverture végétale (Villenave, 2013).

D. L'évolution de la santé du sol

L'expression de la fusariose sur les radis cette année reste faible. Elle est sous le seuil de 2 à 3 % qui représente pour le producteur le début d'un dégât important (Thoument, 2013 (communication personnelle)). Des irrégularités concernant l'irrigation ont eu lieu pendant la culture. La terre des caissettes était prise dans les bouts des parcelles où il y a probablement une pression plus faible, car ils ne sont pas occupés par les cultures.

Le résultat est contradictoire par rapport aux résultats habituels du producteur : dans une occupation des parcelles avec une culture des radis, il y a normalement un taux d'attaque autour de 5 % (Thoument, 2013 (communication personnelle)). Pour expliquer ce fait, il faut attendre les résultats de la prochaine culture de radis.

Conclusion

L'effet des treize mélanges d'engrais verts sur la structure du sol sableux et trois groupes de la vie du sol ont été analysés. Le développement des mélanges n'était pas homogène. Les mélanges avec du raygrass n'ont pas été convaincants, les mélanges avoine – millet – vesce et moha presto – vesce sont à retenir. Les autres mélanges comme le sorgho – phacélie sont à retester en changeant la densité de semis. Concernant l'analyse de la structure du sol, la mise en place d'une interculture baisse la conductivité hydraulique du sol en surface. Une stabilisation de la structure du sol par réduction du groupe des pores « d'assemblage » est assumée. En prolongement du projet, un test de la porosité ainsi qu'une analyse des types et tailles des macropores au point de récolte des engrais verts donnera plus d'informations. Concernant les trois bioindicateurs, les engrais verts ont jusqu'à leur récolte un effet faible sur les collemboles et les acariens. L'utilisation des collemboles comme bioindicateur est mise en question vu qu'ils semblent très sensibles à la sécheresse. Les causes de la disparition des acariens de la famille des penthalodidae sont à analyser dans les prochains essais.

La pression phytosanitaire du sol analysée par le taux d'attaque de fusariose sur radis était faible cette année. Les résultats de l'effet de la matière verte des engrais verts enfouis ainsi que les trois bioindicateurs seront obtenus à l'issue de ce stage. Selon la littérature et les premières analyses, il semble possible que les engrais verts et leur matière verte enfouies améliorent la structure physiologique et biologique du sol. Un effet long terme et sa conséquence sur une amélioration de l'état sanitaire du sol va être analysé dans les deux prochaines années du projet Pathosol.

Bibliographie

- Abergel F., sept/oct. 1997, « *Les engrais verts* », revue La vie du jardin, n° 301, P14 – 15
- Allison F., 1973, « *Soil organic matter and its role in crop production* », Elsevier scientifique publishing company, chapter 22 « Green manuring and related practices », P 445 – 460
- Bachelier G., 1963, « *La vie animale dans le sol* », Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, P 3-4
- Bertrand B., Renaud V., 2009, « *Le génie du sol vivant* », éditions de Terran,
- Bispo A., Grand C., Galsomies L., 2009, « *Le programme ADEME, Bioindicateurs de qualité des sols : Vers le développement et la validation d'indicateurs biologiques pour la protection des sols* », ADEME, Etude et Gestion des Sols, vol 16, P 145 – 158
- Capowiez Y., 2009, « *Etude des effets des apports de produits résiduels organiques sur la macrofaune lombricienne en conditions de grandes cultures* », ADEME, Etude et Gestion des Sols, vol16, P 175 – 185
- Chaussod R., 1996, « *La qualité biologique des sols : Evaluations et implications* », Laboratoire de Microbiologie des Sols, INRA de Dijon, publié dans Forum « Le sol, un patrimoine menacé ? », P 261 – 279
- Cheeke T., 2013, « *Microbial Ecology in sustainable agroecosystems* », CRC Press Taylor and Francis Group, P 69
- Coineau, Cléva, du Chatenet, 1997 « *Ces animaux minuscules qui nous entourent* », les guides pratiques du naturaliste, Delachaux et Niestlé
- Davet P., 1996, « *Vie microbienne du sol et production végétale* », INRA éditions, P 67 - 77
- Day B., Field L., 2009, « *Chapter 5: Soil management* », Biosystems Engineering, vol 3, P 61 – 69
- Decagon Devices, Inc, 2007 – 2012, « *Mini Disk Infiltrometer, User's Manual* », n° 10, P 15 – 18
- Delgin M., nov. 2002, « *Engrais verts et cultures de coupure* », Revue : Culture légumière, hors-série, P 41 – 44
- Devillers J., 2009, « *Sélection multicritère de bioindicateurs de la qualité des sols* », ADEME, Etude et gestion des Sols, vol 16, P 233 – 242
- Dufils A., Goillon C., 2011, « *Les techniques alternatives, Le Sorgho du Soudan* », ressources, collection 1, document 1B, P 1 – 4
- Elfstrand S., Hedlund K., Martensson A., 2007, « *Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring* », Applied soil Ecology, vol 35, Elsevier, P 610 – 621

Gerbault S., sept/oct. 2010, « *Les engrais verts – de précieux « fertilisants » naturels* », Revue : La Vie du Jardin et des Jardiniers, n° 379, P 16 – 17

Girault J-P., Turbeaux S., 2012, « *Lettre fourrage n°2* », agricultures et territoires, chambre d'agriculture centre

Gressitt J., 1967, “*Entomology in Antarctica*”, American Geophysical Union, Library of Congress catalogue, n° 67 – 62159, vol 10, Bookreview in *Quaestiones entomologicae*, n° 1, vol 5, 1969, University of Alberta, Edmonton, Canada, P 2

Hallaire V., 2003. « *Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements.* » *Catena* , vol 54, 637 – 649

Höflich G., 1977 « *Einsatz von Bioziden zur Beeinflussung der Bodenmikroflora und deren Umsetzungen (The effect of biocides on the microflora of soils and their degradation). 3. Mitteilung : Wechselbeziehungen zwischen veränderten Mikroorganismenpopulationen und dem Abbau von Gründüngungspflanzen im Vergleich zum Strohabbau* », Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Zentralbibliothek Bakteriologie, vol 132, P 148 – 154

Höflich G., Steinbrenner K., 1988 « *Einfluss acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf einige bodenbiologische Faktoren* », Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, VEB Gustav Fischer Verlag Jena, P 611 – 620

Joffe J., 1955, « *Green Manuring Viewed by a Pedologist* », New Jersey Agricultural Experiment Station, Rutgers University New Brunswick, New Jersey, published in « *Advances in Agronomy* », vol 7, P 141 - 187

Glachant C., 2012, « *Choisir et réussir son couvert végétal pendant l'interculture en AB* », Cahier technique, n° 1, ITAB, P 10

Kautz T., Wirth S., Ellmer F., 2004 « *Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime* », *European Journal of Soil Biology*, n° 40, Elsevier, P 87-94

Kodova V., 1977 « *Soil loss : an overview* », Institute of Agrochemistry and Soil Science, Moscow State University, Elsevier Scientific Publishing Company, *Agro-Ecosystems*, vol 3, P 205 – 224

Kubal M., 2012, « *Determination of soil dehydrogenase activity (DHA)* », Institute of chemical technology Prague Faculty of Environmental Technology, Department of Environmental Chemistry, Ecotoxicology, studying material, Laboratory work n°8

Laval K., 2009, « *Nouvelles avancées vers la compréhension des données biologiques* », ADEME, Etude et Gestion des Sols, vol 16, P 275 – 287

Laval K., 2009, « *Nouvelles avancées vers la compréhension des données biologiques* », ADEME, Etude et Gestion des Sols, vol 16, 3/4, P 275 – 287

Löhnis F., 1926, « *Nitrogen availability of green manures* », *Soil science*, vol 22

- Mandal U., 2003, « *Green manuring: its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping system* », European Journal of Agronomy, n° 19, Elsevier
- Naumann K., Lange – de la Campe M., 1976 « *Wirkung von Pflanzenrückständen auf die parasitische Aktivität von bodenbürtigen Krankheitserregern und die saprophytische Mikroflora des Bodens (Effect of plant residues on the parasitic activity of soilborne pathogens and the saprophytic microflora of the soil). 1. Modellversuche mit Rhizoctonia solani* », Institut für Phytopathologie Aschersleben, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Zentralbibliothek Bakteriologie, vol 131, P 378 – 391
- Naumann K., Lange – de la Campe M., 1977 « *Wirkung von Pflanzenrückständen auf die parasitische Aktivität von bodenbürtigen Krankheitserregern und die saprophytische Mikroflora des Bodens (Effect of plant residues on the parasitic activity of soilborne pathogens and the saprophytic microflora of the soil). 2. Einfluß eines Zwischenfruchtanbaus auf den Befall mit Rhizoctonia solani* » Institut für Phytopathologie Aschersleben, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Zentralbibliothek Bakteriologie, vol132, P 573 – 592
- Pousset J., 2011, « *Engrais verts et fertilité des sols – Principes agronomiques, Pratiques agricoles* », Productions végétales et grandes cultures, Agriproduction Editions France Agricole, 3^e édition
- Renaudat J., 2012, « *Moha fourrager, rapido* », Sem-Partners SAS, fiche technique
- Riley H., 2008, « *Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use* », Agriculture, Ecosystems and Environment, vol 124, Elsevier, P 275 – 284
- Sirjean S., mai 1997, « *Engrais verts – Pour l'entretien de votre sol* », Revue : Fruits & Légumes, n° 152, P 44 – 45
- Spaccini R., Piccolo A., 2012, « *Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils* », Journal of Geochemical Exploration, Elsevier, n° 129
- Spethmann W., G. Otto, 2003, « *Replant Problems and Soil Sickness* », Elsevier Ltd
- Thomas F., 2005 « *Couverts végétaux, développer des sols performants, encourager la diversité biologique, recycler et produire de l'azote* », Techniques culturales simplifiées, n°33
- Villeneuve C., 2009, « *Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabé (Madagascar)* », ADEME, Etude et Gestion des Sols, vol 16, P 369 – 378
- Yang H., 2006, « *Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China* », Agriculture, Ecosystems and Environment, n°116, Elsevier, P 27-33

Communications personnelles

Apolline Prat, 2013, Conseillère en cultures de plein champ, CDDM, Pont St Martin

Felgentreu C., 2013, conseiller technique, Deutsche Saatveredelung AG

Hallaire V., 2013, Institut National de la Recherche Agronomique, UMR Sol Agronomie Spatialisation, Rennes

Judson Dr M., 2013, Muséum national d'Histoire naturelle Paris, Département Systématique et Évolution, Arthropodes

Patrick Verron, 2013, Conseiller en cultures de plein champ, CDDM, Pont St Martin

Riou V., 2013, conseillère à la Chambre Agriculture Maine et Loire

Serge Mével, 2013, Conseiller en cultures de plein champ, CDDM, Pont St Martin

Sylvain Gérard, 2013, Conseiller en cultures de plein champ, CDDM, Pont St Martin

Villeneuve C., 2013, expert recherchant sur la composition des populations des nématodes dans le laboratoire ELISOL - Environnement détermination des nématodes, Montpellier

Virginie Forget, 2013, Enseignant Chercheur, Unité pédagogique – Sols, substrats horticoles et urbains, Agrocampus-ouest, Angers

Yann Thoument, Chef de culture chez l'entreprise EARL Ducoin, Petit Mars

2011, « *Terres d'avenir* », Chambre d'Agriculture de la Marne

Sites Internet

[1] http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/browse/Q/*/E: consulté le 15.08.2013

[2] <http://www.bastamag.net/article1730.html>: A. Rousseaux « Au secours, la terre disparaît ! », 2011 consulté le 18.08.2013

[3] http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018.pdf: PLAN *ECOPHYTO* 2018 DE REDUCTION DES USAGES DES PESTICIDES 2008 – 2018 ; consulté le 26.07.2013

[4] <http://www.mache-nantaise.com/>: La lêche nantaise, une origine authentique, Le bassin Nantais ; consulté 24.07.2013

[5] <http://www.cddm.fr/>: consulté le 24.07.2013

[6] <http://pays-de-la-loire.france3.fr/2012/09/21/lautomne-fait-sa-rentree-91055.html>: L'automne fait sa rentrée avec la mâche nantaise, 2012 ; consulté : 24.07.2013

[7] <http://www.greenotec.be/modules.php?name=Content2&pa=showpage&pid=81>, « On a testé avec vous... l'avoine brésilienne », n consulté le 15.05

Annexes

Annexe I : Liste des engrais verts possibles selon l'ITAB



Familles	Espèces	Destruction par le gel	Système racinaire
Légumineuses	Fenugrec	-7 °C	mixte
	Féverole de printemps	-5 °C	pivotant
	Féverole d'hiver	-10 °C	pivotant
	Gesse	-10 °C	fasciculé
	Lentille fourragère	-7 °C	mixte
	Lotier comiculé	-10	mixte
	Lupin	DND	mixte
	Luzerne	DND	pivotant
	Méililot	DND	fasciculé
	Minette	DND	fasciculé
	Pois protéagineux de printemps	DND	pivotant
	Pois protéagineux d'hiver	DND	pivotant
	Pois fourrager de printemps	-2 °C	pivotant
	Pois fourrager d'hiver	-10 °C	pivotant
	Sainfoin	-10 °C	pivotant
	Soja	DND	mixte
	Trèfle blanc	DND	mixte
	Trèfle d'Alexandrie	-5 °C	mixte
	Trèfle incarnat	-10 °C	pivotant
	Trèfle violet	DND	fasciculé
Trèfle de perse	-10 °C	mixte	
Vesce de printemps	0 °C	fasciculé	
Vesce d'hiver	-7 °C	fasciculé	
Repousses de légumineuses	DND	mixte	
Graminées	Avoine de printemps	0 °C	fasciculé
	Avoine d'hiver	-13 °C	fasciculé
	Avoine diploïde du Brésil	-4 °C	fasciculé
	Moha	-1 °C	fasciculé
	Millet	DND	fasciculé
	Ray grass d'Italie	DND	fasciculé
	Seigle	ND	fasciculé
	Sorgho	-1 °C	mixte
repousses de céréales	DND	mixte	
Crucifères	Cameline	-10 °C	pivotant
	Colza fourrager d'hiver	DND	pivotant
	Colza d'hiver	DND	mixte
	repousses colza	DND	pivotant
	Moutarde brune	DND	pivotant
	Moutarde blanche/jaune "classique"	DND	mixte
	Moutarde blanche/jaune "nématodes"	DND	mixte
	Navette fourragère d'hiver	-13 °C	pivotant
Radis fourrager	-13 °C	pivotant	
Composées	Nyger	-1 °C	pivotant
	Tournesol	-3 °C	pivotant
Hydrophyllacée	Phacélie	-6 °C	mixte
Polygonacées	Sarrasin	-2 °C	mixte
Linacées	Lin de printemps	-10 °C	mixte
	Lin d'hiver	-13 °C	mixte

DND : Données Non Disponibles.

Annexe II : La méthode de Newman

Des prélèvements du sol en surface (0-15 cm) et en profondeur (15-30 cm) du sol, faits avec un cylindre sont pris dans le sol enraciné. Les prélèvements sont lavés et les racines nettoyées dans une solution de 5% formaline. Les racines sont posées sur un plat en verre. Sous le plat il y a un papier millimétré. La longueur des racines ($R = \text{Root length}$) est mesurée avec la formule :

$$R = \frac{\pi}{4} N$$

R est la longueur des racines en cm, N est le nombre d'intersections entre la racine et les lignes aléatoires du papier millimétré.

Ensuite la densité des longueurs des racines ($RLD = \text{Root Length Density}$) en cm racines/cm⁻³ de sol peut être calculé avec la formule :

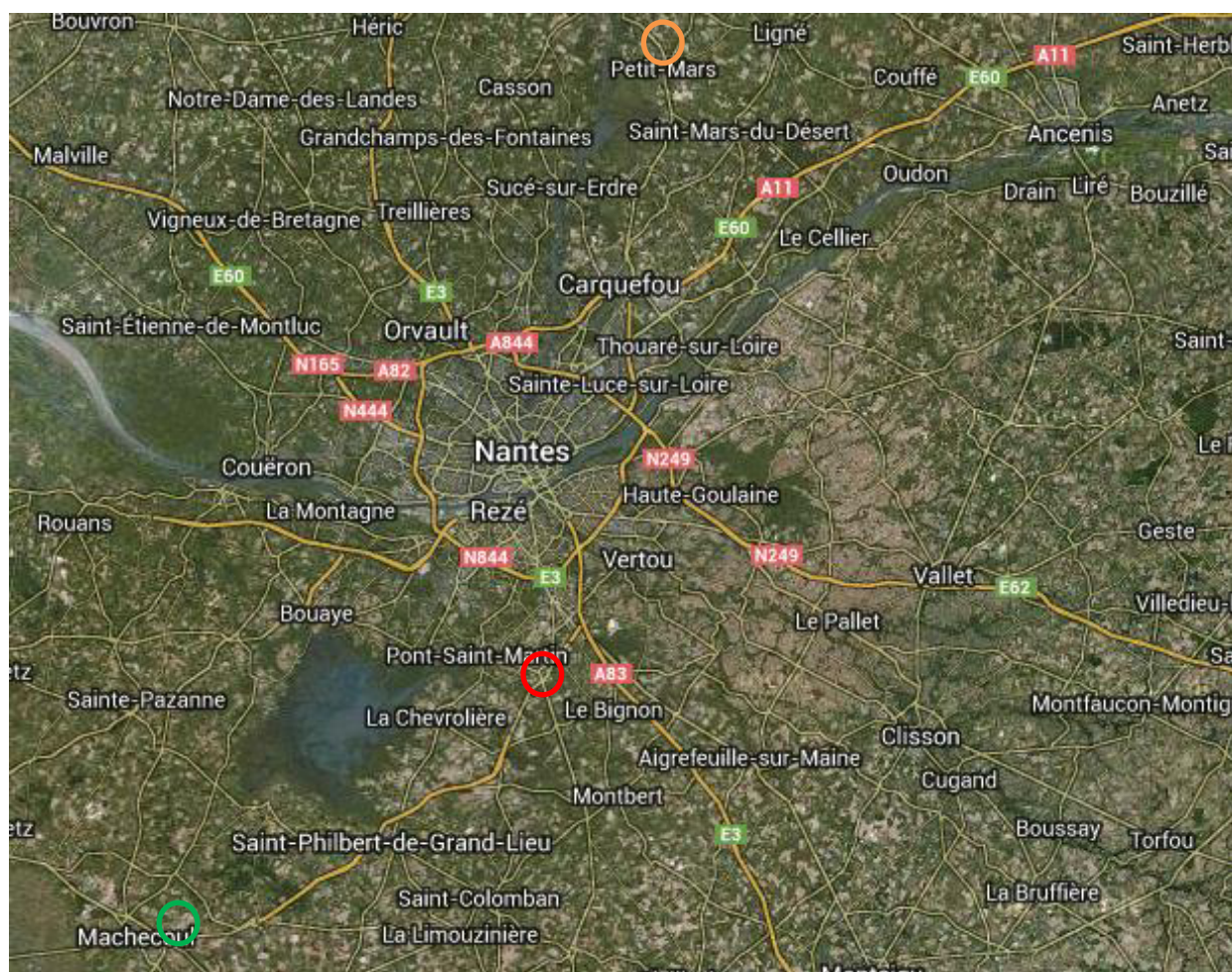
$$RLD = \frac{R}{V}$$

$V = \text{volume du prélèvement du sol, du cylindre.}$




Annexe III : Exemples d'analyse de l'activité enzymique

- Les déhydrogénases sont des composants essentiels du système d'enzymes des microorganismes. Leur activité peut être analysée via la méthode de Thalmann. L'activité déhydrogénase peut être utilisée comme indicateur pour mesurer l'activité des microorganismes dans le sol (Kautz, 2004, Kubal, 2012).
- La mesure de l'activité de cellulase dans 0 – 15 cm de profondeur du sol se fait en utilisant la méthode de Schinner et Mersi : des prélèvements du sol sont inoculés avec du carboxyméthylcellulose. Ainsi les sucres et produits en molécules faibles résultant de la dégradation enzymatique de la carboxyméthylcellulose sont utilisés pour la réduction de potassium hexacyanoferrate II en potassium hexacyanoferrate III. Ceci réagit avec la Fe(III)ammoniumsulfate en formant un complexe connu sous le nom de bleu de Prusse. Le bleu de Prusse peut être déterminé en photométrie de 690 nm. Kautz a trouvé avec cette méthode une activité cellulase élevée dans les sols soumis à un traitement d'enfouissement des engrais verts (Kautz, 2004).
- Selon Elfstrand, l'activité de la vie du sol peut être mesurée en regardant l'activité des enzymes protéases, acide phosphatase et arylsulphatase (Elfstrand, 2007).

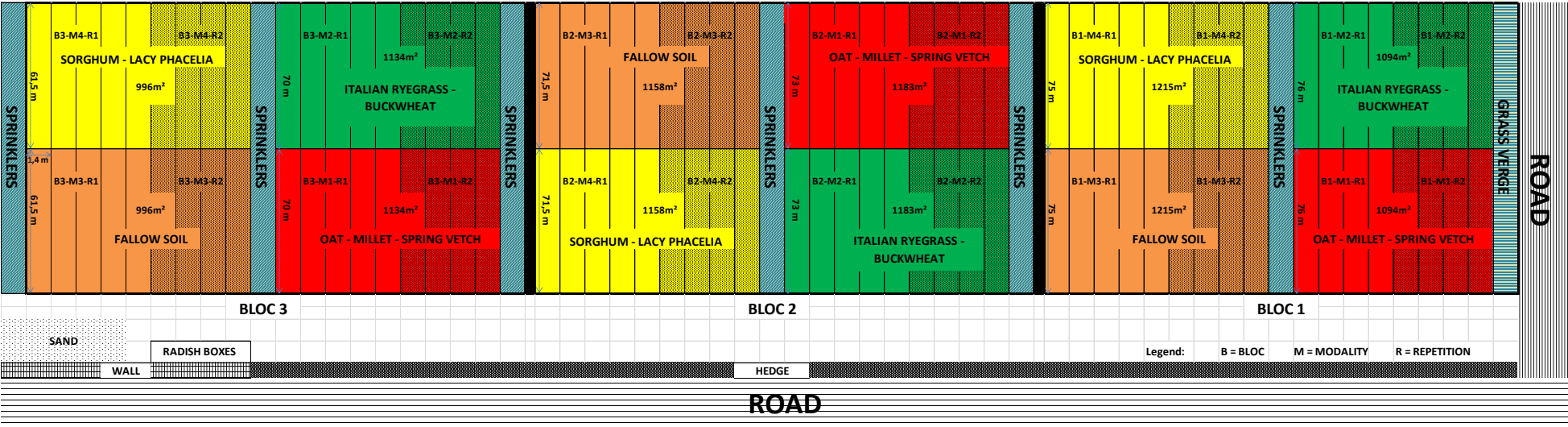
Annexe IV : Site des exploitations



Légende :

-  = siège du CDDM
-  = parcelle de recherche
-  = parcelle de développement

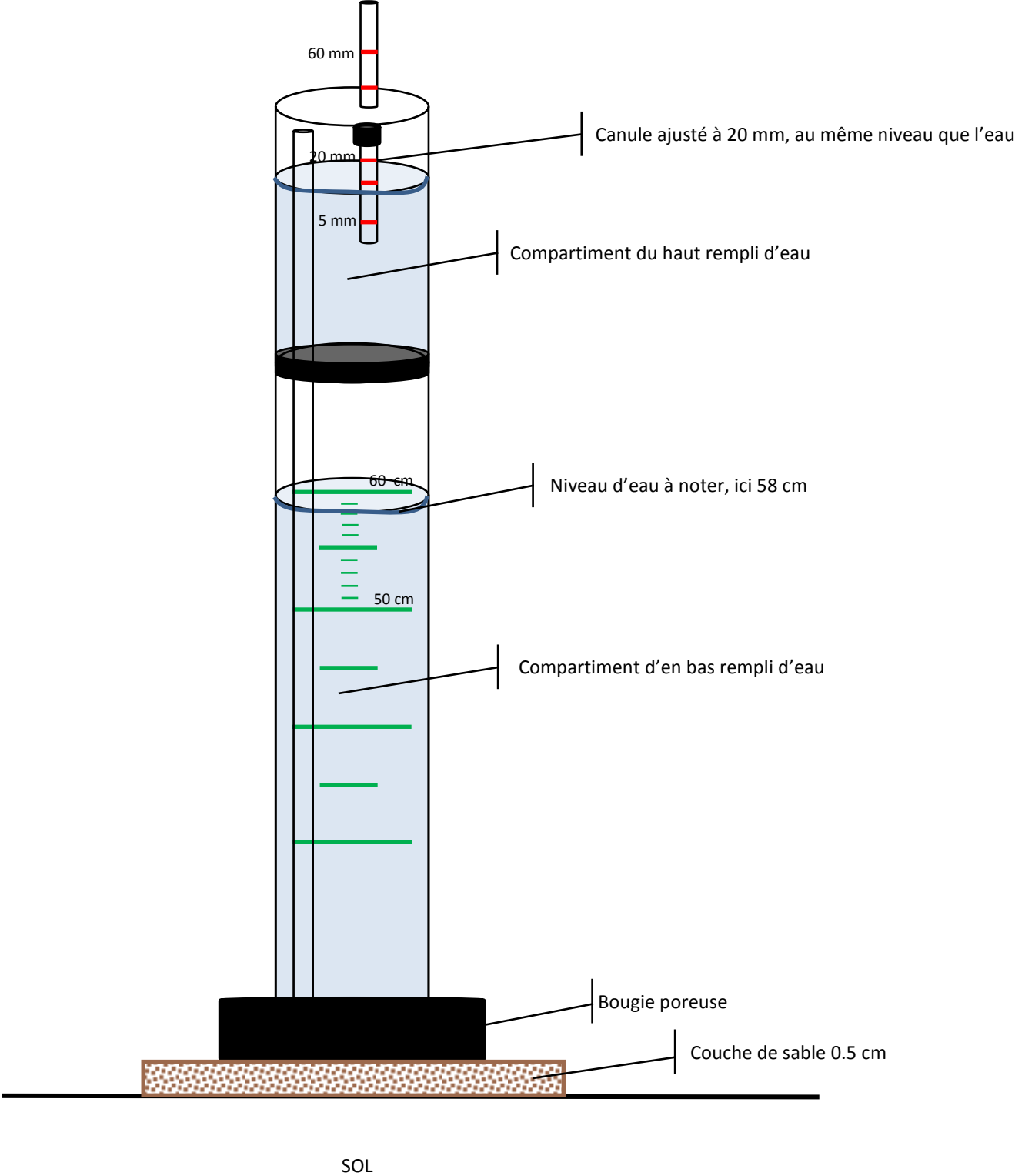
Annexe V : Plan d'essai, parcelle de recherche



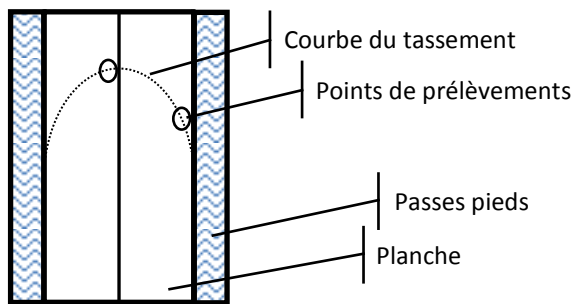
Annexe VI : Plan d'essai parcelle de développement

Subunit 1									
Buckwheat - Millet 58 lm		Buckwheat - White lupine 58 lm			Buckwheat - Oat 58 lm				
Subunit 2									
Spring vetch - foxtail millet "tardivo" 75 lm				Spring vetch - Foxtail millet "presto" 75 lm					
Subunit 3									
Landsberger Gemenge 15 lm									
Landsberger Gemenge 15 lm									
Subunit 4									
Crimson clover - Oat 71 lm									
Crimson clover - Italian ryegrass 71 lm									
Italian Ryegrass - Millet - Oat 71 lm				Crimson clover- Millet 71 lm					
Legend:									
lm = linear meter: 1 m length x 1,4 m breadth									

Annexe VII : Schéma d'un infiltromètre:



Annexe VIII : Démarche d'un test de la conductivité hydraulique en non saturé

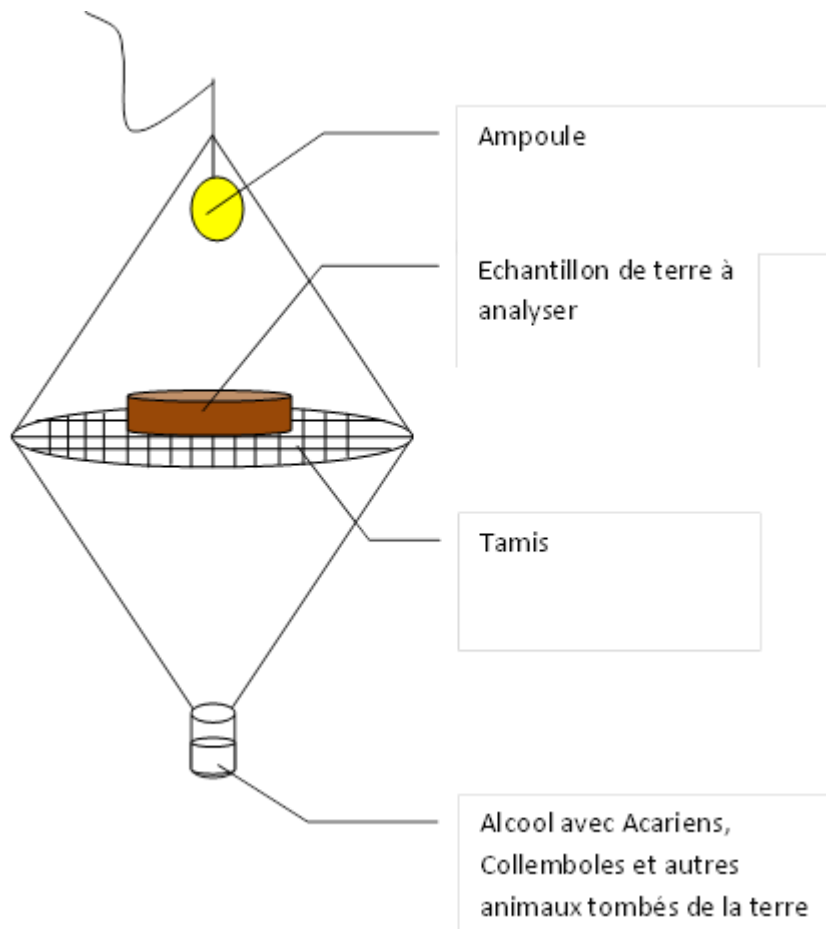


Les passes pieds ont une forte influence sur la structure du sol de la planche : l'endroit le moins compacté se trouve au milieu de la planche. L'endroit le plus compacté se trouve à côté des passes pieds. C'est pour cela que le test d'infiltration est fait une fois au milieu de la planche et une deuxième fois en bordure.

Déroulement du test d'infiltration :

- 2 niveaux à mesurer : 0 cm et 30 cm de profondeur ; commencer par 0 cm :
 - 0 cm : Nettoyer la surface à tester (enlever les pierres et le sable volant)
 - Nivelier le sol de la surface à tester afin de ne pas avoir de pente
 - Mettre une couche de sable fin (environ 0,5 cm d'épaisseur) sur le sol (cercle d'environ 10 cm de diamètre, → Lisser la surface
 - Remplir l'infiltromètre avec de l'eau du robinet des deux côtés et fermer le petit compartiment avant le grand compartiment
 - Poser l'infiltromètre de manière à ce que la bougie poreuse soit sur le sable, et veiller à ce qu'elle soit bien perpendiculaire par rapport au sol
 - 3 niveaux de puissance d'aspiration du sol sont à mesurer : 0,5 mm, 20 mm et 60 mm
 - Commencer par 60 mm : ajuster la petite canule dans le compartiment du haut à 60 mm
 - Attendre que le régime des bulles soit régulier
 - Enclencher le chronomètre et noter le niveau d'eau dans le compartiment du bas (bien noter au niveau du bas du ménisque)
 - Noter toutes les minutes le niveau de l'eau dans le compartiment du bas
 - Quand la quantité d'eau absorbée par le sol entre chaque minute devient égale, arrêter les notations
 - Remplir de nouveau l'infiltromètre avec de l'eau du robinet, si nécessaire
 - Renouveler la procédure pour la puissance d'aspiration 20 mm
 - Faire de même pour 5 mm, mais relever toutes les 30 secondes le niveau de l'eau dans le compartiment du bas si besoin
 - 30 cm : Faire 1 trou à 30 cm de profondeur et d'une largeur d'environ 50 cm, qu'il y a assez de place pour suivre l'abaissement de l'eau dans le cylindre
- Reproduire la procédure dans le trou de 30 cm

Annexe IX : Schéma d'une Berlèse




Annexe X : Résultats d'analyse de la nématofaune par le laboratoire ELISOL

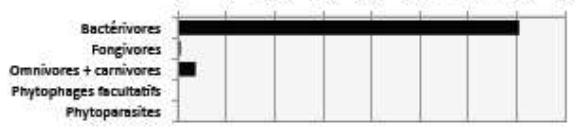
ANALYSE DE LA NEMATOFAUNE DU SOL (norme ISO NF 23611-4)

Référence client: Prélèvement initial
Référence ELISOL: n°3182
Client: D. Lloyd, CDDM
Site: La furetière 44390 Petit Mars
Occupation: mâche
Date de réception de l'échantillon: 5 juin 2013
Date d'envoi des résultats: 19 juillet 2013


Fiche N° 3182



Abondance des différents groupes trophiques de nématodes
(nb /100 g de sol sec)




Abondance des genres majeurs de nématodes phytoparasites présents
(nb /100 g de sol sec)



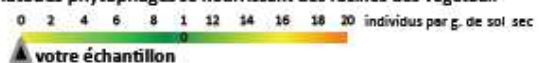
Sur certaines cultures, certains nématodes peuvent créer des dégâts.
Le symbole indique lorsque la valeur seuil connue pour le couple espèce végétale x nématode est atteinte.

Nématodes libres: bactériovores + fongivores + omnivores + carnivores



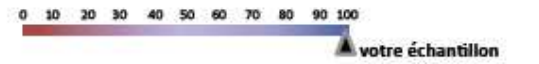
La densité de nématodes libres renseigne sur la qualité de l'habitat et la teneur en matière organique (peu de nématodes, peu de ressources ou habitat perturbé).

Nématodes phytophages se nourrissant des racines des végétaux



Une forte abondance de nématodes phytophages est l'indicateur d'une forte productivité végétale. Mais contrairement aux nématodes libres qui sont tous bénéfiques pour les sols, certains nématodes phytophages sont des ravageurs (voir paragraphe genres phytoparasites).

Indice des voies de décomposition de la matière organique (IVD)



IVD proche de 0: voie de décomposition fongique dominante
IVD proche de 100: voie de décomposition bactérienne dominante
**IVD= NCR, Nematode Channel Ratio en anglais*

Bilan

Sol peu actif renfermant peu de diversité biologique

Sol moyennement actif

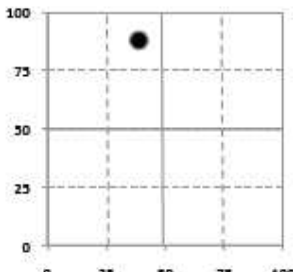
Sol vivant et actif renfermant une importante diversité

vosre échantillon

Diagnostic du réseau trophique du sol

EI 100	Sol perturbé Enrichi en N C/N faible Décomposition bactérienne Sol conductif*	Sol « mature » Enrichi en N C/N faible Décomposition bactérienne Sol régalé
EI	Sol dégradé Pauvre C/N élevé Décomposition fongique Sol conductif	Sol « mature » Sol fertile C/N modéré Décomposition bactérienne/fongique Sol « sapsotif »*
EI	0	100 SI

SI : Indice de Structure, il reflète la stabilité du milieu. Plus SI est élevé, moins le milieu est perturbé.
EI : Indice d'Enrichissement, il donne une indication sur la dynamique des nutriments. EI augmente avec la disponibilité en éléments nutritifs.



*Un sol « sapsotif » est un sol qui grâce à sa diversité biologique, limite l'expression des micro-organismes pathogènes présents dans le sol au contraire d'un sol conductif.

Commentaires: Ce sol présente une activité biologique moyenne. La communauté de nématodes de ce sol est très particulière. D'une part, aucun nématode phytophage n'a été trouvé (abondance inférieure au seuil de détection de 2 nématodes / 100 g de sol sec). D'autre part, la communauté des microbivores est composée quasi exclusivement de bactériovores: les fongivores sont presque absents; l'IVD est donc proche de 100. Cependant la valeur de l'indice de structure (SI=39) reflète une certaine diversité fonctionnelle et une micro-chaine trophique relativement développée. L'indice d'enrichissement (EI=88) est très élevé et indique des flux de nutriments importants dans le sol faisant suite à une fertilisation minérale ou l'apport organique de l'engrais vert.

ELISOL environnement: Campus de la Gaillarde - 2, place Viola, Bât.12 34060 Montpellier cedex 02 - contact@elisol.fr version 2.0

- 51 -



Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Spécialité : Horticulture

Spécialisation / option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marché

Enseignant référent : Virginie Forget

Auteur : Dustin Lloyd

Date de naissance : 29/08/1986

Nb pages : 58

Annexe(s) : 10

Année de soutenance : 2013

Organisme d'accueil : Comité Départemental de Développement Maraîcher

Adresse : 6, Rue de la Flamme Olympique – ZA Viais

44860 Pont St Martin

Maître de stage : Serge Mével

Etude de l'impact des engrais verts sur les qualités physiques et biologiques des sols sableux en cultures maraîchères nantaises

Study on the influence of green manuring on the physical and biological quality of sandy soils in the vegetable production area of Nantes

Résumé : Les dernières années, l'intensification et la spécialisation des cultures maraîchères dans la région Pays de la Loire a continuellement augmenté. Les sols sableux connaissent une perte de fertilité causée par une pression phytosanitaire croissante et un manque de matière organique. Le projet Pathosol est créé pour trouver une méthode alternative aux traitements chimiques conventionnels utilisés contre les pathogènes telluriques en améliorant sa structure et sa vie. L'installation des engrais verts a été choisie. Ainsi, treize mélanges d'engrais verts sont testés. Leur influence sur la structure du sol est analysée en mesurant la conductivité hydraulique, la porosité totale et en caractérisant les formes et tailles des macropores. L'effet des engrais verts sur la vie du sol est analysé en déterminant les populations de collemboles, d'acariens et de nématodes. L'état sanitaire est analysé via le taux d'impact de la fusariose sur des radis. Les résultats montrent que les engrais verts présentent un effet positif sur la structure du sol. La conductivité hydraulique diminue. Ils ont un effet positif sur les acariens. Leur population augmente. En revanche, la population de collemboles diminue. L'impact de la fusariose reste faible. Durant la suite du projet, l'effet de la matière verte enfouie sur la structure, la vie et l'état sanitaire du sol sera analysé.

Abstract : Highly specialized vegetable growing in the Pays de la Loire has constantly intensified during the last years. Consequently the sandy soil has started losing its fertility. This is evident in an increasing phytosanitary pressure and a lack in organic matter. Searching for a method to enhance soil quality through improving soil structure and soil life, the project Pathosol was created. Green manuring was chosen as an alternative to conventional chemical soil treatments. Thirteen green manuring assortments were tested. Their capacity of improving soil structure was analyzed on the basis of hydraulic conductivity and soil porosity measurements as well as through distinguishing macropores in size and shape. Effect of green manure on soil life was measured by scanning population densities of springtails, mites and nematodes. Soil sickness was estimated by analyzing the amount of fusarium attack on radish. Green manure improves soil structure via diminution of the hydraulic soil conductivity. The influence of green manure on soil life population is partly positive. Mite population is increasing. Springtail population is decreasing. The phytosanitary pressure of fusarium is low. In the continuation of the project, the effect of the ploughed fresh matter on soil structure, soil life and on soil health will be studied.

Mots-clés : pression phytosanitaire, matière organique, engrais vert, structure du sol, vie du sol