Acquisition de références locales et évaluation de l'intérêt d'engrais verts comme méthode améliorante des sols sableux en maraîchage nantais : un bilan du projet PATHOSOL (2013-2015)

Glynis Bentoumi-Loaëc

▶ **To cite this version:**

Glynis Bentoumi-Loaëc. Acquisition de références locales et évaluation de l'intérêt d'engrais verts comme méthode améliorante des sols sableux en maraîchage nantais : un bilan du projet PATHOSOL (2013-2015). Sciences agricoles. 2015. dumas-01232718

HAL Id: dumas-01232718

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01232718

Submitted on 24 Nov 2015

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

☐ **CFR Angers**

☐ **CFR Rennes**

Année universitaire : 2014-2015

Spécialité : Horticulture

Spécialisation (et option éventuelle) :

Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés

Mémoire de Fin d'Études

☐ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Acquisition de références locales et évaluation de l'intérêt d'engrais verts comme méthode améliorante des sols sableux en maraîchage nantais : un bilan du projet PATHOSOL (2013-2015)

Par : Glynis BENTOUMI--LOAËC

Source image : Glynis BENTOUMI--LOAËC, 2015

Soutenu à Angers le 11 septembre 2015

Devant le jury composé de :

Président : Emmanuel GEOFFRIAU

Maître de stage : Serge MEVEL

Enseignant référent : Annie SALAT

Autre membre du jury : Maëlle KRZYZANOWSKI
(Conseillère en cultures de plein champ, CDDL)

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

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité :

☐ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible[(1)].
A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).
Date et signature du maître de stage[(2)] :

Droits d'auteur :

L'auteur[(3)] autorise la diffusion de son travail

☐ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

Date et signature de l'auteur :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant :

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.
Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

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

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) 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

Remerciements

Je remercie chaleureusement l'ensemble du Comité Départemental de Développement Maraîcher de m'avoir accueilli au sein de son équipe pendant six mois. Grâce à ce stage, j'ai pu découvrir le métier de conseiller et appréhender l'expérimentation de plein champ en condition de production. Je me réjouis également d'avoir découvert les caractéristiques et problématiques du maraîchage nantais.

Merci à Serge Mevel d'avoir supervisé le déroulement de ce stage et d'avoir su me faire prendre le recul nécessaire à plusieurs occasions.

Merci à William Parmé pour sa compagnie et son aide précieuse pour la mise en place et le suivi des essais.

Merci à Sylvain Gérard pour ses nombreux conseils, son humour et pour le temps dédié à répondre à mes questions.

Merci à Patrick Verron de m'avoir fait découvrir quelques aspects de la culture de muguet en région nantaise.

Merci à Brigitte Pelletier pour le temps consacré à répondre à mes questions d'ordre plus « institutionnel ».

Merci à Marylou Lorne, Amélie Boisrobert et Emilie Meunier pour leur gentillesse, leur énergie et les sorties de terrain.

Mes pensées vont également au personnel de la Fédération des Maraîchers Nantais, lui aussi omniprésent durant tout ce stage.

Merci à tous pour la confiance, les conseils et le suivi accordés, mais aussi pour les moments de convivialité et votre bonne humeur.

Je souhaite mentionner ici les autres stagiaires sur la même période, que je tiens à remercier pour leur aide sur les essais et leur compagnie au quotidien.

Mes remerciements s'adressent également aux producteurs qui ont mis à disposition leurs parcelles pour les essais PATHOSOL de l'été 2015, ainsi qu'au personnel ayant assuré la conduite de ces essais.

Je souhaite également remercier le Conseil Régional des Pays de la Loire et FranceAgriMer pour la validation et le financement du projet PATHOSOL.

Je remercie ma tutrice de mémoire, Annie Salat, pour son suivi et ses conseils.

Je remercie Vincent Hallaire et Virginie RIOU pour leur disponibilité et leur aide à analyser les données collectées.

Table des matières

Introduction.....p.1

Partie A – Une volonté de développer les engrais verts en maraîchage nantais.....p.2
Chapitre I. Le maraîchage nantais à la recherche d'alternatives à l'utilisation de produits chimiques de synthèse.....p.2
1. Le maraîchage nantais.....p.2
2. Des moyens de lutte limités contre les bioagresseurs telluriques.....p.2
3. Projet régional PATHOSOL : lutter contre les bioagresseurs telluriques via la régénération des sols.....p.3

Chapitre II. Les engrais verts, une pratique pour diminuer la pression en bioagresseurs telluriques par la régénération des sols.....p.4
1. Définition et historique des engrais verts.....p.4
2. Mise en place d'engrais verts en interculture.....p.5
3. La régénération du sol grâce aux engrais verts.....p.6
4. Effets attendus des engrais verts via l'amélioration des sols.....p.7
5. Mise en place d'engrais verts dans le maraîchage nantais..... .....p.8

Partie B – Démarche de travail.....p.10
Chapitre I. Présentation du réseau d'essais.....p.10
1. Le réseau d'essais.....p.10
2. Dispositifs expérimentaux sur les sites d'expérimentation.....p.11

Chapitre II. Le matériel végétal : les engrais verts testés sur les sites d'expérimentation p.11
1. Critères de choix des engrais verts sur les sites d'expérimentation.....p.11
2. La conduite de la culture d'engrais verts sur les sites d'expérimentation.....p.11
3. Les mélanges d'engrais verts évalués durant PATHOSOL.....p.12

Chapitre III. Les indicateurs retenus pour évaluer les engrais verts : présentation, suivi et traitement des données p.13
1. Indicateurs pour évaluer le développement des engrais verts.....p.13
2. Indicateurs relatifs à la structure du sol.....p.14
3. Indicateurs pour évaluer l'impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes p.18

Partie C – Résultats.....p.20
Chapitre I. Développement des engrais verts p.20
1. Production de biomasse par les engrais verts suivis p.20
2. Taille des engrais verts suivis.....p.20
3. Mobilisation d'éléments nutritifs par les engrais verts suivis.....p.22
4. La vitesse de dégradation des engrais verts suivis.....p.22

Chapitre II. Effet des engrais verts sur la structure du sol……p.23
1. Impact des engrais verts sur la perméabilité du sol……p.23
2. Impact des engrais verts sur la porosité du sol……p.25
3. Évaluation de l'impact des engrais verts par la méthode Hérody……p.31

Chapitre III. Impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes……p.32
1. Impact sur le rendement……p.32
2. Impact sur la qualité et l'état sanitaire……p.32

Discussion générale……p.33

Chapitre I. L'acquisition de références locales sur les engrais verts ……p.33
1. La production de biomasse (matière verte et matière sèche) par les engrais verts……p.33
2. L'exploration racinaire des engrais verts suivis……p.34
3. La mobilisation d'éléments nutritifs par les engrais verts suivis……p.34
4. Le rapport C/N et la dégradation des engrais verts suivis……p.35
5. Engrais verts retenus pour une culture estivale courte en sols sableux nantais, après l'observation de leur développement……p.36
6. L'acquisition de références locales sur les engrais verts : perspectives……p.37

Chapitre II. Effet des engrais verts sur la structure du sol ……p.37
1. Impact des engrais verts sur la porosité du sol……p.37
2. Impact des engrais verts sur la conductivité hydraulique……p.38
3. Résultats de l'analyse Hérody……p.40
4. Perspectives……p.40

Chapitre III. Impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes……p.41

Conclusion……p.42

Bibliographie……p.43

Annexes……p.46

Glossaire et acronymes

AOP	Association d'Organisation de Producteurs
ARELPAL	Association Régionale d'Expérimentation Légumière des Pays de la Loire
CETA	Centre d'Études Techniques Agricoles
CDDL	Comité Départemental de Développement Légumier
CDDM	Comité Départemental de Développement Maraîcher
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège à Nitrates
CTIFL	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
DDTM	Directions départementales des territoires et de la mer
IE	Index d'Élongation
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
GAB	Groupement des Agriculteurs Biologiques
GAP	Grands Abris Plastiques
GDM	Groupement de Développement Maraîcher
IGP	Indication Géographique Protégée
LMR	Limite Maximale de Résidus
MO	Matière Organique
MS	Matière Sèche
RGI	Raygrass italien
SILEBAN	Société d'Investissement et de Développement pour les Cultures Légumières de Basse-Normandie

Liste des annexes

Annexe 1 – Déroulement de l'essai chez le PROD1, de 2013 à 2015.....p.46

Annexe 2 – Plans des essais menés sur les sites d'expérimentations lors du projet PATHOSOL p.47

Annexe 3 – Conduite des cultures d'engrais verts sur les quatre sites d'expérimentation.....p.49

Annexe 4 – Données climatiques (température et précipitations) sur les parcelles d'essai pendant la culture d'engrais verts.....p.50

Annexe 5 – Déterminer la perméabilité du sol par un test d'infiltrométrie : protocole d'utilisation de l'infiltromètre DECAGON®.....p.53

Annexe 6 – Référentiel de qualité mâche.....p.55

Annexe 7 – Évaluation des mélanges sur les essais 2013-2015 par comparaison des rendements en matière verte.....p.56

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des exploitations maraîchères en Loire-Atlantique……..p.1

Figure 2 : Rotations en production de mâche d'hiver et d'été sur le bassin de production nantais ……..p.8

Figure 3 : Localisation des exploitations suivies durant le projet PATHOSOL……..p.9

Figure 4: Les compartiments de matière organique définis par la méthode Hérody……..p.16

Figure 5: Rendement (tonnes/hectare) en matière verte des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL……..p.19

Figure 6: Rendement (tonnes/hectare) en matière sèche des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL……p.19

Figure 7: Hauteur et profondeur des racines des espèces d'engrais verts suivies durant le projet PATHOSOL……p.20

Figure 8: Mobilisations (en unités ou kg) en éléments nutritifs (azote N, potassium K2O, et phosphore P2O5) par les engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL……..p.21

Figure 9: Quantité d'azote enfoui (kg/ha) et rapport C/N des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL……p.21

Figure 10: Impact du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en surface, pour un potentiel de 0,05 kPa (a), 0,2 kPa (b) et 0,6 kPa (c) ……p.22

Figure 11 : Impact du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en profondeur (20cm), pour un potentiel de 0,05 kPa (a), 0,2 kPa (b) et 0,6 kPa (c) ……p.22

Figure 12 : Comparaison de la porosité totale du sol en surface entre modalités, selon la date de mesure……p.24

Figure 13: Comparaison de la porosité totale du sol en profondeur entre modalités, selon la date de mesure……p.24

Figure 14 : Evolution de la porosité totale du sol en surface, selon le couvert implanté……p.24

Figure 15 : Evolution de la porosité totale du sol en profondeur, selon le couvert implanté……p.24

Figure 16 : Comparaison de la part de macroporosité du sol en surface entre modalités, selon la date de mesure……p.25

Figure 17 : Comparaison de la part de macroporosité du sol en profondeur entre modalités, selon la date de mesure……p.25

Figure 18 : Evolution de la part de macroporosité dans le sol en surface, selon le couvert implanté……p.25

Figure 19 : Evolution de la part de macroporosité dans le sol en profondeur, selon le couvert implanté……p.25

Figure 20 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores tubulaires (a), fissuraux (b) et complexes (c) en surface……p.26

Figure 21: Impact du couvert sur la répartition des formes de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.26

Figure 22 : Impact du couvert sur l'évolution des formes de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.26

Figure 23 : Impact du couvert à date donnée sur la part de pores tubulaires (a), fissuraux (b) et complexes (c) en profondeur……p.27

Figure 24 : Impact du couvert sur la répartition des formes de macropores en profondeur : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.27

Figure 25 : Impact du couvert sur l'évolution des formes de macropores en profondeur: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.27

Figure 26 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores de taille 1 (a), taille 2 (b) et taille 3 (c) en surface……p.28

Figure 27 : Impact du couvert sur la répartition des tailles de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.28

Figure 28 : Impact du couvert sur l'évolution des tailles de macropores en surface: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.28

Figure 29 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores de taille 1 (a), taille 2 (b) et taille 3 (c) en profondeur……p.29

Figure 30 : Impact du couvert sur la répartition des tailles de macropores en profondeur : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.29

Figure 31 : Impact du couvert sur l'évolution des tailles de macropores en profondeur: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d) ……p.29

Figure 32 : Évolution en surface des compartiments de matières organiques, selon le couvert implanté……p.30

Figure 33 : Évolution en profondeur des compartiments de matières organiques, selon le couvert implanté……p.30

Figure 34 : Rendement de la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013……p.31

Figure 35 : Note d'agréage attribuée à la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013……p.31

Figure 36 : Rendement de la 2ème culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013……p.31

Figure 37 : Note d'agréage attribuée à la 2ème culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013……p.31

Figure 38 : Rendement de la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2014……p.31

Figure 39 : Note d'agréage attribuée à la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2014……p.31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pathogènes telluriques problématiques en culture de mâche dans le bassin de production nantais……p.2

Tableau 2 : Suivi réalisé sur les quatre sites d'expérimentation……...p.9

Tableau 3: Dispositifs expérimentaux sur les sites d'expérimentation suivi lors du projet PATHOSOL ……p.10

Tableau 4: critères de choix des espèces d'engrais verts estivaux à tester sur la région nantaise pour le projet PATHOSOL……...p.10

Tableau 5 : Caractéristiques des engrais verts implantés sur les sites d'expérimentation……...p.11

Tableau 6 : Dimension des macropores sollicités par les potentiels appliqués lors du test d'infiltrométrie……...p.14

Tableau 7 : Classification des macropores selon leur morphologie (taille et forme) ……p.15

Tableau 8: Les constituants minéraux du sol étudiés par la méthode Hérody……...p.16

Tableau 9 : Les constituants organiques étudiés par la méthode Hérody……...p.16

Tableau 10 : Itinéraire cultural des cultures maraîchères sur la parcelle d'essai du PROD1……p.17

Tableau 11 : Impact de la date de mesure sur la macroporosité totale du sol en surface……...p.25

Tableau 12 : Impact de la date de mesure sur la macroporosité totale du sol en profondeur…… p.25

Tableau 13 : Évolution du coefficient de fixation du sol, en surface et profondeur, selon le couvert implanté…… p.30

Tableau 14 : Évolution des matières organiques d'accumulation, en surface et profondeur, selon le couvert implanté…… p.30

Tableau 15 : Évolution des formes de fer, en surface et profondeur, selon le couvert implanté……p.30

Tableau 16 : Évolution des bases alcalino-terreuse (Mg et Ca), en surface et profondeur, selon le couvert implanté……p.30

Tableau 17 : Évolution de la fertilité (P, K, Mg) et de la toxicité (Al) du sol, en surface et profondeur, selon le couvert implanté…… p.30

Tableau 18 : Provenance des dégâts constatés lors de l'agréage de lots de 100 mâches de la première récolte de 2013, selon l'interculture implantée en amont……p.32

Tableau 19 : Provenance des dégâts constatés lors de l'agréage de lots de 100 mâches de la deuxième récolte de 2013, selon l'interculture implantée en amont……p.32

Tableau 20 : Teneur en de matière sèche (%MS) et en éléments nutritifs dans les parties aériennes de différents engrais verts……p.34

Tableau 21 : Lien entre rapport C/N et la part d'azote restituée au sol par un engrais vert……p.35

INTRODUCTION

La Loire-Atlantique est l'un des premiers départements maraichers français. Etendue sur 5100 hectares (surface physique), l'activité maraîchère représente pour la région nantaise un chiffre d'affaires variant entre 140 et 220 millions d'euros. Le département bénéficie également d'une organisation commerciale forte, autour de sept organisations de producteurs regroupant 85% de la production.

Les producteurs nantais font aujourd'hui face à l'augmentation de la pression de maladies telluriques. Ce phénomène est favorisé par la spécialisation des exploitations sur quelques produits, et les rotations courtes entre les cultures. Au vu du contexte de durcissement réglementaire et des demandes sociétales de plus en plus fortes, les maraîchers sont poussés à s'interroger sur leurs systèmes de protection.

L'ARELPAL (Association Régionale d'Expérimentation Légumière des Pays de la Loire) mène un projet régional sur 3 ans (2013-2016) intitulé PATHOSOL. L'objectif est de développer des méthodes alternatives à la lutte chimique adaptée au contexte local de production, afin de lutter efficacement et durablement contre les bioagresseurs telluriques.
Le Comité Départemental de Développement Maraîcher (CDDM) assure le conseil et l'appui technique auprès des maraîchers de Loire-Atlantique. Dans le cadre de PATHOSOL, le CDDM est chargé de l'évaluation des engrais verts comme pratique améliorante constituant une alternative à la lutte chimique contre bioagresseurs en maraîchage nantais.

Depuis quelques années, les surfaces d'engrais vert en maraîchage conventionnel sont en développement sur le département : absents des surfaces il y a trois ans, ils représentent aujourd'hui près de 500 hectares semés. Si l'objectif à long terme est de parvenir à maîtriser les pathogènes du sol, il est toutefois nécessaire de passer par une phase d'acquisition de références locales, afin d'optimiser cette technique et de communiquer auprès des producteurs.

L'objet de cette étude s'articule ainsi autour de la problématique suivante :

Dans quelle mesure les engrais verts permettent-ils de maîtriser indirectement les bioagresseurs telluriques, via une action améliorante sur la structure du sol ?

Les objectifs de ce travail sont tout d'abord d'évaluer différents engrais vert en termes de comportement pour proposer aux maraîchers nantais des espèces adaptées au contexte de production local. Les engrais verts sont considérés comme une méthode de lutte indirecte contre les bioagresseurs telluriques, via leur action sur le sol : cette étude s'intéresse ainsi à l'impact de divers mélanges sur les propriétés de sols maraîchers nantais. Il s'agit finalement d'évaluer l'impact sanitaire de cette méthode sur les bioagresseurs telluriques des cultures maraîchères.

Dans un premier temps, un travail bibliographique présentera l'intérêt de développer les engrais verts d'une façon générale et plus particulièrement dans le contexte de production maraîcher nantais. Une partie « matériels et méthodes » décrira les essais et suivis mis en place pour répondre à notre problématique. Enfin, les résultats de trois années d'expérimentation seront présentés et discutés.

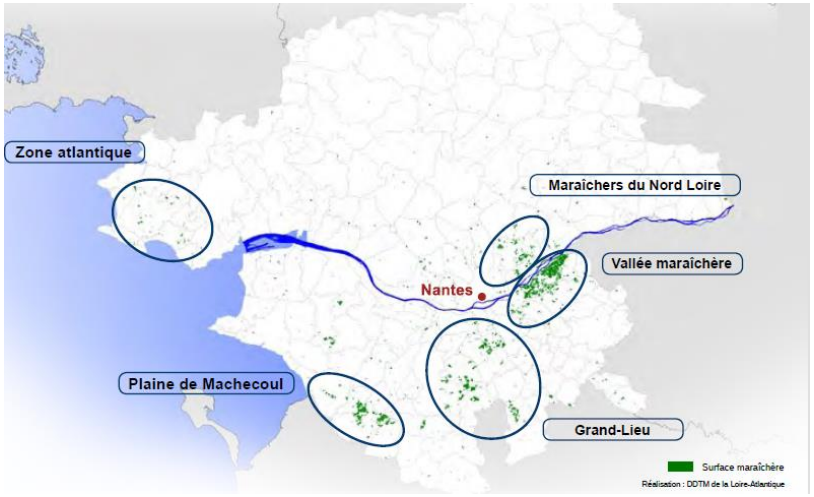


Figure 1 : Localisation des exploitations maraîchères en Loire-Atlantique (Source : DDTM Loire-Atlantique)

PARTIE A

Une volonté de développer les engrais verts en maraîchage nantais

Chapitre I. Le maraîchage nantais à la recherche d'alternatives à l'utilisation de produits chimiques de synthèse

1. Le maraîchage nantais

Histoire et délimitation géographique

A Nantes, l'activité maraîchère a débuté au XVI^{ème} siècle. La production légumière s'accélère au XIXème siècle avec la modernisation des équipements ; cette production accompagne l'arrivée du transport ferroviaire, qui ouvre de nouveaux marchés. Les premiers maraîchers occupaient des quartiers du centre de Nantes. Avec l'extension urbaine, l'activité s'est d'abord délocalisée vers la proche périphérie de Nantes, puis de plus en plus loin (Figure 1) (Chambre d'Agriculture de Loire Atlantique, 2013). Le terme de « maraîchage nantais » est resté mais il s'étend aujourd'hui au-delà de la ville de Nantes ; cette expression est utilisée pour désigner le maraîchage en Loire-Atlantique.

Productions maraîchères

Les exploitations maraîchères de Loire-Atlantique sont caractérisées par des productions spécialisées et cultivées de façon intensive.
Le territoire est notamment spécialisé dans quelques produits phares en plein champ, sous grands abris plastiques froids (GAP) et sous serre verre.

La **mâche** est certainement le légume le plus emblématique du maraîchage nantais depuis l'arrêt de la production de carottes. Elle est reconnue depuis 1999 par l'Indication Géographique Protégée (IGP) « Mâche Nantaise ». La Loire-Atlantique est le leader national et européen pour cette production, représentant 85% des volumes français produits et 50% des volumes européens. La mâche est cultivée en planches, en culture d'hiver (cycle de 80 jours) ou d'été (cycle de 30 jours). La culture et la récolte sont facilitées par un lit de sable. Les terrains sont ainsi sablés au semis, avec en moyenne 50 tonnes de sable apportées par hectare.

Les autres produits de plein champ et abris froids qui caractérisent le maraîchage nantais sont le **radis**, le **poireau de primeur,** les **jeunes pousses** et le **muguet** (leader national avec 80% de la production).

On trouve également des maraîchers qui produisent des cultures sous serres verre en hors-sol chauffées : **tomate** et **concombre** (première région française en volume avec 17% de la production nationale).

Le maraîchage nantais est caractérisé par des rotations très courtes entre les cultures au printemps et à l'été. En plein champ on assiste souvent à plusieurs rotations d'une même espèce ; c'est le cas en particulier de la mâche, où jusqu'à cinq cultures peuvent se succéder dans l'année. L'itinéraire cultural sous GAP comprend parfois une culture de radis ou de jeunes pousses.
Les maraîchers nantais cultivent en sols sableux (plus de 80% de sable), et à faible teneur en matière organique (inférieure à 1%) (Mével, 2015).

2. Des moyens de lutte limités contre les bioagresseurs telluriques

Une forte pression sanitaire en maraîchage nantais

L'utilisation intensive des sols par un nombre limité de familles botaniques a conduit au développement de problèmes sanitaires liés à certains bioagresseurs telluriques.

Tableau 1 : Pathogènes telluriques problématiques en culture de mâche dans le bassin de production nantais

Nature de l'agent pathogène	Bioagresseurs telluriques en cause des dégâts
Fongique	*Rhizoctonia solani, Thielaviopsis basicola, Phoma valerianellae,* Pythiacées*, Olpidium* (champignon vecteur de nécrovirus)
Bactérien	*Acidovorax valerianellae*

Source : Appel à projet PATHOSOL, 2012

Le terme bioagresseur, selon le portail de la protection intégrée EcophytoPIC [2], « regroupe tous les organismes pouvant engendrer des dommages sur les cultures. Il peut s'agir d'agents pathogènes responsables de maladies, de ravageurs ou de plantes adventices. »

En maraîchage nantais, la mâche est la culture la plus préoccupante pour la maîtrise des bioagresseurs telluriques. En effet, l'essentiel des problèmes sanitaires rencontrés pour cette culture sont liés à quelques pathogènes du sol. Ces principaux bioagresseurs telluriques sont renseignés dans le Tableau 1. Les producteurs sont d'autant plus vigilants qu'il s'agit d'une culture où les défauts doivent être absents à la récolte pour une bonne conservation.

Les parcelles sont également en proie aux adventices : présence de pourpier dans les parcelles en été, mais aussi de pâturin, ravenelle, séneçon… Ceci pose particulièrement problème en culture de mâche car aucun corps étranger n'est toléré lors du conditionnement de la production. Il est de plus difficile d'éliminer les adventices dans une culture de mâche en cours de production (Mével, 2015).

L'itinéraire technique type d'une mâche d'hiver débute avec une désinfection au métam sodium à l'automne, avant le semis. Ceci permet de limiter les traitements par la suite lorsque la culture est en place. Un fongicide peut être appliqué et un désherbant en deuxième tournée de mâche peut avoir lieu. Les traitements insecticides sont très peu utilisés.

Des maraîchers soumis aux évolutions et aux contraintes réglementaires

Depuis avril 2013, la mâche est rattachée à la laitue dans le catalogue des usages phytopharmaceutiques (Gérard, 2015). Cela signifie que les matières actives autorisées en laitue le sont également en mâche (en tenant compte des LMR et de la sélectivité du produit). La tendance est tout de même à la diminution du nombre de spécialités autorisées [3].

Traditionnellement, les systèmes de production en région nantaise reposent largement sur la désinfection chimique des sols grâce au métam sodium. Ce fumigant a un triple rôle de fongicide, bactéricide et herbicide. Les traitements au métam sodium ont notamment permis l'intensification caractéristique du maraîchage nantais. Désormais, le métam sodium est soumis à une dérogation pour usage essentiel. Selon la réglementation européenne, il est accompagné d'une restriction de dose et de fréquence d'utilisation (un tiers de la dose actuelle tous les trois ans); à moyen terme, ce fumigant est voué à une interdiction d'utilisation.

Les producteurs disposent de deux spécialités pour le désherbage de la mâche en post-semis (Gérard, 2015): Colzamid® et Proman® (utilisable par dérogation jusqu'au 19/12/2015). Une nouvelle demande de dérogation est en cours pour l'automne 2015.

Dans le cadre de l'ARELPAL (Association Régionale d'Expérimentation Légumière des Pays de la Loire), des programmes d'expérimentation et de recherche ont ainsi lieu depuis le début des années 2000 afin d'obtenir l'autorisation de nouvelles spécialités, mais aussi identifier des méthodes alternatives à la lutte chimique satisfaisantes [2].

3. Projet régional PATHOSOL : lutter contre les bioagresseurs telluriques via la régénération des sols

Comme nous l'avons vu, les produits phytosanitaires ne suffisent plus comme seul recours contre les bioagresseurs telluriques. La profession maraîchère doit désormais se tourner vers d'autres méthodes de lutte et de nouveaux modes de production.

Afin de répondre en partie à cette problématique, l'ARELPAL a entamé en 2013 le projet PATHOSOL. Ce projet régional, d'une durée de trois ans, est mené par différents maîtres d'œuvre dans les domaines du maraîchage conventionnel et agrobiologique. Ceux-ci représentent les maraîchers dans les trois départements principaux producteurs de légumes de la région Pays de la Loire : Loire-Atlantique, Maine-et-Loire et Vendée.

Objectifs du projet PATHOSOL

PATHOSOL vise à mettre au point des stratégies de lutte dites alternatives ou améliorantes contre les agents pathogènes du sol des cultures légumières de plein champ et sous GAP en Pays de la Loire. Cinq méthodes de lutte à étudier ont été définies lors de l'appel à projet : la solarisation, les engrais verts, la biofumigation, la mycorhization, l'apport d'intrants alternatifs.

L'objectif est de pouvoir proposer aux producteurs des solutions techniques pour la gestion des bioagresseurs telluriques rencontrés. Les pratiques étudiées lors du projet sont parfois déjà utilisées par les producteurs (c'est le cas de la solarisation). Avant de les diffuser plus largement, il est nécessaire de s'assurer qu'elles s'incluent dans les itinéraires culturaux et de valider leur intérêt dans le contexte de production local. En effet, ces pratiques suscitent parfois des interrogations quant à leur efficacité.

Déroulement et état des lieux du projet

Le projet se décline en quatre actions définies lors de l'appel à projet. Elles sont réparties entre les différents maîtres d'œuvre :

- Action 1 : Etat des lieux des connaissances sur les modes de régénération des sols par les méthodes alternatives. Cette action a été validée en début de projet.
- Action 2 : Optimisation de mise en place des différentes techniques connues. Cette action se déroule sur les trois années de projet.
- Action 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). L'action 3 se déroule sur les trois années de projet.
- Action 4 : Communication des résultats entre partenaires (comités de pilotage) et aux producteurs (visites d'essais, documents à diffuser). Cette transmission des résultats a lieu chaque année.

Le travail présenté dans ce mémoire est la synthèse des résultats obtenus de 2013 à 2015 lors des actions 2 et 3 menées par le CDDM. Il doit permettre la valorisation et la diffusion des résultats pour répondre à l'action 4 en fin de projet.

Rôle du CDDM dans le projet PATHOSOL

Le CDDM, le CTIFL de Carquefou, et le GAB44 assurent la mise en œuvre du projet PATHOSOL en Loire-Atlantique.

Le CDDM est la structure en charge du conseil et de l'appui technique auprès des maraîchers nantais, avec la particularité de réaliser des expérimentations en condition de production, directement chez les producteurs. Pour diverses raisons (détaillées en Chapitre II.5.), le CDDM a choisi de s'intéresser aux engrais verts dans le cadre du projet PATHOSOL.

Chapitre II. Les engrais verts, une pratique pour diminuer la pression des bioagresseurs telluriques via la régénération des sols

1. Définition et historique des engrais verts

Les engrais verts sont des espèces végétales produites hors période de production d'espèces commercialisées. Ces couverts végétaux sont détruits une fois développés, et avant qu'ils ne produisent des semences, puis incorporés superficiellement dans le sol. Leur culture n'est pas faite dans un objectif de valorisation commerciale. Le but de ces engrais verts est d'apporter des services agronomiques, notamment fournir des éléments nutritifs à la culture suivante et améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Justes et al., 2013).

Ils peuvent agir indirectement sur plusieurs éléments comme le rendement de la culture suivante (Pieters, 1927 ; Abawi et al., 2000 ; Ngouajio et al., 2005 ; Talgre et al., 2009) ou encore l'état sanitaire du sol (Rothrock, 1991 ; Abawi, Widmer, 2000 ; Himmelstein et al., 2014).
Les engrais verts peuvent être implantés en interculture ; ils sont alors cultivés avant ou après la culture principale. Les engrais verts dits intercalaires sont semés entre les rangs ou directement sous une culture, une fois que celle-ci est suffisamment avancée (Justes et al., 2013).

Cette pratique est ancienne : on en retrouve la mention la plus ancienne dans des écrits chinois datant d'il y a 3000 ans. On sait également que les Grecs enfouissaient des fèves, ou encore que les Romains combinaient les méthodes de fertilisation de l'époque (déjections animales, cendres…) avec des engrais verts pourvoyeurs d'azote comme le lupin ou la fève. Par la suite, cette pratique est restée cantonnée au pourtour méditerranéen jusqu'au 17-18ème siècle, où on la voit émerger en Allemagne et par endroits en Amérique du Nord (Pieters, 1927).
Avec le développement de l'industrie agrochimique et de l'agriculture moderne après la seconde guerre mondiale, de nouvelles méthodes (engrais de synthèse, produits phytosanitaires, mécanisation) sont venues remplacer progressivement le rôle des engrais verts dans les systèmes de production intensifs (Cherr et al., 2006). De nos jours, la recherche de pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement a profité aux engrais verts, qui connaissent un regain d'intérêt auprès de la profession agricole.

2. Mise en place d'engrais verts en interculture

Espèces utilisées comme engrais verts en interculture

Trois principales familles botaniques sont utilisées en tant qu'engrais verts: les fabacées (ex-légumineuses), brassicacées (ex-crucifères), et graminées. D'autres espèces conviennent également, comme le sarrasin (famille des Polygonanées) ou la phacélie (des Hydrophyllacées) (Pousset, 2002 ; Cherre, 2006 ; Clark, 2008).

Les **graminées** ont un système racinaire fasciculé puissant et profond, qui améliore la structure du sol (Pousset, 2002). Ce système racinaire va chercher les éléments nutritifs en profondeur dans le sol (Clark, 2008). Après destruction, les graminées rendent ainsi disponibles ces éléments nutritifs pour une culture à enracinement moins profond.

Les **légumineuses** ont un système racinaire pivotant, capable de décompacter le sol. Elles enrichissent le sol en azote grâce à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique via une symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium* (Revellin, 2012). L'azote atmosphérique est réduit en ammoniac puis cédé à la légumineuse, qui le restitue elle-même au sol lors de la dégradation de l'engrais vert. Cet azote peut ensuite être utilisé par la culture suivante.

Les **crucifères** forment une biomasse importante permettant une bonne couverture du sol ; elles explorent efficacement le sol pour y prélever des nutriments (Clark, 2008). Leur action désinfectante présente un intérêt, via les composés soufrés libérés lors de leur dégradation (biofumigation) (Clark, 2008). Certaines crucifères ont un système racinaire pivotant permettant de décompacter le sol.

Les **mélanges** permettent de conjuguer les bénéfices de différentes familles botaniques ; ils sont ainsi souvent préconisés par rapport à l'utilisation d'une espèce seule (Clark, 2008). En général, il s'agit de mettre en place des plantes de développement, hauteur et d'envergure différents. Ainsi les végétaux ont une meilleure couverture du sol ; ils se complètent plutôt que de se concurrencer. Il est souvent recommandé de combiner une graminée et une légumineuse (Clark, 2008). Un tel mélange, composé de racines pivotantes et fasciculées, constitue un ensemble dont les racines structurent le mieux le sol (Pousset, 2002). Les mélanges permettent également de diminuer les risques d'échec de la culture d'engrais vert ; en effet les espèces du mélange répondent différemment aux attaques de ravageurs ou maladies, ou au climat.

Les mélanges ont aussi leurs inconvénients, comme le coût à l'implantation qui peut être plus élevé. La date optimale de destruction des espèces du mélange peut aussi être différente, ce qui oblige à trouver un compromis (Clark, 2008).

Pratiques culturales

Selon la région, la succession culturale et les espèces implantées, la durée d'interculture varie en général entre deux et six mois (Justes et al., 2013). La destruction des engrais verts peut être naturelle (par le gel), mécanique (par un broyage, un labour), ou chimique (application d'un herbicide) (Justes et al., 2013).

3. La régénération du sol grâce aux engrais verts

Le sol comme support de culture : ses propriétés

- Propriétés physiques du sol

La **texture** du sol permet de décrire un sol à partir de la répartition granulométrique des particules minérales élémentaires que sont les sables, limons et argiles (Calvet, 2003). L'assemblage de ces particules élémentaires constitue des mottes ou agrégats.

L'association des constituants inorganiques et organiques du sol de façon plus ou moins complexe confère au sol ce que l'on nomme sa **structure** (Calvet, 2003) La structure est une notion qui définit l'état du sol à un moment donné ; elle est ainsi variable à la fois dans l'espace (selon les conditions locales) et dans le temps. Ainsi, il est possible de conserver cette structure, de l'améliorer comme de la détériorer. Son étude peut se faire de deux façons complémentaires, par l'étude de la phase solide ou l'étude de l'espace poral (phases gazeuse et liquide).
Une stabilité structurale est recherchée en agriculture, c'est à-dire une solidité de la structure du sol, sa résistance aux agents de dégradation. On privilégie une structure fragmentaire, qui facilite la circulation de l'eau et de l'air (Gobat, 2010). Au contraire, une structure particulaire (filtrante, constituée d'éléments grossiers sans adhérence entre eux) ou une structure massive (asphyxiante et résistante à la pénétration des racines) sont à éviter.

- Propriétés biologiques du sol

La **vie du sol** est constituée d'organismes vivants végétaux (racines) et animaux, acteurs de la pédogenèse. Leur composition varie selon les sols, le climat, les activités de l'homme.
On considère qu'il existe trois ensembles d'organismes animaux : microfaune, mésofaune, et macrofaune (Calvet, 2003). La macrofaune et la mésofaune dégradent les résidus végétaux et contribuent à l'évolution des substances humiques. Nématodes et protozoaires sont à la fois pathogènes pour les végétaux et régulateurs des populations microbiennes (Calvet, 2003). Ces organismes dégradent la matière organique, allant de la consommation de mycélium par les collemboles jusqu'à la prédation par des insectes carnivores (Chaussod, 1996).

La structure biologique est directement influencée par la structure physique du sol. En effet, la vie microbienne ne peut se développer que si la porosité est suffisante pour que l'air et l'eau pénètrent aisément dans le sol.
L'inverse est également vrai : la mésofaune et la microfaune agissent sur l'agrégation, l'aération du sol et l'incorporation de matière organique, impactant ainsi la structure physique du sol (Calvet, 2003).

Des sols agricoles dégradés

Le sol peut subir des pertes d'équilibre et souffrir de trois types de dégradations qui sont interdépendantes (Calvet, 2003).

La dégradation physique conduit à une modification de la structure du sol. Elle est due à différents facteurs comme l'action du vent (érosion éolienne) ou de l'eau (érosion hydrique, phénomène de battance). Les excès et retraits d'eau provoquent respectivement un éclatement des agrégats et une compaction des sols. Les actions mécaniques (passage de machines) rendent également le sol compact et induisent un tassement de celui-ci (formation d'une semelle de labour par exemple).

La dégradation chimique est provoquée par divers phénomènes. La salinisation tout d'abord est provoquée par un excès de sodium d'origine naturelle ou résultant de l'activité humaine ; elle impacte la structure du sol et les plantes cultivées. Les polluants d'origine naturelle ou anthropique dont les composés organiques (résidus agricoles, industriels, urbaine) et inorganiques (cadmium, plomb, mercure) sont aussi à l'origine de la dégradation chimique. L'appauvrissement en matière organique, en réponse à l'absence de restitution de résidus végétaux au sol et l'insuffisance en nutriments (diminution de la minéralisation d'azote organique par exemple) contribuent aussi à la dégradation chimique des sols.

La dégradation biologique se traduit par une diminution de la biomasse vivante dans le sol (aspect quantitatif) et par la baisse de diversité de cette biomasse (aspect qualitatif). Parmi les causes de cette dégradation, les applications de produits phytosanitaires et les pratiques culturales provoquant la baisse de matière organique impactent les microorganismes du sol. L'enrichissement des sols en phosphore induirait également une baisse quantitative et qualitative des populations de champignons endomycorhiziens (Chaussod, 1996). La dégradation biologique résulte essentiellement des dégradations chimiques et physiques.

Les engrais verts : une pratique améliorante

On parle des engrais verts comme une pratique améliorante, permettant de régénérer les sols agricoles dégradés. Le recours aux engrais verts apporte des bénéfices qui peuvent varier selon les conditions de culture et être cumulatifs, notamment en cas de mélanges (Clark, 2008).

S'ils sont bien maîtrisés, les engrais verts contribuent à la **régénération physique et biologique des sols.** Ils permettent l'obtention et le maintien d'une bonne structure de sol grâce à la restitution de matière organique et la décompaction du sol via leurs racines (Pieters, 1927). Cette aération du sol y favorise la vie microbienne (qui maintient réciproquement la structure par dégradation de la matière organique). Ce couvert protège également le sol de l'érosion grâce à sa partie aérienne et ses racines ; cette propriété est notamment intéressante en sols lourds ou battants (Pousset, 2002).

Les engrais verts piègent et fournissent par la suite des éléments nutritifs comme l'azote, permettant une **amélioration des propriétés chimiques du sol**. Brassicacées et graminées restituent ainsi à la culture suivante les éléments nutritifs qu'elles ont puisé en profondeur et remonté en surface (Clark, 2008). Lors de leur destruction, les légumineuses restituent au sol l'azote atmosphérique qu'elles ont assimilé, sous une forme utilisable par la culture à venir (Clark, 2008).

4. Effets attendus des engrais verts via l'amélioration des sols

Un impact sur le rendement des cultures suivantes

Une augmentation légère à importante des rendements de la culture suivante a été constatée lors d'essais au début du XXème siècle sur culture de maïs, coton, betterave, pomme de terre, sucre de canne (Pieters, 1927), et plus récemment sur haricot (Abawi et al., 2000), concombre (Ngouajio et al., 2005) ou blé tendre (Talgre et al., 2009). Toutefois ces résultats sont très variables d'une expérimentation à l'autre. Ainsi certains résultats d'essais ne montrent aucun effet des engrais verts sur les rendements de la culture suivante (Ochiai et al., 2007 ; Himmelstein et al., 2014).

Une lutte indirecte contre les bioagresseurs telluriques

Les engrais verts permettent de **lutter indirectement contre les adventices**. La couverture du sol permet également de limiter leur développement ; les espèces à développement suffisamment rapide peuvent prendre le dessus sur les adventices et les étouffer par concurrence sur l'eau, les nutriments ou la lumière (Cherr et al., 2006). Cette méthode permet ainsi de limiter les traitements herbicides (Clark, 2008).

Certaines espèces luttent plus directement contre les adventices. Ainsi, le sarrasin aurait un effet désherbant indirect et direct via la synthèse de toxines (Pousset, 2000). Les résidus de seigle, quant à eux, ont un potentiel allélopathique et permettent de lutter contre certaines adventices en inhibant leur germination : c'est le cas pour l'ambroisie élevée ou le pourpier (Przepiorkowski, 1994).

L'**action des engrais verts sur les maladies et ravageurs** est en revanche plus complexe et il existe peu d'informations à ce sujet. La mise en place d'engrais verts peut introduire de nouvelles familles botaniques dans les rotations, notamment en maraîchage. L'introduction de ces nouvelles familles, non hôtes des bioagresseurs, a pour effet de briser le cycle de vie des maladies ou ravageurs (Clark, 2008). Ces nouvelles familles permettent de désintensifier les pratiques culturales. Un engrais vert mal choisi peut au contraire héberger des maladies ou ravageurs nuisibles à la culture ; les crucifères sont ainsi à éviter dans les rotations maraîchères qui en contiennent déjà (radis, choux, roquette…).

Plusieurs études avancent néanmoins un effet suppressif de certains engrais verts sur champignons phytopathogènes : vesce et mélange vesce/seigle sur *Thielaviopsis basicola* en culture de coton (Rothrock, 1991) ; moins de symptômes de pourriture des racines du haricot observés grâce à différents engrais verts (Abawi, Widmer, 2000) ; trèfle incarnat et vesce sur *Fusarium oxysporum* f. sp. *Niveum* en culture de pastèque (Himmelstein et al., 2014). Un effet suppressif du sudangrass, de l'ivraie et du colza a également été constaté sur le nématode *Pratylenchus penetrans*, une des causes de la pourriture des racines du haricot (Abawi, Widmer, 2000). D'autres études au contraire n'ont pas démontré l'effet suppressif attendu : hausse en parallèle des populations microbiennes du sol et de *Pythium* après une orge en engrais vert sur culture de fraises (Manici, 2004) ; tendance à l'augmentation des populations de *Rhizoctonia* et *Pythium* sur semences avec un engrais vert à base de vesce (Candole et al. 1998).

Que ce soit en termes de rendement ou d'effet sanitaire, il est globalement difficile de mesurer l'impact immédiat des engrais verts. Il s'agit d'organismes vivants qui agissent à moyen-long terme et de façon indirecte. Cette technique ne doit pas être vue comme une solution unique pour obtenir un résultat immédiat, comme le ferait un produit phytosanitaire. Les engrais verts rendent des services multiples, dont quelques-uns peuvent servir de déclencheurs à l'adoption de la technique selon les problèmes rencontrés par le producteur (Cherr et al., 2006).

5. Mise en place d'engrais verts dans le maraîchage nantais

Pertinence des engrais verts dans le contexte maraîcher nantais

Depuis 2009, le CDDM a choisi de développer l'utilisation d'engrais verts chez les maraîchers nantais. En effet, cette technique s'inclut facilement dans les itinéraires techniques des producteurs de mâche. La culture de mâche est répartie sur deux créneaux de production (Figure 2). Les rotations peuvent comporter d'autres espèces à cycle de production court, comme le radis. La culture de mâche d'été (cycle de 30 jours) constitue le tiers de la production. La culture d'hiver (cycle de 80 jours) concerne les deux tiers restants (Mével, 2015); les parcelles dédiées à la mâche d'hiver sont ainsi libérées l'été, sur une période qui s'étend en général de juin à septembre. Ces parcelles peuvent accueillir une culture maraîchère estivale, mais sont généralement laissées en sol nu. Il est ainsi possible de produire une interculture estivale courte (deux mois) sur cette durée. L'introduction d'un engrais vert est également judicieuse pour la maîtrise des adventices sur les parcelles nues. En effet, en l'absence de couvert, leur maîtrise repose sur des traitements herbicides répétés.

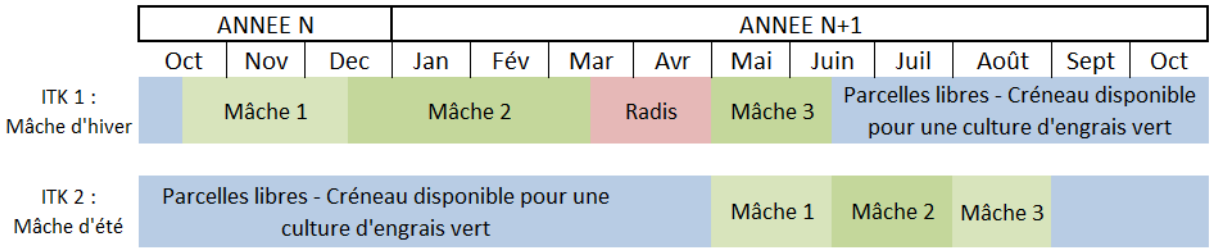


Figure 2 : Rotations en production de mâche d'hiver et d'été sur le bassin de production nantais

La solarisation est une pratique qui se développe sous GAP chez les maraîchers, et qui est également adaptée à cette période ; les engrais verts apportent toutefois d'autres avantages. Ils sont intéressants dans le contexte nantais car ils permettent d'inclure de nouvelles espèces dans les rotations, et ainsi de désintensifier la production des exploitations. Les engrais verts sont aussi une solution pour apporter la matière organique d'origine végétale, peu présente dans les sols sableux des exploitations maraîchères nantaises (la teneur est en moyenne de 0,8% de matière organique – Mével, 2015).

Bilan de l'implantation d'engrais verts avant la mise en place du projet PATHOSOL

Des essais sont réalisés depuis 2009 afin de proposer aux maraîchers nantais des engrais verts adaptés au contexte de production local. En Loire-Atlantique, le projet PraBioTel (2009-2011) a permis de tester différentes espèces en engrais verts chez les maraîchers du département, et d'observer les espèces à bon comportement. Les constats sont positifs : effet désherbant, remobilisation d'éléments nutritifs (grâce aux racines explorant le sol en profondeur), et encore apport de matière fraîche. Le mélange avoine/seigle s'est imposé comme la référence maraîchère d'engrais vert chez les maraîchers nantais à la suite de plusieurs essais. D'abord portés vers des couverts à base de crucifères, les essais du CDDM ont montré que les céréales étaient mieux adaptées (Gérard, 2015). Les crucifères présentent des intérêts (racines pivotantes décompactant le sol, bonne production de biomasse) mais se retrouvent dans les rotations des maraîchers (radis, roquette), ce qui les rend peu pertinentes. Les céréales au contraire sont absentes des parcelles de maraîchage. Elles sont peu gourmandes en éléments nutritifs et demandent ainsi peu ou pas de fertilisation. De même leurs besoins en eau sont plus limités, ce qui est un atout pour un engrais vert produit à une période de l'année où des restrictions d'eau sont courantes. Elles produisent néanmoins une bonne quantité de matière verte. Elles se dégradent mieux que d'autres espèces expérimentées et laissent ainsi peu de débris avant le semis sur les parcelles cultivées.
Le projet PraBioTel ne permettait pas d'avoir assez de recul pour observer l'effet des engrais verts sur l'amélioration de la structure du sol, la matière organique, et les bioagresseurs. En plus de l'acquisition de nouvelles références, c'est cet impact que se propose d'étudier le projet PATHOSOL.

Etude des engrais verts dans le cadre du projet PATHOSOL : objectifs recherchés

Un des objectifs est de poursuivre l'obtention de références locales concernant les engrais verts. Il s'agit d'identifier les espèces et mélanges adaptés au contexte de production nantais, à inclure dans les rotations pour désintensifier les pratiques culturales. Pour cela de nouvelles espèces continueront à être testées à partir de recherches bibliographiques.

Le but du projet est également d'optimiser la conduite des engrais verts pour l'adapter au mieux au contexte de production. Il faut ainsi veiller à l'étape du semis et de la préparation du sol, le mode de conduite (fertilisation, irrigation), et enfin la destruction (stade optimal, amélioration du broyage et de la dégradation).

Il s'agit enfin de vérifier l'intérêt des engrais verts en tant que pratique améliorante et de répondre aux hypothèses de travail formulées en début de projet :

- Les engrais verts **améliorent la structure du sol** par l'apport de matière organique et l'exploration racinaire. La perméabilité du sol diminue grâce à l'apport de matière organique structurante (le sol sableux s'agglomère et devient moins filtrant). La phase poreuse du sol est également impactée : la couverture par les engrais verts permet d'éviter que le sol ne s'assèche en surface et ne devienne compact.
- Via les actions améliorantes précédentes et la désintensification des cycles culturaux par l'introduction de nouvelles espèces dans les rotations, les engrais verts peuvent permettre de **maîtriser des bioagresseurs telluriques**. En conséquence, nous pouvons supposer un meilleur rendement des cultures maraîchères.

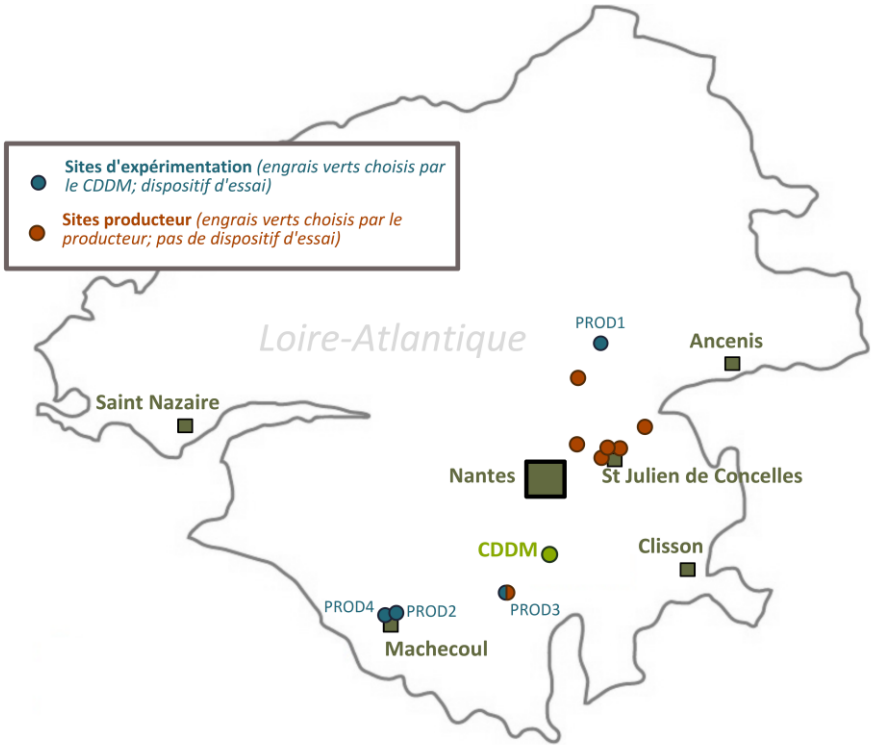


Figure 3 : Localisation des exploitations suivies durant le projet PATHOSOL

Tableau 2 : Suivi réalisé sur les quatre sites d'expérimentation

Producteur	Année de l'essai	Suivi des engrais verts	Suivi de la structure du sol	Suivi de la culture suivante
PROD1	2013 et 2014 (même parcelle suivie sur 2 ans)	✓	✓	✓
PROD2	2013 et 2014 (parcelle différente suivie chaque année)	✓	X	X
PROD3	2015	✓	X	X
PROD4	2015	✓	X	X

PARTIE B

Démarche de travail

Chapitre I. Présentation du réseau d'essais

1. Le réseau d'essais

Les données collectées par le CDDM proviennent d'engrais verts cultivés sur des exploitations maraîchères.
La carte en figure 3 présente la localisation des 10 exploitations qui ont cultivé des engrais verts et permis au CDDM de suivre ces parcelles dans le cadre de PATHOSOL.

Ces 10 exploitations sont réparties en deux catégories :

- Les **sites d'expérimentation**

Il s'agit des exploitations où le CDDM a mis en place ces expérimentations, selon un protocole et un dispositif expérimental. Quatre maraîchers (que nous nommerons PROD1, PROD2, PROD3 et PROD4) ont autorisé la mise en place d'expérimentations sur leur exploitation.

L'objectif des essais chez les PROD2, PROD3 et PROD4 est d'expérimenter de nouvelles espèces d'engrais verts (choisis par le CDDM) à proposer aux maraîchers nantais qui souhaitent faire une interculture. Les observations concernent le développement des nouveaux engrais verts (rendement, taille, mobilisations…) (Tableau 2). Une parcelle est mise à disposition sur la période d'une interculture (de mai à mi-juillet) pour mener les essais.

L'objectif des essais chez le PROD1 est d'évaluer l'intérêt d'engrais verts pour structurer le sol et maîtriser indirectement les bioagresseurs telluriques. L'essai a lieu sur la même parcelle pendant deux années. Les observations concernent la structure du sol et les cultures maraîchères succédant aux engrais verts (rendement, état sanitaire). Le déroulement de l'essai sur deux années est présenté sous forme de frise chronologique en annexe 1.
Suivre la même parcelle sur trois années a été impossible car l'exploitation ne souhaitait pas dédier une parcelle à des essais sur une telle durée.

- Les **sites producteurs** désignent six exploitations qui ont cultivé des engrais verts de leur choix, et permis au CDDM de faire des notations en fin de culture (rendement, mobilisations…).
Les données récoltées ont pour objectif d'acquérir des références locales directement en condition de production. Ceci permet d'enrichir la base de données du CDDM et de suivre les pratiques des producteurs.

Tableau 3: Dispositifs expérimentaux sur les sites d'expérimentation suivi lors du projet PATHOSOL

Code producteur	Durée d'observation (Année)	Dispositif	Nombre de modalités	Surface
PROD1	2 intercultures (2013, 2014)	3 blocs	4	1,35 ha
PROD2	1 interculture (2013)	Randomisation	7	650 m²
	1 interculture (2014)	Randomisation	2	1,45 ha
PROD3	1 interculture (2015)	Randomisation	5	4760 m²
PROD4	1 interculture (2015)	Randomisation	6	3600 m²

Tableau 4: critères de choix des espèces d'engrais verts estivaux à tester sur la région nantaise pour le projet PATHOSOL

Contraintes à respecter
Croissance rapide (5-6 semaines) Période d'interculture de mi-avril à fin août / Date de semis : de mi-avril à mi-juin
Espèces adaptées à un sol sableux + climat nantais estival (sec et chaud)
Diversifier les familles botaniques; pas de brassicacées (déjà présentes dans les rotations) Privilégier un mélange graminée/légumineuse
Bonne couverture et exploration du sol (combiner système racinaire pivotant et fasciculé)
Dégradation rapide après enfouissement (6-8 semaines) pour pouvoir implanter une culture maraîchère sur une parcelle propre dès mi-octobre
Pas de repousses après destruction, ni de débris d'engrais verts (corps étrangers non tolérés à la récolte de la mâche)
Disponibilité des semences chez les fournisseurs
Objectifs attendus
Maîtrise des bioagresseurs et des adventices
Structuration du sol
Apport de matière organique et restitution d'éléments nutritifs
Stimulation de la vie du sol

2. Dispositifs expérimentaux sur les sites d'expérimentation

Le dispositif expérimental mis en place chez chaque producteur est présenté dans le tableau 3 et l'annexe 2.

Les essais mis en place chez les producteurs par le CDDM disposent d'une parcelle témoin constituée d'un sol nu. Selon la taille de parcelle allouée par le producteur, il peut y avoir une parcelle « engrais vert témoin » ; cette parcelle est constituée d'un mélange d'avoine et de seigle. Il s'agit de l'engrais vert estival auquel les maraîchers nantais ont le plus recours.

Chapitre II. Le matériel végétal : les engrais verts testés sur les sites d'expérimentation

1. Critères de choix des engrais verts sur les sites d'expérimentation

Les essais menés chez les producteurs visent à acquérir des références sur les engrais verts, dans le contexte de production nantais. Il s'agit de déterminer de nouveaux mélanges d'engrais verts adaptés aux exigences de la région (interculture estivale courte), à proposer aux producteurs. Le choix des espèces d'engrais verts à évaluer repose ainsi sur plusieurs critères de choix qui figurent dans le Tableau 4.

2. La conduite de la culture d'engrais verts sur les sites d'expérimentation

Le semis des engrais verts

Le CDDM choisi les espèces d'engrais verts expérimentés ainsi que leur densité de semis.
Les espèces et les doses de semis des engrais verts sont déterminées par des recherches bibliographiques et en concertation avec le fournisseur de semences. Pour essais reconduits, les doses de semis sont ajustées si besoin selon les observations des années passées (c'est le cas par exemple du mélange millet-sarrasin testé chez le PROD2 – Tableau 5).

Le semis est réalisé avec un semoir à céréales préalablement réglé selon la densité de semis souhaitée. Le semis a été réalisé manuellement en 2013 chez le PROD2, vu la faible surface d'essai.

Le semis peut être réalisé en plein, c'est-à-dire sur toute la surface de la parcelle, ou en planche. Les engrais verts ne sont alors semés que sur les planches de culture, qui restent ainsi en place. Les exploitations nantaises sont en effet caractérisées par une culture en planche : des planches de 1,40m sont séparées entre elles par des passe-pieds de 40cm, qui servent au passage du personnel et des engins agricoles. Le semis en planche permet aussi de maintenir ces passe-pieds. Seuls les essais chez le PROD2 ont été semés en planche.

Les interventions sur les parcelles d'essai

La conduite de la culture (irrigation, fertilisation) est confiée au producteur, qui transmet ces interventions aux conseillers du CDDM. En général le producteur cultive d'autres engrais verts de son choix à proximité et réalise les mêmes opérations culturales sur l'essai. Le CDDM promeut la culture d'engrais verts comme une culture à part entière : il est ainsi recommandé de l'irriguer (si possible en conditions estivales) et de la fertiliser avec une trentaine d'unités d'azote.
Les interventions réalisées sur les parcelles d'expérimentation sont présentées en annexe 3.

Les conditions climatiques

Les données climatiques (température, précipitations) sur les périodes d'essai sont présentées en annexe 4. Le CDDM dispose de trois stations météo sur la Loire-Atlantique : une station à Saint-Julien-de-Concelles, une à Machecoul et une à la Planche. Les PROD2 et PROD4 se trouvent à Machecoul : nous utilisons les données climatiques recueillies par la station météo de Machecoul pour connaître leurs conditions de production.

Tableau 5 : Caractéristiques des engrais verts implantés sur les sites d'expérimentation

Engrais vert implanté	Densité de semis	Date de semis	Date de destruction + Durée interculture
PROD1 – Essais en 2013 et 2014			
Avoine - Millet - Vesce	20+10+25 kg/ha	12.06.2013 15.05.2014	25.07.2013 (43 jours) 04.07.2014 (50 jours)
RGI - Sarrasin	25+15 kg/ha	12.06.2013 15.05.2014	25.07.2013 (43 jours) 04.07.2014 (50 jours)
Sorgho - Phacélie	15+5 kg/ha (2013) 20+5 kg/ha (2014)	12.06.2013 15.05.2014	25.07.2013 (43 jours) 04.07.2014 (50 jours)
PROD2 – Essais en 2013 et 2014			
Moha - Vesce	25+25 kg/ha (2013) 30+30 kg/ha (2014)	06.06.2013 27.05.2014	23.07.2013 (47 jours) 07.07.2014 (41 jours)
Lupin - Sarrasin	80+10 kg/ha (2013)	06.06.2013	23.07.2013 (47 jours)
Avoine - Sarrasin	20+10 kg/ha (2013)	06.06.2013	23.07.2013 (47 jours)
Millet - Sarrasin	20+10 kg/ha (2013) 30+20 kg/ha (2014)	06.06.2013 27.05.2014	23.07.2013 (47 jours) 07.07.2014 (41 jours)
RGI - Millet - Avoine	25+20+20 kg/ha (2013)	06.06.2013	23.07.2013 (47 jours)
RGI - Trèfle incarnat	25+10 kg/ha (2013)	06.06.2013	23.07.2013 (47 jours)
Moha - Vesce	25+25 kg/ha (2013)	06.06.2013	23.07.2013 (47 jours)
PROD3 – Essai en 2015			
Millet - Trèfle d'Alexandrie	23,5 kg/ha	20.05.2015	08-14.07.2015 (50-60 jours)
Seigle - Vesce - Trèfle incarnat	37,5 kg/ha	20.05.2015	08-14.07.2015 (50-60 jours)
Moha - Trèfle d'Alexandrie	30 kg/ha	20.05.2015	08-14.07.2015 (50-60 jours)
Seigle	80 kg/ha	20.05.2015	08-14.07.2015 (50-60 jours)
PROD4 – Essai en 2015			
Avoine - Seigle	30 kg/ha	19.05.2015	17.07.2015 (60 jours)
Millet - Trèfle d'Alexandrie	26 kg/ha	19.05.2015	17.07.2015 (60 jours)
Seigle - Vesce - Trèfle incarnat	40 kg/ha	19.05.2015	17.07.2015 (60 jours)
Moha - Trèfle d'Alexandrie	35 kg/ha	19.05.2015	17.07.2015 (60 jours)
Seigle	30 kg/ha	19.05.2015	17.07.2015 (60 jours)

Le PROD1 se situe sur la commune de Petit Mars : nous utilisons les données climatiques de St-Julien-de-Concelles (20km de Petit Mars) pour approcher les conditions de productions rencontrées. Le PROD3 est implanté à Saint-Philbert-de-Grandlieu : nous nous servons des données climatiques de Machecoul (15km de Saint-Philbert-de-Grandlieu) pour estimer les conditions climatiques du PROD3.

La destruction des engrais verts

La date de destruction du couvert est décidée par le producteur, en concertation avec le CDDM. L'ensemble de l'essai est détruit par broyage dès qu'un engrais vert arrive à un stade de destruction. Le broyage de l'engrais vert est déclenché avant une lignification trop avancée et avant floraison de l'espèce (pour éviter les repousses dans la culture commercialisée). La destruction a lieu entre 40 et 60 jours après semis en moyenne en conditions de maraîchage nantais.

Le mode de destruction et les interventions après destruction (fréquence du travail du sol, arrosage pour améliorer la dégradation des engrais verts, préparation des planches pour la culture suivante…) dépendent ici aussi du choix du producteur, qui en informe le CDDM.

3. Les mélanges d'engrais verts évalués durant PATHOSOL

Depuis le début du suivi d'engrais verts en région nantaise en 2009, et jusqu'à fin 2012, ce sont 10 espèces réparties en 5 mélanges et 5 couverts monospécifiques qui avaient été observés.

Le projet PATHOSOL a permis d'acquérir des références sur le comportement en engrais vert de 14 espèces, dont 9 espèces supplémentaires par rapport aux années précédentes. Ce sont au total 15 mélanges (dont 14 nouveaux) qui ont été observés (Tableau 5) : 11 mélanges à deux espèces et 4 mélanges constitués de trois espèces. Les essais comprenaient également deux espèces utilisées comme engrais verts monospécifiques.

Engrais verts testés chez le PROD1

La parcelle du PROD1 a été suivie deux années consécutives (2013 et 2014) ; trois mêmes engrais verts ont été implantés au même emplacement chaque année depuis 2012.

Engrais verts testés chez le PROD2

La parcelle du PROD2 a été suivie en 2013 afin de déterminer de nouveaux mélanges intéressants parmi 7 mélanges testés à petite échelle. Les deux mélanges retenus ont été implantés chez ce même producteur l'année suivante, à plus grande échelle.

Engrais verts testés chez les PROD3 et PROD4

Les PROD3 et PROD4 ont été suivis parallèlement en 2015 : les mêmes mélanges ont été implantés à la même date chez ces deux producteurs. Les densités de semis théoriques étaient identiques pour les deux essais ; les doses de semis effectives diffèrent légèrement à cause de l'imprécision du semis. Ces essais permettent d'évaluer le comportement de nouveaux mélanges à la fois en sol lourd (PROD3) et sol léger (PROD4).

Chapitre III. Les indicateurs retenus pour évaluer les engrais verts : présentation, suivi et traitement des données

Des indicateurs ont été définis lors de la première année du projet PATHOSOL afin d'évaluer les engrais verts testés.

1. Indicateurs pour évaluer le développement des engrais verts

Le comportement des mélanges en tant que tels sont comparés selon plusieurs indicateurs. Ces caractéristiques permettent de déterminer si les engrais verts sont adaptés aux contraintes locales de production (climat, période disponible pour l'interculture).

La hauteur du couvert et la profondeur d'exploration racinaire

Lors de l'évaluation de nouveaux mélanges ou de nouvelles espèces, la hauteur moyenne du couvert (en cm) ainsi que la longueur moyenne des racines (en cm) sont déterminées.

On mesure la longueur moyenne des racines en fin de culture d'engrais vert, pour chaque espèce constitutive des mélanges d'engrais verts. Un profil de sol est réalisé en complément pour évaluer visuellement l'enracinement. L'enracinement nous renseigne également sur la capacité du couvert à structurer le sol (décompactage).

La hauteur moyenne des espèces constitutives des mélanges renseigne sur la qualité du développement aérien et la capacité de l'engrais vert à fournir un couvert végétal.

La production de biomasse

La production de matière végétale, en considérant la partie aérienne et racinaire des mélanges, est évaluée pour chaque engrais vert dans les jours précédant la destruction du couvert. Nous évaluons la teneur en matière verte et en matière sèche.

a/ Rendement en matière verte

On souhaite connaître le rendement en matière verte du mélange (en tonnes/ha). Les engrais verts sont récoltés à la fourche (afin de récolter au mieux les racines sans les endommager) en plusieurs échantillons de 1m². Ils sont ensuite lavés afin d'éliminer la terre des racines, puis égouttés et pesés. La quantité de biomasse produite sur 1m² est extrapolée à l'hectare, ce qui permet de connaître le rendement en matière verte du mélange en tonnes/ha.

Pour les essais réalisés sur les sites d'expérimentation, les moyennes des rendements pour chaque engrais vert sont comparées statistiquement par un test de Newman-Keuls au seuil de 5%. Selon l'essai, deux ou trois répétitions sont réalisées pour chaque modalité.

b/ Rendement en matière sèche

Nous voulons également connaître le rendement en matière sèche des engrais verts. Un échantillon de chaque mélange est analysé en laboratoire (Inovalys) afin de déterminer le taux de matière sèche. Par croisement avec le rendement en matière verte, nous en déduisons le rendement en matière sèche de chaque engrais vert (en tonnes/ha).

La mobilisation d'éléments nutritifs et en carbone organique

L'analyse en laboratoire (Inovalys) des échantillons prélevés en fin d'interculture fournit également la composition chimique des mélanges d'engrais verts récoltés.

Nous connaissons ainsi **les teneurs en azote total N, en phosphore P_2O_5 et potassium K_2O** (en g/kg de matière sèche) des végétaux incorporés au sol. Connaissant la teneur en matière sèche de l'échantillon, nous pouvons calculer les unités (en kg/ha) d'azote (uN), de potassium (uK) et de phosphore (uP) fournies par l'incorporation des engrais verts. Cela nous renseigne sur la quantité d'éléments mobilisés par les engrais verts, et incorporés au sol lors de leur enfouissement.

Nous connaissons également la **teneur en carbone organique** (également en g/kg de matière sèche) des échantillons. Ce carbone organique est restitué au sol à l'enfouissement de l'engrais vert ; il participe à la stabilité structurale du sol et contribue à la nutrition des organismes du sol.

Le rapport C/N et la vitesse de dégradation des engrais verts

Une fois enfouis dans le sol, les engrais verts mettent un temps variable à se dégrader. Une des contraintes à respecter en maraîchage nantais est de pouvoir remettre les parcelles d'engrais verts en culture dès début octobre. Pour cela, il est impératif qu'aucun débris végétal ne soit retrouvé sur les parcelles lors du semis.
Nous obtenons le **rapport C/N** des engrais verts évalués grâce aux analyses de laboratoire ; cela nous renseigne sur l'aptitude à la dégradation du mélange. Ainsi nous recherchons un rapport C/N moyen de 20-25 : en cas de C/N inférieur à 10 la dégradation et la minéralisation est trop rapide pour constituer de la matière organique stable. La dégradation est au contraire très lente pour un rapport C/N supérieur à 30 (Mével, 2015).

2. Indicateurs relatifs à la structure du sol

La structure du sol est évaluée chez le PROD1 grâce à trois indicateurs : la conductivité hydraulique, la morphologie des macropores et la porosité totale du sol.
Leur comparaison, avant et après engrais verts, doit nous permettre d'observer l'évolution de la structure du sol. Nous pourrons alors vérifier l'effet structurant des engrais verts implantés.
En complément, une analyse de sol par la méthode Hérody est réalisée avant la mise en place de l'essai (avril 2013) et après l'essai (avril 2015).

2.1 Fréquence des mesures

La conductivité hydraulique, la morphologie des macropores et la porosité totale du sol sont suivis sur deux années (2013 et 2014) à deux moments (Annexe 1):

- Avant la mise en place d'engrais verts (Point 0 – P0)
  Le P0 de 2013 est réalisé le 06/06/2013 ; le P0 de 2014 est effectué le 14/05/2014.
- Lors de la récolte de la première culture maraîchère suivant la mise en place d'engrais verts (Point 1 – P1)
  Le P1 de 2013 a lieu le 27/11/2013, après la 1ère culture de mâche sur la parcelle. Le P1 de 2014 est réalisé le 20/01/2015 après la 1ère culture de mâche sur la parcelle (précédée de deux cultures de radis).

Lors des mesures, trois répétitions sont réalisées par modalité.
Au P0 de 2013, une seule répétition a été mesurée par modalité pour la conductivité hydraulique, la porosité et la macroporosité. En considérant un précédent cultural identique sur toute la parcelle, c'est la moyenne des quatre modalités qui a été prise en compte comme valeur au P0 de 2013.

2.2 Localisation des mesures

Le test d'infiltrométrie étant long à réaliser (compter 30 minutes pour deux mesures), les mesures sont donc effectuées uniquement dans le bloc 3 du dispositif expérimental. Les données de macroporosité et de porosité doivent être étudiées en lien avec la conductivité hydraulique : les mesures sont ainsi également effectuées dans le bloc 3 du dispositif expérimental.

Les mesures sont réalisées en surface et en profondeur (20cm de la surface du sol).
En effet, la couverture du sol par les engrais verts est censée agir sur la structure du sol en surface (limitation de l'érosion et meilleure cohésion du sol dans les premiers centimètres du sol). L'exploration racinaire et l'incorporation de matière organique lors de l'enfouissement sont supposées structurer le sol en profondeur [4].

Tableau 6 : Dimension des macropores sollicités par les potentiels appliqués lors du test d'infiltrométrie (Hallaire, 2015)

Potentiel *h*	Diamètre des macropores sollicités
-0,6 kPa	300-750 µm
- 0,2 kPa	750-3000 µm
-0,05 kPa	> 3000 µm

* le centimètre d'eau (cmH_2O) est une unité de mesure de pression. On peut passer d'une pression exprimée en cmH_2O à une pression en pascals (Pa) grâce à l'équivalence suivante : $1cmH_2O$ = 98,0638 Pa [5]

Les mesures et prélèvements sont réalisés en milieu de planche, là où le sol est le moins perturbé et tassé « artificiellement ». Les passe-pieds servent en effet au passage de machines et du personnel : le sol y est plus compact que sur le reste de la parcelle. Le sol en bordure de planche est également influencé par les passages dans les passe-pieds.

2.3 Traitement statistique des données

Les données sont traitées statistiquement grâce au logiciel Statbox. L'effet du facteur 'couvert' (engrais verts ou témoin en sol nu) et du facteur 'date de mesure' est étudié par analyse de la variance (ANOVA). Avant analyse, les postulats de départ de l'ANOVA (normalité de l'échantillon, homoscédasticité) sont vérifiés. En cas de différence significative au seuil de 5%, les moyennes des données (conductivité hydraulique, porosité totale ou macroporosité) sont comparées grâce au test de Newman-Keuls afin de constituer des groupes d'impact homogène.

2.4 La conductivité hydraulique

a/ Le principe

La perméabilité du sol est évaluée grâce à un test d'infiltrométrie. Ce test détermine la conductivité hydraulique K(h), c'est-à-dire la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol (exprimée en en m/s) selon un gradient de pression h.

Le fonctionnement d'un infiltromètre est décrit par Coquet et al. (2000). Un apport d'eau continu est imposé au sol pour déterminer la vitesse d'infiltration. La particularité de l'infiltromètre est de posséder une canule pour régler et contrôler ce potentiel d'eau à l'interface infiltromètre/sol (au niveau d'un disque de 4,4 cm de diamètre).

L'intérêt est de pouvoir mesurer la conductivité hydraulique en conditions proches de la saturation du sol, à des potentiels négatifs en général compris entre $-25 < h < 0$ cmH_2O (soit $-2,5 < h < 0$ kPa). Cette gamme de potentiels permet d'obtenir des informations sur les macropores de diamètre supérieur à 0,12 mm ; en effet, selon le potentiel appliqué, les macropores de tailles différentes sont sollicités (Tableau 6). Il est alors possible d'estimer l'importance relative des différents macropores impliqués dans les mouvements d'eau au sein du sol.

b/ Notations

La perméabilité du sol est déterminée grâce à un infiltromètre DECAGON® dont le protocole détaillé d'utilisation est présenté en Annexe 5.

Pour réaliser des mesures de conductivité hydraulique en sol sableux, nous appliquons trois niveaux de pression croissants dans l'infiltromètre: h=-0,6 kPa, h=-0,2 kPa puis h=-0,05 kPa. Nous obtenons ainsi trois valeurs de conductivité hydraulique par test d'infiltrométrie : $K_{(0,6)}$, $K_{(0,2)}$ et $K_{(0,05)}$. Le test est réalisé en surface et à une profondeur de 20cm, avec trois répétitions par modalité (soit au total 24 tests d'infiltrométrie).

Tableau 7 : Classification des macropores selon leur morphologie (taille et forme) (Hallaire, 2015)

Classes de forme	**Classes de taille (rayons des pores)**			
	< 300 µm	[300-750 µm]	[750-3000 µm]	> 3000 µm
Pores tubulaires *(I_A < 5)*	Type A1	Type A2	Type A3	Type A4
Pores fissuraux *(5 < I_A < 10)*	Type B1	Type B2	Type B3	Type B4
Pores d'assemblage *(I_A > 10)*	Type C1	Type C2	Type C3	Type C4

2.5 La morphologie des macropores

a/ Le principe

L'étude de la morphologie des macropores du sol permet de caractériser l'espace poral d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Les macropores sont des pores dont le diamètre varie de 30 à 3000 µm (Chen et al., 1993). Cette caractérisation est effectuée avec l'expertise de Vincent Hallaire de l'INRA de Rennes, par analyse d'images sur lames de sol issues d'échantillons résinés. Les pores sont décrits par le couplage de leur taille et leur forme, soit au total douze morphologies de macropores (Tableau 7).

- La caractérisation qualitative des macropores est possible grâce à la définition de trois formes de pores (Citeau et al., 2008). La forme de ces pores est décrite par un indice, l'indice d'allongement I_A (Hallaire, Curmi et Widiatmaka, 1997):

$$I_A = \frac{P^2}{4\pi S}$$

avec P : périmètre du pore
S : surface du pore

  Les pores tubulaires (I_A <5) sont arrondis, et d'origine biologique (radicelles, racines). Les pores fissuraux (5 < I_A < 10) sont de forme allongée ; ils correspondent aux interstices inter-agrégats dans les assemblages serrés (cette compaction provoque la déconnexion des pores). Les pores d'assemblage (I_A > 10) correspondent aux interstices inter-agrégats où les pores sont inter-connectés. Le passage d'une porosité d'assemblage à une porosité fissurale révèle un tassement du sol (Citeau et al., 2008).

- Quatre classes de taille sont déterminées, ce qui permet de décrire quantitativement la macroporosité. Ces classes correspondent aux rayons des pores sollicités par le test d'infiltrométrie et les différents niveaux de pressions appliqués lors de ce test. A titre d'exemple, la pression de 0,6 kPa sollicite les pores de rayon 300µm à 750 µm. Ainsi cette caractérisation des macropores permet de compléter les données du test d'infiltrométrie : il est ainsi possible de savoir quels pores jouent sur la perméabilité du sol (Hallaire, 2015).

b/ Mode de prélèvement et notations

Afin de caractériser la macroporosité, un bloc de terre (8x5x3cm) non perturbé est prélevé suite au test d'infiltrométrie, au même emplacement. Ce bloc est envoyé à l'INRA de Rennes où il est séché et imprégné de résine. Le bloc est ensuite découpé horizontalement en lames. Par analyse d'image, un logiciel distingue la phase solide de la phase poreuse et identifie les différentes tailles et formes de macropores. Pour chaque bloc de sol, nous connaissons ainsi la part de chaque type de pore au sein de la macroporosité.

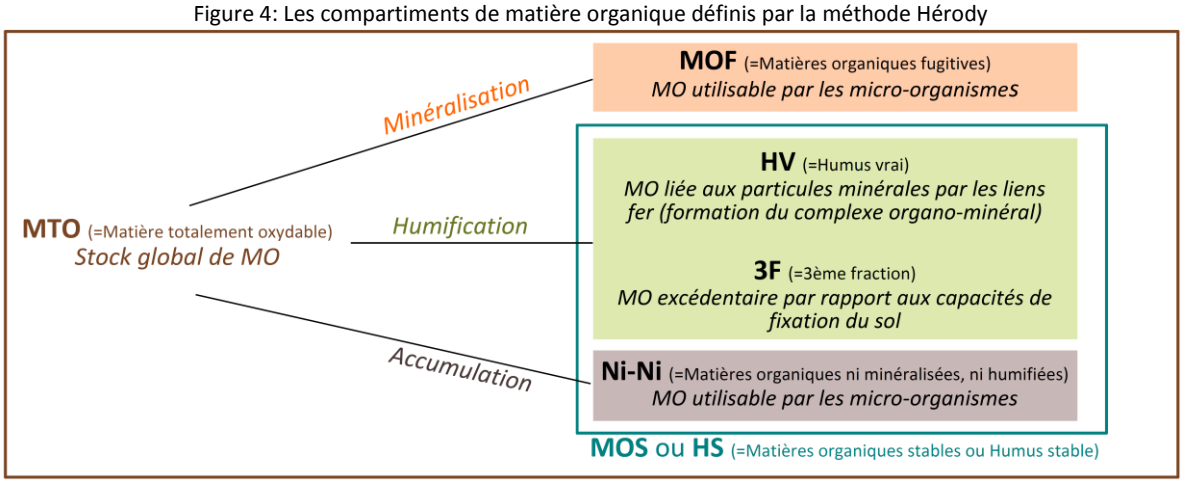
A chaque date de mesure, trois blocs de sol sont prélevés pour chaque modalité, en surface et en profondeur (20cm), soit au total 24 prélèvements.

Tableau 8: Les constituants minéraux du sol étudiés par la méthode Hérody

Indicateur	Rôle	Echelle
FL (Fer de liaison)	Assure de lien entre MO et argiles	Optimum FL=20
FA (Fer amorphe)	Assure de lien entre MO et limons	Optimum FA=55
AT (Bases alcalino-terreuses Mg et Ca)	Assurent la stabilité du lien entre la MO et particules minérales (argiles ou limons)	Mg | Teneur souhaitable : Mg/AT = 10-12% Ca | Noté de 0 à 3 0 : pas d'effervescence acide, sol décarbonaté 3 : forte effervescence, sol calcaire
CF (Coefficient de fixation)	Traduit la capacité du sol à retenir des éléments minéraux	Noté de 0 à 7 0 : faible capacité de réserve 7 : forte capacité de réserve
Al (Aluminium)	Peut bloquer certains composants du sol (insolubilisation de la MO). Toxique pour les plantes On évalue son risque de présence	Seuil fixé à 0,3% d'Al Noté de 0 à 3 0 : absence d'Al dans le sol / 1 : inférieur au seuil / 2 : seuil / 3 : supérieur au seuil
P, K (Phosphore et potassium)	Éléments de fertilité du sol	Noté de 0 à 5 0=très pauvre / 3=bien pourvu / 5= très riche
Mn (Manganèse)	Mn présent sous deux formes Mn1 : lié à la MO, indicateur de lessivage Mn2 : Mn total mobilisable	Teneur souhaitable : 0,5 < Mn1 < 1,5 Noté de 0 à 3 0 : absence de Mn dans le sol 1 : inférieur au seuil / 2 : seuil / 3 : supérieur au seuil

D'après Riou (2007), Massenot (2004), et Siron (2004)

Figure 4: Les compartiments de matière organique définis par la méthode Hérody



D'après Riou (2007), Massenot (2004), et Siron (2004)

Tableau 9 : Les constituants organiques étudiés par la méthode Hérody

Indicateur	Rôle	Echelle
MOF Matières organiques fugitives	MO facile à décomposer par la vie microbienne, rapidement minéralisable	Optimum MOF/MTO=20%
HS (Humus stable)	MO stockée sous forme stable mais susceptible d'évoluer	Optimum HS=1,5
3F (3ème fraction)	Réserve d'humus excédentaire par rapport à la capacité de fixation du sol	Niveau souhaitable : 3F < 0,5
Ni-Ni (Matières organiques ni humifiées, ni minéralisées)	Traduit l'importance de MO brute inerte qui s'accumule dans le sol	Niveau souhaitable Ni-Ni < 150

D'après Riou (2007), Massenot (2004), et Siron (2004)

2.6 La porosité totale

a/ Principe

Exprimée en pourcentage, la porosité totale Φ traduit l'état de compacité du sol ; cet indicateur permet aussi de connaître la capacité de rétention en eau du sol. Par complémentarité avec les données de macroporosité, il est possible de connaître la part de micro-mésoporosité (pores de diamètre inférieur à 30 µm) du sol étudié.

Calculer la porosité totale nécessite de connaître la densité apparente sèche du sol ρ_a (en kg/m^3). Cette densité apparente est calculée à partir du prélèvement d'un échantillon de terre :

$$\rho_a = \frac{m}{V}$$

m : masse sèche de l'échantillon de terre, obtenue après séchage pendant 48h dans une étuve à 105°C

V : volume de l'échantillon de terre. Nos prélèvements sont réalisés avec un cylindre de volume V=98 cm^3

La porosité totale ϕ est alors estimée grâce à la formule suivante (d'après Calvet, 2003):

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_S}\right) \times 100$$

Où ρ_S est la densité réelle moyenne de la phase solide d'un sol, avec ρ_S=2,65 kg/m^3 – Calvet, 2003)

b/ Mode de prélèvement et notations réalisées

La porosité totale est déterminée grâce à un prélèvement de terre dans un cylindre de 98 cm^3 (5cm de diamètre sur 5cm de hauteur). Les prélèvements ont lieu en surface et à 20cm de profondeur, avec trois répétitions par modalité (soit au total 24 prélèvements). La porosité totale est déduite de la différence de masse du sol prélevé avant et après séchage à 105°C pendant 48h.

2.6 La méthode Hérody

a/ Principe

La méthode Hérody propose un diagnostic global de l'état du sol, par des observations de terrain (profil de sol et description) et des analyses en laboratoire.

Le diagnostic par analyse se base sur plusieurs indicateurs, appartenant aux constituants minéraux ou organiques du sol [6].

- Les constituants minéraux du sol (Tableau 8)

La méthode Hérody détermine la fertilité du sol (niveau de **potassium** et **phosphore**), ainsi que le risque de présence d'**aluminium** (élément toxique). La méthode Hérody estime la présence de **manganèse** total mobilisable situé dans le complexe d'altération (Mn2) ; le manganèse lié à la MO (Mn1) est aussi observé, il permet de tracer le lessivage de MO. Le niveau en bases alcalino-terreuses (**magnésium** et **calcium**) dans le sol est également évalué pour raisonner les apports en carbonates et magnésie.

Cette méthode évalue la présence de deux formes de fer : le fer de liaison et le fer amorphe.

Le **fer de liaison** assure le lien entre matière organique et argile, afin de former le complexe argilo-humique. Ce lien est stabilisé par la présence de magnésium et de calcium, eux aussi déterminé lors de l'analyse.

Le **fer amorphe** assure le lien entre matière organique et limons, afin de former le complexe limono-humique (lui aussi stabilisé par le calcium et le magnésium).

L'association de ces deux complexes est dénommée complexe organo-minéral ; ce complexe possède une capacité de fixation des éléments minéraux, traduite par un **coefficient de fixation**. L'approche Hérody considère en effet que le complexe argilo-humique et le complexe limono-humique ont tous les deux une capacité de fixation.

Tableau 10 : Itinéraire cultural des cultures maraîchères sur la parcelle d'essai du PROD1

Culture	Date de semis	Date de récolte	Durée du cycle
Mâche 1, 2013	08/10/2013	27/11/2013	50 jours
Mâche 2, 2013	27/11/2013	19/02/2014	84 jours
Mâche 1, 2014*	Début novembre 2014	S3 2015 (12-17/01/2015)	Environ 70 jours

* Après les engrais vert, rotation Radis 1 / Radis 2 / Mâche 1. Seule la mâche est suivie pour les notations

- Les constituants organiques

La méthode Hérody subdivise la matière organique (MO) du sol en plusieurs compartiments. Ce fractionnement permet une analyse plus fine de la MO pour une meilleure gestion des apports par la suite.

La matière organique totale (appelée « Matière organique totalement oxydable ») est ainsi répartie entre les matières organiques fugitives (les MOF, facilement minéralisables et réserve nutritionnelle des micro-organismes) et l'humus stable (HS) (Figure 4 et Tableau 9). Cet humus est stabilisé soit par humification (cas de l'humus vrai et de la 3ème fraction) ou par accumulation de MO (Ni-Ni) [6] [7].

b/ Mode de prélèvement et traitement des données

Ce diagnostic est effectué par du personnel formé à cette méthode ; dans notre cas, le prélèvement et l'analyse sont réalisés par Virginie RIOU, conseillère en agronomie à la Chambre d'Agriculture du Maine-et-Loire.

Des échantillons de terre sont prélevés en début et en fin de projet chez le PROD1. Les analyses en début et en fin de projet sont comparées afin de voir les évolutions sur 3 ans selon le couvert estival implanté.

Un échantillon de sol en surface et en profondeur est extrait dans le bloc 1 pour chaque modalité de l'essai chez le PROD1, soit huit échantillons au total.

3. Indicateurs pour évaluer l'impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes

Les cultures maraîchères qui suivent la destruction des engrais verts sont suivies chez le PROD1. On observe leur rendement et leur qualité, afin de déterminer si les engrais verts ont un impact sur les cultures par rapport au témoin en sol nu.

Pour les producteurs nantais, la mâche est la culture maraîchère la plus contraignante car aucun corps étranger (herbes, feuilles…) n'est toléré à la récolte. L'impact des engrais vert est ainsi étudié sur la mâche d'hiver lors des essais. Comme les cycles de culture de ce produit sont courts (50 à 60 jours à la période d'essai), cela laisse la possibilité de suivre deux cultures consécutives.

3.1 Fréquence des mesures

L'impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes a été suivi deux années de suite (2013 et 2014, cf. annexe 1 et Tableau 10) sur la parcelle du PROD1. Cette parcelle a été choisie car elle était naturellement contaminée par des bioagresseurs telluriques avant la mise en place des essais.

Les cultures sont implantées après dégradation des engrais verts, à partir de mi-octobre.

En 2013, la 1ère mâche a été semée après 69 jours de dégradation des engrais verts.

En 2014, la première culture maraîchère (radis) a été semée après deux mois de dégradation des engrais verts ; la première mâche a été implantée après quatre mois de dégradation.

3.2 Traitement statistique des données

Les données sont traitées statistiquement grâce au logiciel Statbox. L'effet du facteur 'couvert' (engrais verts ou témoin en sol nu) sur le rendement et la qualité est étudié par analyse de la variance (ANOVA). Avant analyse, les postulats de départ de l'ANOVA (normalité de l'échantillon, homoscédasticité) sont vérifiés. En cas de différence significative au seuil de 5%, les moyennes des données (rendement ou note d'agréage) sont comparées grâce au test de Newman-Keuls afin de constituer des groupes d'impact homogène.

3.3 Le rendement de la culture suivante

a/ Présentation

Le rendement de la culture suivante est suivi afin de voir l'impact possible d'un engrais vert.
Le rendement est exprimé en kg/ml (mètre linéaire). En effet, comme la culture de mâche se fait en planche, le rendement est raisonné dans cette unité plutôt qu'en kg/ha.*

b/ Notations réalisées

Lors de la récolte, un échantillon de mâche est prélevé sur un mètre linéaire (ml) à l'aide d'une fourche de largeur connue. Il y a trois répétitions par modalité et par bloc (soit 36 mesures au total). La mâche est ensuite lavée, essorée, puis pesée afin d'obtenir le rendement de la culture en kg/ml pour chaque modalité.

3.4 La qualité de la culture suivante

a/ Présentation

Afin d'évaluer l'effet sanitaire de l'engrais vert, on attribue une **note d'agréage** à un lot de 100 mâches pour chaque parcelle ayant eu un engrais vert. Cette note traduit la qualité du produit et est déterminée à partir du référentiel de qualité mâche (Annexe 6) établi par l'AOP Mâche Pays de la Loire. Il s'agit d'un référentiel commun aux producteurs de mâche de la région, créé pour palier à l'absence de normes officielles. Une note allant de 0 à 2 est attribuée à chaque mâche ; plus la mâche présente un défaut important, plus sa note sera élevée (sachant qu'une note élevée correspond à des symptômes de maladies). On peut ainsi considérer que la somme des notes d'agréage de 100 mâches reflète l'état sanitaire de la culture suivant l'engrais vert. Les qualiticiens considèrent que le lot est acceptable jusqu'à un seuil de tolérance de 25 points pour 100 mâches.
Lors de la notation des lots, la nature du défaut est également saisie afin de pouvoir vérifier plus précisément la composition de la note finale d'agréage.

b/ Notations réalisées et traitement des données

Lors de la récolte, un échantillon de 50 mâches est prélevé et noté pour chaque modalité dans chaque bloc du dispositif expérimental (soit au total 12 notations).
Une note (de 0 à 2) est attribuée à chaque mâche à l'aide du référentiel de qualité mâche. La somme de ces notes constitue la note globale du lot de 50 mâches. Cette note est ensuite rapportée à 100 mâches.

* La conversion d'une unité à l'autre est possible grâce à l'équivalence suivante : 1kg/ml = 5t/ha (un hectare comprend en effet 5000ml de planches de 1,40m de large, soit 7000 m² de planches).

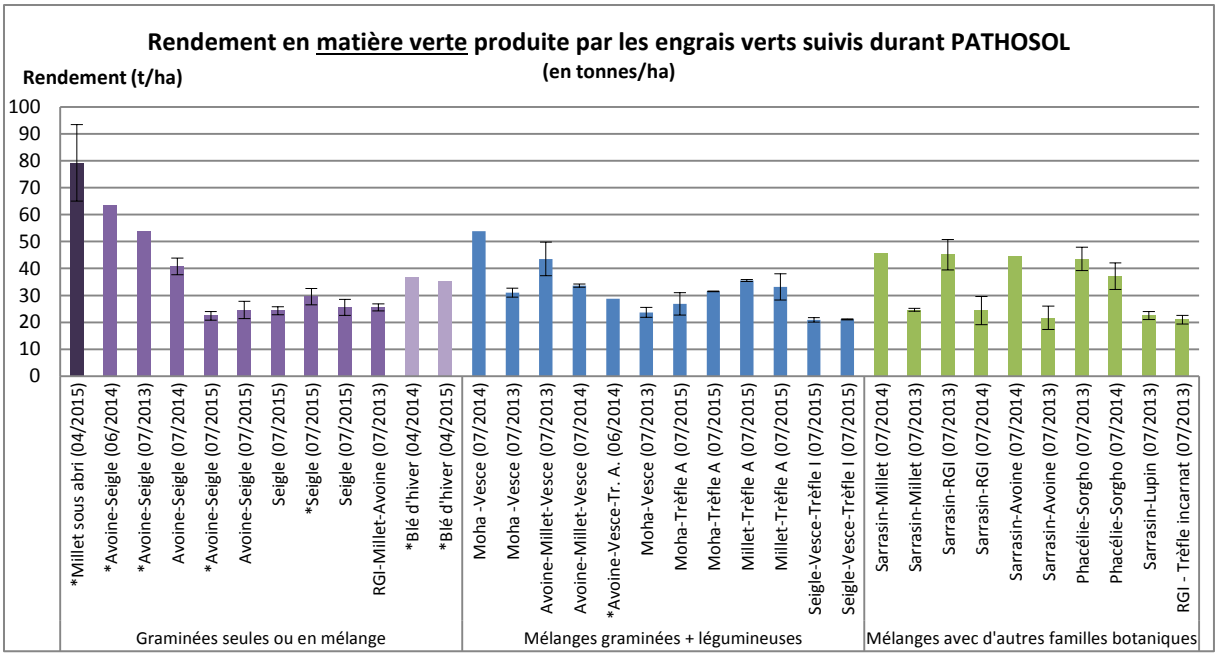


Figure 5: Rendement (tonnes/hectare) en matière verte des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL
Les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types. La date indiquée entre parenthèses en abscisse est la date de destruction du couvert correspondant. Les étoiles * désignent les engrais verts implantés sur les sites producteurs.

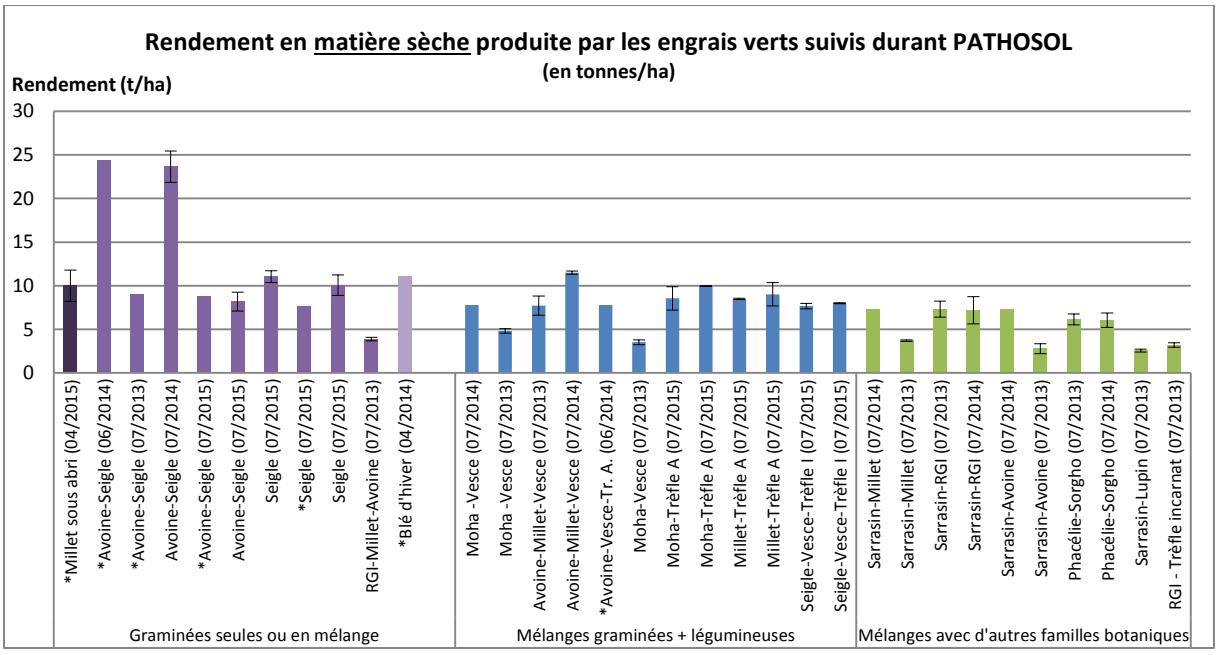


Figure 6: Rendement (tonnes/hectare) en matière sèche des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL
Les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types. La date indiquée entre parenthèses en abscisse est la date de destruction du couvert correspondant. Les étoiles * désignent les engrais verts implantés sur les sites producteurs.

PARTIE C

Résultats

Chapitre I. Acquisition de références locales sur les engrais verts : développement des mélanges suivis

1. Production de biomasse par les engrais verts suivis

Le rendement des engrais verts estivaux est en moyenne de 33,2 t/ha de matière verte (Figure 5); il s'échelonne de 21 t/ha (mélange ray-grass italien et trèfle incarnat) jusqu'à 64 t/ha (mélange avoine-seigle). Ces valeurs sont valables pour des engrais verts cultivés en plein champ, et détruits entre début et fin juillet (semés de mi-mai à mi-juin).
Un rendement supérieur, de 79 t/ha de matière verte, a été atteint par un engrais vert cultivé sous abri froid (millet) récolté mi-juin.
Des cultures de blé comme engrais vert hivernal ont également été suivies : le rendement en matière verte à la destruction (entre mi et fin avril) se situe alors à 36 t/ha en moyenne.

La matière sèche (partie aérienne et racinaire) produite est en moyenne de 8,3 tonnes/ha, avec un minimum de 2,6 t/ha (mélange sarrasin et lupin) et un maximum de 24,4 t/ha (mélange avoine et seigle) (Figure 6).

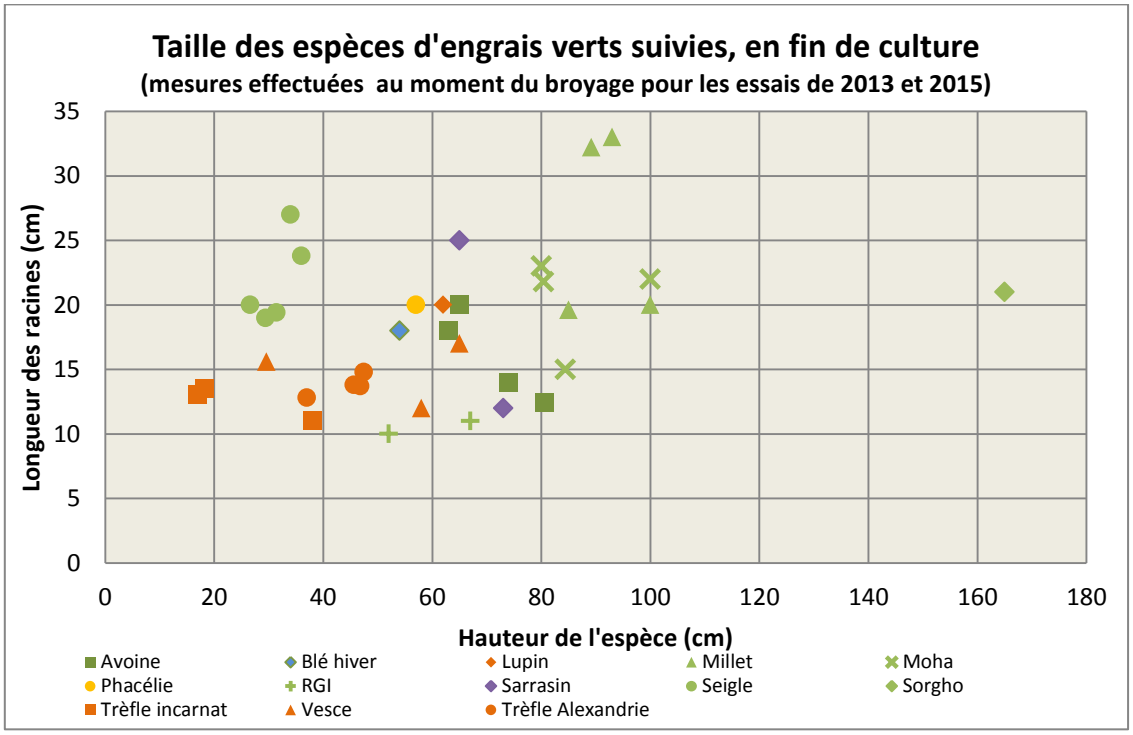


Figure 7: Hauteur et profondeur des racines des espèces d'engrais verts suivies durant le projet PATHOSOL
En orange : espèces de la famille des légumineuses (*Fabaceae*)
En vert : espèces de la famille des graminées (*Poaceae*)

2. Taille des engrais verts suivis

Les espèces testées ont des morphologies variables : leur hauteur est comprise entre 20cm (trèfle incarnat) et 100 cm (millet, moha). L'exploration racinaire se situe en moyenne dans les 20 premiers centimètres du sol ; des espèces comme le millet ou le seigle vont jusqu'à 25-30 cm de profondeur (Figure 7).

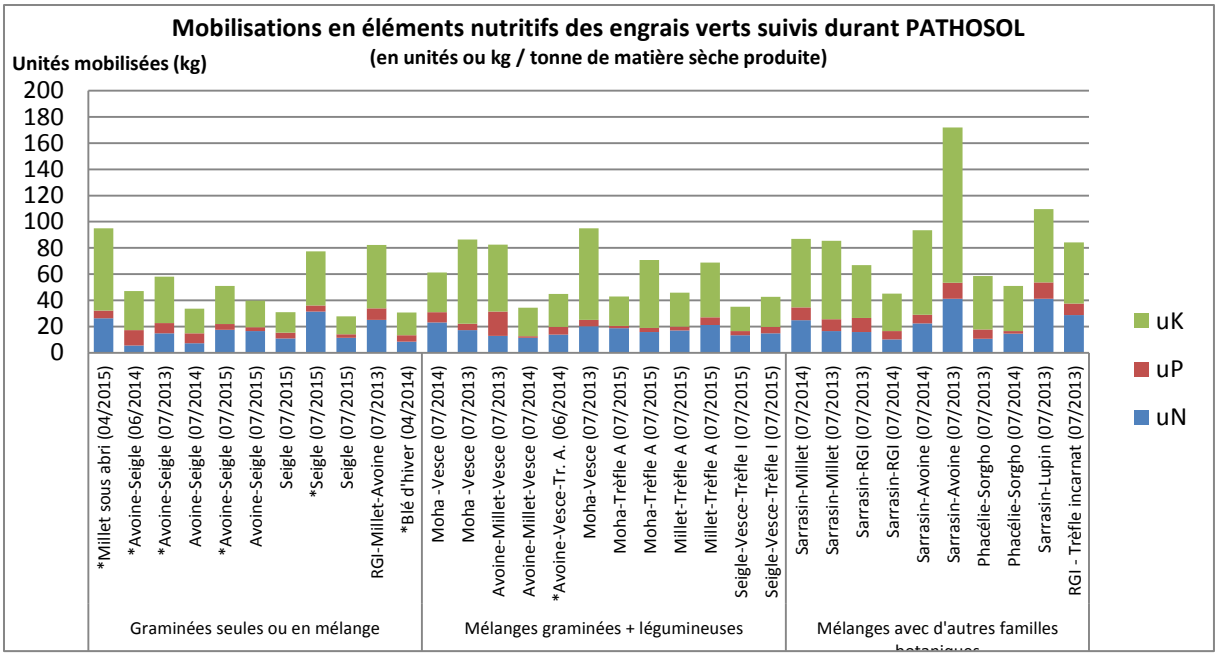


Figure 8: Mobilisations (en unités ou kg) en éléments nutritifs (azote N, potassium K_2O, et phosphore P_2O_5) par les engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL

Les étoiles * désignent les engrais verts implantés sur les sites producteurs.

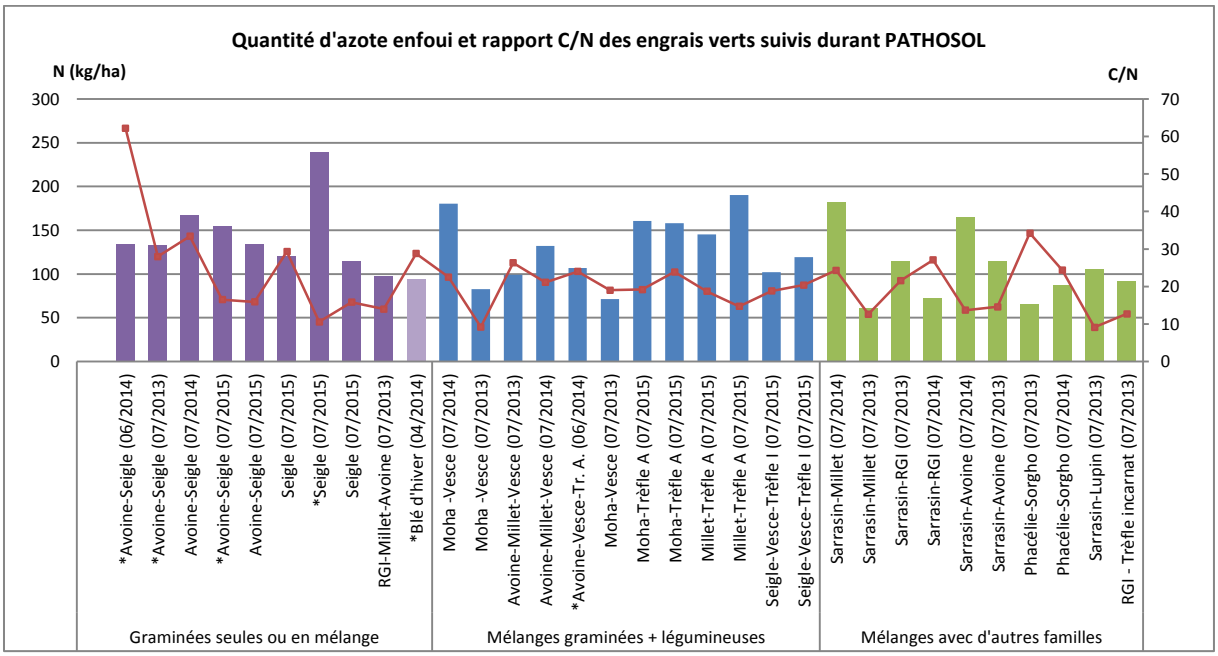


Figure 9: Quantité d'azote enfoui (kg/ha) et rapport C/N des engrais verts suivis durant le projet PATHOSOL

En histogramme : Azote enfoui en kg/ha pour les mélanges évalués (échelle à gauche)

Courbe : Rapport C/N des mélanges évalués (échelle à droite)

Les étoiles * désignent les engrais verts implantés sur les sites producteurs.

4. Mobilisation d'éléments nutritifs par les engrais verts suivis

En moyenne, les engrais verts ont mobilisé 17 kg d'azote par tonne de matière sèche (MS) produite (minimum 3 kg/t de MS ; maximum 41 kg/t de MS). Les teneurs moyennes en phosphore et potassium sont respectivement de 7 kg/tonne de matière sèche (minimum 1 kg/t de MS ; maximum 19 kg/t de MS) et 38 kg/tonne de matière sèche (minimum 8 kg/t de MS ; maximum 119 kg/t de MS) (Figure 8).

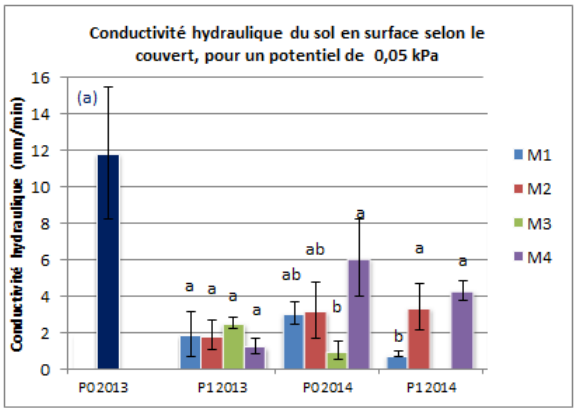
Avec une production moyenne de 8,3 tonnes de MS/ha, les engrais verts testés en conditions nantaises assimilent ainsi en moyenne 141 kg/ha d'azote, 58 kg/ha de phosphore et 315 kg/ha de potassium.

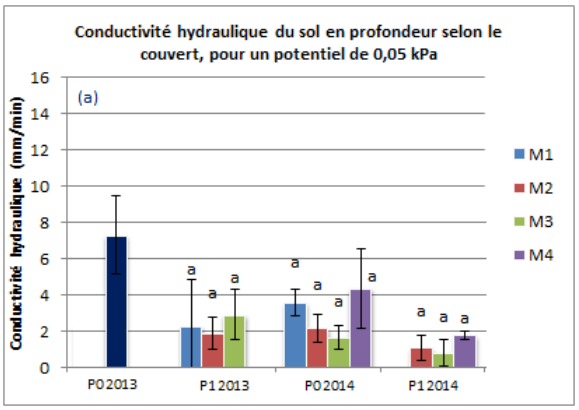
La mobilisation d'azote et de phosphore est similaire entre les familles suivies. Ainsi les graminées seules ou en mélange mobilisent 14 kg d'azote par tonne de MS, tandis que les mélanges graminées-légumineuses mobilisent 17 kg d'azote/t de MS et les mélanges d'autres familles 23 kg d'azote/t de MS produite. De même, en moyenne 6 kg/t de MS de phosphore sont mobilisés par les graminées seules ou en mélange, 5kg/t de MS pour les mélanges graminées-légumineuses ; les mélanges d'autres familles mobilisent en moyenne 8 kg/t de MS de phosphore.

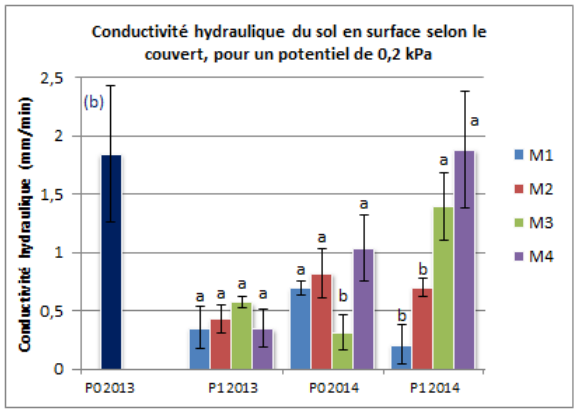
Les graminées en mélanges ou seules mobilisent en moyenne 25 kg de potassium par tonne de MS produite. Les mélanges graminées-légumineuses en mobilisent en moyenne 37 kg/t de MS, et les autres mélanges de familles botaniques 54 kg/t de MS produite.

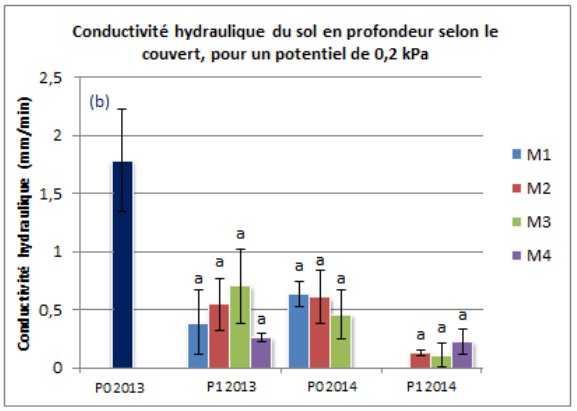
5. Rapport C/N et dégradation des engrais verts suivis

Le rapport C/N des engrais verts testés traduit leur capacité à se dégrader plus ou moins rapidement. Ce rapport est en moyenne de C/N=21 pour les mélanges suivis (Figure 9); les valeurs s'étendent de C/N=9 (mélange sarrasin-lupin) à C/N=62 (mélange avoine-seigle). Cette dernière valeur est très élevée par rapport aux autres valeurs de C/N trouvées pour le même mélange (en moyenne C/N=23,5).









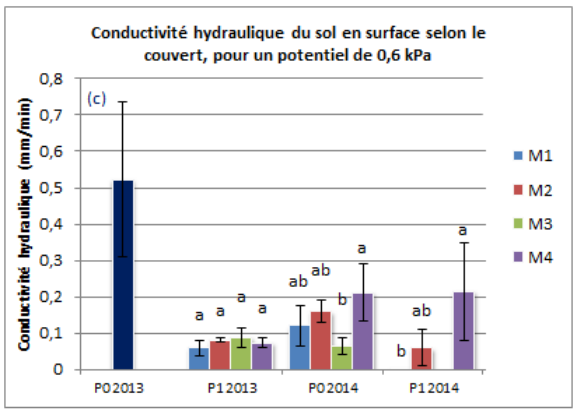


Figure 10: Impact du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en surface, pour un potentiel de 0,05 kPa (a), 0,2 kPa (b) et 0,6 kPa (c)

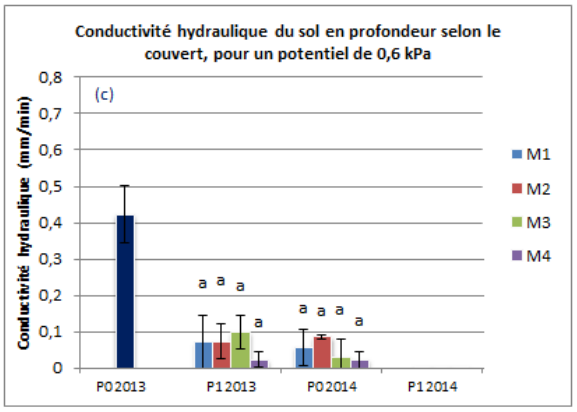


Figure 11 : Impact du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en profondeur (20cm), pour un potentiel de 0,05 kPa (a), 0,2 kPa (b) et 0,6 kPa (c)

Chapitre II. Effet des engrais verts sur la structure du sol

L'impact des engrais verts sur la structure du sol est étudié chez le PROD1. Des engrais verts ont été semés deux années consécutives sur la même parcelle : M1 (mélange avoine-millet-vesce), M2 (mélange raygrass italien-sarrasin) et M4 (mélange sorgho-phacélie). La modalité M3 sert de témoin laissé en sol nu.

Lecture des graphiques

Chaque point résulte de la moyenne de 3 répétitions. Les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types. Les étoiles * indiquent l'absence de différence significative entre moyennes. Les lettres indiquent les groupes homogènes de moyennes d'après le test de Newman-Keuls (la lettre 'a' désignant le groupe ayant la moyenne la plus élevée).

Les moyennes n'ont pas pu être comparées entre elles en cas d'absence d'étoiles ou de lettre (non-respect des postulats de l'ANOVA).

1. Impact des engrais verts sur la perméabilité du sol (conductivité hydraulique)

Données écartées de l'analyse

a/ En surface

Les données d'une répétition de la modalité M3 (témoin) sont aberrantes en surface au P1 2014. A cette date et en surface, nous n'utilisons ainsi que les données de deux répétitions pour évaluer M3. Les conditions de l'ANOVA ne sont pas respectées dans deux cas : à un potentiel de -0,05 kPa et à -0,6 kPa. Nous ne comparons alors entre elles que les moyennes de conductivité des modalités M1, M2, et M4.

b/ En profondeur

- Les données d'une répétition de la modalité M4 sont aberrantes en profondeur au P1 2013 et au P0 2014. A ces dates et en profondeur, nous n'utilisons ainsi que les données de deux répétitions pour évaluer M4. Les conditions de l'ANOVA ne sont pas respectées dans deux cas : au P1 2013 à -0,05 kPa et au P0 2014 à -0,2 kPa. Nous ne comparons alors entre elles que les moyennes de conductivité des modalités M1, M2, et M3.
- Les données des trois répétitions de la modalité M1 sont aberrantes au P1 2014 en profondeur. Nous ne pouvons pas comparer cette modalité aux autres. Nous ne comparons entre elles que les moyennes de conductivité hydraulique des modalités M2, M3 et M4 à cette date en profondeur.

Conductivité hydraulique à l'état initial, avant la mise en place d'engrais verts (P0 2013) (Figures 11 et 12)

La vitesse moyenne à 0,05 kPa est de 11,845 mm/min en surface et 7,295 mm/min en profondeur.
La vitesse moyenne à 0,2 kPa est de 1,845 mm/min en surface et 1,787 mm/min en profondeur.
La vitesse moyenne à 0,6 kPa est de 0,523 mm/min en surface et 0,425 mm/min en profondeur.

Influence du couvert sur la conductivité hydraulique fin 2013, après une culture d'engrais verts (P1 2013)

Il n'y a pas de différence significative de perméabilité entre les modalités étudiées, ni en surface ni en profondeur (Figures 10 et 11). Aucune différence de perméabilité n'est constatée l'hiver après la première culture d'engrais verts.

La vitesse moyenne à 0,05 kPa est de 2,080 mm/min en surface et 2,337 mm/min en profondeur.
La vitesse moyenne à 0,2 kPa est de 0,425 mm/min en surface et 0,496 mm/min en profondeur.
La vitesse moyenne à 0,6 kPa est de 0,076 mm/min en surface et 0,070 mm/min en profondeur.

Influence du couvert sur la conductivité hydraulique début 2014, après une culture d'engrais verts l'été précédent et avant la mise en place d'une deuxième interculture l'été suivant (P0 2014)

a/ En surface

On observe un effet du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en surface, peu importe le potentiel appliqué (Figure 10).

La modalité M4 possède les valeurs de conductivité hydraulique les plus élevées (différence significative) à un potentiel de -0,05 et -0,6 kPa (Figure 10a et 10c).

Pour un potentiel de -0,2 kPa, les modalités avec engrais verts (M1, M2, et M3) ont des valeurs de conductivité similaires ; ces valeurs sont supérieures à celles du témoin M3 (Figure 10b).

M1 et M2 possèdent des vitesses d'écoulement intermédiaires entre M3 et M4 à -0,05 kPa et -0,6 kPa.

La modalité M3 (témoin en sol nu) possède les valeurs de conductivité hydraulique les plus faibles (différence significative), quel que soit le potentiel appliqué (Figure 10).

Ainsi, au printemps 2014, le sol apparaît moins perméable en surface sur le témoin sol nu que sur les parcelles avec engrais verts.

b/ En profondeur

Il n'y a pas de différence significative de conductivités hydraulique entre modalités en profondeur. Les engrais verts n'ont pas affecté la perméabilité du sol en profondeur (Figure 11). La vitesse moyenne d'écoulement est de 2,776 mm/min à -0,05 kPa ; 0,549 mm/min -0,2 kPa ; 0,051 mm/min à -0,6 kPa

Influence du couvert sur la conductivité hydraulique fin 2014, après une culture d'engrais vert deux étés consécutifs (P1 2014)

a/ En surface

On observe un effet du couvert sur la conductivité hydraulique du sol en surface, peu importe le potentiel appliqué (Figure 10).

La modalité M1 a une conductivité hydraulique plus faible que les autres à -0,05 kPa et -0,6 kPa (différence significative – Figure 10a et 10c). A -0,2 kPa, M1 et M2 ont des conductivités similaires, plus faibles que les modalités M3 et M4 (Figure 10b). M2 possède une conductivité intermédiaire entre M1 et M4 à -0,6 kPa (Figure 10c).

La modalité M4 a une conductivité significativement supérieure à M1 et M2 à -0,6 kPa (Figure 10c). M4 a une conductivité hydraulique similaire à M2 à -0,05 kPa et à M3 à -0,2 kPa.

b/ En profondeur

Il n'y a pas de différence significative de perméabilité entre les trois autres modalités en profondeur (Figure 11). Les engrais verts n'ont pas affecté la perméabilité du sol en profondeur. La vitesse moyenne d'écoulement est de 1,118 mm/min à -0,05 kPa ; 0,145 mm/min -0,2 kPa ; 0,001 mm/min à -0,6 kPa.

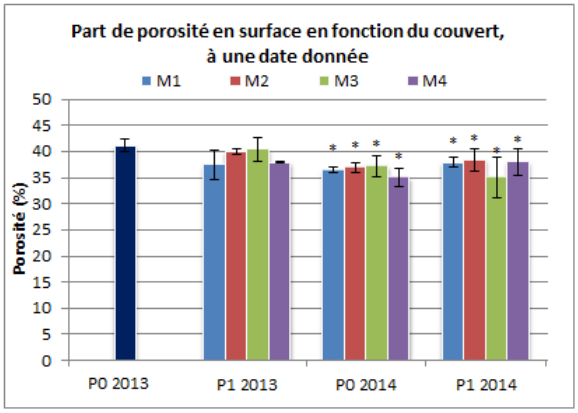


Figure 12 : Comparaison de la porosité totale du sol en surface entre modalités, selon la date de mesure

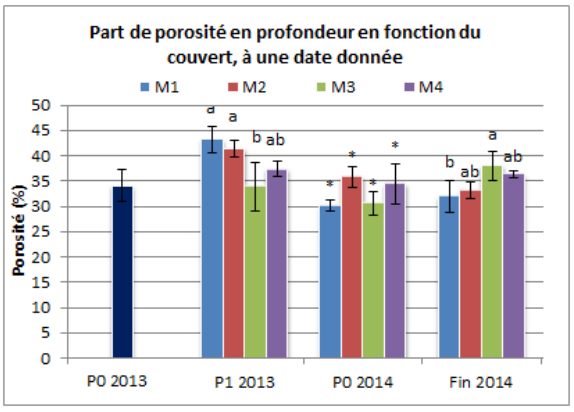


Figure 13: Comparaison de la porosité totale du sol en profondeur entre modalités, selon la date de mesure

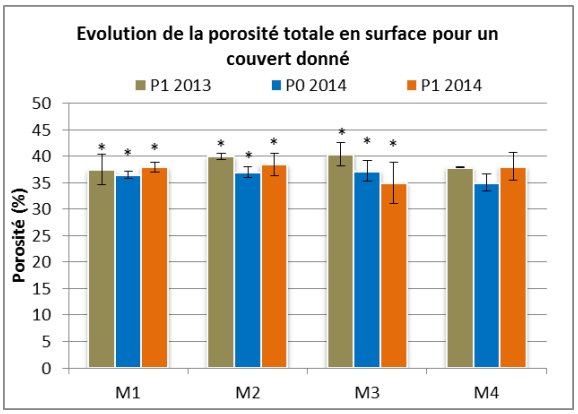


Figure 14 : Evolution de la porosité totale du sol en surface, selon le couvert implanté.

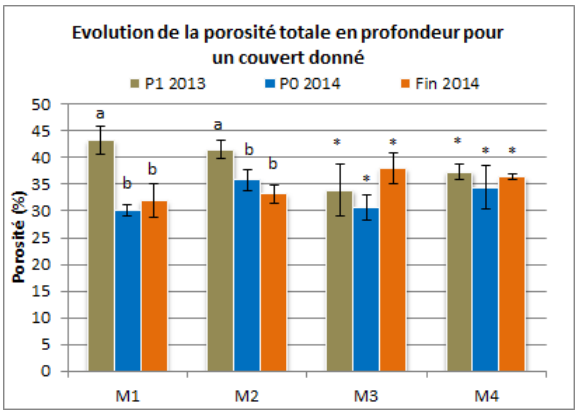


Figure 15 : Evolution de la porosité totale du sol en profondeur, selon le couvert implanté.

2. Impact des engrais verts sur la porosité du sol

Impact des engrais verts sur la porosité totale du sol

a/ En surface

A l'état initial, la porosité totale du sol en surface était de 41,25% (Tableau 11).
La porosité totale reste similaire au P0 2014 et au P1 2014 entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts (Figure 12).

Ainsi la porosité totale moyenne de la parcelle d'essais est de 36,42% au P0 2014 et de 37,34 % au P1 2014. La comparaison entre couverts au P1 2013 (date de récolte de la 1ère mâche après la 1ère interculture) n'a pas pu être étudiée par ANOVA.

La part de porosité dans le sol n'a pas évolué au cours du temps, ni pour le témoin (en moyenne 37,53% de porosité sur les deux années) ni pour les parcelles des modalités M1 (en moyenne 37,27% de porosité) et M2 (38,46% de porosité en moyenne) avec engrais verts (Figure 14).
L'évolution de la porosité pour M4 n'a pas pu être étudiée statistiquement par ANOVA ; la tendance est similaire aux autres parcelles avec des engrais verts.

➔ La culture d'engrais verts n'a pas agi sur la porosité du sol en surface par rapport à un sol laissé nu sur la même période.

b/ En profondeur

A l'état initial, la porosité totale du sol en profondeur était de 34,21% (Tableau 11).
Au P1 2013, la parcelle témoin M3 a une porosité plus faible (33,92% de porosité) que les parcelles avec engrais verts M1 et M2 (en moyenne 42,37% de porosité) (Figure 13).
La porosité pour M4 (37,38%) est similaire à celle des autres modalités (Figure 13).
Ainsi le sol du témoin en sol nu est plus tassé que le sol de M1 et M2 lors de la récolte de la première culture maraîchère après une interculture.

La porosité totale sur les parcelles est similaire au P0 2014, que des engrais verts ait été implanté ou non (en moyenne 32,74% de porosité).

Au P1 2014, la parcelle témoin M3 a une porosité plus élevée (38,04% de porosité) que la parcelle avec engrais verts M1 (31,94% de porosité) (Figure 13). Ainsi le sol du témoin en sol nu est moins tassé que le sol de M1 lors de la récolte de la première culture maraîchère après deux intercultures.
La porosité pour M2 et M4 (34,79%) est similaire à M1 et M3.

Pour M1 et M2, le sol est plus poreux au P1 2013 qu'aux dates suivantes (Figure 15).
Pour M1, la porosité au P1 2013 est de 43,24% contre en moyenne 31,00% aux dates suivantes.
Pour M2, la porosité totale passe de 41,49% au P1 2013 à 34,54% en moyenne aux dates suivantes.

La part de porosité dans le sol n'a pas évolué au cours du temps pour le témoin (en moyenne 34,18% de porosité sur les deux années) ni pour la parcelle de la modalité M4 (en moyenne 36,07% de porosité) (Figure 15).

➔ D'après nos résultats, deux mélanges d'engrais verts ont agi sur la porosité du sol en profondeur par rapport à un sol laissé nu sur la même période.
Les mélanges des modalités M1 et M2 ont provoqué une baisse de la porosité du sol au bout de deux intercultures estivales. Au contraire, la porosité est restée stable pour le témoin en sol nu durant l'été. La porosité est également restée stable sur deux ans pour le mélange de la modalité M4.

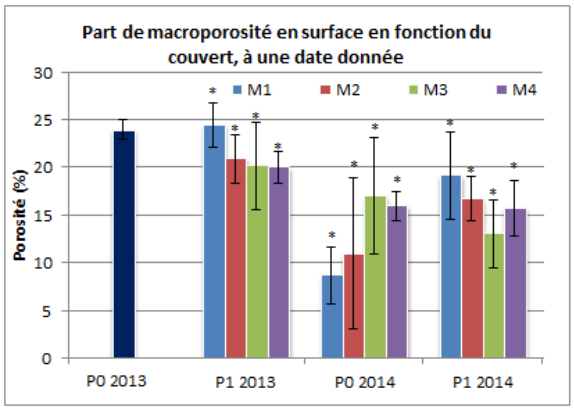


Figure 16 : Comparaison de la part de macroporosité du sol en surface entre modalités, selon la date de mesure

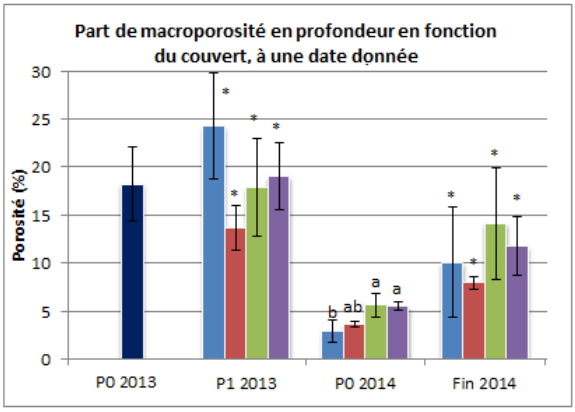


Figure 17 : Comparaison de la part de macroporosité du sol en profondeur entre modalités, selon la date de mesure

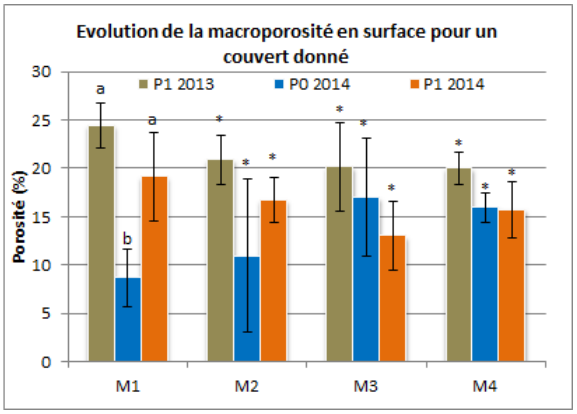


Figure 18 : Evolution de la part de macroporosité dans le sol en surface, selon le couvert implanté.

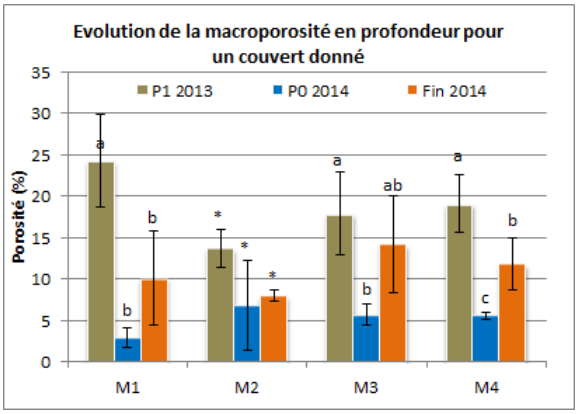


Figure 19 : Evolution de la part de macroporosité dans le sol en profondeur, selon le couvert implanté.

Tableau 11 : Impact de la date de mesure sur la macroporosité totale du sol en surface

Effet étudié		Macroporosité (%)
Date de mesure	P1 2013	21,374 a
	P0 2014	13,149 b
	P1 2014	16,163 b

Tableau 12 : Impact de la date de mesure sur la macroporosité totale du sol en profondeur

Effet étudié		Macroporosité (%)
Date de mesure	P1 2013	18,72 a
	P1 2014	10,99 b

Impact des engrais verts sur la part de macroporosité du sol

a/ En surface

A l'état initial, la part de macroporosité dans le sol en surface était de 24,00% (Figure 16).
Au cours des deux années de suivi, les parcelles avec engrais verts et la parcelle témoin ont toujours eu une part de macroporosité similaire (pas de différence significative) (Figure 16). Ainsi la part de macroporosité moyenne était de 21,37% au P1 2013, 13,15% au P0 2014 et 16,16% au P1 2014.
La part de macroporosité était significativement plus élevée au P1 2013 qu'aux dates suivantes (Tableau 11).

La part de macroporosité dans le sol n'a pas évolué au cours du temps pour le témoin (en moyenne 16,71% de macroporosité sur les deux années) ni pour les parcelles avec engrais verts des modalités M2 (en moyenne 16,20% de macroporosité) et M4 (en moyenne 17,24% de macroporosité) (Figure 18).
Pour la modalité M1, il y a une différence significative de macroporosité entre le P0 2014 et les autres dates de mesures. La macroporosité au P0 2014 représente 8,70% du sol, contre en moyenne 21,79% aux deux autres dates (Figure 18).

➔ La culture d'engrais verts n'a pas agi sur la macroporosité du sol en surface par rapport à un sol laissé nu sur la même période.

b/ En profondeur

A l'état initial, la part de macroporosité dans le sol en profondeur était de 18,24% (Figure 17).
La part de macroporosité est similaire entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts au P1 2013 (en moyenne 18,72% de macroporosité) et au P1 2014 (en moyenne 10,99% de macroporosité) (Figure 17).
Comme observé en surface, la part de macroporosité était significativement plus élevée au P1 2013 qu'au P1 2014 (Tableau 12).

Au P0 2014, les parcelles des modalités M3 et M4 ont une part de macroporosité plus importante (en moyenne 5,59% de macroporosité) que la parcelle de la M1 (3,64% de macropores). La part de macropores pour M2 est similaire à celle des autres modalités (Figure 17).

La part de macroporosité dans le sol est restée stable en cours du temps pour le sol de la modalité M2 (pas de différence significative, avec en moyenne 8,42% de macroporosité sur les deux années). On observe toutefois une tendance à une diminution de la part de macropores dans le sol (Figure 19).

La part de macroporosité a changé au cours du temps pour les modalités M1, M3 et M4 en profondeur (Figure 19).

- Pour la parcelle de M1, la part de macropores est plus élevée au P1 2013 (24,28% du sol) qu'aux dates de mesure suivantes (en moyenne 6,51% de macropores).
- Pour le témoin (modalité M3), la part de macropores diminue de façon significative entre le P1 2013 (17,87% de macropores) et le P0 2014 (5,65% de macroporosité). Au P1 2014, la part de macropores est similaire aux dates précédentes.
- Les mesures sur la modalité M4 indiquent une macroporosité significativement plus élevée au P1 2013 (19,06% de macroporosité) par rapport aux dates suivantes. Après avoir chuté entre le P1 2013 et le P0 2014, la part de macroporosité a augmenté entre le P0 2014 (5,53% de macroporosité) et le P1 2014 (11,78% de macropores).

➔ Au printemps 2014, la part de macroporosité est plus faible pour la parcelle de la modalité M1. Elle est plus élevée pour le témoin resté en sol nu et pour un autre engrais vert (modalité M4).
Aux autres dates, la culture d'engrais verts n'a pas montré d'impact sur la macroporosité du sol en profondeur par rapport à un sol laissé nu sur la même période.

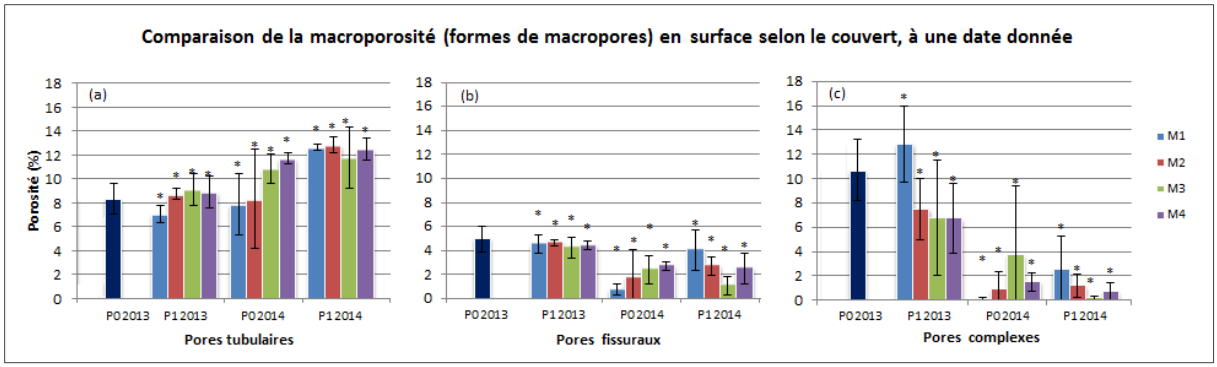


Figure 20 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores tubulaires (a), fissuraux (b) et complexes (c) en surface

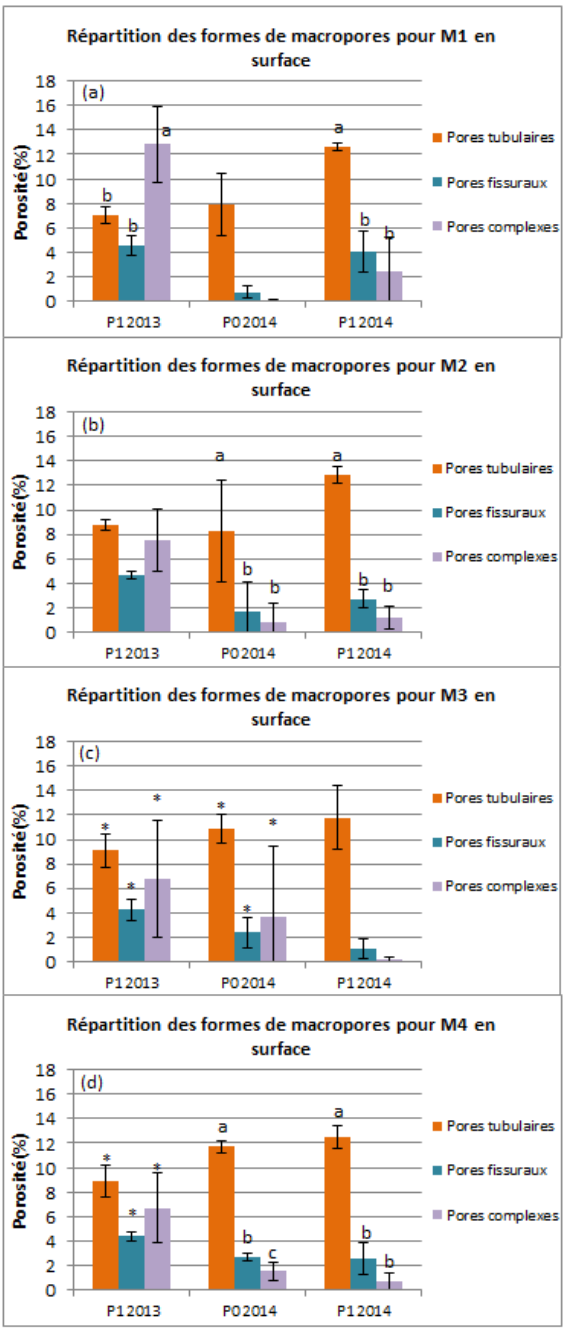


Figure 21: Impact du couvert sur la répartition des formes de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

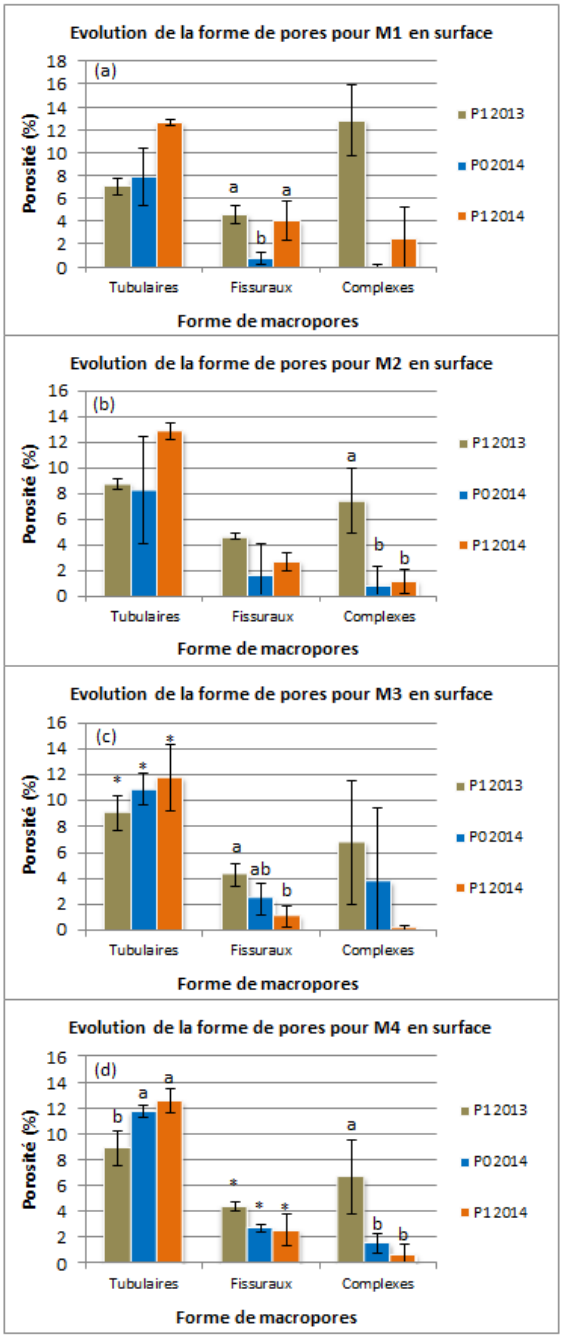


Figure 22 : Impact du couvert sur l'évolution des formes de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

Impact des engrais verts sur la forme des pores au sein de la macroporosité du sol

a/ En surface

A l'état initial, la part de pores tubulaires dans le sol en surface était de 8,34% ; la part de pores fissuraux et complexes était respectivement de 4,97% et 10,69% (Tableau 11).
A une date donnée, il y a autant de pores tubulaires, fissuraux et complexes (pas de différence significative) entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts (Figure 20).

La répartition des macropores n'est pas pour autant similaire entre couverts à une date donnée.
Ainsi au P1 2013, toutes les formes de pores sont présentes en même quantité pour M3 et M4 ; en revanche les pores complexes prédominent pour M1 (Figure 21a).
Au P0 2014, toutes les formes de pores prédominent pour le témoin (Figure 21c). Pour M2 et M4 ce sont les pores tubulaires qui prédominent (Figures 21b et 21d).
Au P1 2014, la répartition des macropores est similaire entre les modalités avec engrais verts (les pores tubulaires prédominent).

Au cours des deux années, la part de pores tubulaires reste stable pour le témoin alors que la part de pores fissuraux diminue (Figure 22c).
La part de pores tubulaires augmente pour M4 au détriment des pores complexes dont la part diminue (Figure 22d). La part de pores complexes diminue également pour M2 (Figure 22b).

➔ La culture d'engrais verts n'a pas montré d'impact sur la forme des macropores du sol en surface, par rapport à un sol laissé nu sur la même période.
La répartition des formes de macropores reste similaire au cours du temps, avec ou sans culture d'engrais verts : les pores tubulaires prédominent.
Sur les deux années de l'essai, les évolutions sont similaires avec ou sans engrais verts : la part de pores tubulaires a tendance à augmenter, celle des pores fissuraux et complexes tend à diminuer.

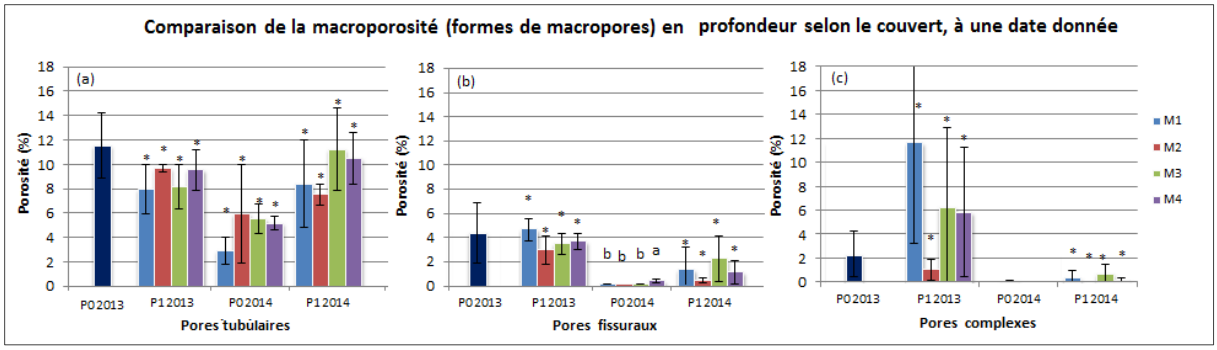


Figure 23 : Impact du couvert à date donnée sur la part de pores tubulaires (a), fissuraux (b) et complexes (c) en profondeur

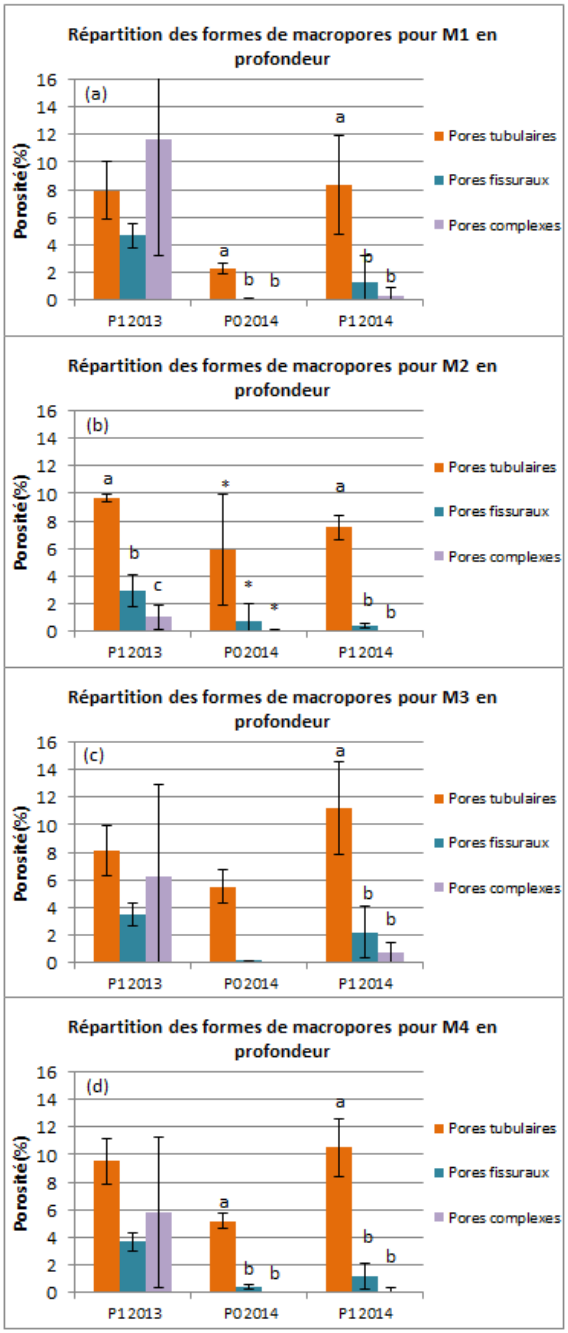


Figure 24 : Impact du couvert sur la répartition des formes de macropores en profondeur : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

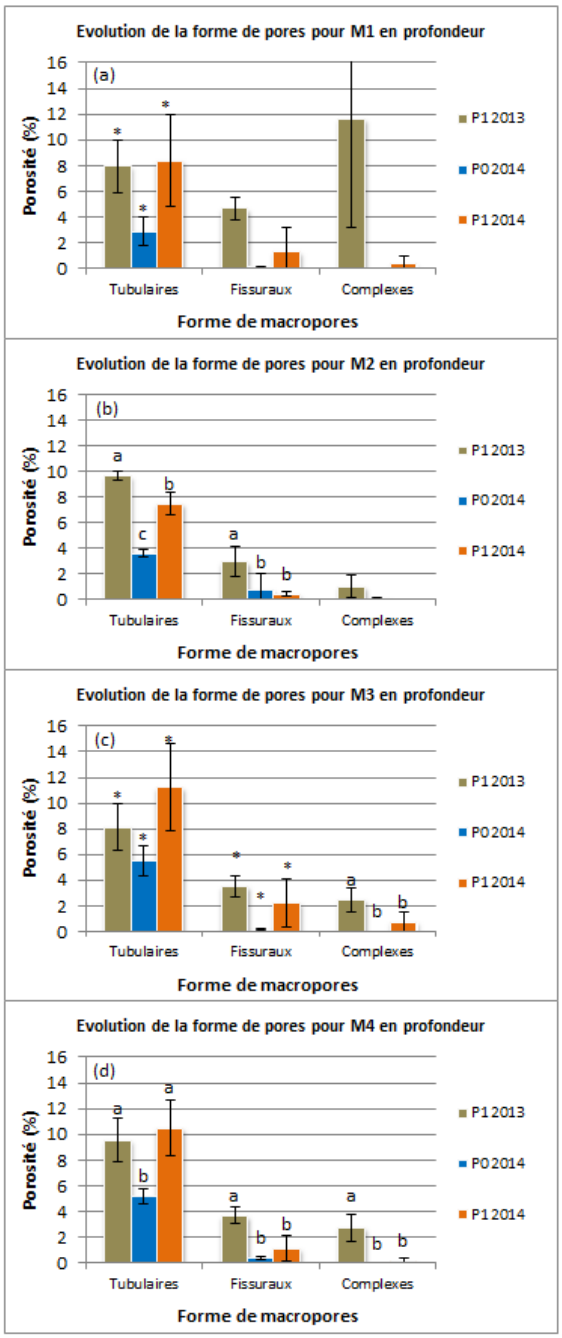


Figure 25 : Impact du couvert sur l'évolution des formes de macropores en profondeur: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

b/ En profondeur

A l'état initial, la part de pores tubulaires dans le sol en profondeur était de 11,52% ; la part de pores fissuraux et complexes était respectivement de 4,39% et 2,33% (Tableau 11).
A une date donnée, il y a autant de pores tubulaires (pas de différence significative) entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts (Figure 23a).
La part de pores fissuraux est similaire entre modalités au P1 2013 et au P1 2014 ; au P0 2014 nous avons plus de pores fissuraux sur la M4 (0,38%) que sur les autres modalités (en moyenne 0,09%) (Figure 23b).
La part de pores complexes est similaire entre modalités au P1 2013 et au P1 2014 (Figure 23c) ; au P0 2014 les moyennes n'ont pas pu être comparées (postulats de l'ANOVA non respectés).

Au P1 2013, les pores tubulaires prédominent au sein de la macroporosité pour M2, suivis des pores fissuraux et des pores complexes (Figure 24b). La répartition des formes de macropores n'a pas pu être étudiée statistiquement pour les autres modalités. On retrouve des distributions similaires à celles en surface, où les pores tubulaires prédominent (sauf pour M1).

Au P0 2014, la répartition des macropores est similaire entre la M1 et la M4 : les pores tubulaires prédominent au sein de la macroporosité (Figures 24a et 24d).
Les différentes formes de macropores sont présentes dans les mêmes proportions pour la modalité M2 (pas de différence significative, mais la tendance est à la prédominance des pores tubulaires – Figure 24b).
Les moyennes au P0 2014 n'ont pas pu être comparées statistiquement pour le témoin, mais la tendance est à la prédominance des pores tubulaires (Figure 24c).

Au P1 2014, la répartition des macropores est similaire entre les modalités avec engrais verts et le témoin : comme observé en surface, les pores tubulaires prédominent (Figure 24).

La part de pores tubulaires reste stable sur les deux années pour M1 et le témoin M3 (Figure 25a et 25c).
Elle diminue puis augmente (sans atteindre le niveau du P1 2013) pour M2 (Figure 25b).
Elle diminue entre P1 2013 et P0 2014, puis revient à son niveau initial au P1 2014 pour M4 (Figure 25d).
La part de pores fissuraux est stable sur les deux années pour le témoin (Figure 25c). Elle est significativement plus élevée au P1 2013 par rapport aux dates suivantes pour M2 et M4 (Figures 25b et 25d). L'évolution n'est pas étudiée statistiquement pour M1.
La part de pores complexes est significativement plus élevée au P1 2013 par rapport aux dates suivantes pour le témoin M3 et M4 (Figure 25c et 25d). L'évolution n'est pas étudiée statistiquement pour M1 et M2.

➔ La culture d'engrais verts n'a pas montré d'impact sur la forme des macropores du sol en profondeur, par rapport à un sol laissé nu sur la même période. La seule différence constatée entre couverts a lieu au P0 2014 : il y a davantage de pores fissuraux dans le sol de la modalité M4 que dans les autres modalités.
La répartition des formes de macropores reste similaire au cours du temps, avec ou sans culture d'engrais verts : les pores tubulaires prédominent.
Sur les deux années de l'essai, les évolutions sont similaires avec ou sans engrais verts : la part de pores tubulaires a tendance à rester stable, celle des pores fissuraux et complexes tend à diminuer.

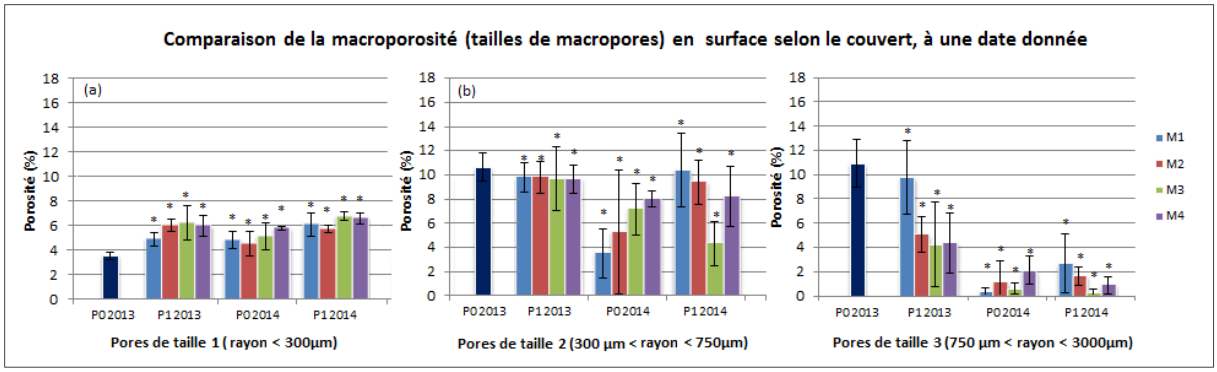


Figure 26 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores de taille 1 (a), taille 2 (b) et taille 3 (c) en surface

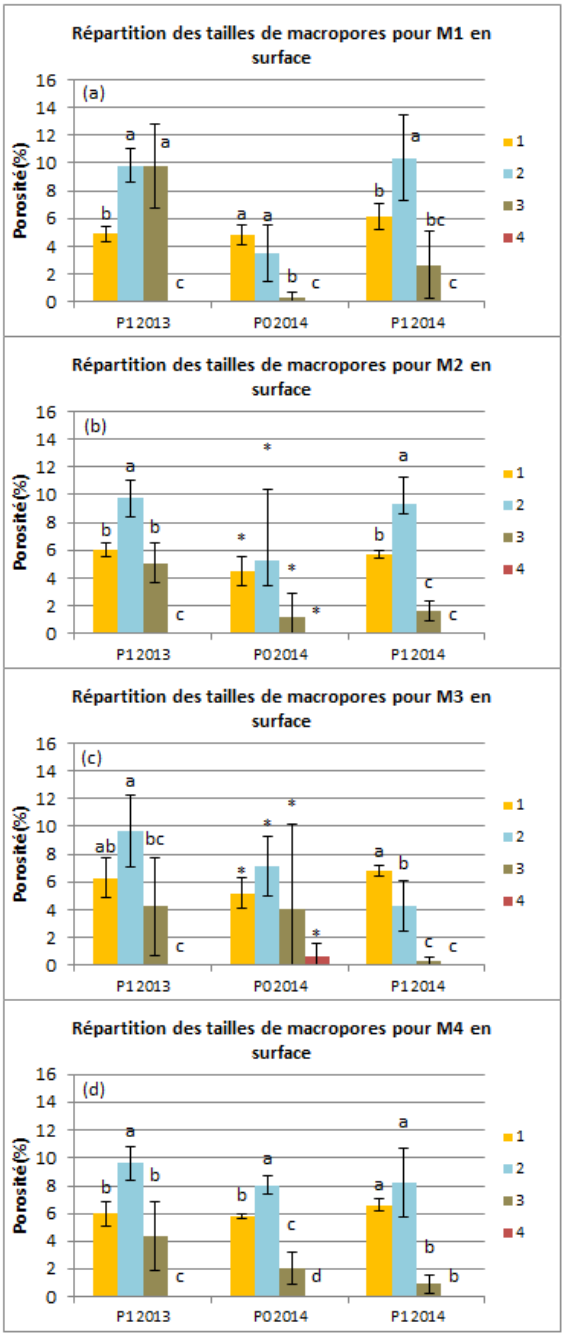


Figure 27 : Impact du couvert sur la répartition des tailles de macropores en surface : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

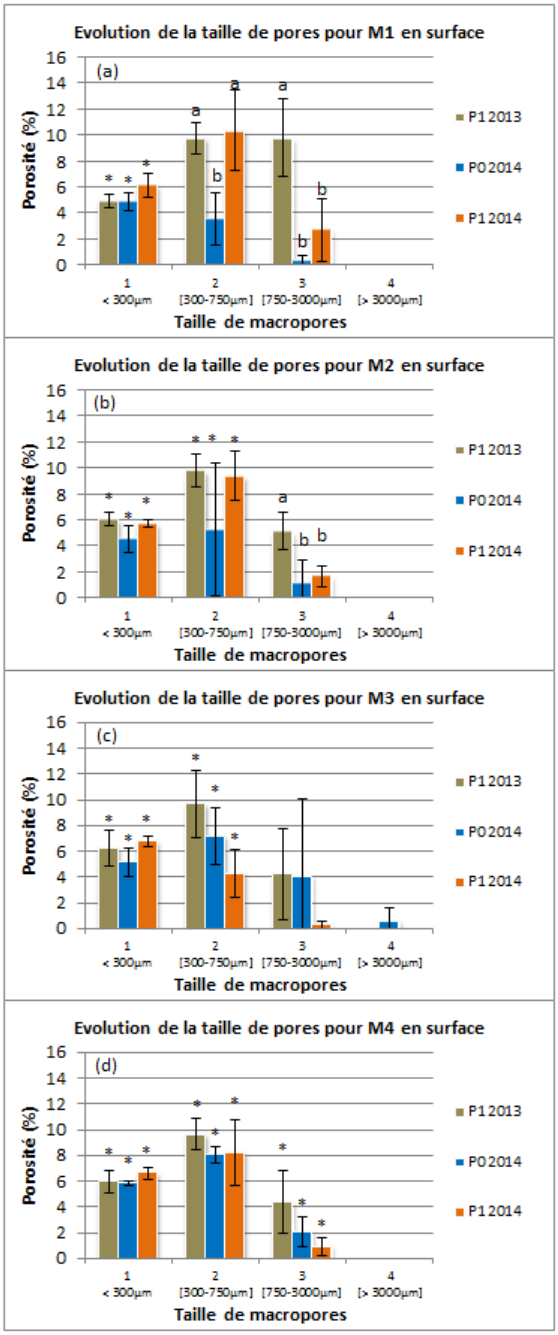


Figure 28 : Impact du couvert sur l'évolution des tailles de macropores en surface: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

Impact des engrais verts sur la taille des pores au sein de la macroporosité du sol

a/ En surface

A l'état initial, la part de pores de taille 1 dans le sol en surface était de 3,55% ; la part de pores de taille 2, 3 et 4 était respectivement de 10,62%, 10,93% et 0,00% (Tableau 11).
A une date donnée, la part de pores de taille 1, 2, 3 et 4 est similaire (pas de différence significative) entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts (Figure 26).

Au P1 2013, les pores de taille 2 sont prédominants dans la macroporosité pour M2, M3 et M4 (Figure 27). En termes d'importance, ils sont suivis par les pores de taille 1 et 3 pour M2 et M4.
Les pores de taille 2 codominent avec les pores de taille 3 pour M1, suivis des pores de taille 1. Les pores de taille 4 sont minoritaires pour toutes les modalités.

Au P0 2014, toutes les tailles de pores sont présentes dans les mêmes proportions pour M2 et le témoin M3 (pas de différence significative) (Figures 27b et 27c).
Les pores de taille 2 restent prédominants pour M4, suivis des pores de taille 1 puis de taille 3 et enfin de taille 4 (Figure 27d).
Les pores de taille 2 codominent avec les pores de taille 1 pour M1, suivis des pores de taille 3 puis de taille 4 (Figure 27a).

Au P1 2014, les pores de taille 2 sont prédominants dans la macroporosité pour M1 et M2 (Figure 27a et 27b). Ils sont suivis des pores de taille 1. Les pores de taille 3 et 4 sont minoritaires.
Pour le témoin M3, les pores de taille 1 sont majoritaires, suivis des pores de taille 2, puis 3 et 4 (Figure 27c).
Pour M4, les pores de taille 1 et 2 codominent. Les pores de taille 3 et 4 sont minoritaires (Figure 27d).

La part des plus petits pores de taille 1 reste stable sur les deux années suivi, pour toutes les modalités (Figure 28).
La part de pores de taille 2 reste stable sur les deux années de suivi pour les modalités M2, M3 et M4. Pour M1, la part de pores de taille 2 est similaire au P1 2013 et P1 2014 (en moyenne 10,07% de pores de taille 2); elle est statistiquement plus faible au P0 2014 (3,50% de pores de taille 2) (Figure 28a).
La part de pores de taille 3 est stable sur les deux années pour le témoin. Il y a davantage de pores de taille 3 au P1 2013 (différence significative) par rapport aux dates de mesure suivantes pour M1 et M2 (Figures 28 a et 28b).
Les pores de taille 4 sont quasiment absents du sol, peu importe la date de mesure, et pour toutes les modalités (Figure 28). On trouve quelques pores de taille 4 dans le sol de la parcelle témoin au P0 2014 (0,59% de pores de taille 4).

➔ La culture d'engrais verts n'a pas montré d'impact sur la taille des macropores du sol en surface, par rapport à un sol laissé nu sur la même période.
La répartition des tailles de macropores reste similaire au cours du temps, avec ou sans culture d'engrais verts : les plus petits pores (taille 1 et 2) prédominent.
Sur les deux années de l'essai, les évolutions sont similaires avec ou sans engrais verts : la part de petits pores de tailles 1 et 2 a tendance à rester stable, celle des pores de taille 3 tend à diminuer. Les plus gros pores de taille 4 sont quasiment absents du sol.

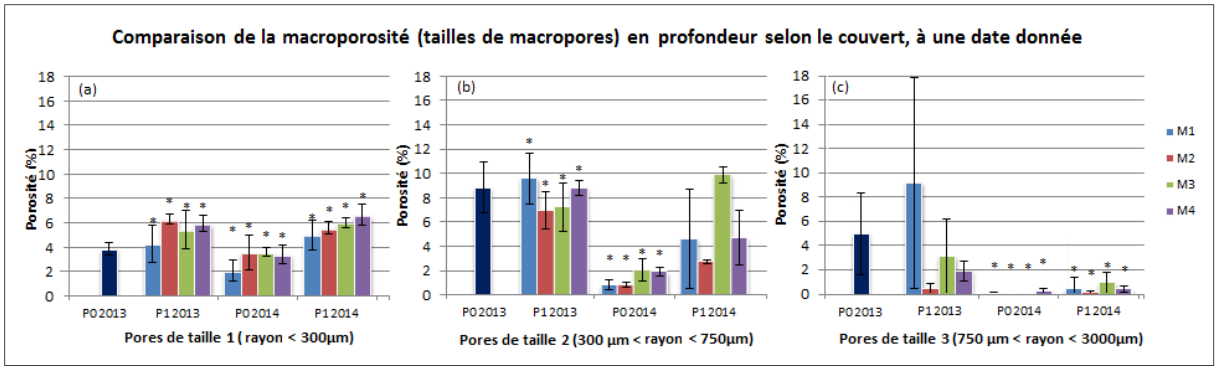


Figure 29 : Impact du couvert à une date donnée sur la part de pores de taille 1 (a), taille 2 (b) et taille 3 (c) en profondeur

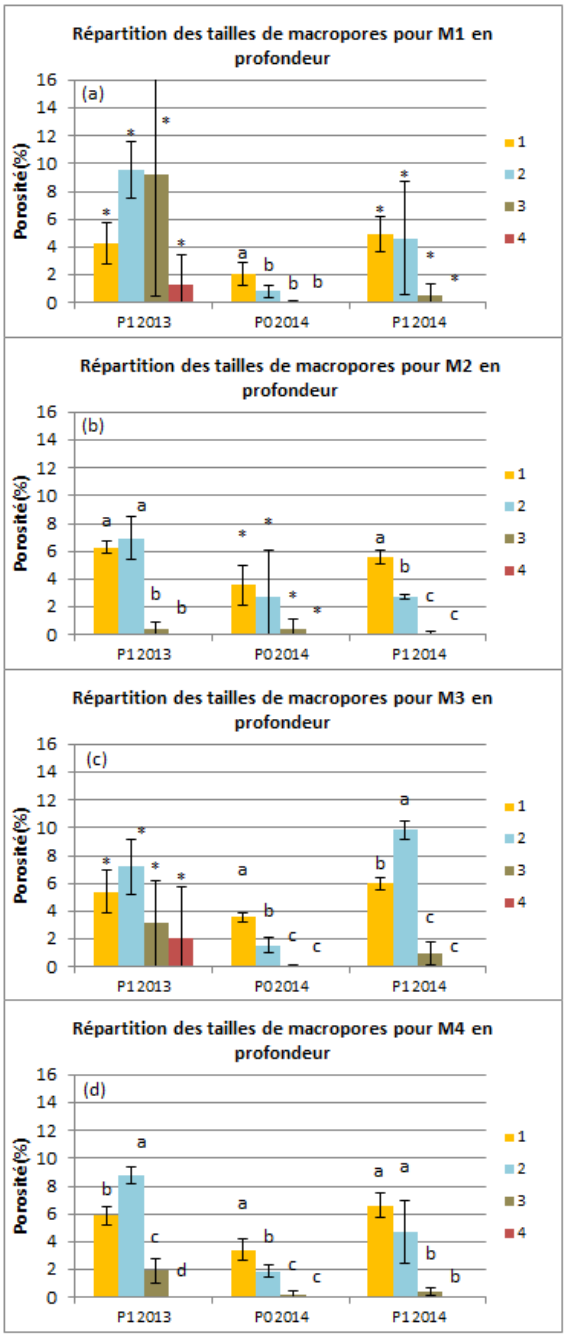


Figure 30 : Impact du couvert sur la répartition des tailles de macropores en profondeur : impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

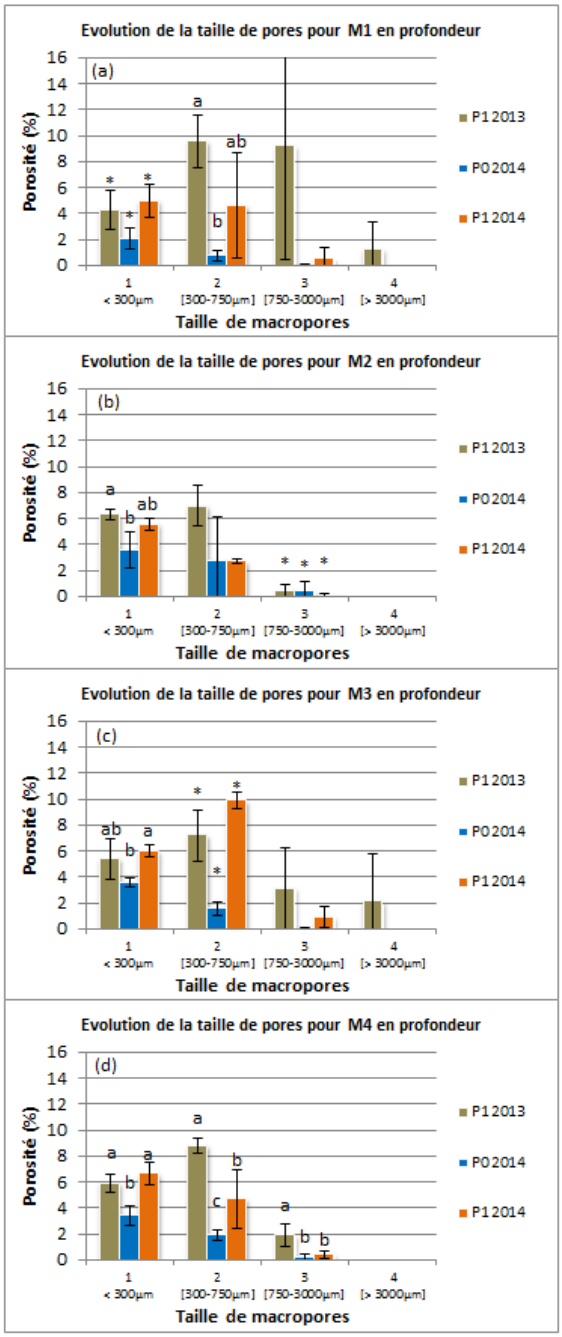


Figure 31 : Impact du couvert sur l'évolution des tailles de macropores en profondeur: impact de M1 (a), M2 (b), M3 (c) et M4 (d)

b/ En profondeur

A l'état initial, la part de pores de taille 1 dans le sol en profondeur était de 3,87% ; la part de pores de taille 2, 3 et 4 était respectivement de 8,86%, 4,98% et 0,54% (Tableau 11).
A une date donnée, la part de pores de taille 1, 2, 3 et 4 est similaire (pas de différence significative) entre le témoin en sol nu et les parcelles cultivées avec des engrais verts (Figure 29).
Les moyennes au P1 2014 pour les pores de taille 2 ainsi que les moyennes au P1 2013 pour les pores de taille 3 n'ont pas pu être comparées (postulats de l'ANOVA non respectés).

Au P1 2013, les pores de taille 2 sont prédominants pour M4 ; ils sont suivis des pores de taille 1, puis 3, puis 4 (Figure 30d).
Les pores de taille 2 codominent avec les pores de taille 1 pour M2. Les pores de taille 3 et 4 sont minoritaires (Figure 30b).
Toutes les tailles de pores sont présentes dans les mêmes proportions (pas de différence significative) pour M1 et M3 (Figure 30a et 30c).

Au P0 2014, toutes les tailles de pores sont présentes dans les mêmes proportions (pas de différence significative) pour M2 (Figure 30b).
Les pores de taille 1 sont prédominants pour toutes les autres modalités (M1, M3, M4). Ils sont suivis par les pores de taille 2 puis de taille 3 et 4 pour M3 et M4 (Figures 31c et 31d). Les autres pores de tailles 2, 3 et 4 sont présents dans les mêmes proportions pour M1 (Figure 30a).

Au P1 2014, toutes les tailles de pores sont de nouveau présentes dans les mêmes proportions (pas de différence significative) pour M1 (Figure 30a).
Les pores de taille 2 prédominent pour le témoin M3, suivis des pores de taille 1 (Figure 30c).
Les pores de taille 1 prédominent pour M2, suivis des pores de taille 2 (Figure 30b).
Les pores de taille 1 et 2 codominent pour M4 (Figure 30d).
Les pores de taille 3 et 4 sont minoritaires pour M2, M3 et M4.

La part des plus petits pores de taille 1 reste stable sur les deux années suivi, pour la modalité M1 (Figure 31a).
Leur part diminue puis revient au niveau initial pour M2 et M4 (Figures 31b et 31d).
La proportion de pores de taille 1 est plus élevée au P1 2014 qu'au P0 2014 pour M3 (Figure 31c).

La part de pores de taille 2 est stable sur deux ans pour le témoin M3. Elle diminue entre le P1 2013 et le P0 2014 pour M1, puis atteint un niveau intermédiaire au P1 2014. Pour la modalité M4, la part de pores de taille 2 diminue entre P1 2013 et P0 2014 puis augmente entre P0 2014 et P1 2014 (Figure 31d).

La part de pores de taille 3 n'évolue pas pour M2 au cours des deux années. Elle diminue entre P1 2013 et les dates suivantes pour M4.

Les plus gros pores de taille 4 sont quasiment absents du sol.

➔ La culture d'engrais verts n'a pas montré d'impact sur la taille des macropores du sol en profondeur, par rapport à un sol laissé nu sur la même période.
La répartition des tailles de macropores reste similaire au cours du temps, avec ou sans culture d'engrais verts : les plus petits pores (taille 1 et 2) prédominent.
Sur les deux années de l'essai, les évolutions sont similaires avec ou sans engrais verts : la part de petits pores de tailles 1 et 2 a tendance à rester stable, celle des pores de taille 3 tend à diminuer. Les plus gros pores de taille 4 sont quasiment absents du sol.

Tableau 13 : Évolution du coefficient de fixation du sol, en surface et profondeur, selon le couvert implanté

	2013 (Etat initial)	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015
Surface	*0,3*	0,3	0,3	0,3	0,3
Profondeur	*0,4*	0,4	0,4	0,4	0,5

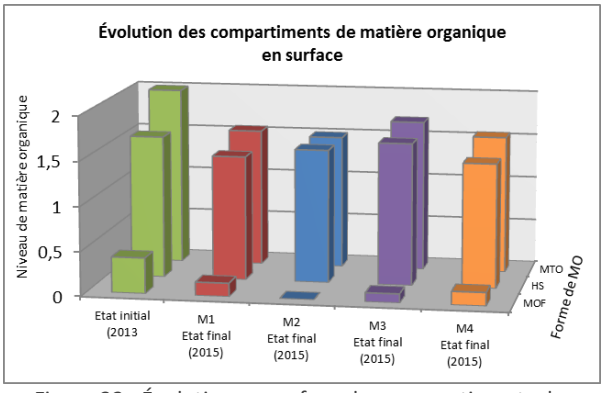


Figure 32 : Évolution en surface des compartiments de matières organiques, selon le couvert implanté

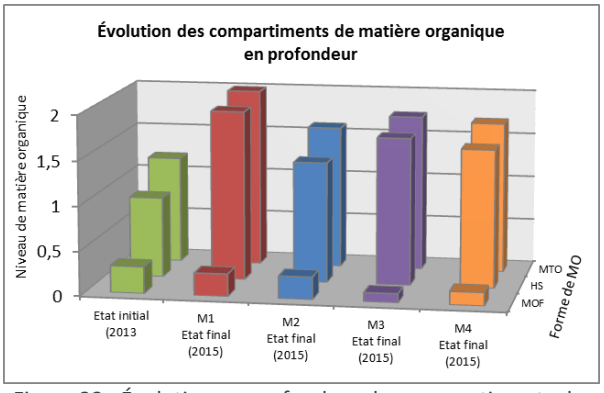


Figure 33 : Évolution en profondeur des compartiments de matières organiques, selon le couvert implanté

Tableau 14 : Évolution des matières organiques d'accumulation, en surface et profondeur, selon le couvert implanté

	3ème fraction (3F)					Matière organique brute inactive (Ni-Ni)				
	2013 (Etat initial)	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015	*2013 (Etat initial)*	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015
Surface	*1,05*	0,8	0,75	0,9	0,75	*510*	290	270	300	315
Prof.	*0,45*	0,6	0,35	0,45	0,5	*130*	115	100	100	135

Tableau 15 : Évolution des formes de fer, en surface et profondeur, selon le couvert implanté

	Fer de liaison					Fer amorphe				
	2013 (Etat initial)	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015	*2013 (Etat initial)*	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015
Surface	*40*	60	30	30	40	*40*	50	50	50	50
Prof.	*50*	60	60	75	60	*50*	60	60	75	75

Tableau 16 : Évolution des bases alcalino-terreuse (Mg et Ca), en surface et profondeur, selon le couvert implanté

	Carbo					Mg/AT (%)				
	2013 (Etat initial)	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015	*2013 (Etat initial)*	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015
Surface	*3*	3	3	3	3	*26*	22	26	22	10
Prof.	*3*	3	3	3	3	*28*	26	25	22	27

Tableau 17 : Évolution de la fertilité (P, K, Mg) et de la toxicité (Al) du sol, en surface et profondeur, selon le couvert implanté

		2013 (Etat initial)	M1 2015	M2 2015	M3 2015	M4 2015
Surface	P	*5*	5	5	5	5
	K	*5*	4	4	4	5
	Mg	*5*	4	4	4	3
	Al	*0*	0	0	0	0
Profondeur	P	*5*	5	5	4	5
	K	*4*	5	4	5	5
	Mg	*5*	4	4	4	4
	Al	*0*	0	0	0	0

3. Évaluation de l'impact des engrais verts par la méthode Hérody

La capacité de fixation du sol

De par sa texture sableuse, la capacité de fixation du sol était faible à l'état initial et demeure basse, que l'on implante ou non une culture d'engrais vert (Tableau 13). Les apports de matière organique doivent ainsi être fractionnés, le sol n'étant pas capable de stocker de grands apports vu son faible réservoir.

Les compartiments de matière organique

Le niveau de MTO (matière organique totale) semble diminuer en surface et augmenter en profondeur (Figures 32 et 33) entre l'état initial et l'état final.
La hausse en profondeur s'explique par l'augmentation du niveau d'humus stable (HS) pour le témoin et les modalités avec engrais verts. En surface, le niveau d'humus stable reste constant ; le taux de matières organiques fugitives (MOF) en baisse explique la diminution globale du niveau de MTO.
La part de MOF au sein de la MTO était correcte à l'état initial (22% de MOF en surface ; 25% en profondeur). En surface comme en profondeur, on observe une diminution de la part de MOF au bout de deux années, atteignant un niveau insuffisant pour une bonne activité biologique pour toutes les modalités. Ainsi la part de MOF est comprise entre 0 et 10% en surface (Figure 32), et entre 6 et 15% en profondeur (Figure 33). En profondeur, la diminution du pourcentage de MOF est moins nette pour les modalités avec engrais verts par rapport à la M3 'Sol nu'. En revanche, en surface le pourcentage de MOF à l'état final est nul pour la M2 (alors que les engrais verts sont des précurseurs de MOF).

L'état initial du sol présente des niveaux élevés initiaux de matière organique d'accumulation (3ème fraction 3F et matière organique brute Ni-Ni, ni humifiée ni minéralisée). Les niveaux de 3F restent élevés au bout de deux années ; en revanche les niveaux de Ni-Ni ont considérablement baissé en surface, avec ou sans engrais vert (Tableau 14).

Il n'y a pas de différence nette d'évolution de la matière organique du sol entre le sol nu et les modalités avec engrais verts.

Les minéraux

Les niveaux de fer de liaison et de fer amorphe étaient corrects en 2013 et évoluent peu, avec ou sans apport d'engrais verts (Tableau 15). De même, la fertilité, déjà bonne à l'état initial, ne présente pas de différence après deux cultures d'engrais verts. Le sol reste bien pourvu en éléments minéraux (potassium, phosphore, magnésium), avec ou sans culture d'engrais verts (Tableau 17).

On ne retrouve pas de trace d'aluminium dans le sol, que ce soit à l'état initial, avec ou sans culture d'engrais verts (Tableau 18). Il n'y a ainsi pas de risque d'intoxication des cultures par l'aluminium.

Le sol étudié est riche en alcalino-terreux, avec en moyenne 25% de magnésie (le niveau conseillé est compris entre 10 et 12%). On constate peu d'évolutions au bout de deux années, avec ou sans engrais verts. Seule la M4 (mélange sorgho-phacélie) semble présenter un appauvrissement de magnésie en surface (Tableau 16).

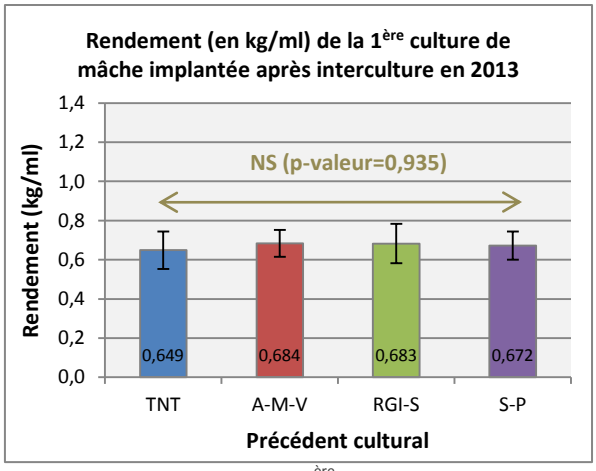


Figure 34 : Rendement de la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013. Moyenne de 9 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

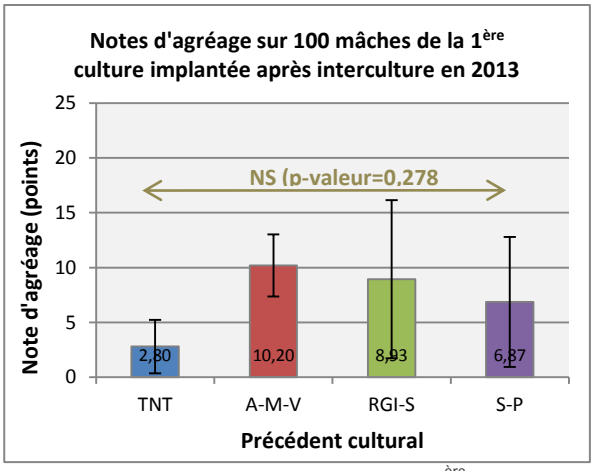


Figure 35 : Note d'agréage attribuée à la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013. Moyenne de 3 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

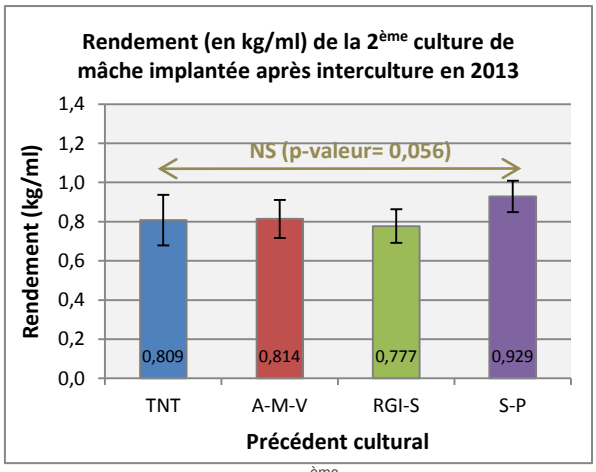


Figure 36 : Rendement de la 2ème culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013. Moyenne de 9 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

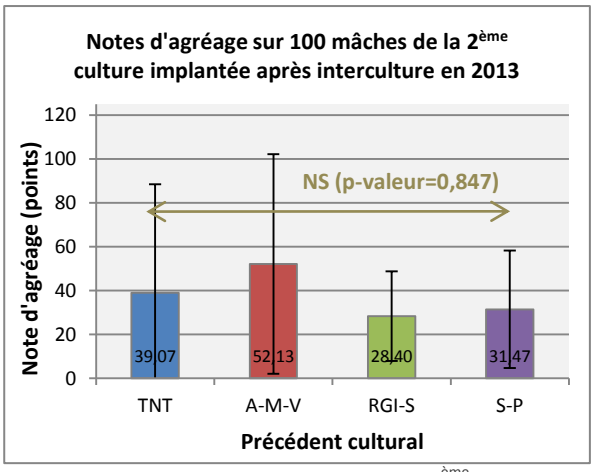


Figure 37 : Note d'agréage attribuée à la 2ème culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2013. Moyenne de 3 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

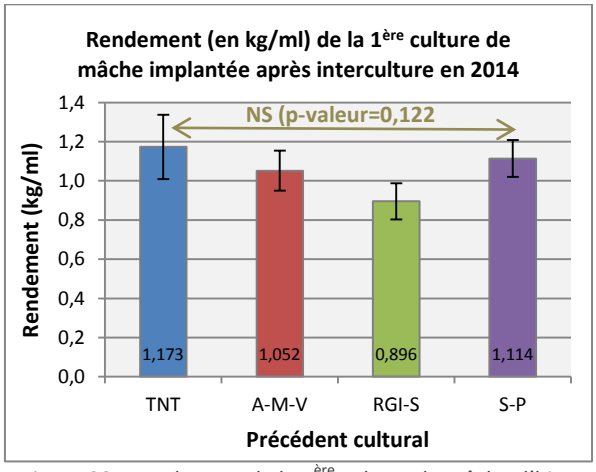


Figure 38 : Rendement de la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2014. Moyenne de 9 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

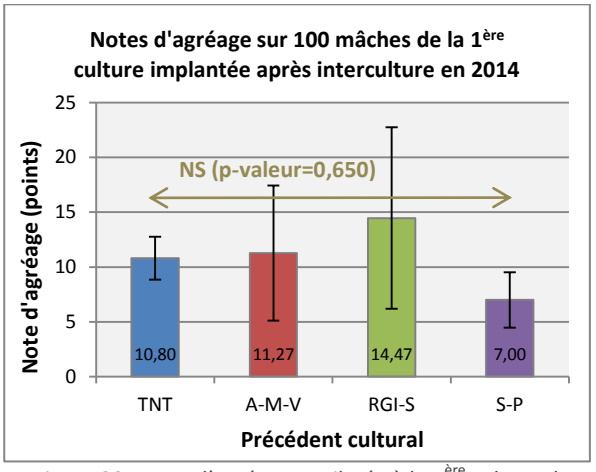


Figure 39 : Note d'agréage attribuée à la 1ère culture de mâche d'hiver suivant le précédent cultural implanté l'été 2014. Moyenne de 3 répétitions sur 3 blocs. Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types.

Chapitre III. Impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes

L'impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes a été suivi deux années consécutives (2013 et 2014) sur la parcelle du PROD1. Trois engrais verts avaient été implantés au même emplacement chaque année : avoine-millet-vesce (A-M-V), sorgho-phacélie (S-P), et raygrass italien-sarrasin (RGI-S). Leur impact est étudié en comparaison avec un sol témoin laissé nu en été (TNT). L'impact d'engrais verts sur les cultures maraîchères pourra être étudié chez le PROD4 ; d'autres résultats pourront ainsi compléter ceux-ci avant la fin du projet.

1. Impact sur le rendement

Les deux années d'observation n'ont pas permis d'observer de différence significative entre les modalités pour ce qui est du rendement de la mâche suivant la période d'interculture.
En 2013, le rendement moyen de la première mâche d'hiver était de 0,672 kg/ml (3,36 T/ha) (Figure 34) ; la deuxième mâche d'hiver de 2013 avait un rendement moyen de 0,832 kg/ml (4,16 T/ha) (Figure 36). En 2014 le rendement moyen de la première mâche d'hiver (précédée de deux cultures de radis) était de 1073 g/ml (5,37 T/ha) (Figure 38).
La culture d'engrais vert n'a ni pénalisé, ni amélioré le rendement de la récolte par rapport à une parcelle restée en sol nu sur la période estivale.

2. Impact sur la qualité de la récolte et l'état sanitaire

Sur les deux années d'observation nous n'avons pas observé de différence significative entre les modalités en matière de qualité. La pression sanitaire était faible sur la parcelle d'essai, la mise en place d'engrais verts n'a ainsi pas permis d'observer d'effet sanitaire sur les cultures maraîchères.

On constate ainsi une bonne qualité globale de la mâche récoltée : 7,2 points en moyenne pour la 1ère mâche d'hiver de 2013 (Figure 35), expliqués essentiellement par des symptômes de bactérie et d'autres dégâts (Tableau 18). La 1ère mâche d'hiver de 2014 a obtenu une note moyenne d'agréage de 10,4 points (Figure 39), avec uniquement des dégâts dus au jaunissement des feuilles.

La deuxième mâche de 2013 est de moindre qualité par rapport aux deux autres récoltes, avec ou sans précédent engrais verts. Elle obtient une moyenne de 28,8 points à l'agréage (Figure 37); les dégâts observés sont majoritairement des symptômes de bactérie (Tableau 19).

Tableau 18 : Provenance des dégâts constatés lors de l'agréage de lots de 100 mâches de la première récolte de 2013, selon l'interculture implantée en amont. Moyenne de 3 répétitions sur 3 blocs

	Mâches saines	*T. basicola*	*P. valerianellae*	Bactérie	Autres dégâts*
TNT	97%	0%	0%	2%	1%
A-M-V	87%	1%	0%	4%	11%
RGI-S	91%	0%	1%	3%	5%
S-P	93%	1%	0%	2%	5%

* Dégâts de ravageurs aériens (piqûre d'insecte, dégâts de chenilles) ou d'origine physiologique (jaunissement de feuille)

Tableau 19 : Provenance des dégâts constatés lors de l'agréage de lots de 100 mâches de la deuxième récolte de 2013, selon l'interculture implantée en amont. Moyenne de 3 répétitions sur 3 blocs

	Mâches saines	*T. basicola*	*P. valerianellae*	Bactérie	Autres dégâts*
TNT	79%	0%	0%	19%	2%
A-M-V	73%	0%	0%	26%	1%
RGI-S	84%	0%	0%	14%	2%
S-P	81%	0%	0%	15%	4%

* Dégâts de ravageurs aériens (piqûre d'insecte, dégâts de chenilles) ou d'origine physiologique (jaunissement de feuille)

DISCUSSION GÉNÉRALE

Chapitre I. L'acquisition de références locales sur les engrais verts

1. La production de biomasse (matière verte et matière sèche) par les engrais verts

Les rendements obtenus à l'issue du projet sont variables entres mélanges et parfois entre années pour un même mélange.

Une comparaison n'est possible qu'entre engrais verts issus d'un même essai sur une exploitation. Les résultats sont présentés en Annexe 7. Deux essais (PROD2 en 2013 et PROD4 en 2015) ont permis d'identifier un mélange avec un rendement supérieur aux autres (moha-vesce pour l'un, millet-trèfle d'Alexandrie pour l'autre). Il s'agit à chaque fois de mélanges associant une légumineuse à une graminée estivale (très productive et résistante à la chaleur (Pousset, 2011 ; [4]) donc idéale pour notre créneau d'interculture.

En dehors d'un même essai, les rendements sont difficilement comparables entre eux afin de savoir quels mélanges ont le meilleur rendement.
En effet, les essais ont lieu en condition de production et ce sont les exploitations qui gèrent la conduite de la culture. Ainsi l'arrosage et la fertilisation varient d'une exploitation à l'autre, de même que les caractéristiques de la parcelle.
De plus, le suivi du rendement a eu lieu sur 3 années : tous les mélanges n'ont pas été suivis dans les mêmes conditions climatiques. Ceci peut expliquer les différences de rendement entre deux années pour les trois mélanges évalués chez le PROD1 (meilleurs rendements en 2013 qu'en 2014) ainsi que les deux mélanges évalués chez PROD2 (meilleurs rendements en 2014 qu'en 2013). Pour le PROD2, la différence de rendement d'une année à l'autre s'explique également par les doses de semis revues à la hausse en deuxième année.
Lors de la pesée des engrais verts récoltés, nous avons pris en compte la partie aérienne et racinaire des espèces. Or pour certaines espèces (notamment le seigle ou l'avoine) une large partie du système racinaire, très fin et fasciculé, a été laissée dans le sol. Il est difficile d'estimer la part de racines laissées dans le sol selon Pousset (2011) ; les proportions proposées varient énormément selon les chercheurs. Pour donner un ordre de grandeur, il estime que la partie racinaire d'une graminée d'hiver annuelle (il n'aborde pas les engrais verts d'été) représente 1,5 t/ha de matière sèche. Pour Jobin et Douville (1996), la biomasse racinaire représente 15 à 30% de la biomasse totale produite (variable selon l'espèce et sa maturité). Elle peut même atteindre la moitié de la biomasse totale pour des espèces comme le seigle.

L'ensemble de ces paramètres est à prendre en compte et explique en partie les variations de rendement en matière verte et sèche entre les mélanges.
Le suivi en condition de production est toutefois également un atout : sur trois années et dix exploitations suivies on peut considérer qu'on a une bonne représentativité des rendements atteignables par les maraîchers nantais.

Pour une bonne production de biomasse, les conseillers du CDDM ont observé sur les trois années l'importance de conduire les engrais verts comme une culture à part entière. Une irrigation régulière durant toute la culture, ainsi qu'une fertilisation à mi-culture garantissent une bonne production de matière verte (Mével, 2015).

Tableau 20 : Teneur en de matière sèche (%MS) et en éléments nutritifs dans les parties aériennes de différents engrais verts (source : CTIFL)

	% MS	Composition en % de matière fraîche			
		N	P_2O_5	K_2O	CaO
Vesce	20-30	0,5-0,7	0,1-0,2	0,5-0,7	0,4-0,6
Trèfle	15-20	0,5-0,7	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
Féverole	10-15	0,4-0,6	0,1-0,2	0,4-0,6	0,4-0,6
Seigle	20-25	0,4-0,6	0,1-0,2	0,1-0,3	0,1-0,2
Moutarde blanche	10-15	0,2-0,3	0,1-0,2	0,1-0,3	0,1-0,2
Paille	85-95	0,3-0,5	0,1-0,2	0,6-3	0,1-0,8

2. L'exploration racinaire des engrais verts suivis

L'exploration racinaire des engrais verts suivis (jusqu'à 20-30 cm) est satisfaisante : elle permet de décompacter le sol en profondeur par rapport aux cultures maraîchères présentes habituellement (les racines de mâches ou de radis ne vont pas au-delà des 15 premiers centimètres de sol – Gérard, 2015). Lors du suivi des essais de 2015, nous avons constaté la formation d'une semelle de labour aux alentours de ces 30 cm : les engrais verts peinent à traverser cette couche. Seules quelques espèces à racines puissantes, tel le millet, le sorgho ou des crucifères, pourraient être capable de briser cette croute avec un cycle de culture plus long. En effet, dans notre contexte de production, les cycles de culture des engrais verts sont rapides ce qui ne permet pas à l'enracinement d'atteindre son potentiel maximal.
Ainsi, les racines de graminées se concentrent habituellement dans les 10 premiers centimètres du sol mais peuvent s'étendre jusqu'à 2m de profondeur (Jobin et Douville, 1996). Au mieux, nous avons observé des racines de millet allant jusqu'à 30-35cm de profondeur mais nos graminées exploraient en moyenne le sol jusqu'à 15-25cm.
De même, les racines de trèfle incarnat et de vesce peuvent explorer le sol jusqu'à 0,8m (Jobin et Douville, 1996) tandis que nous n'en avons observé que jusqu'à 10-15cm.

De plus, la longueur des racines est certainement sous-estimée lors de nos mesures en fin de culture pour certaines espèces. En effet, une partie non négligeable des racines reste mélangée au sol lors des prélèvements pour des espèces comme le seigle ou l'avoine. Ces espèces produisent un système racinaire très fasciculé et difficile à récupérer dans son intégralité à cause de la fragilité des racines.
Au contraire du seigle et de l'avoine, les légumineuses et d'autres graminées (moha, millet, sorgho) ont des racines plus pivotantes et robustes. Lors de nos suivis, elles ont pu être mesurées dans leur intégralité avant destruction du couvert.

3. La mobilisation d'éléments nutritifs par les engrais verts suivis

Ici aussi les résultats que nous obtenons sont difficilement comparables entre eux car la fertilisation des parcelles n'était pas homogène selon les essais (Annexe 3). Ainsi les mobilisations peuvent être plus importantes sur une parcelle bien pourvue en éléments nutritifs.

Les données existantes provenant d'autres essais donnent les mobilisations en éléments nutritifs par espèce cultivée. Or nos résultats concernent les teneurs en azote, phosphore et potassium de mélanges d'espèce. Ne connaissant pas la part de chaque espèce dans le rendement final, il nous est difficile comparer nos valeurs à d'autres valeurs de références.

Le seigle est la seule espèce que nous avons évaluée hors mélange. Les trois cultures de seigle suivies en région nantaise ont produit entre 26 et 45% de MS. L'azote constitue entre 0,5 et 0,8% de la matière verte ; le phosphore entre 0,1 et 0,2% ; le potassium de 0,5 et 1,1% de la matière verte.
Une étude du CTIFL a ainsi calculé les mobilisations de diverses espèces d'engrais verts, dont le seigle, qui figurent dans le Tableau 20.
Notre teneur en matières sèches est plus élevée que celle observée par le CTIFL. Eux ne considèrent que les parties aériennes tandis que nous considérons la plante entière. Cela peut expliquer l'écart observé. Les mobilisations en azote et phosphore sont similaires à celles que nous trouvons. Nous obtenons une teneur en potassium supérieure.

Tableau 21 : Lien entre rapport C/N et la part d'azote restituée au sol par un engrais vert
(Source : Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes)

Rapport C/N de la plante	Part d'azote minéralisé et restituable au sol
C/N < 15	50 %
15 < C/N < 20	40 %
20 < C/N < 25	30 %
25 < C/N < 30	25 %
C/N > 30	20 %

La mobilisation en azote des mélanges évalués

Les engrais verts n'enrichissent pas le sol en éléments nutritifs, mais restituent ce qu'ils ont prélevé. Les légumineuses ont la particularité en revanche de pouvoir fournir de l'azote supplémentaire grâce à la fixation d'azote de l'air (Pousset, 2011). Nos observations n'indiquent pas de réelle différence de mobilisation d'azote par les mélanges avec légumineuses par rapport à d'autres mélanges. Nous avons observé quelques nodosités mais de très petite taille. Cela suggère que les légumineuses ne restent peut-être pas en place assez longtemps pour produire des nodosités fixatrices d'azote suffisamment développées.

De plus, la fertilisation des parcelles d'engrais verts fournit de l'azote NO_3^-. Cela peut réduire la fixation d'azote atmosphérique (les légumineuses privilégient leur alimentation par l'assimilation de NO_3^- à la fixation de N_2 atmosphérique – Obaton, 1992) même si l'association avec une graminée, qui prélève l'azote du sol, force la légumineuse à fixer de l'azote atmosphérique (Guet, 2003).

Les restitutions en éléments nutritifs aux cultures suivantes

Les données collectées lors du projet PATHOSOL nous renseignent sur la mobilisation en éléments nutritifs. Elles ne nous donnent pas les éléments nutritifs réellement mis à disposition pour la culture maraîchère suivante. Une partie des éléments est en effet libérée dans le sol dans les mois qui suivent la destruction du couvert, tandis qu'une autre est stockée puis libérée plus lentement [9].

Des outils ont été développés pour estimer les quantités d'éléments nutritifs potentiellement disponibles après un engrais vert. C'est le cas par exemple de la méthode MERCI proposée par la Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes. Cet outil permet d'estimer l'azote, le potassium et le phosphore restitué par espèce d'un mélange, à partir du rendement en matière verte, sèche ou de la hauteur de l'espèce. La durée de l'interculture est également prise en compte dans les calculs. Cet outil a été construit à partir de références acquises dans plusieurs régions françaises (Centre, Bretagne, Alsace, Rhône-Alpes, Champagne-Ardenne…).

Il est possible de faire une approximation grossière des éléments nutritifs mis à disposition de la culture suivante.

Ainsi, on peut considérer que 20 à 50% de l'azote mobilisé est mis à disposition selon le rapport C/N du couvert [9] (Tableau 21). Avec un rapport C/N moyen de 21 (restitution de 30% de l'azote mobilisé) et une mobilisation moyenne de 141 kg/ha d'azote, les engrais verts évalués en conditions nantaises pourraient fournir 42,3 kg/ha d'azote aux cultures maraîchères suivantes.

Comme évoqué plus haut, une partie de la biomasse racinaire n'est pas prise en compte dans le rendement de certaines espèces (seigle, avoine). On considère que l'azote contenu dans les racines d'engrais verts est négligeable devant l'azote des parties aériennes (environ 10% de l'azote total contenu dans un engrais vert annuel – Duval, Weill et N'Dayegamiye, 2014).

De même, on peut estimer que 50 à 80% (variable selon plusieurs paramètres dont le climat, l'activité biologique du sol) du phosphore mobilisé par un engrais vert est restitué au sol la première année (Jobin et Douville, 1996). Avec en moyenne 58 kg/ha mobilisés, les engrais verts en région nantaise pourraient ainsi restituer entre 29 et 46 kg/ha de phosphore.

Le potassium mobilisé serait quant à lui restitué intégralement au sol dans les semaines suivant la destruction de l'engrais vert (Joubin et Douville, 2000). Selon ces mêmes auteurs, ce potassium risque d'ailleurs d'être lessivé dans des sols à faible capacité de fixation comme les nôtres.

4. Le rapport C/N et la dégradation des engrais verts suivis

Les rapports C/N des mélanges évalués sont satisfaisants. Ils sont pour la grande majorité compris entre 10 et 30, soit des valeurs de C/N permettant de constituer de la matière organique dans le sol, tout en restituant de l'azote par dégradation (Mével, 2015).

Le rapport C/N des légumineuses seules ou en association (avec une graminée par exemple) est habituellement plus faible (il tend vers 15) que celui de graminées seules (le C/N tend alors vers 30) (Chambre régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, 2010). Nous retrouvons des résultats similaires avec un C/N moyen de 19,8 pour nos associations légumineuses/graminées contre 25,5 en moyenne pour nos graminées seules ou en mélanges.

Les analyses de quelques engrais verts ont révélé des rapports C/N un peu élevés pour quelques mélanges (C/N autour de 35). L'azote mobilisé sera alors peu disponible pour la culture suivante ; au contraire, une faim d'azote peut être provoquée ce qui nécessite de mobiliser l'azote du sol pour dégrader l'engrais vert. Des engrais verts un peu trop lignifiés lors des prélèvements en fin de culture peuvent expliquer ces valeurs, notamment le C/N=64 obtenu pour un mélange avoine-seigle.

5. Engrais verts retenus pour une culture estivale courte en sols sableux nantais, après l'observation de leur développement

Les espèces les mieux adaptées aux contraintes du maraîchage nantais

L'**avoine** et le **seigle,** en plus d'être de bons couvre-sol à croissance rapide, explorent et structurent bien le sol grâce à leur réseau racinaire dense et fasciculé. Ces deux espèces sont désormais largement utilisées par les maraîchers nantais comme engrais verts. Le mélange d'avoine et de seigle se comporte bien mais la montée à graine précoce de l'avoine oblige à avancer la destruction du mélange d'une à deux semaines. Le seigle a ainsi été testé seul en été 2015 pour la dernière année du projet PATHOSOL : l'espèce seule permet d'obtenir un couvert satisfaisant et de le maintenir en place quelques semaines de plus afin d'obtenir davantage de biomasse.

Quelques légumineuses se comportent bien en mélange avec des graminées : ainsi, la **vesce**, le **lupin** et le **trèfle d'Alexandrie** peuvent se développer correctement en mélange. Implantées seules, elles ne seraient pas suffisamment couvrantes et n'exploreraient pas suffisamment le sol en 6 semaines de culture. L'association avec des graminées assure une production de biomasse importante et homogène comme l'ont également observé Jobin et Douville (1996). Assez sensibles à la sécheresse, ces espèces sont à préférer pour un semis en fin de printemps et à arroser régulièrement (Mével, 2015).

Les espèces réservées aux conditions très chaudes et sèches

Trois espèces ont été testées pour une culture en conditions très chaudes et sèches (semis à partir de fin mai): le **millet**, le **moha**, et le **sorgho**.

D'après le suivi réalisé, ces espèces ont un bon développement (bonne production de biomasse et croissance rapide permettant de concurrencer les adventices – confirmé par Pousset, 2011), à condition d'être semées lorsque les températures sont suffisamment élevées (de fin-mai à début juin en plein champ). Elles conviennent également à une culture sous abri. Elles sont adaptées aux conditions chaudes et aux terrains secs (Pousset, 2011 ; [4]) et conviennent ainsi au climat estival nantais. Pour obtenir une biomasse suffisante, il faut toutefois veiller à une bonne préparation du sol et une irrigation suffisante lors de l'implantation de ces espèces (ceci est confirmé par Pousset, 2011). Elles présentent un système racinaire fasciculé, voire légèrement pivotant, plus puissant que les autres graminées estivales testées. Millet et moha sont des espèces qui se comportent bien en mélange avec des légumineuses comme la vesce ou le trèfle d'Alexandrie d'après nos observations.

Les espèces moins adaptées aux contraintes de production nantaises

L'observation du développement des mélanges a permis d'identifier certaines espèces moins adaptées aux conditions nantaises. Ainsi le **raygrass italien** (RGI) en mélange ne s'est pas montré satisfaisant car il montait à graine trop rapidement, obligeant à une destruction précoce de l'engrais vert ; l'exploration racinaire se limite aux dix premiers centimètres de sol lors d'une interculture courte comme en condition de maraîchage à Nantes (Lloyd, 2013).

Le **trèfle incarnat** a une croissance plus lente que les autres espèces et nécessite une période de vernalisation pour réellement exprimer son potentiel (Deheyer, 2015) ; il n'est pas retenu pour une interculture estivale courte, mais il serait intéressant de l'évaluer comme engrais vert hivernal. Le **sarrasin** permet d'inclure une famille botanique (*Polygonaceae*) non cultivée dans les rotations des maraîchers nantais ; cet intérêt est contrebalancé par une couverture moyenne du sol et un développement rapide par rapport à d'autres espèces en mélange (il entre ainsi en concurrence avec celles-ci – Lloyd, 2013). De même la **phacélie** (*Hydrophylaceae*) n'appartient à aucune famille botanique cultivée par les maraîchers nantais, mais d'après les observations du CDDM cette espèce présente de forts risques de repousses dans les cultures maraîchères suivant les engrais verts.

6. L'acquisition de références locales sur les engrais verts : perspectives

Les trois années de projet PATHOSOL ont permis d'acquérir des références locales et de déterminer des espèces adaptées à une culture d'engrais verts estivaux en climat nantais. A l'avenir, il serait intéressant de réaliser un suivi plus précis des éléments nutritifs mis à disposition du sol par les engrais verts. Une étude économique pourrait compléter la réflexion des maraîchers, en comparant un itinéraire technique intégrant des engrais verts et un itinéraire où le sol est laissé nu en été.

Le projet PATHOSOL s'est intéressé essentiellement à la mise ne place d'engrais vert en période estivale. Désormais, certains producteurs implantent des engrais verts en hiver, où certaines parcelles sont libérées entre octobre et avril. En effet, la pression sanitaire est telle en hiver sur certaines parcelles que la culture de mâche n'y est plus possible.
Les couverts estivaux évalués durant PATHOSOL ne sont pas tous adaptés à une culture hivernale : le trèfle d'Alexandrie ainsi que le moha, millet, et sorgho sont à réserver à une interculture estivale (Cadillon, 2013). Le CDDM n'a pas encore mis en place d'essai d'engrais verts hivernaux jusqu'ici mais pourrait être amené à le faire. Une implantation tardive est possible pour plusieurs graminées : avoine, seigle, triticale, blé d'hiver, raygrass italien. Des légumineuses comme la vesce d'hiver, le pois fourrager et le trèfle incarnat conviendraient également [4] [8]. Ces graminées et légumineuses sont disponibles localement chez les fournisseurs semenciers ; ces fournisseurs proposent également des mélanges qui pourraient être évalués. Ainsi les mélanges trèfle incarnat-RGI, ou RGI-trèfle incarnat-vesce d'hiver proposés paraissent intéressants à évaluer pour une interculture hivernale en maraîchage.
Quelques maraîchers nantais cultivent déjà des engrais verts hivernaux (seigle, avoine, blé d'hiver). Ces producteurs doivent détruire l'avoine et le seigle par désherbage chimique, les espèces étant trop coriaces pour une destruction par broyage après l'hiver. Une destruction mécanique pourrait être envisagée en trouvant d'autres espèces hivernales moins coriaces.

Chapitre II. Effet des engrais verts sur la structure du sol

1. Impact des engrais verts sur la porosité du sol

Les sols étudiés en maraîchage nantais sont très tassés : la porosité totale se situe en moyenne entre 35-40% (densité apparente ρ_a =1,6 kg/m^3), contre 50% de porosité totale (ρ_a =1,3 kg/m^3) en sols agricoles habituels (Hallaire, 2015).

Malgré ce tassement, la porosité totale du sol en surface n'a pas évolué différemment sous l'action d'engrais verts par rapport à un sol nu. En profondeur, au bout de deux années, deux engrais verts (avoine-millet-vesce et RGI-sarrasin) ont au contraire provoqué un tassement du sol. Ce phénomène n'est pas observé pour le témoin en sol nu ni pour le couvert M4 (sorgho-phacélie).
Nous observons ainsi l'inverse des résultats attendus au niveau de la porosité du sol, c'est-à-dire un tassement du sol plutôt qu'une aération (provoquée théoriquement par l'exploration racinaire des engrais verts) (Hababi et al., 2013 ; Hallaire, 2015).

De même, en surface comme en profondeur, la culture d'engrais verts estivaux n'a pas impacté la part de macropores dans le sol par rapport à un sol laissé nu en été. Dans des sols agricoles, une culture d'engrais vert provoque habituellement une hausse de la macroporosité (Hallaire, 2015). Or on observe ici plutôt une baisse globale de cette macroporosité, que l'on soit en sol nu ou avec des engrais verts. De plus, ni la forme, ni la taille des macropores n'a été influencée par les cultures d'engrais verts.

L'essai a eu lieu en condition producteur : ce biais créé par les pratiques du producteur est ainsi à prendre en compte. La parcelle a été travaillée entre les mesures de porosité ; ainsi nos mesures peuvent être faussées par ces passages de machines et le travail du sol qui masquent l'action des couverts sur la porosité.

Le CTIFL de Carquefou étudie également l'impact de différentes pratiques (dont les engrais verts) sur les propriétés physiques des sols dans le cadre de PATHOSOL. Aucune différence de porosité totale n'a été constatée entre l'état initial et l'état du sol après un engrais vert (CTIFL, 2015).

Limites des résultats

Lors des mesures de porosité en début d'essai (P0 de 2013), une seule répétition a été mesurée par modalité pour la porosité et la macroporosité. C'est la moyenne des quatre modalités qui a été prise en compte comme valeur au P0 de 2013. La parcelle a été considérée comme homogène à cet état initial (on a considéré un précédent cultural identique sur toute la parcelle). Cependant ce choix en début de projet rend difficile l'analyse des données : il n'est pas possible de comparer statistiquement la porosité après une ou plusieurs culture d'engrais verts à la porosité initiale.

De même, lorsque des différences significatives sont constatées entre différentes dates ou modalités, celles-ci sont souvent assez faibles (de l'ordre de quelques pourcents). Ces quelques pourcentages d'écart peuvent s'expliquer par des erreurs de mesure, la détermination de la porosité totale par la densité apparente n'étant pas très précise. Le volume de prélèvement est en effet faible ce qui favorise les erreurs, d'autant plus que l'échantillon prélevé est très friable car il provient de sols sableux. Les bords du cylindre de prélèvement peuvent aussi tasser les bordures de l'échantillon prélevé et fausser les mesures.

Les résultats sont obtenus au bout de deux ans de culture d'engrais verts estivaux ; des essais à plus long terme pourraient éventuellement permettre de constater une évolution plus marquée de la porosité entre dates ou modalités.

2. Impact des engrais verts sur la conductivité hydraulique

Le sol étudié est caractérisé par de hautes valeurs de conductivité hydraulique, à cause de sa nature sableuse (Calvet, 2003). Le faible impact des engrais verts sur la porosité du sol (vu précédemment) explique que l'on observe peu d'évolution de la conductivité hydraulique, avec ou sans engrais verts.

Sur les deux années de suivi, la perméabilité en profondeur était en effet similaire entre les modalités avec engrais verts et la modalité témoin laissée en sol nu. La structuration du sol par les racines en profondeur n'est peut-être pas suffisante car elles n'y pénètrent pas suffisamment ; il est aussi possible que cette structuration ne soit pas durable dans le temps.

La mise en place d'engrais verts semble influencer la perméabilité du sol en surface. En effet, aucune différence de perméabilité n'est constatée l'hiver après la première culture d'engrais verts.

Au contraire, au printemps 2014 (après la 1ère culture d'engrais verts et avant la deuxième culture l'été suivant), le sol est moins perméable en surface sur le témoin sol nu que sur les parcelles avec engrais verts. L'eau circule alors mieux sur les sols où ont été cultivés des engrais verts en été 2013. Le sol ayant eu l'engrais vert sorgho-phacélie est le plus perméable. Pour constater une évolution, il faudrait comparer ces valeurs à celles du P0 2013 réalisé à la même période de l'année (printemps). En effet la conductivité hydraulique possède une forte variabilité intra-annuelle : elle est plus élevée au printemps et la plus faible en hiver et en été (Bottinelli, 2010 ; Hallaire, 2015). Ainsi comparer les conductivités hydrauliques entre P0 et P1 est délicat : nous ne sommes pas à la même saison et donc pas dans les mêmes conditions de sol.
Une seule mesure par modalité a été effectuée au P0 2013 : nous pouvons difficilement confronter les conductivités hydrauliques du P0 2014 au P0 2013.

Les mesures suivantes, en hiver 2014, donnent des résultats difficiles à interpréter car nous ne pouvons pas comparer la conductivité hydraulique des couverts avec celle du témoin.
Seule la conductivité pour un potentiel de -0,2 kPa peut être étudiée : la parcelle témoin a alors une conductivité hydraulique similaire à celle avec le mélange sorgho-phacélie. Par comparaison avec le P1 2013, le sol semble plus perméable pour la modalité M4 (sorgho-phacélie) au P1 2014.
Le sol de la modalité M1 semble au contraire moins perméable qu'au P1 2013.

Notre hypothèse de départ est que les engrais verts permettent de structurer le sol, baissant ainsi la conductivité hydraulique (le sol devient moins filtrant). Il n'y a pas d'effet net des engrais verts au bout de deux années de suivi : la conductivité hydraulique semble augmenter pour un engrais vert et diminuer pour l'autre.
Le CTIFL de Carquefou étudie également l'impact de différentes pratiques (dont les engrais verts) sur les propriétés physiques des sols. Au bout de deux années, les variations de conductivités hydrauliques sont faibles ; les pratiques étudiées n'ont pas impacté la perméabilité du sol de manière durable (Ade, 2015). Pour les sols avec des engrais verts, il semblerait toutefois que la conductivité hydraulique diminue (soit une baisse de perméabilité du sol comme attendu) (CTIFL, 2015).

Limites des résultats

Le sol étudié est sableux : la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'appareil de mesure est très rapide par rapport aux sols « classiques » où sont normalement réalisées ces mesures. Le réservoir se vide en quelques minutes à peine dans notre situation alors qu'il met plusieurs heures dans des sols agricoles habituels. Ainsi des valeurs aberrantes lors des mesures d'infiltrométrie sont fréquentes et posent problème lors du traitement des données (données manquantes rendant la comparaison statistique des modalités impossible).

De plus certains écart-types sont très grands : nous avons parfois une grande variabilité des mesures. Il faudrait réaliser davantage de répétitions pour obtenir des mesures plus fiables.

Comme pour la porosité, une seule mesure par modalité a été réalisée au P0 2013 ce qui ne permet pas de comparer la perméabilité du sol à l'état initial pendant la suite du projet.

Les résultats sont obtenus sur un sol travaillé intensivement par le producteur et régulièrement tassé par le passage d'engins agricoles. Il est ainsi difficile de connaître le réel effet des couverts implantés, qui peut être masqué par l'effet du travail du sol. Ceci peut expliquer pourquoi la perméabilité du sol augmente pour un engrais vert mais pas pour l'autre.

3. Résultats de l'analyse Hérody

Les analyses Hérody à l'état initial et après deux cultures estivales d'engrais verts n'ont pas montré de différence nette d'évolution du sol entre le sol nu et les modalités avec engrais verts.

L'évolution de la matière organique entre l'état initial et final est surprenante pour les modalités avec engrais verts. Ainsi le pourcentage de MOF (matière organique fugitive) à l'état final est nul pour la M2 en surface. Nous espérions une hausse des MOF sur les parcelles avec engrais verts ; en effet, les engrais verts enfouis jeunes comme les nôtres sont des précurseurs de MOF (Jobin et Douville, 1996 ; Riou, 2015). Pour les autres parcelles avec engrais verts, le niveau de MOF est similaire ou inférieur au niveau initial. La baisse de MOF semble toutefois moins marquée que sur le sol resté nu en été.

La matière organique stable augmente en profondeur et reste similaire en surface d'après nos résultats. On obtient les mêmes résultats pour le témoin en sol nu ; ces évolutions ne seraient pas dues à l'apport d'engrais verts. De même, les niveaux de Ni-Ni ont considérablement baissé en surface, que ce soit pour la parcelle restée en sol nu l'été ou celles avec des engrais vert. Cette chute est surprenante car il s'agit de matière organique très stable sensée évoluer très lentement (Riou, 2015). Cette chute est difficilement explicable.

Quelques maraîchers nantais cultivent des engrais verts en été sur leurs parcelles depuis maintenant trois ans. L'apport de matière organique par ces engrais verts aurait provoqué une légère hausse du taux de matière organique dans leur sol. Ce taux serait en effet passé de 0,8% à 0,9% (ce qui serait non négligeable pour un sol sableux pauvre en matière organique) (Mével, 2015). Pour Pousset (2002), ce n'est pas un apport ponctuel, mais bien un apport régulier, annuel, qui peut améliorer durablement la teneur en humus. Les parties aériennes d'engrais verts annuels comme les nôtres, enfouis jeunes et verts, n'enrichissement pas le sol en matière organique ; ce seraient les racines et les tiges âgées qui enrichiraient le sol en humus. En cas de culture irrégulière d'engrais verts, Poursset (2002) observe tout de même que le niveau de matière organique se maintient mieux dans les sols avec des engrais verts qu'en sol nu.
Pour espérer augmenter le taux d'humus dans les sols pauvres en matière organique comme à Nantes, Jobin et Douville (1996) préconisent de compléter la culture d'engrais verts avec des apports de matière organique précurseurs d'humus (composts, résidus lignifiés).

Limites des résultats par la méthode Hérody

Il est difficile de conclure sur l'impact réel des couverts d'autant plus que le producteur a réalisé une désinfection thermique sur la parcelle d'essai en 2014, sans consulter le CDDM. Cela a pu fausser les résultats obtenus.

Ici aussi, la durée de l'essai n'est peut-être pas suffisante pour évaluer l'impact des engrais verts sur la matière organique du sol.

4. Perspectives

Lors de l'étude de la macroporosité, nous avons observé davantage de pores de petite taille que de gros pores. A l'avenir il serait intéressant de choisir une échelle d'analyse plus fine de la macroporosité (jusqu'à la mésoporosité, définie par un diamètre de 0,2 à 30 µm) pour ce type d'étude en sols sableux. En effet, il se pourrait que les engrais verts agissent sur des pores de plus petite taille que ceux étudiés (Hallaire, 2015).

Les sols étudiés sont très sableux et les méthodes de mesures ne sont pas assez fines pour être suffisamment discriminantes.
Ainsi l'infiltrométrie donne une idée de la perméabilité du sol mais n'est pas suffisamment discriminante en sols sableux pour comparer différents couverts.

Ce constat pour le test d'infiltrométrie est partagé par le CTIFL et le CDDL, qui ont également eu des difficultés à caractériser les évolutions de leurs sols par ce type de mesure (CDDL, 2014 ; Ade, 2015). De même la mesure de densité apparente permet d'évaluer la porosité du sol, mais n'est pas assez discriminante pour distinguer un sol nu d'un sol avec engrais verts.

Deux années de suivi semblent insuffisantes pour constater une différence entre un sol nu et un sol avec engrais verts. Il y aurait un intérêt à étudier l'évolution de la structure du sol à plus long terme. Ainsi la durée d'étude pourrait d'accentuer les faibles différences d'évolution constatées entre un sol resté nu et un sol cultivé avec des engrais verts. Mais trouver une parcelle à mobiliser et suivre sur une longue durée est problématique pour une structure qui travaille en condition de production.

Les résultats de l'essai mené en condition de production par le CDDM sont certainement faussés par le passage d'engins agricoles et le travail intensif du sol, qui masquent l'effet structurant possible des engrais verts. Cela nous permet toutefois de voir l'impact d'une culture d'engrais incluse dans une situation de production (pas d'effet assez marqué pour observer une amélioration de la structure).

➔ **Suite aux trois années du projet PATHOSOL, les essais du CDDM n'ont pas montré de différence de structure de sol entre une parcelle témoin sans engrais vert et des parcelles avec engrais verts. Ainsi, les méthodes de mesure utilisées ne permettent pas d'obtenir des résultats pour valider les engrais verts comme moyen d'agir sur les propriétés physiques des sols maraîchers nantais.**

Chapitre III. Impact des engrais verts sur les cultures maraîchères suivantes

Pour toutes les notations nous n'avons pas pu observer de différence significative de rendement ou de qualité entre le témoin en sol nu et les parcelles avec engrais verts.

Les résultats n'ont pas montré d'impact des engrais verts sur les propriétés du sol. Cela peut expliquer que nous n'observons pas d'effet sur la culture suivante ; en effet, les engrais verts sont supposés agir indirectement sur les bioagresseurs telluriques via une amélioration du sol.

L'expression des maladies telluriques est restée faible lors de chaque notation réalisée, ce qui explique aussi que nous n'observons pas d'impact des engrais verts. Sur 3 années d'essais aux Etats-Unis, Himmelstein (2014) a observé un effet suppressif de deux engrais verts mais cet effet n'a pu être démontré qu'en cas de forte pression sanitaire. Même si nos parcelles d'essais avaient naturellement des problèmes sanitaires, un niveau d'attaque similaire après la mise en place des essais n'a jamais pu être observé. Le suivi des essais en condition producteur rend impossible une inoculation artificielle ; l'observation des maladies est alors aléatoire.
Le CTIFL de Carquefou, qui évalue l'effet sanitaire d'engrais verts en conditions contrôlées, a également des résultats variables et n'observe pas systématiquement d'attaque suffisante de maladies malgré une inoculation artificielle des pathogènes (Ade, 2015). Ainsi, aucune incidence d'une culture d'engrais vert n'a été constatée non plus sur le rendement et l'état sanitaire des mâches suivies par le CTIFL de Carquefou (CTIFL, 2015).

L'effet sanitaire des engrais verts n'a été ici étudié que sur quelques années mais il s'agit en réalité d'un phénomène à constater à moyen ou long terme. Cette méthode de lutte indirecte doit permette de lutter contre les pathogènes en agissant sur la régénération du sol.

➔ **Suite aux trois années du projet PATHOSOL, les essais du CDDM ne permettent pas de valider les engrais verts comme méthode de maîtrise des bioagresseurs telluriques en maraîchage nantais.**

CONCLUSION

Un des objectifs de cette étude était d'acquérir des références locales sur les engrais verts dans le contexte de production maraîchère nantaise.
Des essais en condition de production ainsi qu'un suivi sur des exploitations maraîchères ont permis d'observer plusieurs mélanges d'engrais verts. Des espèces comme le seigle et l'avoine produisent une bonne biomasse en peu de temps, et explorent bien le sol. Ces deux espèces sont les plus utilisées localement car elles s'adaptent bien aux sols des maraîchers nantais. Plusieurs légumineuses ont été retenues, mais il est nécessaire de les semer en mélange avec d'autres familles botaniques. Le millet, moha et sorgho sont adaptés pour une interculture en conditions très chaudes et sèches ou sous abri.

Les observations ont aussi permis de constituer une base de données locale avec les rendements, mobilisations, tailles des espèces et rapports C/N moyens dans le contexte local de production. Ainsi, les maraîchers nantais peuvent espérer pour leurs cultures d'engrais verts une biomasse moyenne de 33t/ha de matière verte pour 8 t/ha de matière sèche. Les mobilisations en éléments nutritifs sont en moyenne 141 kg/ha d'azote, 58 kg/ha de phosphore et 315 kg/ha de potassium. Le rapport C/N moyen des engrais verts est de 21.

Les échanges et les visites organisés durant le projet PATHOSOL ont permis la communication des connaissances acquises auprès des maraîchers nantais, facilitant la diffusion des engrais verts. A l'avenir, il serait intéressant d'évaluer et d'acquérir des références sur des engrais verts pour un usage hivernal. Les maraîchers nantais sont de plus en plus demandeurs de ce type de couverts, en plus d'engrais verts estivaux. La hausse du taux de matière organique dans les sols des maraîchers cultivant des engrais verts depuis trois ans est à vérifier et à surveiller.

Cette étude avait également pour objectif d'évaluer l'impact d'engrais verts sur les propriétés de sols sableux en condition de production maraîchère nantaise. A l'issue de deux années de suivi d'une parcelle, nous ne sommes pas en mesure de valider la méthode des engrais verts comme moyen d'agir sur ces sols avec nos méthodes de mesures. Nos résultats montrent certes une baisse de porosité du sol en profondeur grâce aux engrais verts. En revanche, ils ne montrent aucun impact net des engrais verts sur les autres paramètres du sol étudiés (porosité en surface, macroporosité, perméabilité du sol, compartiments de matière organique) par rapport à une parcelle laissée nue en été.

L'objectif à terme était d'évaluer les engrais verts en tant que moyen de maîtrise indirecte des bioagresseurs telluriques en production maraîchère nantaise. Ici aussi, nous ne sommes pas en mesure de valider la méthode des engrais verts à cette fin. En effet, sur deux années de suivi, aucun impact des engrais verts n'a été observé, que ce soit sur l'état sanitaire ou le rendement des cultures maraîchères observées.

Ainsi, deux années de suivi d'une parcelle n'ont pas suffi pour observer l'effet améliorant attendu des engrais verts. Nous n'en sommes qu'aux prémices des engrais verts en maraîchage nantais ; cette pratique n'est réalisée sur ces sols très sableux que depuis trois ans en moyenne. Un suivi à moyen-long terme lors d'une suite au projet PATHOSOL pourrait peut-être permettre d'observer une action améliorante.

Références bibliographiques

ABAWI G. S., WIDMER T.L. Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. Applied Soil Ecology, 2000, Vol.15, p.37–47

BOTTINELLI N. Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. Rennes : Acrocamupus Ouest, 2010, 165p.

CADILLON A. Couvert végétal pendant l'interculture en AB : caractéristiques des espèces. ITAB, 2013, 87p.

CALVET R. Le sol : propriétés et fonctions. Tome 1: Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Paris : Editions France Agricole, Dunod, 2003, 456 p.

CALVET R. Le sol : propriétés et fonctions. Tome 2: Phénomènes physiques et chimiques. Paris : Editions France Agricole, Dunod, 2003, 511p.

CANDOLE, B. L., ROTHROCK, C. S. Using marked strains to assess the effect of hairy vetch amendment on the inoculum densities of *Thielaviopsis basicola*, *Pythium ultimum* and *Rhizoctonia solani*. Soil Biology and Biochemistry. 1998, Vol.30, p.443-448.

CDDL. PATHOSOL : Lutte contre les agents pathogènes des sols en cultures légumières. Beaufort-en-vallée : CDDL, 2014, 15p.

CHAUSSOD R. La qualité biologique des sols: évaluation et implications. Étude et Gestion des Sols, Vol.3, n°4, 1996, p.261-278

CHEN C., THOMAS D. M., GREEN R.E., WAGENET R.J. Two-domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. Soil Science Society of America Journal., 1993, Vol.57, p.680-686

CHERR C.M., SCHOLBERG J.M.S, MCSORLEY R. Green manure approaches to crop production: a synthesis. Agronomy Journal, 2006, Vol.98, n°2, p.302–319

CITEAU et al. Gestion durable des sols. Versailles : Editions Quae, 2008, 320p.

CLARK A. Managing cover crops profitably. 3ème édition. Beltsville : Sustainable Agriculture Network, 2008, 248p.

COQUET et al. Caractérisation hydrodynamique des sols à I'aide de I'infiltromètre à disques, aspects théoriques et pratiques. Etude et gestion des sols, 2000, Vol.7, n°1, p.7-24

CTIFL. Projet PATHOSOL : Gestion des bioagresseurs telluriques par l'utilisation de pratiques améliorantes dans la rotation poireau primeur/mâche en région nantaise 2014. In : CTIFL, Support de visite des essais « plein champ et abris froids » 2015. Carquefou : CTIFL, 2015, p.31-46

DUVAL J., WEILL A. et N'DAYEGAMIYE A. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. St-Bruno-de-Montarville : Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité, 2014, 7p.

GOBAT J.-M., ARAGNO M., MATTHEY W. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. 3ème édition. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010, 817p.

GUET G. Mémento d'agriculture biologique. 2ème édition. Paris : Editions Agridécisions, 2003, 417 p.

HABABI A., JAVANMARD A., MOSAVIET S.B., al. Effect of Green Manure on Some Soil Physicochemical Characteristics. International Journal of Agronomy and Plant Production, 2013, Vol. 4, n°11, p.3089-3095

HALLAIRE V., CURMI P, WIDIATMAKA. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé, cas des horizons d'un système pédologique armoricain. Etude et gestion des sols, 1997, Vol.4, n°2, p. 115-126

HIMMELSTEIN J. C., MAUL J. E., EVERTS K. L. Impact of five cover crop green manures and actinovate on fusarium wilt of watermelon. Plant Disease, 2014, Vol.98, n°5, p.965-972

JOBIN P. et DOUVILLE Y. Engrais verts et cultures intercalaires. Montréal : Centre de développement d'agrobiologie, 1996, 22p.

JUSTES E., BEAUDOIN N., BERTUZZI P., CHARLES R., CONSTANTIN J., et al. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Versailles : éditions Quae, 2013, 112 p.

LLOYD D. Étude de l'impact des engrais verts sur les qualités physiques et biologiques des sols sableux en cultures maraîchères nantaises. Angers : Agrocampus Ouest, 2013, 51p.

MANICI L.M., CAPUTO F., V. BABINI V. Effect of green manure on *Pythium* spp. population and microbial communities in intensive cropping systems. Plant and soil, 2004, Vol.263, n°1, p.133-142

NGOUAJIO M., MENNAN H. Weed populations and pickling cucumber (*Cucumis sativus*) yield under summer and winter cover crop systems. Crop Protection, Vol. 24, n° 6, 2005, p.521-526

OBATON M. Généralités sur la symbiose fixatrice d'azote rhizobium-légumineuse. In : Food and Agriculture Organisation, Fichier technique de la fixation symbiotique de l'azote légumineuses/rhizobium. Rome : Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1992, p.14-19

OCHIAI N., POWELSON M. L., DICK R. P., CROWE F. J. Effects of green manure type and amendment rate on Verticillium wilt severity and yield of russet Burbank potato. Plant Disease Journal, 2007, Vol. 91, n°4, p. 400-406

PIETERS A. J. Green manuring principles and practice. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1927, 267p.

POUSSET J. Engrais verts et fertilité des sols. 2ème édition. Paris : France Agricole Editions, 2002, 303 pages

PRZEPIORKOWSKI T., GORSKI S.F. Influence of rye (S*ecale cereale*) plant residues on germination and growth of three triazine-resistant and susceptible weeds. Weed Technology, 1994, Vol. 8, No. 4, p. 744-747

REVELLIN, C. Les symbioses fixatrices d'azote. In : Alliances au pays des racines. Recueil des communications du XIVème Colloque Scientifique de la Société Nationale d'Horticulture de France. Paris : Société Nationale d'Horticulture de France, 2012, p.32-36

ROTHROCK C.S., KENDIG S.R. Suppression of black root rot (*Thielaviopsis basicola*) on cotton by winter legume cover crops. In : Cover crops for clean water. Tennessee : Soil and Water Conservation Society , 1991, p.155-156

TALGRE L. , LAURINGSON E., ROOSTALU H. , ASTOVER A. The effects of green manures on yields and yield quality of spring wheat. Agronomy Research, Vol.7, n°1, 2009, p.125-132

Communications personnelles

ADE C. (2015). Chargée de programmes au CTIFL, Centre de Carquefou

DEHEYER P. (2015). Responsable du réseau Nord et Sud pour la vigne, l'arboriculture, et le maraîchage à Jouffray-Drillaud, Cissé

GERARD S. (2015). Conseiller en cultures de plein champ au CDDM, Pont-Saint-Martin

HALLAIRE V. (2015). Chercheur à l'Institut National de Recherche Agronomique, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Rennes

MEVEL S. (2015). Conseiller en cultures de plein champ au CDDM, Pont-Saint-Martin

RIOU V. (2007). Conseillère agronomie, sol et culture, Chambre d'Agriculture du Maine-et-Loire, Angers

Sitographie

[1] Chambre d'agriculture de Loire atlantique. Charte pour la prise en compte de l'agriculture dans l'aménagement du territoire, volet maraichage [en ligne]. Disponible sur : http://www.loire-atlantique.chambagri.fr/uploads/media/charte_maraichage_2013.pdf (consulté le 17.03.2015)

[2] Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. EcophytoPIC Cultures légumières [en ligne]. Disponible sur : http://cultures-legumieres.ecophytopic.fr/cl/surveillance/les-bioagresseurs (consulté le 26.03.2015)

[3] CTIFL. Mâche-Radis : les priorités de la filière [en ligne]. Disponible sur : http://www.ctifl.fr/Pages/Activites/DetailsProgramme.aspx?id=976 (consulté le 22.05.2015)

[4] LEPATOIS VEDIE H. Les engrais verts en maraîchage biologique [en ligne]. ITAB, 2005, 4p. Disponible sur : http://www.itab.asso.fr/downloads/Fiches-techniques_maraichage/ENGRAIS%20VERTS.pdf (consulté le 02.06.2015)

[5] THOMPSON A., TAYLOR B.N. NIST Guide to SI units [en ligne]. Disponible sur : http://physics.nist.gov/Pubs/SP811/appenB8.html (consulté le 01.06.2015)

[6] SIRON J. La méthode Hérody, un diagnostic global du sol [en ligne]. Disponible sur : http://www.ecoledepermaculture.org/images/Le_sol/La%20methode%20Herody%20-%20Un%20diagnostic%20global%20du%20sol.pdf (consulté le 21.07.2015)

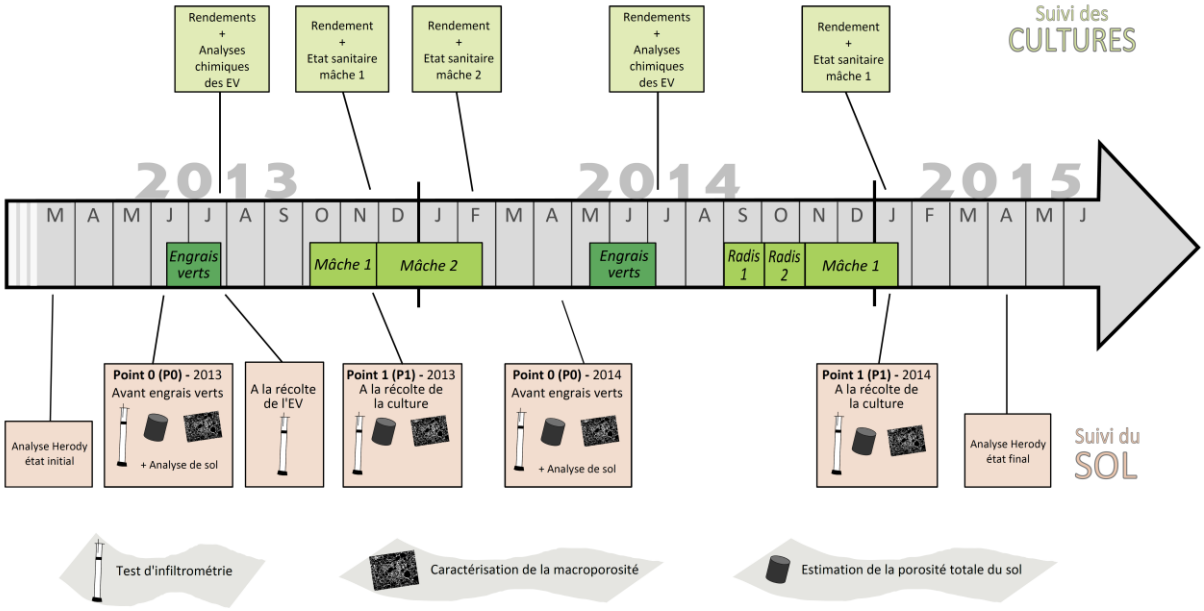
[7] MASSENOT D. L'agrobiologiste, la matière organique et l'humus [en ligne]. Disponible sur : http://www.ecoledepermaculture.org/images/Le_sol/Lagrobiologie_la_matiere_organique_lhumus_et_la_methode_Herody.pdf (consulté le 17.08.2015)

[8] MAZOLLIER C., VEDIE H. Les engrais verts en maraîchage biologique [en ligne]. GRAB, 2003, 8p. Disponible sur : http://abiodoc.docressources.fr/opac/doc_num.php?explnum_id=24tr%C3%A8fle (consulté le 18.08.2015)

[9] Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes. Légumineuses, comment les utiliser comme cultures intermédiaires ? [en ligne] Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, 2010, 24p. Disponible sur : http://www.poitou-charentes.chambagri.fr/fileadmin/publication/CRA/15_Innovation/Agronomie_pub/2012/2010_Dossier_technique_IC_-_Legumineuses.pdf (consulté le 20.08.2015)

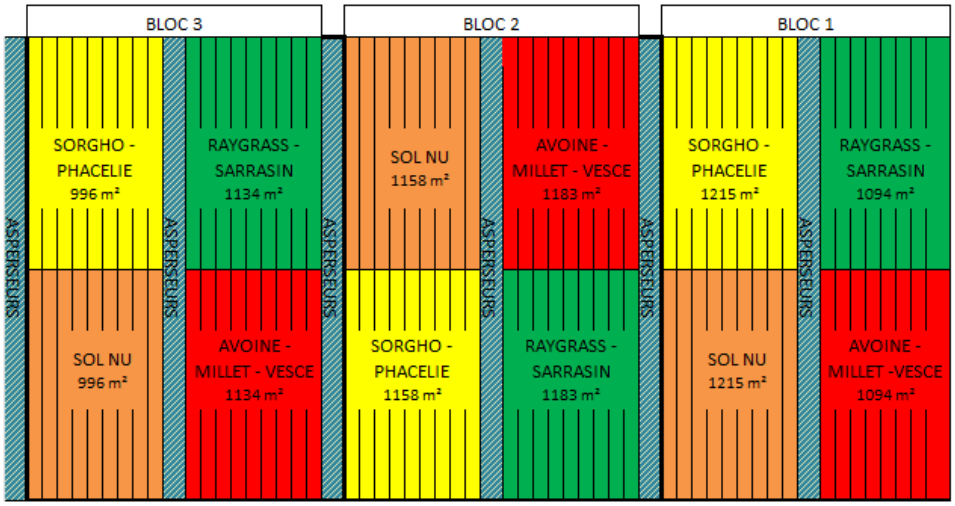
ANNEXES

Annexe 1 – Déroulement de l'essai chez le PROD1, de 2013 à 2015



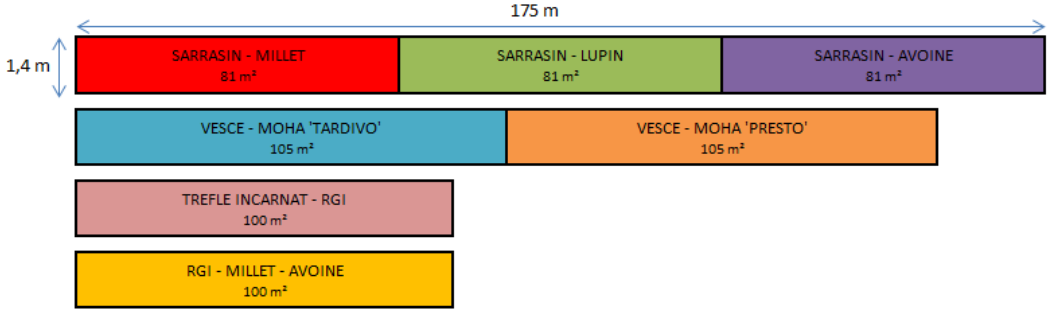
Annexe 2 – Plans des essais menés sur les sites d'expérimentations lors du projet PATHOSOL

Parcelle d'essai du PROD1 (parcelle suivie du 12/06/2013 au 09/04/2015)

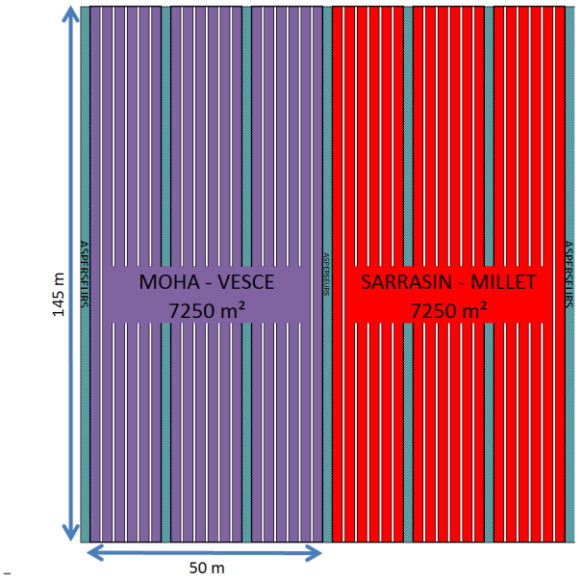


Parcelles d'essai du PROD2

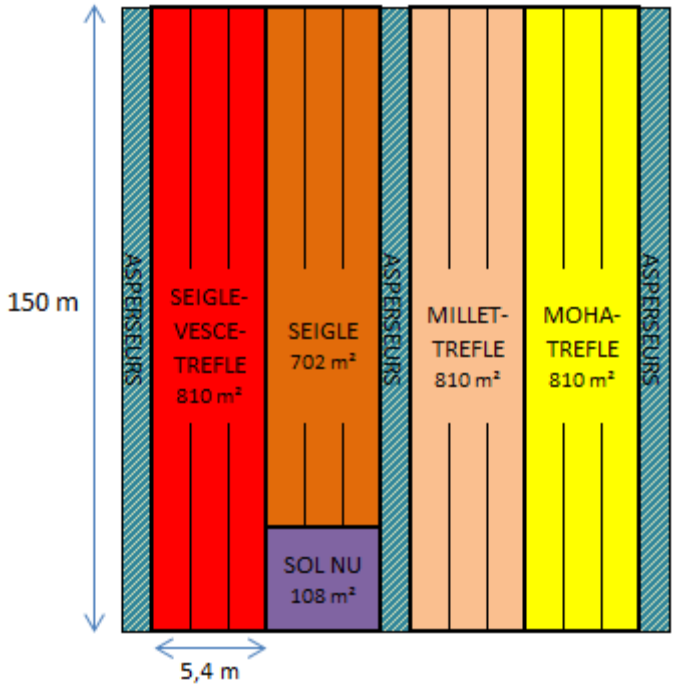
- *Parcelle suivie en 2013 (du 06/06/2013 au 23/07/2013)*



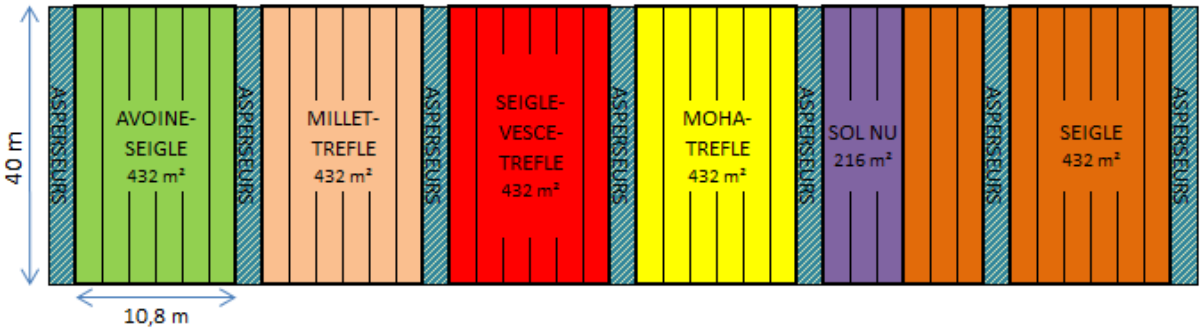
- *Parcelle suivie en 2014 (du 27/05/2014 au 07/07/2014)*



Parcelle d'essai du PROD3 (parcelle suivie du 20/05/2015 au 11/08/2015)



Parcelle d'essai du PROD4 (parcelle suivie du 19/05/2015 au 11/08/2015)



Annexe 3 – Conduite des cultures d'engrais verts sur les quatre sites d'expérimentation

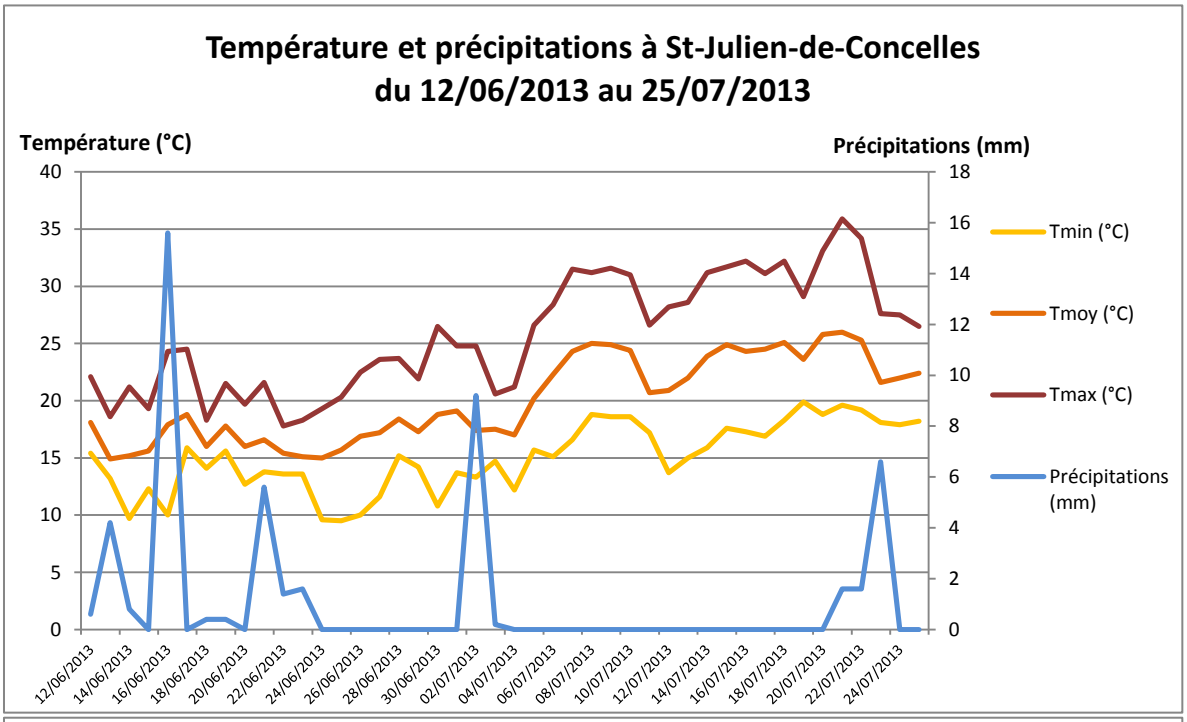
	Irrigation	Fertilisation	Destruction du couvert
PROD 1 - 2013			
	Irrigation : 3 mm/jour Précipitations : 50 mm 176 mm cumulés	34 uN / 245 kg/ha d'engrais NPK 14-7-17 à mi-culture	Après 42 jours de culture (25.07.2013): broyage par gyrobroyeur. Enfouissement par rotavator 6 jours après broyage.
PROD 1 - 2014			
	Irrigation : 67 mm (15 jours avant broyage sans eau) Précipitations : 83 mm 150 mm cumulés	30 uN à mi-culture	Après 50 jours de culture (04.07.2014)
PROD 2 - 2013			
	Non irrigué Précipitations : 48 mm	72 uN / 216 kg/ha ammonitrate à mi-culture	Après 49 jours de culture (23.07.2013): broyage au gyrobroyeur. Enfouissement une semaine après broyage.
PROD 2 - 2014			
	Non irrigué Précipitations : 53 mm	Non fertilisé	Après 41 jours de culture (07.07.2014)
PROD 3 - 2015			
	Irrigation : oui (non tracée par le producteur) Précipitations : 39 mm	33 uN / 100 kg/ha ammonitrate	Après 50-60 jours de culture (mi-juillet – entre le 08 et le 14/07) : broyage, puis 2 passages de déchaumeur + 1 rotavator + 1 cultivateur + 1 rotalabour dans les 4 semaines suivantes
PROD 4 - 2015			
	Irrigation : 6-7mm/sem. Précipitations : 41,4 mm 94 mm cumulés	37 uN / 110 kg/ha ammonitrate en deux apports à mi-culture	Après 60 jours de culture (17.07.2015): broyage par gyrobroyeur + enfouissement au rotavator. 2ème passage de rotavator 5 jours après destruction

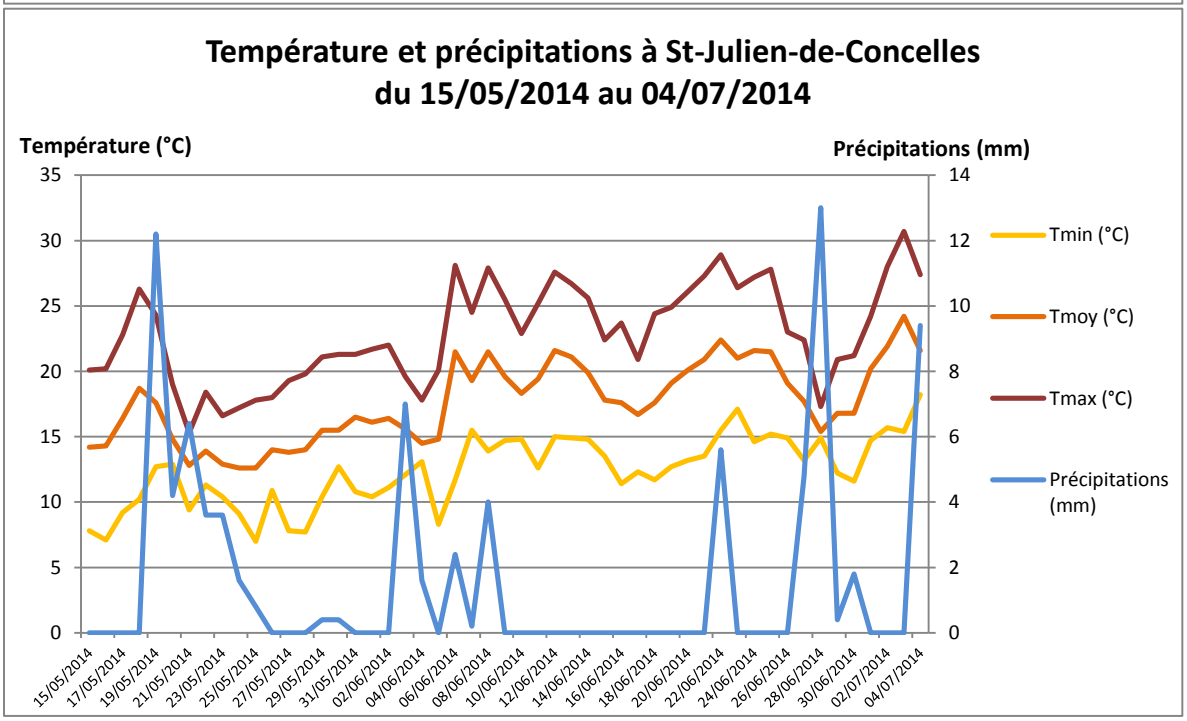
Annexe 4 – Données climatiques (température et précipitations) sur les parcelles d'essai pendant la culture d'engrais verts

Parcelle d'essai du PROD1 : parcelle située à Petit Mars (44)

- Essai 2013 : culture d'engrais verts du 12/06/2013 au 25/07/2013
- Essai 2014 : culture d'engrais verts du 15/05/2014 au 04/07/2014

Données climatiques recueillies à Saint-Julien-de-Concelles (44) – 20 km de la commune de Petit Mars

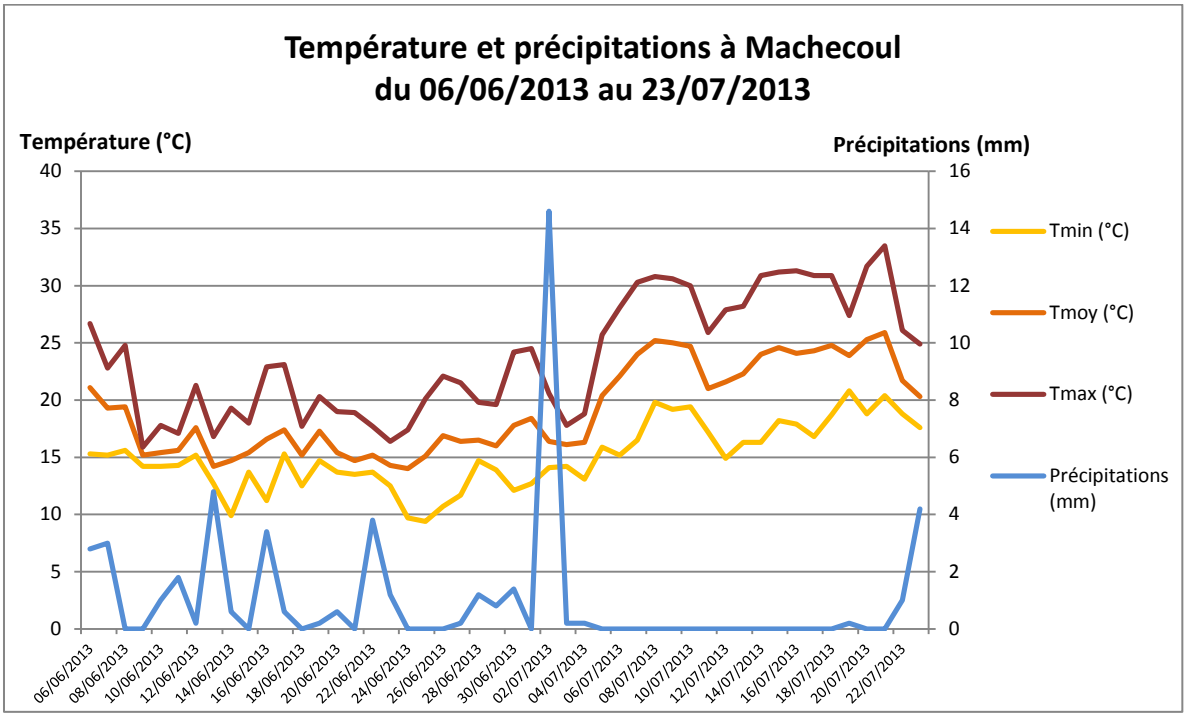


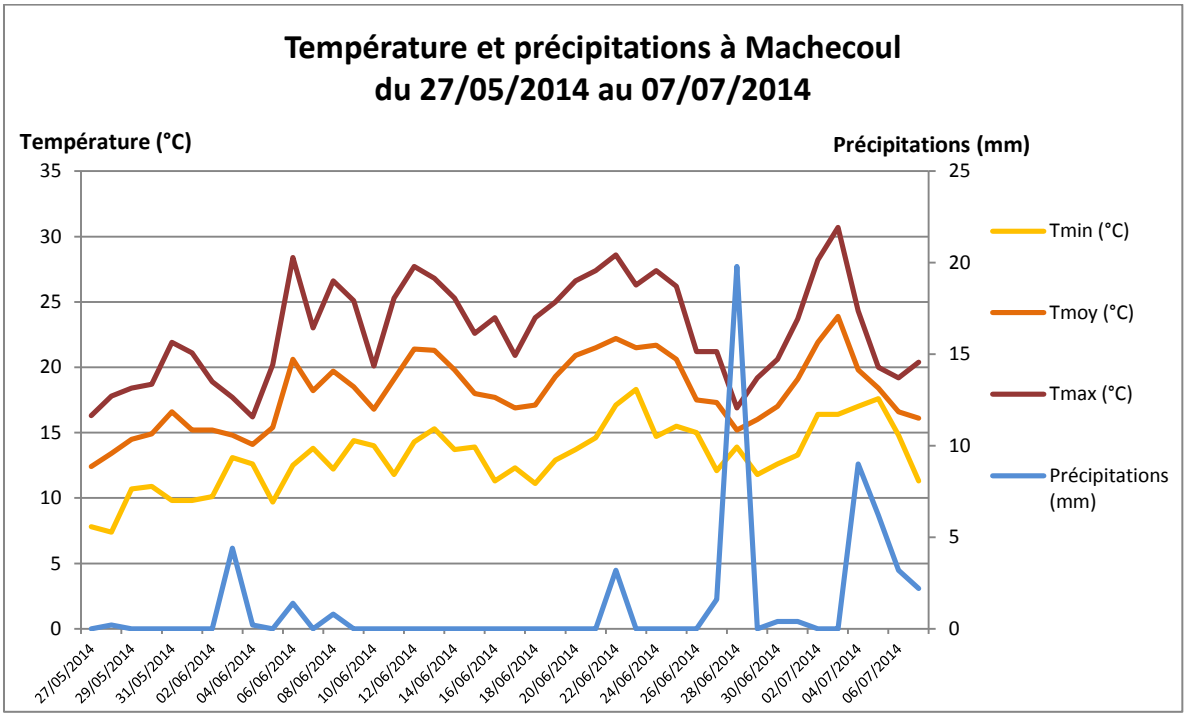


Parcelle d'essai du PROD2 : parcelle située à Machecoul (44)

- Essai 2013 : culture d'engrais verts du 06/06/2013 au 23/07/2013
- Essai 2014 : culture d'engrais verts du 27/05/2014 au 07/07/2014

Données climatiques recueillies à Machecoul (44)

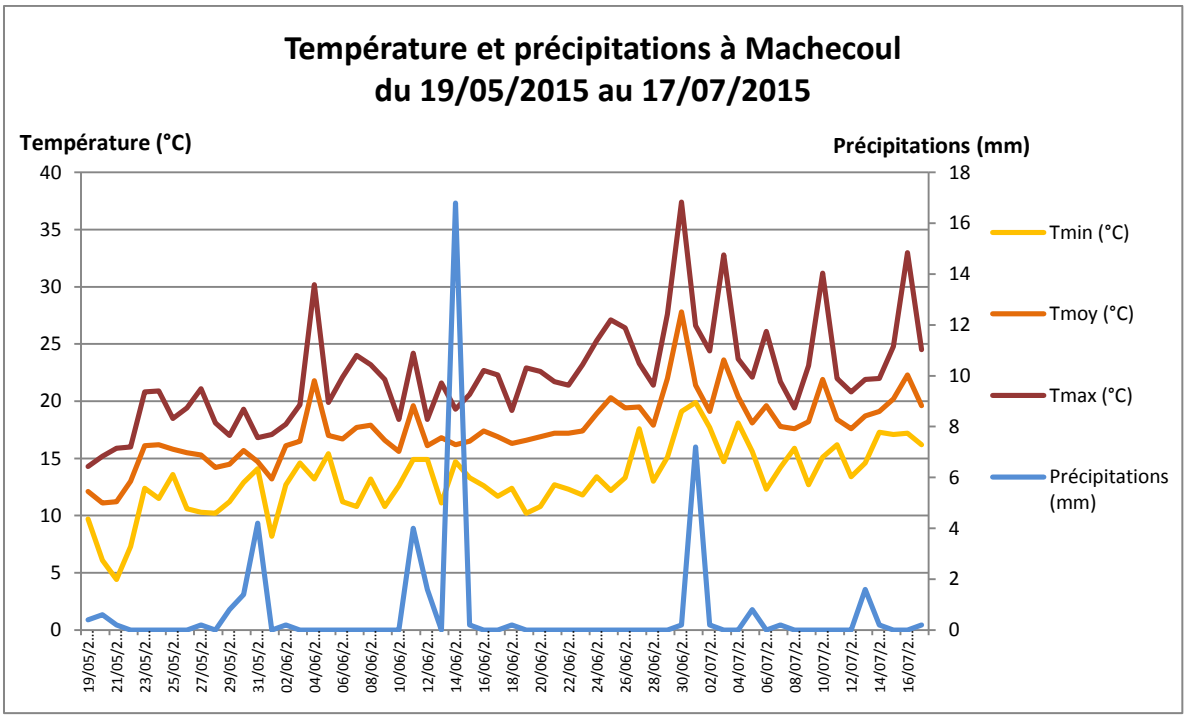




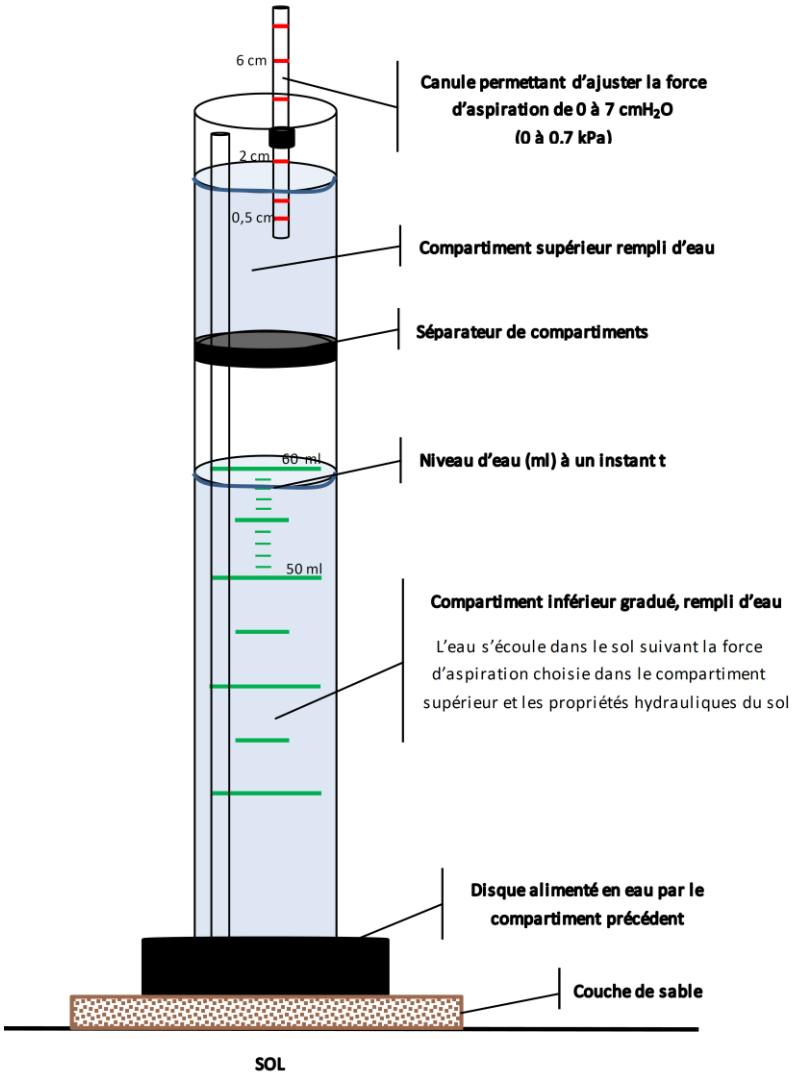
Parcelles d'essai des PROD3 (parcelle située à St-Philbert-de-Grand-Lieu, 44) et PROD4 (parcelle située à Machecoul, 44)

- PROD3 (St-Philbert-de-Grand-Lieu) : culture d'engrais verts du 20/05/2015 au 08/07/2015.
- PROD4 (Machecoul) : culture d'engrais verts du 19/05/2015 au 17/07/2015.

Données climatiques recueillies à Machecoul (44) – 15 km de la commune de St-Philbert-de-Grand-Lieu



Annexe 5 – Déterminer la perméabilité du sol par un test d'infiltrométrie : protocole d'utilisation de l'infiltromètre DECAGON®



Protocole du test d'infiltrométrie :

Les mesures d'infiltrométrie sont réalisées en surface et en profondeur (20 cm).

- Nettoyer et niveler la surface à tester (enlever les pierres et le sable grossier)
- Mettre une couche de sable fin (diamètre des particules compris entre 0 et 1 mm) sur le sol (cercle d'environ 10 cm de diamètre et 0,5 cm d'épaisseur). Cette couche de sable permet d'éliminer les aspérités et de maintenir la surface de l'infiltromètre en contact avec le sol. Cette condition est nécessaire pour la qualité des mesures.
- Remplir l'infiltromètre avec de l'eau puis le poser de manière à ce que la bougie poreuse soit sur le sable. Veiller à ce qu'elle soit bien en contact et perpendiculaire par rapport au sol. L'eau ne devrait pas s'écouler si la canule est enfoncée.
- Commencer le test d'infiltrométrie par les mesures de conductivité hydraulique à -0,6 kPa. Ajuster la canule dans le compartiment supérieur de l'infiltromètre à -6 cmH_2O (cf. schéma précédent).
  - Attendre que le régime des bulles soit régulier
  - Enclencher le chronomètre et noter le niveau d'eau initial dans le compartiment inférieur
  - Noter le niveau d'eau dans le compartiment inférieur au bout d'une minute d'écoulement, puis au bout de cinq minutes

- Renouveler la procédure au même emplacement pour une pression de -2 cmH_2O. Faire de même pour -0,5 cmH_2O
- Recommencer le test d'infiltrométrie en profondeur (20 cm) pour les 3 valeurs de potentiels

Traitement des données

Voici un exemple de tableau obtenu après une notation de test d'infiltrométrie :

	Pression d'aspiration (kPa)		
T (min)	0,6	0,2	0,05
0	89	86	87
1	88	78	75
5	81	54	40

Niveau d'eau initial dans l'infiltromètre (en ml)

Niveau d'eau dans l'infiltromètre (en ml) au bout d'une minute à une pression d'aspiration de 0,05 kPa

A partir des données collectées, il est possible de connaître la conductivité hydraulique (en mm/min) par conversion.

REFERENTIEL DE QUALITE MACHE

Version V
2013

CHAQUE PHOTO REPRÉSENTE LE DÉFAUT MAXI ADMIS DANS LA CLASSE DE COEFFICIENT

classes de coefficient	COTYLEDONS	FEUILLES	PLANTES
0	**1** Point noir sur extrémité **2** Ponctuations rougeâtres ou brunes sur cotylédon vert		**3** Sans défaut
0,2	**5** Début de jaunissement < 25 % **6** Coup de chaud sur extrémité **7** Piqûres ou ponctuations **8** Bord anthocyané	**10** Début de jaunissement **11** Début de brûlure ou de nécrose **12** Légère trace de mineuse avec ou sans larve **13** Piqûres **14** Léger dégât de chenille sans évolution sanitaire **15** Décoloration due à une superposition de feuilles sans limitation de surface	**20** Mâchure ou feuilles cassées **21** Montaison < 0,5 cm **22** Racines de 0,5 à 1 cm
0,5	**25** Jaunissement < 50% **26** légère brûlure ou nécrose **27** Galeries de mineuse < 30 % avec ou sans larve **28** Anthocyanement > 50 %	**30** Jaunissement < 25% **31** Légère brûlure ou nécrose **32** Dégât de mineuse < 30% avec ou sans larve **33** Piqûres sur toute la surface **34** Dégât de chenille sans évolution sanitaire **35** Feuilles anthocyanées	**41** Montaison < 1 cm **42** Racines > 1 cm et < 2 cm **43** Thiélaviopsis sur racine < 1 cm
1,2	**45** Jaunissement > 50% **46** brûlure ou nécrose **47** Galeries de mineuse > 30% avec ou sans larve **48** Type phoma : liseret rouge < 0,5 cm ou ponctuations rougeâtres	**50** Jaunissement > 25% **51** brûlure ou nécrose **52** Dégât de mineuse > 30% avec ou sans larve	**61** Montaison > 1 cm **62** Racines > 2 cm **63** Thiélaviopsis sur racine > 1 cm et < 2 cm
2	**65** Tache bactérienne **66** Brûlure importante ou nécrose **67** Galeries de mineuse avec évolution sanitaire **68** Type phoma	**70** Tache bactérienne **71** Brûlure importante ou nécrose **72** Dégât de mineuse avec évolution sanitaire **73** Type phoma sur nervure **74** Perforation évolutive **75** Botrytis et autres symptômes similaires	**80** Mâchure évolutive **81** Plante chlorosée **82** Flétrissement **83** Oïdium et nécroses foliaires

MPL **AOP Mâche Pays de la Loire** - 6 rue de la Flamme Olympique - ZA de Vlais - 44860 PONT-SAINT-MARTIN - Tél. 02 40 65 14 89 - Fax 02 72 68 58 37 - aop.mpl@orange.fr

Annexe 7 – Évaluation des mélanges sur les essais 2013-2015 par comparaison des rendements en matière verte

Les moyennes des rendements en matière verte sont comparées entre elles par ANOVA au seuil de 5%. Les lettres indiquent les groupes homogènes de moyennes d'après le test de Newman-Keuls (la lettre 'a' désignant le groupe ayant la moyenne la plus élevée).

Engrais vert implanté	Rendement en matière verte (t/ha)
PROD1 – Essai en 2013 (moyennes de 6 répétitions)	
Avoine - Millet - Vesce	43,55 ± 6,22 a
RGI - Sarrasin	45,12 ± 5,62 a
Sorgho - Phacélie	43,52 ± 4,33 a
PROD2 – Essai en 2013 (moyennes de 2 répétitions)	
Moha - Vesce	31,00 ± 1,62 a
Lupin - Sarrasin	22,50 ± 1,52 b
Avoine - Sarrasin	21,64 ± 4,34 b
Millet - Sarrasin	24,64 ± 0,51 b
RGI - Millet - Avoine	25,50 ± 1,31 b
RGI - Trèfle incarnat	21,00 ± 1,62 b
Moha - Vesce	23,68 ± 1,87 b
PROD3 – Essai en 2015 (moyennes de 2 répétitions) *	
Millet - Trèfle d'Alexandrie	33,15 ± 4,88
Seigle - Vesce - Trèfle incarnat	21,10 ± 0,14
Moha - Trèfle d'Alexandrie	31,50 ± 0,14
Seigle	24,37 ± 1,45
PROD4 – Essai en 2015 (moyennes de 2 répétitions)	
Avoine - Seigle	24,60 ± 3,25 b
Millet - Trèfle d'Alexandrie	35,55 ± 0,35 a
Seigle - Vesce - Trèfle incarnat	20,90 ± 0,85 b
Moha - Trèfle d'Alexandrie	26,85 ± 4,17 b
Seigle	25,50 ± 2,97 b

* Les postulats de l'ANOVA ne sont pas respectés pour l'analyse des données ; les moyennes ne sont pas comparées entre elles statistiquement

	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés Enseignant référent : Annie Salat

Auteur : Glynis Bentoumi--Loaëc Date de naissance : 18/04/1992	Organisme d'accueil : Comité Départemental de Développement Maraîcher Adresse : 6 rue de la Flamme Olympique - ZA de Viais 44860 Pont-Saint-Martin Maître de stage : Serge Mevel
Nb pages : 56 Annexe(s) : 7	
Année de soutenance : 2015	

Titre français : Acquisition de références locales et évaluation de l'intérêt d'engrais verts comme méthode améliorante des sols sableux en maraîchage nantais : un bilan du projet PATHOSOL (2013-2015)

Titre anglais : Gaining local references and evaluating green manuring as a sandy soil improving practice in Nantes' vegetable production area : a review of PATHOSOL project (2013-2015)

Résumé : Le maraîchage nantais actuel est caractérisé par une production spécialisée et intensive, conduisant à l'augmentation de la pression de maladies telluriques.
Dans le cadre du projet régional PATHOSOL (2013-2015) le CDDM évalue la méthode des engrais verts comme pratique améliorante du sol ; l'objectif est de maîtriser indirectement les bioagresseurs telluriques. Des essais ont été conduits en condition de production, d'une part pour acquérir des références locales sur les engrais verts (espèces adaptées, optimisation de la conduite de la culture), d'autre part pour évaluer l'intérêt d'engrais verts comme pratique améliorante (impact sur le sol et l'état sanitaire des cultures maraîchères suivantes).
Plusieurs espèces d'engrais verts (seigle, avoine, moha, millet, sorgho) se sont montrées adaptées aux contraintes et objectifs des maraîchers nantais ; ceux-ci produisent en moyenne 33 t/ha de matière verte et 8 t/ha de matière sèche.
Les résultats ne permettent pas de valider les engrais verts comme moyen d'agir sur les propriétés physiques des sols maraîchers nantais. De même, la maîtrise des bioagresseurs telluriques par la culture d'engrais verts n'a pas pu être démontrée.
Ces résultats ont été obtenus sur trois années de suivi ; il serait intéressant de poursuivre l'étude de l'impact d'engrais verts en maraîchage nantais à moyen-long terme.

Abstract: Specialized and intensive crop production characterizes today's vegetable production in Nantes' area, leading to an increase of soilborne pathogens.
As part of the regional project PATHOSOL (2013-2015), the CDDM evaluates green manuring as a soil improving practice; the aim is to indirectly control soilborne pathogens. Trials were carried out in growers' fields in order to gain references about green manuring in local vegetable growing conditions (adapted species, optimization of crop management) but also to evaluate green manuring as a soil improving practice (incidence of green manures on the soil and the following vegetable crops' health).
Various green manure species (rye, oat, foxtail millet, millet, sorghum) were adapted to the constraints and goals of Nantes' vegetable growers. On average, 33t/ha of fresh matter and 8t/ha of dry matter are produced by green manures.
Results didn't show any benefit from using green manures in order to act on soil properties. Likewise, control of soilborne pathogens by green manures couldn't be demonstrated.
These results were obtained after three years of monitoring; it would be interesting to carry on this study of green manuring incidence in the medium-to-long term.

Mots-clés : Engrais verts, Maraîchage, Propriétés du sol, Bioagresseurs telluriques, Loire-Atlantique

Key Words : Green manure, Vegetable production, Soil properties, Soilborne pathogens, Loire-Atlantique