

École Supérieure d'Agriculture d'Angers

55 rue Rabelais

49007 ANGERS

GR CIVAM PACA

MIN 13

84953 Cavaillon

M. CARLET Florian

Evaluation de pratiques de gestion de la fertilité des sols en maraîchage diversifié en PACA et de leurs effets sur la minéralisation de l'azote



Mémoire de fin d'études

Promotion 2011

Date de remise : 16/09/2016

GABAUD Louis

Elève ingénieur ESA

Patrons de mémoire :

COSTE Françoise

MAWOIS Marie

Résumé : Evaluation de pratiques de gestion de la fertilité des sols en maraîchage diversifié en PACA et de leurs effets sur la minéralisation de l'azote

Le maintien ou l'amélioration de la fertilité du sol est un enjeu majeur pour le maraîchage diversifié en Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA). La succession rapide des cultures sur des surfaces restreintes entraîne une intensité élevée d'exploitation des sols. Cela induit des problèmes culturaux liés à la structure des sols, phénomène aggravé par un climat propice à une minéralisation rapide des matières organiques. Depuis 2013, le Groupement Régional des Centres d'Initiative pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural de PACA (GR CIVAM PACA), mène un projet financé par le Compte d'Affectation Spécial "Développement Agricole et Rural" (CASDAR). Celui-ci a pour but de permettre la diffusion et la mise en place de pratiques agro-écologiques intégrées de gestion de la fertilité des sols au sein de collectifs de maraîchers diversifiés, par une démarche ascendante et collective. L'étude réalisée de mars à août 2016 traite du suivi de 4 essais, mis en place par des agriculteurs impliqués dans le projet. Les expérimentations visent à évaluer les pratiques que ceux-ci souhaitent mettre en place sur leurs exploitations, ainsi que leurs effets sur la minéralisation de l'azote. Ces essais concernent le travail du sol, l'emploi d'engrais verts, de paillages plastiques noirs ou végétaux et de matières organiques (précédent prairie, fumier et biomasse adventice fraîche employée comme amendement). Le retour d'expérience des maraîchers sur les pratiques testées est également recueilli par des entretiens semi-directifs. Comparés aux paillages végétaux (paille de blé à 1,0kg/m² ou d'orge à 1,6kg/m²), l'emploi de plastique noir augmente significativement la température du sol de 1,1°C à 2,7°C à 10cm de profondeur, et permet d'avancer la première récolte de 1 à 3 semaines dans la majorité des cas. En revanche, leurs effets sur la minéralisation de l'azote ne sont pas suffisamment marqués pour en tirer des informations fiables. Dans un autre essai, un engrais vert de petit épeautre (*Triticum monococcum*) semé le 1^{er} novembre 2015 à 830kg/ha et détruit par occultation peu avant montaison permet un gain de rendement (non significatif) de 152% pour une culture d'aubergines et de 93% pour une culture de courgettes, comparé à une conduite sans engrais vert. L'efficacité d'utilisation de l'azote minéral du sol est également supérieure pour ces mêmes cultures après engrais vert. Le travail du sol le 11 avril à l'aide d'une grelinette n'a pas d'effet significatif sur la densité apparente du sol et sur sa résistance mécanique à la pénétration. Il permet en revanche d'accroître la teneur en nitrates du sol de 93 à 200% (non significatif) durant environ 1 mois, la valeur maximale atteinte dans le sol travaillé étant de 56 kgN-NO₃⁻/ha. L'agriculteur n'est pas satisfait de cette pratique, qui crée des mottes compactes en surface du sol. Il est en revanche satisfait de l'effet observé de l'engrais vert sur l'autre essai, et signale que l'occultation à l'aide de 4kg de matière fraîche/m² de paille de luzerne est plus pratique qu'à l'aide d'une bâche de polyéthylène noir, celle-ci étant fréquemment emportée par le vent. Les deux agricultrices réalisant les essais comparatifs de paillages sont peu satisfaites du retard de croissance et de développement des tomates cultivées sur paille de céréales. Cependant, l'une signale que la structure du sol semble améliorée par cette dernière alors que le paillage plastique paraît induire une prise en masse de l'horizon superficiel. Par ailleurs, l'autre maraîchère remarque que la qualité gustative des tomates semble supérieure sur paille et que celles récoltées sur plastique noir sont moins fermes. Enfin, aucun des agriculteurs participant aux essais ne signale de différence économique ou organisationnelle gênante entre les divers traitements mis en place. Les expérimentations réalisées ont permis d'apporter des éléments de réponse aux questions que se posaient les maraîchers, que ce soit par les résultats obtenus à l'aide des suivis, ou par les observations que ceux-ci ont effectuées sur les cultures. Les adaptations envisagées des pratiques testées ainsi que les questionnements des agriculteurs sur ces modifications paraissent prouver l'intérêt de développer davantage les démarches participatives et le lien entre terrain et recherche.

Mots clés : maraîchage diversifié – fertilité des sols – minéralisation de l'azote – démarche ascendante.

Abstract : Assessment of soil fertility management practices in diversified vegetable cropping in the PACA region and effects on nitrogen mineralization.

Maintaining or improving soil fertility is a major stake for diversified vegetable cropping in Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA). The fast succession of crops on limited surfaces induces intensive use of lands. This can lead to soil fertility issues associated with soil structure, which are enhanced by the rapid mineralization of soil organic matter, due to the warm Mediterranean climate. Since 2013, the Groupement Régional des Centres d'Initiative pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural de PACA (GR CIVAM PACA) drives a project financed by the Compte d'Affectation Spécial "Développement Agricole et Rural" (CASDAR). Its aim is to allow the diffusion and the implementation of integrated agroecological practices for soil fertility management, within diversified vegetable crop farmers groups, by a collective and bottom-up approach. This study deals with 4 field experiments, designed by farmers involved in the project, and occurs between March and April 2016. These experiments aim at assessing the practices that farmers want to set up on their farms and the effect of these practices on nitrogen mineralization. The topics of the trials are soil tillage, green manures, black plastic and straw mulching, and soil organic matters (brought by a preceding grassland, manure, and fresh weed biomass used as an amendment). Farmers' feedback on the tested practices will also be collected by semi-directive interviews. Compared with straw mulches (wheat straw at 1,0kg/m² or barley straw at 1,6kg/m²), plastic mulching increases soil temperature at 10cm depth from 1,1°C to 2,7°C. First harvest can be done between 1 to 3 weeks earlier than with straw mulching. However, mulches effects on nitrogen mineralization aren't clear enough to draw reliable conclusions. In another trial *Triticum monococcum* green manure has been sowed on the 1st of November 2015 at 830kg/ha and occulted just before the elongation stage. On this treatment, the yield of zucchini are 152% higher (not significant) and those of eggplant are 93% higher (not significant) than on the control. Nitrogen use efficiency is also higher for these crops on the green manure treatment. Broadfork tillage in spring (11th of April) has no significant effect on soil bulk density, neither on soil penetration resistance. On the other hand, soil mineral nitrogen is higher after broadfork tillage, with values ranging from 93% to 200% higher than on the control (not significant) during a month. The highest value during this period is 56kgN-NO₃⁻/ha. The farmer is not satisfied with the effect of this practice, which creates compact clods on the soil surface. Nonetheless, he is satisfied with the results obtained with the spelt green manure on his other field trial. He mentions that occulting the green manure with alfalfa straw (4kg of fresh biomass/m²) is more convenient than with black plastic mulch which is often carried away by the wind. The two other farmers carrying comparative field trials on straw and plastic mulching aren't satisfied with the slow growth and development of tomatoes induced by straw mulching. However, one of them mentions that soil structure seems to be improved by this later, whereas plastic mulching seems to create a dense structure on the upper soil layer. Furthermore, the other farmer notices that tomatoes taste quality and firmness are poorer with black plastic treatment. Finally, none of the farmers indicate that the treatments tested show clear differences with their usual practices in terms of costs or time organization. Experiments provide answers to farmer's questions, either by the results of the trial monitoring or by their own observations on the crops. The practices modification that farmers consider and their questioning show evidence for the interest of developing bottom-up approaches and links between research and farmers.

Key words: diversified vegetable cropping – soil fertility – nitrogen mineralization – bottom-up approach.

Remerciements

J'adresse en premier lieu mes remerciements à Florian Carlet, mon maître de stage, pour son soutien méthodologique, pour m'avoir guidé dans mes réflexions et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens également à remercier Mireille Navarrete de l'unité Ecodev de l'INRA d'Avignon, pour ses nombreux conseils et son soutien méthodologique riche en réflexions et en enseignements.

Je souhaite aussi remercier mes patrons de mémoire de l'ESA, Françoise Coste et Marie Mawois pour leur accompagnement et leur aide dans la rédaction de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement les maraîchers du groupe, Patrick Vidal, Solange Follet, Marion Peyric, Guillaume Argentin, Tristan Rique et Eric Barrière pour leur accueil chaleureux et leur sympathie, et pour leur investissement dans l'installation des essais et la réalisation de plusieurs des mesures exploitées dans ce rapport. Je les remercie également de m'avoir permis de mettre en pratique mes connaissances et d'en acquérir de nouvelles, ce fut très stimulant.

Je remercie également Marion Genty, François Marcadé et Annick Nicolas, l'équipe du GR CIVAM PACA, ainsi que les membres d'Agribio 84 et de l'ADEAR pour l'atmosphère amicale qui règne dans les locaux du M.I.N. de Cavaillon.

Je tiens également à remercier Florian Carlet et François Marcadé pour me permettre de terminer le suivi des essais et de travailler à leur valorisation.

Je remercie enfin mes parents pour toute l'énergie, le soutien moral, logistique et économique qu'ils m'ont apporté, pour avoir facilité de leur mieux l'aboutissement de mes études et pour m'avoir toujours soutenu dans mes choix.

Sigles et abréviations

04 : n° du département des Alpes de Hautes Provence

13 : n° du département des Bouches-du-Rhône

84 : n° du département du Vaucluse

AB : Agriculture Biologique

ADméd : Agricultures Durables en Méditerranée

CASDAR : Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural

CIVAM : Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural

FN CIVAM : Fédération Nationale des Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural

GRAB : Groupement de Recherche en Agriculture Biologique

GR CIVAM : Groupement Régional des Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ITAB : Institut Technique en Agriculture Biologique

MCAE : Mobilisation Collective pour L'AgroEcologie

PACA : Provence-Alpes-Côte D'azur (région)

SAU : Surface Agricole Utile

Table des matières

INTRODUCTION	1
I. CONTEXTE DE L'ETUDE	3
1. Contexte et enjeux sur la fertilité des sols du maraichage diversifié en région PACA.....	3
1.1. CONTEXTE PEDOCLIMATIQUE	3
1.2. CONTEXTE DEMOGRAPHIQUE.....	4
1.3. PLACE DU MARAICHAGE BIOLOGIQUE DIVERSIFIE DANS LE CONTEXTE AGRICOLE REGIONAL	5
2. Présentation de la mission de stage.....	7
2.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE ET DE SES ACTIONS.....	7
II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	13
1. Influence des paramètres pédoclimatiques sur la minéralisation de l'azote organique	13
1.1. DEFINITIONS	13
1.2. TENEUR EN EAU DU SOL.....	14
1.3. TEMPERATURE.....	14
1.4. pH	14
1.5. TEXTURE	15
1.6. STRUCTURE.....	15
1.7. COMPOSITION DE LA MO/RESIDUS.....	15
2. Pratiques.....	16
2.1. AMENDEMENTS ORGANIQUES	16
2.2. ENGRAIS VERTS.....	17
2.3. PAILLAGES.....	18
2.4. TRAVAIL DU SOL	20
III. PROBLÉMATIQUE	21
IV. MATÉRIELS ET MÉTHODE	22
1. Dispositifs d'essais et mesures réalisées.....	22
1.1. EFFET DU TRAVAIL DU SOL A LA GRELINETTE SUR LA STRUCTURE DU SOL ET LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE.....	22
1.2. EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT ÉPEAUTRE SUR LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE A LA PÉNÉTRATION DU SOL ET LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE	25
1.3. ÉVALUATION DE PRATIQUES DE PAILLAGES ET D'AMENDEMENTS	28
2. Méthodes de récolte et de traitement des données	33

2.1.	METHODES DE PRELEVEMENT ET DE MESURES ET TRAITEMENTS STATISTIQUES	33
2.2.	RETOUR D'EXPERIENCE DES AGRICULTEURS SUR LA PRATIQUE TESTEE	38
V.	RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION	39
1.	Effet du travail du sol à la grelinette sur la structure du sol et la minéralisation de l'azote organique.	39
1.1.	INFLUENCE DU TRAVAIL A LA GRELINETTE SUR LA STRUCTURE DU SOL	39
1.2.	EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL (PATRICK VIDAL)	45
1.3.	DISCUSSION GENERALE	46
1.4.	RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTEUR.....	47
2.	Effet d'un engrais vert de petit épeautre sur la minéralisation de l'azote organique	48
2.1.	INFLUENCE DU PRECEDENT ENGRAIS VERT SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL.....	48
2.2.	INFLUENCE DU PRECEDENT ENGRAIS VERT SUR L'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL :	53
2.3.	COMPARAISON DES RENDEMENTS OBTENUS SUR LES PLANCHES AYANT COMPORTE OU NON UN ENGRAIS VERT :	54
2.4.	DISCUSSION GENERALE	55
2.1.	RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTEUR.....	57
3.	Evaluation des pratiques de paillage et d'amendement.....	58
3.1.	EFFET DES PAILLAGES PLASTIQUE NOIR ET DE PAILLE DE CEREALES SUR LA TEMPERATURE DU SOL.....	58
3.2.	EFFET DES PAILLAGES PLASTIQUE NOIR ET DE PAILLE DE CEREALES SUR LA PRECOCITE DE DIFFERENTES VARIETES DE TOMATE.....	64
3.3.	EFFET DU TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT SUR L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES DANS LE SOL.....	68
3.4.	DISCUSSION GENERALE	71
3.5.	RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTRICE – SOLANGE FOLLET	75
3.6.	RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTRICE – MARION PEYRIC.....	76
4.	Synthèse générale	77
4.1.	RETOUR D'EXPERIENCE DES AGRICULTEURS.....	77
4.2.	RESULTATS DES ESSAIS.....	78
4.3.	LIMITES DES SUIVIS REALISES.....	79
	CONCLUSION	80

Table des illustrations

Figure 1 : TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES EN PACA ET EN FRANCE SELON LEURS SYSTEMES DE PRODUCTION DOMINANTS, BASE SUR LE RECENSEMENT AGRICOLE 2010 DE LA DRAAF (AGRESTE, 2014).	5
Figure 2 : TYPE DE GRELINETTE EMPLOYEE DANS L'ESSAI (LARGEUR : 60CM ; PROFONDEUR DE TRAVAIL : 25cm) REALISE CHEZ PATRICK VIDAL.....	23
Figure 3 : POSITIONNEMENT DES PLANCHES DE CULTURE FAISANT PARTIE DE L'ESSAI REALISE CHEZ ERIC BARRIERE.....	25
Figure 4 : DISPOSITIF DE L'ESSAI REALISE CHEZ PATRICK VIDAL. EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT EPEAUTRE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL ET LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE.....	26
Figure 5 : DISPOSITIF D'ESSAI CHEZ SOLANGE FOLLET.....	29
Figure 6 : DISPOSITIF D'ESSAI CHEZ MARION PEYRIC.	32
Figure 7 : TARIERE GOUGE EMPLOYEE POUR LES PRELEVEMENTS DE SOL.	34
Figure 8 : NITRACHEK ET BADELETTES MERCKOQUANT UTILISES POUR LE DOSAGE DES NITRATES DANS LE SOL.	34
Figure 9 : PRELEVEMENT DE SOL DE L'HORIZON 10-15CM PAR LA METHODE DES CYLINDRES.....	35
Figure 10 : PENETROMETRE STATIQUE MANUEL EMPLOYE POUR LA MESURE DE RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL.....	36
Figure 11 : COMPARAISON DES DENSITES APPARENTES (D_a) D'HORIZONS COMPACTE D'UNE PLANCHE TRAVAILLEE A LA GRELINETTE ET D'UN PLANCHE NON TRAVAILLEE (ERIC BARRIERE).....	40
Figure 12 : COMPARAISON DES DENSITES APPARENTES (D_a) D'HORIZONS PRENANT EN MASSE D'UNE PLANCHE DE CULTURE TRAVAILLEE A LA GRELINETTE ET D'UNE PLANCHE NON TRAVAILLEE (PATRICK VIDAL).....	40
Figure 13 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 10-20CM D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (ERIC BARRIERE).....	42

Figure 14 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 10-20CM D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (ERIC BARRIERE).....	43
Figure 15 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (PATRICK VIDAL).	43
Figure 16 : EFFET DU TRAVAIL DU SOL A LA GRELINETTE SUR LA DYNAMIQUE DE MINERALISATION DE L'AZOTE (PATRICK VIDAL).	45
Figure 17 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT DE PETIT EPEAUTRE.....	49
Figure 18 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 0-30cm DE SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.	51
Figure 19 : EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT ÉPEAUTRE SUR LA DYNAMIQUE DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE.	53
Figure 20 : COMPARAISON DES RENDEMENTS OBTENUS SUR UN SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.	54
Figure 21 : COMPARAISON DES TEMPERATURES MESUREES A 10cm DE PROFONDEUR DANS LE SOL DES PASSE-PIEDS (MARION PEYRIC).	59
Figure 22 : COMPARAISON DES TENEURS EN EAU DU SOL, MESUREES SUR 0-25cm DE PROFONDEUR DANS LES PARTIES AMENDEES ET NON AMENDEES DES PLANCHES DE CULTURE (MARION PEYRIC).	59
Figure 23 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR ET DE LA TEMPERATURE DU SOL A 10cm DE PROFONDEUR DU SOL AMENDE SOUS PAILLAGE PLASTIQUE NOIR OU PAILLE (MARION PEYRIC).	60
Figure 24 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE A 10cm DE PROFONDEUR DU SOL AMENDE SOUS PAILLAGE PLASTIQUE NOIR OU PAILLE (SOLANGE FOLLET).....	61
Figure 25 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT. VARIETES « ANANAS » ET « NOIRE DE CRIMEE » (SOLANGE FOLLET).....	64
Figure 26 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET). VARIETE « ANANAS ».....	65

Figure 27 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET). VARIETE « NOIRE DE CRIMEE ».	65
Figure 28 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « MOON GLOW ».	66
Figure 29 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « DIPLOM F1 ».	67
Figure 30 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET).	68
Figure 31 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « RAISIN VERT ».	69
Figure 32 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « MOON GLOW ».	70
Figure 33 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « DIPLOM F1 ».	70

INTRODUCTION

Le maraîchage diversifié est typique des exploitations de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Ses caractéristiques principales sont un nombre élevé d'espèces cultivées (20 à 40) et des surfaces comprises entre 1 et 5ha. La succession rapide des cultures qui en découle entraîne ainsi une intensité de travail du sol élevée et peut induire des problèmes de structure du sol. Par ailleurs, le climat méditerranéen accentue la minéralisation de la matière organique, cruciale pour maintenir la fertilité des sols.

Des travaux réalisés en 2013 au Groupement Régional des Centres d'Initiatives pour Valoriser L'Agriculture et le Milieu Rural (GR CIVAM) de PACA identifient la réduction du travail du sol et l'intégration d'engrais verts comme leviers pour remédier aux problèmes culturels liés au contexte méditerranéen. La même année, le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt lance l'appel à projet « *Mobilisation Collective pour l'AgroEcologie* » (MCAE), financé par le Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR). Celui-ci vise à améliorer l'impact des systèmes de production agricoles sur l'environnement par des démarches collectives en faveur de l'agroécologie.

Le GR CIVAM PACA travaille sur des projets d'animation entre acteurs du milieu rural ou encore sur la question de la durabilité des exploitations agricoles méditerranéennes dans le cadre du réseau Agriculture Durable en Méditerranée (ADméd). Ses valeurs s'inscrivent dans des démarches ascendantes et plaçant l'action collective au centre du développement rural. Travaillant en lien avec deux groupes de maraîchers diversifiés dans le cadre du réseau ADméd, il répond à l'appel à projet CASDAR MCAE et est sélectionné pour celui-ci.

L'objectif global du GR CIVAM PACA à l'issue de ce projet est de permettre la diffusion et la mise en place de pratiques agro-écologiques intégrées de gestion de la fertilité des sols au sein de collectifs de maraîchers. La première action engagée permet aux agriculteurs impliqués de sélectionner les engrais verts, les matières organiques et le travail du sol comme axes de travail pour faire progresser leurs pratiques. Différentes visites et rencontres avec des experts leur permettent d'acquérir certaines des connaissances et savoirs-faire nécessaires à la mise en place de ces nouvelles pratiques.

L'étude présentée dans le présent rapport traite d'essais mis en place par les agriculteurs pour évaluer les pratiques liées à l'utilisation d'engrais verts, la réduction du travail du sol et la gestion des matières organiques. Ces dernières regroupent notamment l'emploi de paillages végétaux qui sont, avec le plastique noir une pratique courante en maraîchage.

Les questions initiales des agriculteurs ont permis de centrer l'étude réalisée sur la minéralisation de l'azote, processus essentiel pour les systèmes de production n'ayant pas recours à la fertilisation minérale.

La mise en place des dispositifs d'essai ainsi que leur gestion par les maraîchers concernés a également pour intérêt de tester chaque pratique en conditions réelles et ainsi de recueillir le retour d'expérience de chacun des agriculteurs.

La question à laquelle tente de répondre la présente étude est : **quelle est l'efficacité des pratiques de gestion de la fertilité des sols centrées sur la réduction du travail du sol, l'emploi d'engrais verts, de paillages organiques et plastiques et d'amendements organiques pour répondre aux objectifs des agriculteurs et quel est leur effet sur la minéralisation de l'azote ?**

L'objectif est également de savoir **comment chaque maraîcher adapte l'expérience tirée de l'essai pour son système de culture ?**

Dans un premier temps, la présentation du contexte agricole en PACA permettra de comprendre les enjeux de gestion de la fertilité du sol en maraîchage diversifié. Puis sera détaillée la démarche d'élaboration d'une question centrale mise en œuvre pour orienter cette étude à partir d'un projet « multi-questions ». Une analyse bibliographique apportera ensuite les éléments nécessaires pour définir quels facteurs influencent la minéralisation de l'azote et quelle est l'incidence des pratiques étudiées dans le projet sur ces facteurs. Après description de chaque essai et des suivis mis en place pour répondre aux questions des maraîchers, leurs résultats seront présentés puis discutés en lien avec les observations des agriculteurs concernés. Les retours d'expérience de ces derniers permettront enfin de déterminer les axes de progrès des pratiques testées.

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

Le présent rapport a pour objet l'étude de pratiques de gestion de la fertilité des sols en maraîchage diversifié biologique dans la région PACA. Le contexte pédoclimatique et démographique de cette région est présenté dans un premier temps.

1. Contexte et enjeux sur la fertilité des sols du maraîchage diversifié en région PACA.

1.1. CONTEXTE PEDOCLIMATIQUE

1.1.1. Climat méditerranéen et types de sols

Le climat de la région PACA est de type méditerranéen. Il est caractérisé par des étés chauds et secs¹, et par des températures hivernales rarement inférieures à 0°C. Les précipitations annuelles varient entre 500 et 900mm, et sont concentrées à l'automne et au printemps, souvent sous forme de violentes averses (65 à 70 jours de pluie par an en moyenne). Le faible nombre de jours de pluie se traduit par un fort ensoleillement, avec des valeurs annuelles moyennes supérieures à 2700 heures. Cette caractéristique est également liée à la présence de vent violent et sec, provenant de la vallée du Rhône (mistral) (CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LANGUEDOC ROUSSILLON. ; 2012 ; PINATEL, 2015 ; GREC-PACA, 2016). Enfin, la région présente un important déficit hydrique du fait des faibles précipitations et d'une évapotranspiration potentielle (ETP²) élevée, favorisée par de fortes températures, un ensoleillement important et des vents violents (ETP journalière comprise entre 4,1 et 6,8mm en juillet-août 2016 en PACA ; AFIDOL, 2016). Cela a d'ailleurs conduit l'INRA à retenir l'irrigation comme intrant indispensable à la production agricole dans la région (CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LANGUEDOC ROUSSILLON, 2012). Enfin, les sols de la région sont majoritairement de type alluviaux fluviaux et fersiallitiques (AFES, 2008).

¹ Un mois sec est un mois durant lequel les précipitations sont inférieures à deux fois la température moyenne mensuelle (PINATEL, 2015).

² Correspond à « la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée au niveau d'un couvert végétal continu, en phase active de croissance, lorsqu'il est abondamment alimenté en eau. » (ELDIN *et al.*, 1969)

1.1.2. Enjeux pour la fertilité des sols

La fertilité des sols est définie comme son aptitude à fournir de l'eau et des nutriments en quantités adéquates pour la croissance et la reproduction des plantes (FAO, 2016). Elle relève de composantes physiques, chimiques et biologiques, au centre desquelles la matière organique joue un rôle clé, notamment dans le cas de l'agriculture biologique (CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LANGUEDOC ROUSSILLON, 2012 ; ALTIERI *et al.*, 2015)

Le climat méditerranéen implique de fortes contraintes sur les sols agricoles. Les températures estivales élevées, dans le cas de cultures souvent irriguées, favorisent des taux de décomposition élevés de la matière organique du sol (DIACONO et MONTEMURRO, 2010). Par ailleurs, le régime des précipitations et les vents violents entraînent de forts problèmes d'érosions, dont 29% des sols sont menacés en France méditerranéenne (MONTANARELLA, 2016).

1.2. CONTEXTE DEMOGRAPHIQUE

La région PACA est la troisième région la plus peuplée de France, et comptait 4,9 millions d'habitants en 2013. Elle est également celle qui a connu la plus forte hausse de population au cours des cinquante dernières années (+ 73 % entre 1962 et 2009) ce qui a ainsi entraîné une urbanisation rapide. Par ailleurs, le taux d'augmentation de la population périurbaine et rurale est deux fois supérieur à ce dernier, augmentant de 1,5% chaque année entre 1999 et 2008 (PAILLER *et al.*, 2011 ; PDR PACA, 2013).

Ces dynamiques démographiques consomment de l'espace agricole, et entre 1970 et 2000, la surface agricole productive³ a diminué de 20%. Par ailleurs, la disponibilité en surfaces constructibles est faible et accroît ainsi la pression foncière sur les espaces naturels et agricoles. L'attractivité résidentielle de la région diminue depuis 10 ans, du fait du prix au m² habitable élevé, plaçant la région en 2^{ème} position derrière la région Ile de France. Mais malgré cela, il est estimé que la perte de Surface Agricole Utile (SAU) s'élèvera à 5%, du fait de la pression d'urbanisation (PAILLER *et al.*, 2011).

Aux risques de diminution de la fertilité des sols inhérente au climat local, vient ainsi s'ajouter une dynamique démographique qui accroît l'intensité d'exploitation des sols.

³ Surface agricole utilisée dont est déduite la surface toujours en herbe peu productive (parcours, landes, etc.).

1.3. PLACE DU MARAICHAGE BIOLOGIQUE DIVERSIFIE DANS LE CONTEXTE AGRICOLE REGIONAL

1.3.1. Place du maraichage dans les productions agricoles de PACA

En région PACA, le maraîchage représente la 5^{ème} production végétale (en SAU) derrière les grandes cultures, la viticulture, l'arboriculture et les Plantes à Parfum Aromatiques et Médicinales (PPAM) (CHAMBRE D'AGRICULTURE PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR, 2016). En revanche, la proportion d'agriculteurs maraîchers y est sept fois supérieure à celle observée au niveau national en 2010 (Figure 1). Cette situation s'explique par le développement des voies ferrées au 19^{ème} siècle et des transports routiers au 20^{ème} siècle qui permirent de délocaliser les productions maraîchères dans des régions aux conditions climatiques favorables, telles que le sud de la France (REY *et al.*, 2015 ; VIDAL, 2015). En effet, les fruits et légumes ne pouvant pas être conservés suffisamment longtemps pour être acheminés sur de longues distances, ces productions étaient traditionnellement situées à proximité des grandes villes.

On constate également que la région PACA est principalement tournée vers la viticulture et l'arboriculture (plus d'une exploitation sur quatre), alors que l'élevage est une production largement minoritaire par rapport au reste du territoire (Figure 1).

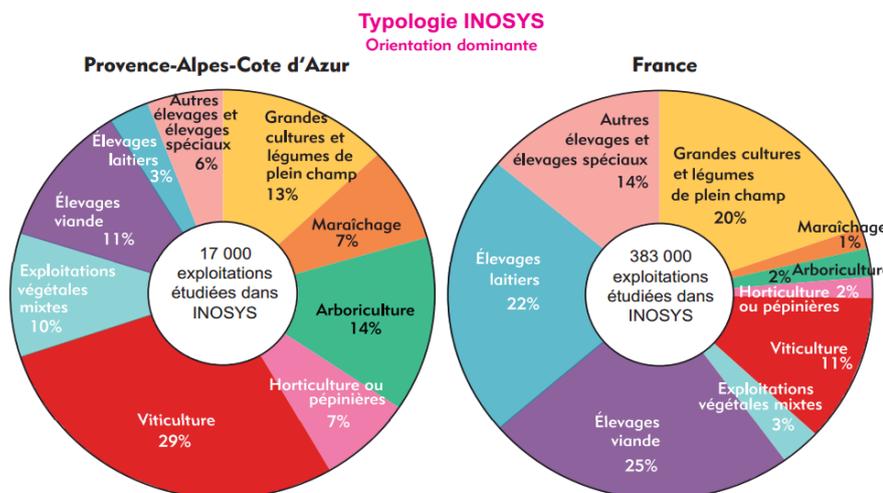


Figure 1 : TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS AGRICOLES EN PACA ET EN FRANCE SELON LEURS SYSTEMES DE PRODUCTION DOMINANTS, BASE SUR LE RECENSEMENT AGRICOLE 2010 DE LA DRAAF (AGRESTE, 2014).

1.3.2. Place de l'agriculture biologique et de la vente en circuits courts

Durant la saison estivale, les conditions sèches provoquées par de faibles précipitations couplées à un fort ensoleillement et des vents secs et fréquents limitent le développement des pathogènes et permettent également la culture de nombreuses espèces légumières (GUEUSQUIN, 2012 ; PINATEL, 2015). Ainsi, en 2014, PACA est la région dont la part de SAU convertie ou en conversion à l'agriculture biologique est la plus élevée de France (15,4%

contre 4,14% pour la moyenne nationale) (CHAMBRE D'AGRICULTURE PACA, 2016 ; AGENCE BIO, 2016).

Par ailleurs, la commercialisation en circuits courts concerne 38% des exploitations agricoles de la région (contre 21% en France). 56 % de ces exploitations sont des fermes en maraîchage-horticulture (CHAMBRE D'AGRICULTURE PACA, 2016). Ce mode de vente est encouragé par une forte densité de population au pouvoir d'achat élevé et favorisant la pratique du maraîchage diversifié, en soumettant les producteurs à la demande directe de consommateurs recherchant une gamme large et variée de produits (REGION PACA, 2016).

1.3.3. Les caractéristiques du maraîchage diversifié

Le maraîchage diversifié se caractérise par la culture de 20 à 40 espèces différentes, sur des surfaces allant de 1 à 5ha et dont 5 à 50% sont sous abri. Ces cultures sont généralement irriguées et sont préférentiellement vendues via des circuits courts, entraînant ainsi la nécessité d'une production continue sur l'année. La complexité de ce mode de production réside dans le besoin de disposer d'une gamme large de légumes et en quantités suffisantes. Il nécessite ainsi une excellente maîtrise technique de l'organisation et de la production (REY *et al.*, 2015).

1.3.4. Enjeux liés à la fertilité des sols en maraîchage biologique diversifié en PACA

Ce mode de production entraîne des successions rapides de cultures, générant ainsi de nombreux passages d'engins et par conséquent la nécessité d'un travail du sol soigné pour l'implantation des cultures (VEDIE & BUFFARD, 2013). Par ailleurs, l'interdiction de recourir aux herbicides en agriculture biologique, le climat favorable à la croissance des végétaux ainsi que l'irrigation des cultures favorise la croissance des adventices et augmente le nombre d'interventions de travail du sol. Ces effets viennent s'ajouter à ceux d'un climat favorable à la dégradation de la matière organique, dans des sols dont l'intensité d'exploitation devrait s'accroître compte tenu de la pression d'urbanisation élevée. De plus, la faible ressource en effluents d'élevage dans la région limite les solutions disponibles pour maintenir le potentiel de fertilité des sols (CAVOSKI *et al.*, 2016).

Ce contexte explique les nombreuses expérimentations menées depuis 2001 par l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB) et le Groupement de Recherche en Agriculture Biologique (GRAB) sur la réduction du travail du sol et l'intégration de couverts végétaux en interculture.

2. Présentation de la mission de stage

2.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE ET DE SES ACTIONS

2.1.1. Les CIVAM

Les Centres d'Initiative pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural (CIVAM) sont des associations loi 1901 issues de rapprochement dans les années 1950 d'instituteurs agricoles et de la Ligue Française de l'Enseignement (LORIOUX *et al.*, 2011). Ils sont structurés au sein d'un réseau de groupes locaux répartis sur 17 régions, de fédérations départementales et régionales, et d'une Fédération Nationale (FN CIVAM).

Les CIVAM sont impliqués dans des travaux d'animation entre acteurs du milieu rural, d'accompagnement technique, de formation et de diffusion des connaissances, avec pour objectif le développement rural et l'autonomie des agriculteurs. Leurs actions reposent sur des thèmes tels que les systèmes de production économes et autonomes, les circuits courts, l'accueil social et éducatif ou encore l'installation. La particularité de leurs activités est de placer les agriculteurs et l'action collective au centre de leurs démarches d'innovation, de recherche et d'évolution des pratiques (FNCIVAM, 2015).

2.1.2. Le GR CIVAM PACA

Le Groupement Régional des CIVAM de PACA (GR CIVAM PACA) regroupe en tout 11 associations locales⁴. Il travaille sur différents programmes tels que l'égalité Femmes-Hommes en milieu rural, l'accueil pédagogique et l'accueil social à la ferme, le lien entre consommateurs et producteurs, ou encore la question de la durabilité des exploitations agricoles méditerranéennes dans le cadre du réseau Agriculture Durable en Méditerranée (ADméd, ADMED, 2016). Ce dernier, est porté par le GR CIVAM PACA et la Fédération Régionale des CIVAM de Languedoc-Roussillon (FR CIVAM LR). Il a notamment pour objectif d'identifier les problématiques agricoles particulières de la zone méditerranéenne, et de travailler collectivement avec les agriculteurs pour proposer des leviers d'action concrets. Le projet CASDAR sur lequel porte le stage présenté dans ce rapport est issu du programme ADméd.

2.1.3. Le projet Casdar « Mobilisation Collective pour l'Agroécologie »

2.1.3.1. Origines

Dans le cadre du programme ADméd, un stage de fin d'étude d'ingénieur agronome a été réalisé au GR CIVAM PACA en 2013. Celui-ci a permis de mettre en évidence et de détailler

⁴ 2 fédérations départementales des CIVAM (04 et 84), 3 groupes d'agriculteurs biologiques, 3 groupes d'oléiculteurs (Groupement des Oléiculteurs de Haute Provence et du Luberon, Groupe Oléicole des Bouches du Rhône, Groupement des oléiculteurs de Vaucluse), CIVAM apicole des Alpes Maritimes, CIVAM Reagri et CIVAM de Cavailon.

le besoin des maraîchers de développer des pratiques innovantes de gestion de la fertilité des sols. Plusieurs entretiens et profils culturels ont permis d'identifier la réduction du travail du sol et l'intégration de plantes de service dans les rotations comme axes de travail, notamment pour apporter des réponses aux problèmes de structure et de fertilisation azotée du sol (PASSARIEU, 2013).

La même année, le ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt lance l'appel à projet « *Mobilisation Collective pour l'AgroEcologie* » (MCAE), financé par le Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR). Celui-ci a pour but d'améliorer collectivement l'impact des systèmes d'exploitation sur l'environnement et d'en préserver ou d'en améliorer les performances économiques, par des démarches collectives et ascendantes en faveur de l'agroécologie (ALIM'AGRI, 2013).

Le GR CIVAM PACA travaillait déjà en lien avec deux groupes de maraîchers diversifiés, dans le cadre du programme ADméd. Le premier groupe, situé au sud du massif du Luberon, échangeait de manière informelle depuis plus de 7 ans sur les modes de production et d'organisation en Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne (AMAP). Il est constitué de 15 agriculteurs. Le second groupe, provient du Collectif des Agriculteurs du Parc du Luberon et est situé au nord du massif. Il est constitué de 7 agriculteurs. Chacun de ces groupes souhaite mettre en place une approche collective leur permettant de faire progresser leurs pratiques en termes de gestion de la fertilité du sol. Ainsi, la volonté des maraîchers et les valeurs défendues par les CIVAM étant cohérents avec les objectifs et les critères de l'appel à projet CASDAR MCAE, le GR CIVAM PACA a répondu et a été sélectionné pour ce dernier.

2.1.3.2. *Déroulement chronologique et principe*

Le projet, nommé « Organisations collectives pour une meilleure gestion de la fertilité des sols en maraîchage diversifié », a été structuré en 4 actions chronologiques.

- L'action 1 (janvier à septembre 2014) consistait à faire un état des lieux des pratiques, de leurs effets sur le sol et de définir quels axes de travail étaient envisageables pour améliorer la fertilité des sols pour chaque collectif. C'est à l'issue de cette action que **3 axes de travail ont été établis : le travail du sol, les amendements organique et l'emploi d'engrais verts**. Chaque axe a ensuite été décomposé en sous-problèmes. Ceux-ci correspondaient à des questions que se posaient les maraîchers sur la gestion de la fertilité des sols et propres à leurs exploitations (immobilisation de l'azote liée aux paillages à l'aide de bois raméal fragmenté ou de paille, stabilisation de la structure d'un limon battant par l'emploi d'engrais verts,...).
- L'action 2 (octobre 2014 à mars 2016) a consisté à définir et mobiliser les connaissances nécessaires pour mettre en place de nouvelles pratiques répondant aux sous-problèmes identifiés. Ces savoirs ont été mobilisés à la fois à partir d'échanges entre pairs et partenaires techniques (consultants, chercheurs), de formations et de voyages d'étude sur des pratiques innovantes, et de méthodes simples d'évaluation de la fertilité du sol, réalisables en autonomie (test bêche, emploi d'un pénétromètre,...).
- L'action 3 (mars 2015 à octobre 2016), actuellement en cours, consiste à **mettre en place des essais chez plusieurs agriculteurs de chaque collectif afin de tester les pratiques**

qu'ils souhaitent mettre en œuvre sur leurs exploitations. Le choix leur est laissé de définir eux même quelle pratique tester, la seule exigence imposée étant de respecter au moins un des trois axes de travail définis à l'issue de l'action 1. La démarche ascendante consiste ici à laisser à l'agriculteur, expert du fonctionnement de son exploitation, de son contexte et de ses objectifs, le choix de la pratique à mettre en place et de l'accompagner dans la mise en œuvre et le suivi de l'essai permettant de l'évaluer.

- L'action 4 (janvier à décembre 2016), également en cours, a pour objectif de diffuser les acquis du projet (pratiques, méthodologies du projet et résultats des essais), à une échelle locale (groupes de maraîchers impliqués, partenaires du projet), régionale et nationale, notamment via le site internet du programme ADMéd.

L'objectif global du CIVAM à l'issue du projet est d'avoir permis la mise en place de pratiques agro-écologiques intégrées de gestion de la fertilité des sols au sein de collectifs de maraîchers. En ce sens, la démarche ascendante du projet revêt plusieurs intérêts. Tester la pratique dans le contexte auquel elle est destinée permet de faciliter son adoption mais également sa diffusion. De plus, en incluant l'agriculteur dans le déroulement de l'essai et en lui fournissant les résultats des expérimentations, cette démarche permet de faire de lui un vecteur de diffusion des connaissances acquises sur la pratique à l'intérieur et à l'extérieur du groupe du projet.

2.1.3.3. Problème initial et mission de stage

L'étape 3 du projet CASDAR MCAE étant en cours, le GR CIVAM PACA souhaite définir les essais et les suivis à mettre en place pour évaluer les pratiques que souhaitent mettre en place les agriculteurs. Par ailleurs, l'action 4 étant également en cours, il souhaite que les données issues de ces expérimentations permettent la diffusion à différentes échelles des acquis de l'étape 3.

Les agriculteurs n'ayant pas le temps et parfois pas les compétences pour mettre en place un essai et une méthodologie de suivi fiables, une partie du financement alloué par le CASDAR MCAE a été attribuée pour la réalisation d'un stage de 6 mois sur ce sujet. La communication des acquis du projet et l'animation du groupe de maraîchers impliqués est également attribuée au stagiaire, en collaboration avec l'animateur chargé du projet. De plus, le travail mené bénéficie d'un soutien régulier du milieu de la recherche, du fait du rapprochement en cours de projet de l'unité EcoDéveloppement de l'INRA d'Avignon. Le travail avec Mireille NAVARRETE, chargée de recherche à l'INRA, permet d'avoir un appui méthodologique pour mener les expérimentations sur les fermes. Ce lien est de plus en plus recherché dans les réseaux CIVAM car ils permettent au développement agricole de s'approprier plus facilement les acquis et avancées de la recherche.

2.1.3.4. Essais du projet : situation de départ

Parmi les maraîchers impliqués dans le projet, 6 se sont portés volontaires pour mettre en place 1 à 2 essais sur leurs exploitations. 1 maraîchère est située à proximité de Céreste (84) et fait partie du groupe issu du Collectif des Agriculteurs du Parc du Luberon, les 5 autres agriculteurs proviennent du groupe situé au sud du massif du Luberon, leurs exploitations s'étendent de Mallemort (13) à Pertuis (84) sur un axe est-ouest en suivant le lit de la Durance.

5 exploitations sont labellisées "Agriculture Biologique" et toutes correspondent à la description précédemment donnée du maraîchage diversifié.

Un travail préalable au stage a été réalisé par l'animateur du GR CIVAM PACA Florian CARLET pour engager les maraichers à choisir la pratique qu'ils souhaitent tester et les dispositifs d'essai et de suivi qu'ils souhaitent mettre en place. Des entretiens initiaux réalisés par le stagiaire ont permis de déterminer et de fixer ces dispositifs. Chaque essai correspond à une ou plusieurs questions que se pose l'agriculteur ou l'agricultrice sur la pratique qu'il souhaite mettre en œuvre. Celles-ci, regroupées selon les 3 axes de travail définis dans l'action 1, sont les suivantes :

Réduction et non-travail du sol

Quels sont les effets de la réduction du travail du sol, notamment en termes de désherbage mécanique, sur la marge brute de la culture de fèves, le temps de travail et les populations d'adventices ?

Quelle est l'influence en début et en fin de période estivale du travail du sol à la grelinette sur la porosité du sol ? Que est l'effet de cette intervention sur la dynamique de l'azote dans un système où seule la matière organique du sol apportée sous forme de paillages est source de nutriments ?

Le travail du sol à la grelinette permet-il la décompaction d'un horizon de sol tassé par un passage de roues de tracteur ? Quelle est la persistance de son effet 6 mois après cette intervention ?

Engrais verts

Quel est l'efficacité d'un engrais vert de blé/fèverole relativement ligneux (blé au stade grain laiteux) pour réduire la sensibilité à l'érosion d'un sol limono-sableux, et comment mesurer cet effet ?

Quel est l'effet d'un engrais vert de petit épeautre sur la structure du sol, la dynamique de minéralisation de l'azote et sur la culture dans le cas d'une conduite en planches permanentes paillées et non travaillées ? L'occultation de ce couvert par une bâche ou par un paillage organique a-t-elle une influence sur ce phénomène ?

Matières organiques

Quels sont les effets relatifs des paillages organiques et plastiques sur la température du sol, la dynamique de minéralisation de l'azote, le rendement et la précocité de la culture de tomates sous serre et en plein champ ?

L'utilisation de la biomasse fraîche d'adventices apportée en surface du sol permet-elle de réduire le risque d'immobilisation de l'azote induit par l'emploi de paillage au rapport C/N élevé ? Quel est l'effet relatif d'un engrais vert de blé/fèverole incorporé sur ce phénomène ?

La minéralisation de la matière organique d'une prairie de plus de 4 ans est-elle suffisante pour répondre aux besoins d'une culture exigeante en azote comme la tomate et permet-elle d'obtenir des rendements *acceptables* ?

L'apport d'une dose élevée de compost de déchets verts visant à augmenter le taux de matière organique du sol a-t-il un effet sur le rendement de la courgette comparé à un apport classique de compost de fumier d'ovins ?

2.1.4. Adaptation de la démarche de MFE à un projet « multi-questions »

Compte tenu de la diversité des thèmes abordés, tant en termes de pratiques que d'aspects de la fertilité des sols, le regroupement des tous les essais traités par le projet sous une seule question centrale paraît difficile ou réducteur. En revanche, il est possible de constater que chaque axe comprend au moins un essai dans lequel l'agriculteur ou l'agricultrice souhaite étudier l'influence de sa pratique sur la dynamique de minéralisation de l'azote dans le sol. Il semble donc judicieux de choisir l'influence des pratiques sur la minéralisation de l'azote comme objet d'étude de ce rapport.

En plus d'être cohérent avec le cadre du projet (respect des trois axes de travail), traiter de la minéralisation de l'azote paraît ici pertinent. En effet, l'azote est un élément clé du rendement. Par ailleurs, les systèmes de production concernés dans le projet n'utilisant pas d'engrais minéraux, la fertilisation azotée des cultures repose essentiellement sur les processus de minéralisation du sol. Une meilleure compréhension de l'effet des pratiques sur ce processus est d'autant plus importante que les besoins en cet élément sont élevés pour plusieurs des cultures exigées par les consommateurs en été (tomates, aubergines, courgettes,...), et que celui-ci est mobile dans le sol (VEDIE, 2010).

Toutefois, les suivis mis en place ont pour but premier d'apporter les réponses aux questions des agriculteurs et pourront être différents d'un essai à l'autre. Ces derniers n'ont en effet pas vocation à être comparés entre eux mais bien à observer l'effet que produit la pratique dans un contexte donné et pour répondre à un besoin déterminé. Cela n'empêche pas pour autant une valorisation collective et une appropriation des résultats des essais par l'ensemble des maraîchers des groupes concernés.

Par ailleurs, il paraît intéressant de pouvoir valoriser la démarche ascendante de ces expérimentations. Le fait que l'agriculteur conduise les interventions effectuée dans l'essai et les organise selon son propre agenda permet de tester la pratique directement dans le contexte auquel elle est destinée. Cela permet par retour d'expérience de l'agriculteur d'en connaître certains aspects organisationnels (temps de travail et praticité, conflit entre interventions dans l'agenda des différents itinéraires techniques en cours,...). Prendre ainsi davantage en compte les critères jugés importants par l'agriculteur pour décider de la mise en place de la pratique apporte des informations pertinentes pour la diffusion des acquis du projet. Enfin, le fait de recueillir les observations réalisées par l'agriculteur en cours d'expérimentation permet d'apporter des éléments nouveaux de discussion des résultats et de fournir un message plus adapté pour leur diffusion auprès d'autres agriculteurs.

Les enjeux à l'issue de ce stage sont de :

- Permettre une meilleure connaissance de l'influence des pratiques que souhaitent mettre en place les agriculteurs sur les processus de minéralisation de l'azote.

- Répondre à la question initiale de chaque maraicher quant à l'efficacité de la pratique testée pour répondre à une question déterminée.
- Recueillir les informations nécessaires pour discuter de l'intégration de la pratique dans un contexte donné et favoriser une diffusion adaptée des résultats d'essais.

Il reste à présent à définir quels sont en théorie les effets des pratiques appartenant à chaque axe de travail sur les processus de minéralisation de l'azote dans le sol. Pour plus de précision dans l'orientation de l'étude bibliographique, il paraît nécessaire d'indiquer que ces pratiques correspondent à l'utilisation de paillages à l'aide de plastique noir ou de paille de céréales, le travail du sol à l'aide d'une grelinette, l'intégration d'engrais verts en période d'interculture et l'apport ou non d'amendement organique après destruction d'une prairie.

II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

La première partie de cette synthèse bibliographique aborde les facteurs pédoclimatiques qui influencent les processus de minéralisation de l'azote. La seconde partie a pour objectif de définir l'état des connaissances concernant les effets potentiels des pratiques mises en œuvre dans les essais sur ces facteurs et ainsi l'influence qu'ils peuvent avoir sur la minéralisation de l'azote.

1. Influence des paramètres pédoclimatiques sur la minéralisation de l'azote organique

1.1. DEFINITIONS

La minéralisation de l'azote correspond à la transformation de l'azote organique en azote minéral sous forme de NH_4^+ (nitrites) et NO_3^- (nitrates) par les micro-organismes du sol (bactéries, champignons et actinomycètes) (ANDRIANARISOA, 2009). Elle est composée de deux étapes. L'ammonification est la transformation de l'azote organique en NH_4^+ et est exclusivement réalisée par des micro-organismes hétérotrophes (BENBI et RICHTER, 2002 ; ANDRIANARISOA, 2009). La nitrification, processus réalisé par deux groupes de bactéries autotrophiques (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*), correspond à l'oxydation des ions ammonium en NO_3^- assimilable par les plantes (BENBI et RICHTER, 2002 ; ANDRIANARISOA, 2009).

L'organisation, ou immobilisation correspond à l'absorption de l'azote minéral par les micro-organismes, qui le transforment sous des formes organiques inaccessibles pour les plantes (BENBI et RICHTER, 2002). Ainsi, la quantité de NO_3^- disponible pour les plantes dans un sol est la résultante de ces deux processus simultanés. On parle alors de minéralisation nette lorsque le stock d'azote minéral du sol augmente, et d'immobilisation nette lorsque celui-ci diminue (ANDRIANARISOA, 2009).

La minéralisation étant régie par la biomasse microbienne et son activité, les facteurs qui la limitent sont ceux qui influencent directement ou indirectement l'activité des micro-organismes (HAYNES, 1986). Ces facteurs sont : la teneur en eau du sol et l'accès à l'oxygène, la température du milieu, le pH, la texture et la structure du sol, ainsi que la composition du substrat nutritif décomposé par les micro-organismes (HAYNES, 1986 ; WATTS et TORBERT, 2014).

1.2. TENEUR EN EAU DU SOL

La minéralisation de l'azote augmente lorsque la teneur en eau approche la capacité au champ⁵ et est maximale lorsque le taux de saturation en eau de la porosité du sol est de 60% (WATTS et TORBERT, 2014). L'apparition de conditions anaérobies au-delà de cette valeur induit l'intervention de micro-organismes anaérobies dans les processus de décomposition, et dont l'efficacité est plus faible que celle des micro-organismes aérobies (HAYNES, 1986 ; WATTS et TORBERT, 2014).

Le taux de minéralisation du sol diminue quand sa teneur en eau décroît. En revanche, les taux de minéralisation augmentent fortement lorsque le sol subit des cycles de séchage suivis par une réhumidification rapide (BIRCH 1959; KEIFT *et al.* 1987). La réhumidification rapide induit un choc osmotique provoquant la lyse de cellules microbiennes ou l'excrétion de substances intracellulaires. De plus, ces cycles peuvent détruire les agrégats de sol, et ainsi exposer la matière organique anciennement protégée par ces derniers aux attaques microbiennes (WATTS et TORBERT, 2014).

1.3. TEMPERATURE

La vitesse de minéralisation de l'azote augmente avec la température du sol (WATTS et TORBERT, 2014). VIGIL et KISSEL (1995) indiquent que la vitesse de minéralisation est 13 fois plus rapide à 15°C qu'à 5°C et 3,7 fois plus rapide à 25°C qu'à 15°C. Par ailleurs, il est admis que la température optimale pour ce processus est située entre 25°C et 35°C et qu'il est presque arrêté au-delà de 40°C et en dessous de 5°C (TISDALE *et al.*, 1985 ; WATTS et TORBERT, 2014). Toutefois, il semble que l'influence de la température sur les vitesses de minéralisation des sols varie selon les latitudes et les climats dont ils sont issus (CAMPBELL *et al.*, 1984 ; WATTS *et al.* 2007). Enfin, il semble important de noter que la température du sol étant liée à sa teneur en eau, ces deux paramètres sont interactifs dans leur influence sur la minéralisation de l'azote (KNOEPP et SWANK, 2002).

1.4. pH

Le pH optimal pour les bactéries et les champignons responsables de la minéralisation est de 6,5 à 8 et de 5,5 à 6,5 respectivement (WHALEN et SAMPEDRO, 2010). L'ammonification est peu influencée par les variations de pH. La nitrification est en revanche réduite lorsque celui-ci est inférieur à 5 et accélérée lorsqu'il est supérieur à 6 (ST LUCE *et al.*, 2011). Cependant les valeurs supérieures à 8 ralentissent ce processus (LE TACON, 1978).

⁵ Teneur maximale en eau du sol, non mobilisable par la seule force de gravité.

1.5. TEXTURE

Il est considéré que plus un sol est sableux, plus les taux de minéralisation y sont élevés du fait d'une aération accrue du milieu. Celle-ci permet en conséquence une vitesse de réchauffement et une disponibilité en oxygène plus élevées (SUBBARAO *et al.* 2006 ; GRIFFIN, 2008). WATTS et TORBERT (2014) indiquent cependant qu'à l'échelle de l'année, la quantité totale d'azote minéralisé peut être supérieure dans les sols argileux, du fait d'une rétention en eau supérieure et d'une exposition moindre aux phénomènes de lessivage. En revanche, les argiles, en ayant la capacité de former des liaisons chimiques (ponts cationiques principalement) avec la matière organique (complexe argilo-humique), peuvent la protéger physiquement de la dégradation par les micro-organismes du sol (BENBI et RICHTER, 2002). Cette propriété a été démontrée comme l'un des facteurs importants affectant la minéralisation (NORDMEYER et RICHTER, 1985).

1.6. STRUCTURE

La structure du sol, par son action indirecte sur les échanges de gaz, d'eau et de chaleur, a une influence élevée sur les processus de minéralisation de l'azote (ST LUCE *et al.*, 2011). La densité apparente du sol (D_a) est inversement corrélée à la porosité du sol. Elle est liée à la nature et à l'organisation de ses constituants, sans pour autant indiquer la proportion de vides permettant la circulation de fluide, ou macroporosité (AUDRY *et al.*, 1973 ; YORO et GODO, 1990). Ainsi, TORBERT et WOOD (1992) mesurent que l'activité de minéralisation des micro-organismes est réduite de 65% lorsque la D_a augmente de 1,4 à 1,8g/cm³.

1.7. COMPOSITION DE LA MO/RESIDUS

La matière organique constitue une source d'énergie et de nutriments pour les micro-organismes (WHALEN *et al.*, 2013). Lors de sa décomposition le taux de minéralisation et d'immobilisation de l'azote dans le sol est une fonction de la proportion relative de carbone (C) et d'azote (N), ou rapport C/N, de la matière organique décomposée (WATTS et TORBERT ; 2014). Les micro-organismes ayant un rapport C/N proche de 12, lorsque celui de la matière organique y est inférieur, sa décomposition conduit à la libération d'azote minéral dans le milieu (minéralisation) (ROBERTSON et GROFFMAN, 2015). En revanche, lorsqu'il est supérieur, les micro-organismes prélèvent l'azote minéral du sol pour répondre à leurs besoins (immobilisation) (ROBERTSON et GROFFMAN, 2015). Cependant, lorsque de la matière organique est apportée dans un sol, il est considéré que la limite entre minéralisation et immobilisation nette dans le sol se situe à 20, mais que l'immobilisation nette ne se produit qu'au-delà d'un rapport C/N de 30. Enfin, entre ces deux seuils, les processus d'immobilisation et de minéralisation brutes sont estimées être à l'équilibre (WATTS et TORBERT, 2014).

La matière organique du sol favorise la stabilisation des agrégats et ainsi la diminution de la densité apparente du sol. Elle permet également d'en augmenter le pouvoir tampon vis-à-vis du pH et la capacité de rétention en eau, et constitue une source de nutriments et de carbone majeure pour les micro-organismes (MURPHY, 2015). La teneur en matière

organique d'un sol a ainsi une incidence élevée sur les processus microbiens qui s'y déroulent (ST LUCE *et al.*, 2011 ; WATTS et TORBERT, 2014 ; MURPHY, 2015).

2. Pratiques

Toute pratique agricole a pour but d'agir sur l'état du milieu dans lequel la plante est cultivée. Ainsi, les pratiques agricoles influençant les processus de minéralisation de l'azote ne peuvent être abordées ici de façon exhaustive. Le choix a donc été fait de présenter uniquement les pratiques concernées dans le projet traité par le présent rapport : matières organiques (amendements organiques et paillages), engrais verts et travail du sol.

2.1. AMENDEMENTS ORGANIQUES

Les effluents d'élevage constituent une source d'énergie, d'azote et d'autres nutriments pour les micro-organismes. Leurs propriétés varient selon la partie qui en est récupérée (lisiers, fumier), leur mode de stockage, l'espèce animale considérée et son alimentation, mais également selon leur niveau de transformation (NIEDER et BENBI, 2002 ; WATTS et TORBERT, 2014). Les fumiers, mélange d'excréments d'animaux et de matière végétale (litière), contiennent 20 à 80% d'azote sous forme minérale et interviennent ainsi directement sur le stock d'azote assimilable du sol (WATTS et TORBERT, 2014 ; REY *et al.* 2015). En pouvant perdre environ 50% de leur masse sous forme de CO₂, leur compostage entraîne une concentration en azote total (5 à 6kg/t de N total pour un fumier de bovin contre 8kg/t après compostage), mais qui se trouve davantage sous forme organique (REY *et al.*, 2015). Les rapports C/N de ces matières varient également selon les mêmes critères que les effluents d'élevage et sont généralement compris entre 10 et 20 (CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LANGEDOC-ROUSILLON, 2012 ; WATTS et TORBERT, 2014).

L'influence majeure de ces amendements sur les facteurs de la minéralisation est liée à leur capacité à augmenter le taux de matière organique du sol (WATTS et TORBERT, 2014). Plusieurs auteurs reportent une augmentation des taux de carbone organique du sol après au moins 5 années d'applications répétées de fumiers bovins (VITOSH *et al.*, 1973 ; FRASER *et al.*, 1988 ; SOMMERFELDT *et al.* 1988).

Cependant, en plus de fournir un substrat nutritif aux micro-organismes du sol, les apports de fumiers et de compost ont également eux-mêmes une incidence élevée sur les facteurs influençant la minéralisation de l'azote. Ils permettent une diminution de la densité apparente du sol par un effet de dilution, induisant ainsi un nombre relatif de micropores (< 30µm de diamètre) plus élevé et par conséquent une capacité de rétention en eau accrue. En stimulant l'activité des macro-organismes, notamment des vers de terre, ces amendements augmentent la macroporosité et l'infiltrabilité des sols, et améliorent ainsi les échanges de chaleur et de fluides. Par ailleurs, selon leur niveau de décomposition, les fumiers permettent d'élever la taille et la stabilité (stabilité structurale) des agrégats de sol. En effet, les matières organiques

les plus humifiées induisent un accroissement lent mais durable de ce dernier paramètre, alors que celles qui sont peu décomposées favorisent une augmentation rapide mais moins stable de ce paramètre du fait d'une augmentation brève et intense de l'activité microbienne. Enfin, de nombreuses références indiquent que des apports répétés de fumier ont une influence positive sur la taille de la biomasse microbienne et l'activité enzymatique du sol (HAYNES et NAIDU, 1998).

Ainsi, différentes matières organiques peuvent être apportées à la parcelle et contribuer à améliorer les facteurs de la minéralisation de l'azote. Il est également possible de produire de la matière organique directement dans la parcelle, par l'implantation de cultures intermédiaires non destinées à être récoltées et ayant pour but d'améliorer la fertilité du sol, ou engrais vert (HARTWIG et AMMON, 2002).

2.2. ENGRAIS VERTS

Un engrais vert peut être défini de la façon suivante : « toute plante qu'on cultive non dans le but d'être récoltée, mais pour augmenter la fertilité de la terre » (POUSSET, 2011).

En se développant, les racines ont une action mécanique de fissuration du sol. Cet effet est particulièrement marqué chez les graminées, du fait d'un système racinaire dense et très ramifié, et également chez les crucifères dont le système racinaire pivotant est puissant (navette, radis fourrager par exemple) (POUSSET, 2011 ; REY *et al.*, 2015). Cependant, cet effet dépend de la durée sur laquelle s'est développé le couvert. POUSSET (2011) indique ainsi que l'effet d'une graminée semée en automne sera marqué dans le cas d'un semis précoce, mais faible en cas de semis tardif.

Le mode de destruction influe également sur les propriétés de l'engrais vert. Ainsi, si les réseaux racinaires des couverts sont maintenus en place à la destruction, ils contribuent à créer une porosité tubulaire par laquelle peuvent passer d'autres organismes mais également les flux d'air, d'eau et de chaleur (POUSSET, 2011 ; BERTUZZI *et al.*, 2012). Par ailleurs, l'incorporation de leur biomasse après destruction stimule l'activité fousseuse des macro-organismes décomposeurs tels que les vers de terre, et accroît ainsi la porosité du sol et donc la pénétration de l'air et de l'eau dans le milieu (MAZOLLIER et VEDIE, 2008). L'activité des micro-organismes décomposeurs augmente également du fait d'un apport de matière facilement dégradable. Les produits transitoires de la matière ainsi dégradée permettent la formation d'agrégats et améliorent donc la porosité du sol (HARTWIG et AMMON, 2002). Cet effet est intense mais cependant de courte durée (1 à 2 mois) dans le cas d'engrais vert peu âgés (MAZOLLIER et VEDIE, 2008). En effet, le rapport C/N des tissus végétaux augmente généralement au cours de leur développement (REY *et al.*, 2015). La dilution de l'azote dans la biomasse, à l'origine de ce phénomène, est particulièrement bien documenté pour différentes graminées, légumineuses et crucifères (LEMAIRE et SALETTE, 1984 ; CALOIN et YU, 1986 ; DORE *et al.*, 2006). Par ailleurs, la teneur en lignine, composé carboné récalcitrant à la dégradation, participe également à réduire la facilité de dégradation d'un engrais vert dans le temps (HAYNES, 1986 ; POUSSET, 2011).

L'effet d'un engrais vert sur le cycle de l'azote varie selon l'espèce implantée. Ainsi, les graminées et certaines crucifères ont pour effet d'absorber l'azote assimilable du sol. Après destruction, leur biomasse sert de substrat aux micro-organismes du sol, qui en la dégradant minéralisent l'azote plus ou moins vite selon le stade de développement auquel a été détruit le couvert. Les légumineuses absorbent également de l'azote assimilable du sol mais en de faibles quantités (FAGERIA *et al.*, 2005). Elles permettent en revanche d'augmenter la quantité d'azote minéralisé après destruction par fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (REY *et al.*, 2015). Cet effet dépend de l'espèce considérée, ainsi que de son stade de développement au moment de la destruction. Parmi les légumineuses annuelles, la féverole est connue pour avoir la capacité de fixer des quantités élevées d'azote atmosphérique. Celle-ci peut atteindre 4 à 5kg de N/ha/jour durant la formation des gousses et des grains. De tels taux ne sont toutefois atteints qu'à partir de ces stades, ce qui nécessite d'être pris en compte dans le choix de la date de destruction du couvert (KOPKE et NEMECEK, 2010). Enfin, les propriétés des espèces peuvent être combinées lorsqu'elles sont associées. Il est donc possible de supposer qu'un mélange de graminée et de légumineuse influencera la minéralisation de l'azote en améliorant la structure du sol et en y introduisant une quantité supplémentaire d'azote (REY *et al.*, 2015).

Ainsi, l'effet d'un engrais vert sur les facteurs de la minéralisation dépend fortement de ou des espèces choisies, ainsi que de la durée pendant laquelle elles se développent et de leur mode de destruction. Cette pratique permet à l'agriculteur d'agir indirectement sur certains des facteurs de la minéralisation. D'autres, telles que l'emploi de paillages, fréquemment utilisés en maraîchage, lui permettent d'agir également de façon directe sur ces paramètres.

2.3. PAILLAGES

Le paillage correspond à l'apport d'une couche de matière organique ou synthétique en surface du sol pour en modifier les conditions agronomiques (GUET *et al.*, 2011). Les deux objectifs principaux de cette pratique sont : réduire la compétition des adventices sur la culture et améliorer les conditions de croissance dans le sol pour cette dernière (GUET *et al.*, 2011 ; KASIRAJAN, 2012). Il est donc fortement probable qu'en modifiant l'environnement dans lequel les racines se développent, cette pratique ait des répercussions sur les facteurs de la minéralisation. Les paragraphes suivants distinguent les effets des paillages plastiques noirs et ceux des pailles de céréales sur ces derniers.

2.3.1. Paillages organiques

NOVAK *et al.* (2000) indiquent que les paillages de paille de céréales, ont la propriété de limiter les flux de chaleur provenant à la fois de l'atmosphère et du sol. Plusieurs sources indiquent ainsi qu'ils ont la capacité d'en réduire les températures maximales et d'en élever les minimales (TEASDALE et ABDUL-BAKI, 1995 ; CHALKER-SCOTT, 2007 ; TEGEN *et al.*, 2015). Par ailleurs, LARSSON et BATH (1996) mesurent que la température du sol sous divers paillages organiques est généralement inférieure à celle d'un sol nu, ce qui peut ainsi réduire l'activité de minéralisation de l'azote des micro-organismes (WATTS et TORBERT, 2014).

Cependant, en limitant l'incidence de la chaleur mais également du vent sur le sol, ceux-ci permettent de réduire l'évaporation de l'eau et d'en augmenter la teneur dans le sol (LARSSON et BATH, 1996 ; CHALKER-SCOTT, 2007, BODNER *et al.*, 2015). De plus, les paillages organiques étant poreux, ils permettent aux précipitations d'atteindre le sol et sont ainsi parfois rapportés comme étant plus efficaces que les paillages synthétiques pour conserver l'eau dans le sol (CHALKER-SCOTT, 2007). Cette caractéristique irait donc dans le sens d'une minéralisation plus élevée de l'azote sous les paillages organiques que synthétiques (WATTS et TORBERT, 2014). Cependant, ces matériaux présentent souvent des rapports C/N élevés et peuvent provoquer une immobilisation temporaire de l'azote contenu dans le sol comme le suggèrent DORING *et al.* (2005). Enfin, bien que cet effet ne soit pas immédiat, apporter de la paille constitue un apport de matière organique, dont les effets sur la minéralisation de l'azote ont été abordés précédemment.

2.3.2. Paillages plastiques noirs

Les paillages plastiques noirs composés de polyéthylène sont les plus utilisés dans le monde (STEINMETZ *et al.*, 2016). Ils ont la capacité de transmettre la chaleur issue du rayonnement solaire (HAM *et al.*, 1993). Sous ces paillages, la température des premiers 30cm de sol est ainsi rapportée pour être généralement supérieure de 2 à 6°C à celle observée dans un sol nu (TARARA, 2000 ; CHALKER-SCOTT, 2007 ; KASIRAJAN et NGOUAJIO, 2012 ; STEINMETZ *et al.*, 2016). A l'inverse des paillages organiques, leur effet est donc supposé favoriser une minéralisation accrue de l'azote, du moins si la température du sol n'excède pas 35°C (TISDALE *et al.*, 1985 ; WATTS et TORBERT, 2014). En empêchant les échanges de gaz, les paillages plastiques sont également plus efficaces que les paillages organiques pour limiter l'évaporation de l'eau (QIN *et al.*, 2015 ; STEINMETZ *et al.*, 2016). Ainsi, dans le cas de cultures irriguées et lorsque l'irrigation n'est pas limitante, ils seraient susceptible de permettre une minéralisation supérieure de l'azote (WATTS et TORBERT, 2014). QIN *et al.* (2016) mesurent en effet une amélioration des processus de minéralisation de l'azote sous paillage plastique noir, attribuée à une évaporation réduite et une température accrue du sol. De plus, ces paillages favorisent la production d'exsudats racinaires des cultures et l'activité de la macro-faune du sol, dont résulte ainsi une densité apparente du sol réduite (STEINMETZ *et al.*, 2016). Bien qu'à court terme, cet effet soit favorable à une minéralisation plus intense de l'azote organique (WATTS et TORBERT, 2014), à long terme, l'emploi répété de ces paillages dans des conditions de chaleur élevée présente le risque de rendre les sols hydrophobes par séchage de certains exsudats racinaires (STEINMETZ *et al.* 2016).

Il semblerait ainsi qu'à court terme, les paillages à l'aide de plastique noir favoriseraient une minéralisation de l'azote supérieure à celle des paillages organiques. En effet ces derniers sont les seuls à pouvoir produire une immobilisation de l'azote du sol, et compte tenu du fait que les cultures maraichères sont généralement irriguées, la perméabilité de la paille aux précipitations n'est pas ici un atout. Enfin, l'effet supérieur des plastiques noirs sur la température du sol va également dans ce sens, comme l'indiquent QIN *et al.* (2016).

Le travail du sol modifie également l'état du sol et peut par conséquent avoir des effets sur les processus de minéralisation.

2.4. TRAVAIL DU SOL

NIEDER et BENBI (2008) indiquent que le travail du sol, en modifiant les états physiques du sol tels que sa structure ou sa densité apparente, affecte les transferts d'eau, de chaleur et de gaz, qui influencent en conséquence la minéralisation de l'azote par les micro-organismes. En effet, GERMON *et al.* (1994) démontrent que, comparé au semis direct, le labour permet des températures supérieures du sol au printemps et ainsi une quantité d'azote minéralisé plus importante. Par ailleurs, la destruction des agrégats de sol par le travail du sol expose la matière organique protégée physiquement à la minéralisation (ANGERS *et al.*, 1993 ; WATTS et TORBERT, 2014). Ces effets sont cependant temporaires car la porosité, fortement augmentée après un travail du sol, décroît rapidement après celui-ci (KEEN ; 1931 ; PELEGRIN *et al.*, 1990 ; FRANZEN *et al.*, 1994). Ainsi, une intensité de travail du sol élevée conduit à réduire à terme la circulation de l'air et de l'eau dans le sol et peut ainsi réduire l'activité des micro-organismes (TORBERT *et al.*, 1997 ; N'GAYEDAMIYE, 2007). Ces informations peuvent expliquer pourquoi VEDIE *et al.* (2011) observent qu'après une conduite conventionnelle du travail du sol (outils rotatifs, travail à 20cm de profondeur), le passage à une conduite en planches permanentes (outils à dents, travail à moins de 10cm de profondeur) entraîne une réduction de l'intensité de la minéralisation seulement en début de saison estivale, et que cet effet disparaît après deux ans.

Toutefois, ces effets sont fortement dépendants du type de sol et du contexte climatique. Par exemple, un labour d'automne n'aura pas la même incidence sur le sol selon sa texture, compte tenu des propriétés de gonflement et de retrait des argiles sous l'action de l'eau et de l'effet du gel. Par ailleurs, la pluviométrie aura également une incidence plus ou moins élevée selon la texture du sol, sa teneur en matière organique, pouvant être influencée par les pratiques, ainsi que sa sensibilité à l'érosion (HENIN, 1976).

Le travail du sol a également pour effet de répartir la matière organique enfouie ou incorporée sur la profondeur de travail de l'outil, et influence ainsi la profondeur à laquelle les processus de minéralisation ont lieu (VIAN *et al.*, 2009). Par ailleurs, ces interventions augmentent la surface de contact entre la matière organique située en surface (résidus de culture) et le sol sur la profondeur travaillée, permettant ainsi d'accroître la minéralisation de l'azote organique (NIEDER et BENBI, 2008 ; WHALEN *et al.* 2013). Ainsi, MURPHY *et al.* (1998) observent que 70 à 88% des processus de minéralisation brute ont lieu dans l'horizon de sol de profondeur 0-10cm, lorsque celui-ci ne reçoit qu'un travail superficiel (<10cm). Enfin, lorsque le travail du sol est réalisé pour la destruction d'une prairie, l'incorporation de la matière produite par celle-ci peut conduire à la minéralisation de 1 à 3kg d'azote/ha/jour selon le mode de conduite de la prairie (BESNARD *et al.* 2007).

III. PROBLEMATIQUE

La minéralisation de l'azote relève de processus biologiques multifactoriels et donc complexes.

La minéralisation potentielle des sols est souvent étudiée par des méthodes d'incubation en conditions contrôlées pour évaluer l'impact des pratiques agricoles sur le cycle de l'azote. Elle est cependant moins souvent mesurée en conditions réelles de culture pour l'évaluation de pratiques telles que l'emploi de paillages organiques, de la biomasse adventice ou encore le travail du sol à l'aide d'un grelinette.

Le travail réalisé a pour objectif de comprendre comment les processus de minéralisation sont influencés par de telles pratiques, dans leur contexte pédoclimatique et systèmes de culture. L'objectif est de permettre aux maraîchers de disposer de davantage d'informations pour la mise en place de ces pratiques. Améliorer la connaissance des maraîchers sur l'influence qu'ont ces dernières sur les processus de minéralisation de l'azote peut permettre d'adapter les prises de décision au cours des itinéraires techniques, en fonction des conséquences potentielle d'une intervention sur une culture donnée.

Il convient ainsi de se demander **quelle est l'efficacité des pratiques de gestion de la fertilité des sols centrées sur la réduction du travail du sol, l'emploi d'engrais verts, de paillages organiques et plastiques et d'amendements organiques pour répondre aux objectifs des agriculteurs et quel est leur effet sur la minéralisation de l'azote ?**

La bibliographie permet de définir les hypothèses suivantes quant à l'effet des pratiques sur la minéralisation de l'azote :

Hypothèse 1 : Le travail du sol à la grelinette augmente la quantité d'azote minéralisé seulement de façon temporaire.

Hypothèse 2 : Les paillages plastiques noirs entraînent une minéralisation plus élevée de l'azote que les paillages organiques (paille de céréales).

Le projet CASDAR MCAE, bien qu'ayant une approche technique à travers un travail collectif de réflexion sur des pratiques, doit permettre aux maraîchers du groupe (et d'autres agriculteurs) d'acquérir les éléments les plus exhaustifs possibles sur les itinéraires techniques testés. Cette acquisition ne sera permise qu'en prenant également en compte les aspects organisationnels, économiques voire éthiques liés à leur mise en place. Pour cela, les objectifs des maraîchers (temps de travail, correspondance entre pratique testée et circuit de distribution, coût de la pratique...) sont pris en compte dans l'analyse des résultats et la discussion.

IV. MATERIELS ET METHODE

La première partie correspond à la description des dispositifs d'essais mis en place, ainsi que des mesures réalisées. La seconde partie décrira plus en détail les méthodes de prélèvement et d'analyse, les traitements statistiques permettant d'analyser les données ainsi que l'organisation d'entretiens semi-directifs en fin d'essai pour recueillir le retour d'expérience de chaque maraîcher sur la pratique testée.

1. Dispositifs d'essais et mesures réalisées

1.1. EFFET DU TRAVAIL DU SOL A LA GRELINETTE SUR LA STRUCTURE DU SOL ET LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE

Ces essais sont réalisés chez deux maraîchers : Patrick VIDAL et Eric BARRIERE. Patrick VIDAL est le seul agriculteur non certifié Agriculture Biologique. Cependant, il n'utilise aucun fertilisant de synthèse.

1.1.1. Essai réalisé chez Patrick VIDAL

La parcelle de l'essai est située aux alentours de la ville de Mallemort dans les Bouches du Rhône (13) au lieu-dit La Tapie (latitude : 43.739068° ; longitude : 5.133954°). D'après les informations fournies par l'agriculteur et la réalisation d'un test boudin, le sol est estimé être de type limon sableux, soit contenant moins de 10% d'argiles et entre 40 et 60% de limons (BAIZE, 1995). Sa profondeur est inconnue mais supérieure à 40cm. La parcelle est une ancienne friche mise en culture au printemps 2014 et conduite en planches permanentes sans aucun travail du sol. Les planches de culture sont constamment paillées depuis la mise en culture à l'aide de 8,3t/ha de paille de céréale par an. Le sol est considéré comme peu productif par l'agriculteur car très drainant et du fait de sa prise en masse naturelle au-delà de 10cm de profondeur. La parcelle ne présente aucune pente.

L'essai est constitué par deux planches de culture de 18m² (1,20m x 15m), séparées par un passage (passe-pieds) de 50cm de large. Aucune de ces planches n'a comporté de travail du sol depuis leur mise en culture. Le précédent cultural correspond à une culture de fèves, détruite à l'automne 2015.

La première planche est conduite de manière classique (15kg de paille/an, aucun travail du sol). La seconde également mais est travaillée le 11 avril à l'aide d'une grelinette (Figure 2), dont la profondeur de travail est estimée à 25cm. Ses dents sont plantées dans le sol, puis par action manuelle de levier sur les deux manches le sol est soulevé puis scarifié par les dents de l'outil, sans retournement des mottes.



Figure 2 : TYPE DE GRELINETTE EMPLOYEE DANS L'ESSAI (LARGEUR : 60CM ; PROFONDEUR DE TRAVAIL : 25cm) REALISE CHEZ PATRICK VIDAL.

Aucun apport d'amendement ou de fertilisant n'est réalisé sur la parcelle. Le seul apport de matière organique est constitué par l'apport de paille de céréales. Celui-ci est réalisé le 11 avril sur la planche non travaillée et le 18 avril sur la planche travaillée.

Deux rangs de haricots à grimpants mangetout (*Phaseolus vulgaris*) de la variété Merveille de Venise sont semés en poquets le 11 mai sur chaque planche. Les écartements entre les rangs et entre les poquets sont de 60cm et 20cm respectivement. Des tuteurs sont mis en place le 22 juin et des pommes de terre de variété inconnue sont plantées entre les rangs à la même date, avec un écartement de 25cm entre chaque tubercule. L'irrigation est réalisée par aspersion, à raison de 15mm tous les 3 jours entre le 11 mai et fin juillet, puis tous les 4 jours jusqu'au 18 août et ensuite à raison de 3 fois par semaine. Les deux planches de cultures sont également désherbées manuellement 2 fois dans la saison, à un intervalle de 7 semaines entre chaque désherbage depuis le semis de la culture de haricots.

Les paramètres suivis correspondent à :

- La densité apparente (D_a) du sol dans les horizons 0-5cm, 15-20cm et 20-25cm de profondeur. Celle-ci est mesurée entre le 3 et le 10 mai, soit 1 mois environ après le passage de l'outil. Une seconde mesure est réalisée en octobre pour observer l'évolution de ce paramètre et ne fait donc pas partie de ce rapport.
- La teneur en nitrates du sol. Elle est mesurée toute les deux semaines à partir du 4 avril.
- La résistance mécanique à la pénétration des horizons de sol de 0-10, 10-20, 20-30 et 30-40cm de profondeur. Elle est mesurée au même moment que la teneur en nitrates du sol et à partir du 11 mai.

Les mesures de densité apparente et de résistance mécanique à la pénétration ont pour but de mesurer les changements d'état physique du sol. Cela permet dans un premier temps de définir si l'intervention permet de résoudre le problème de prise en masse du sol rencontré par l'agriculteur, puis dans un second, de déterminer si d'éventuelles différences de dynamique de minéralisation de l'azote peuvent être liées à un changement de la structure du sol. Les premières récoltes n'ont pas encore lieu au moment de l'analyse des données. Les rendements des cultures seront ainsi utilisés ultérieurement dans le projet. Les éventuelles différences de croissance ou de développement de la culture sont observées à chaque suivi et également discutés avec l'agriculteur.

1.1.2. Observations réalisées chez Eric BARRIERE

Les parcelles de l'essai sont situées en périphérie de la ville de Mallemort (latitude : 43,726245° ; longitude : 5.218171°). D'après les informations fournies par l'agriculteur et la réalisation d'un test boudin, le sol est profond et estimé être de type limon sableux, soit contenant moins de 10% d'argiles et entre 40 et 60% de limons (BAIZE, 1995). L'agriculteur exploite depuis 3 ans d'anciennes parcelles maraichères en planches permanentes avec travail superficiel du sol. L'exploitation est labellisée Agriculture Biologique.

L'essai est constitué de deux parcelles, chacune mesurant environ 30m x 15m. Un passage de décompacteur et de buttoir pour la mise en place des planches sont réalisés à l'aide d'un tracteur en mars 2015 sur les deux parcelles. Les planches de culture présentent un horizon compacté à partir de 10cm de profondeur environ, possiblement provoqué par le passage des roues du tracteur lors de leur création.

La parcelle dite "non travaillée" ne comporte pas d'intervention de travail du sol depuis un passage de herse rotative (profondeur de travail : 10cm) attelée sur un motoculteur au mois de mai avant la plantation de tomates. La planche choisie dans l'autre parcelle, dite "travaillée", reçoit la même intervention avant un semis de carottes. Ces dernières sont récoltées d'octobre 2015 à mars 2016 à l'aide d'une grelinette (largeur : 60cm ; profondeur de travail : 20cm). Ces parcelles ne présentent aucune pente.

Cet essai a pour objectif de déterminer si l'emploi de la grelinette a permis de décompacter l'horizon tassé. Il permet de compléter les observations faites chez Patrick VIDAL quant à l'incidence de cet outil sur la structure du sol.

Pour cela, deux planches de culture (une par parcelle) sont sélectionnées. Celle située sur la parcelle travaillée est choisie pour avoir été travaillée la plus récemment (récolte du début du mois de mars). La planche de la parcelle non travaillée est située dans l'alignement de cette dernière comme décrit par la Figure 3 ci-dessous

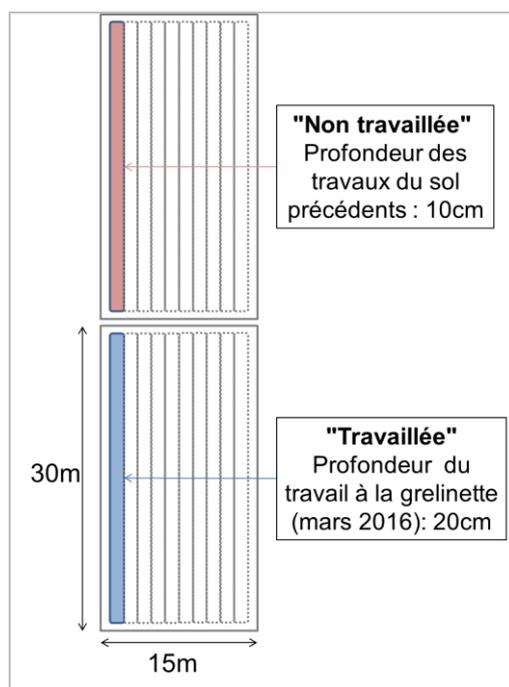


Figure 3 : POSITIONNEMENT DES PLANCHES DE CULTURE FAISANT PARTIE DE L'ESSAI REALISE CHEZ ERIC BARRIERE.

L'essai correspond à une mesure ponctuelle de la densité apparente du sol, dans les horizons 10-15cm et 15-20cm de profondeur des deux planches sélectionnées, afin de se situer dans la zone uniquement travaillée ou non par la grelinette. Cette opération est réalisée le 11, le 18 et le 19 mai, soit un peu plus de deux mois après ce travail du sol. La résistance mécanique à la pénétration des horizons de sol de 0-10, 10-20, 20-30 et 30-40cm de profondeur y est également mesurée une seule fois et au même moment. Cela permet également d'observer l'effet de cet outil sur la structure du sol à un intervalle différent de celui décrit chez Patrick VIDAL. Toutefois, les sols suivis sont différents, ce qui doit être pris en compte lorsque ces observations sont comparées entre elles. Enfin, ces mesures ayant pour objectif de compléter les observations des effets de l'outil sur la structure du sol, aucune mesure des teneurs en azote n'est réalisée dans cet essai.

1.2. EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT EPEAUTRE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL ET LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE

L'essai est réalisé dans une autre parcelle louée par Patrick VIDAL, située à moins d'1km au sud (latitude : 43.73088683° ; longitude : 5.133892°) de celle décrite précédemment. D'après les informations fournies par l'agriculteur et la réalisation d'un test boudin, le sol est estimé être de type limon sableux, soit contenant entre 10 et 20% d'argiles et entre 40 et 60% de limons (BAIZE, 1995). Il présente une couche de galets à 80cm de profondeur. Cette

parcelle correspond à la plus productive de celles qu'exploite l'agriculteur. La conduite du sol est identique à celle de la parcelle concernée par l'essai sur le travail du sol à la grelinette, excepté une décompaction en septembre 2013 avant sa mise en culture. La parcelle ne présente aucune pente.

L'essai est réalisé sur 4 planches de culture de 18m² chacune (15m x 1,20m). Celles-ci sont mitoyennes et séparées par des passe-pieds de 50cm de large. Les deux planches centrales comportent un engrais vert de petit épeautre (*Triticum monococcum*) semé le 1^{er} novembre 2015 à une densité équivalente à 830kg/ha, après un travail superficiel à l'aide d'un outil à dent. Celui-ci est détruit par occultation à l'aide de paille de luzerne (4kg de matière fraîche/m²) sur une planche et à l'aide d'une bâche de polyéthylène noir après un passage de rouleau pour coucher le couvert sur l'autre. Ces deux opérations sont réalisées le 20 avril. Les deux planches qui sont situées de part et d'autre reçoivent une conduite classique et constituent les témoins. Les cultures correspondent à des courgettes et des aubergines. Chacune est implantée sur une planche témoin et une planche ayant comporté l'engrais vert. La culture d'aubergine est implantée sur la planche d'engrais vert occultée à l'aide de la bâche et celle courgette sur la planche d'engrais vert occultée par la paille de luzerne. Ce dispositif est schématisé sur la Figure 4.

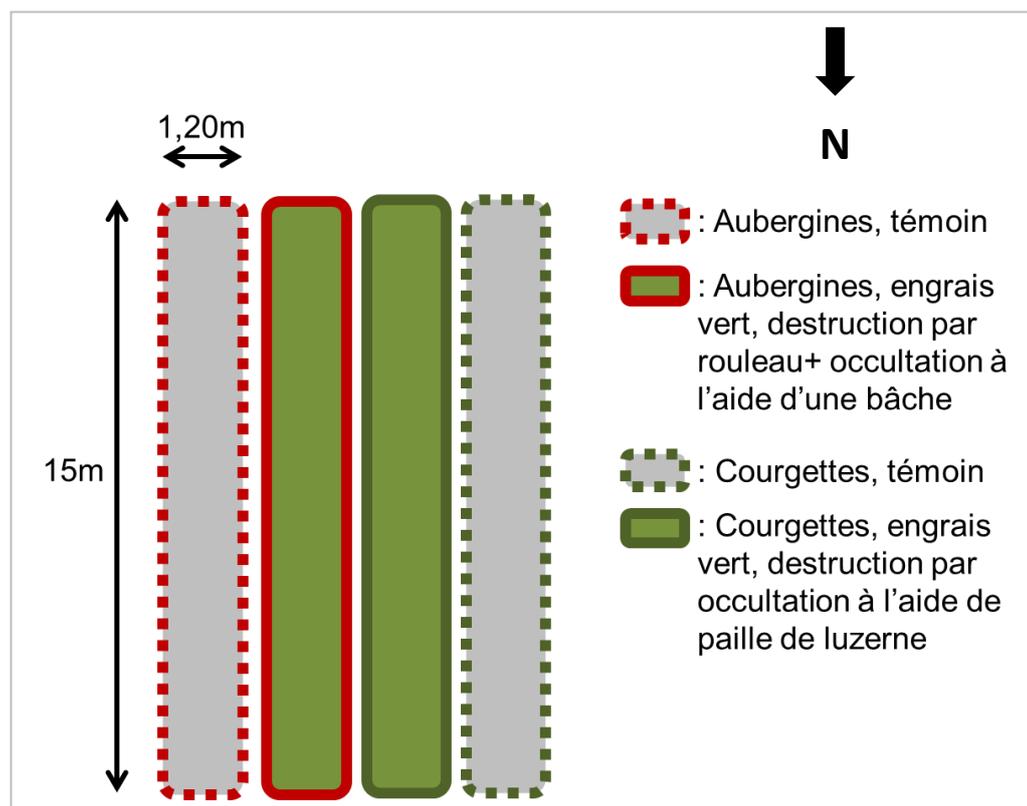


Figure 4 : DISPOSITIF DE L'ESSAI REALISE CHEZ PATRICK VIDAL. EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT EPEAUTRE SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL ET LA MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE.

La culture de courgettes (variété « Ronde de Nice ») est implantée le 5 mai sur 2 rangs espacés de 80cm. L'écartement entre chaque plante sur le rang est également de 80cm. La planche témoin ne reçoit aucun apport de paille durant tout l'essai, le dernier apport correspondant à de la paille de luzerne (environ 4kg de matière fraîche/m²) au printemps 2015. Le précédent cultural de ces deux planches correspond à une culture d'aubergines.

La culture d'aubergines de l'essai (variété « Minorga ») est implantée le 19 mai sur 3 rangs, après avoir retiré la bâche noire le même jour. L'inter-rang est de 30cm et l'espacement entre les plants sur le rang est de 60cm. Sur le rang, les pieds sont disposés de manière à être en quinconce par rapport aux autres rangs. Les deux planches sont paillées à l'aide de paille de céréale (espèce inconnue) le 2 juin. Cette opération est répétée le 17 août.

D'après les itinéraires techniques mis en place, il est possible de considérer que l'essai comporte 4 traitements différents :

- Culture d'aubergines après engrais vert, détruit à l'aide d'une bâche plastique noire, avec ajout de paille rajout de paille de céréales le 2 juin et le 17 août,
- Culture d'aubergine sans engrais vert avec ajout de paille de céréales le 2 juin et le 17 août,
- Culture de courgettes après engrais ver, détruit à l'aide de 4kg de matière fraîche/m² de paille de luzerne,
- Culture de courgettes sans engrais vert ni ajout supplémentaire de paille durant l'essai.

L'irrigation est réalisée par aspersion à raison de 1 fois par semaine en moyenne. Les volumes et la fréquence varient cependant en fonction du jugement que fait l'agriculteur de l'état de son sol.

Les paramètres suivis sont :

- La teneur en nitrates du sol. Elle est mesurée toutes les deux semaines à partir du 4 avril.
- La résistance mécanique à la pénétration des horizons de sol de 0-10, 10-20, 20-30 et 30-40cm de profondeur. Elle est mesurée au même moment que la teneur en nitrates du sol et à partir du 11 mai.
- Le rendement des cultures.

Les mesures de résistance mécanique à la pénétration ont pour objectif d'observer un possible effet du développement du système racinaire de l'engrais vert sur la structure du sol. Aucune mesure de densité apparente n'est réalisée car cette opération est fastidieuse et n'est pas souhaitée par l'agriculteur. Les mesures de rendements permettent d'observer l'effet de la pratique sur la culture.

1.3. EVALUATION DE PRATIQUES DE PAILLAGES ET D'AMENDEMENTS

Ces essais sont réalisés chez deux maraichères : Solange FOLLET et Marion PEYRIC. Le terme "pratiques de paillages" recouvre les types de paillage (paille de céréales ou plastiques noirs) ainsi que le choix du moment où ils sont appliqués. Le terme "pratique d'amendements" recouvre différentes sources de biomasse végétale fraîche, disposée différemment selon le paillage considéré, ou de fumier composté.

1.3.1. Essai réalisé chez Solange FOLLET – Evaluation de paillages plastique noir ou à l'aide de paille d'orge et d'amendements à l'aide de la flore adventice ou d'un précédent engrais vert

La parcelle d'essai se trouve à proximité de Villelaure dans le Vaucluse (84) (latitude : 43.688011° ; longitude : 5.434351°). Les informations fournies par l'agricultrice et la réalisation d'un test boudin permettent d'estimer que le sol est profond et de type limon sablo argileux. Il contient entre 15 et 20% d'argiles, et d'après la classification de BAIZE (1995) entre 40 et 60% de limons. La parcelle se trouve sous abri (serre tunnel). Elle est cultivée par l'agricultrice depuis 2013, qui a repris l'exploitation familiale fondée en 1997 et déjà labellisée Agriculture Biologique. Cette parcelle est conduite en travail superficiel du sol (<10cm).

La fertilisation des cultures précédentes à l'essai est homogène sur toute la serre et correspond à un apport de fumier de caprins pailleux (dose inconnue) et de l'équivalent de 1t/ha de tourteau de ricin (N-P-K : 5-2-1) sous forme de bouchons. Les espèces implantées sont ensuite cultivées sous paillage plastique noir.

La moitié nord de la serre comporte une culture de chou chinois, récoltée jusqu'en mi-novembre 2015. Après la fin des récoltes, le sol est travaillé superficiellement (<10cm) à l'aide d'un cultivateur, puis un semis d'engrais vert composé de 70% de blé et 30% de féverole est réalisé à la volée, suivi d'un passage superficiel de cultivateur et d'un rouleau pour favoriser la levée.

La moitié sud de la serre comporte une culture de mâche, dont la récolte débute mi-novembre 2016. Les espaces laissés vides par les rosettes récoltées permettent à la flore adventice, composée en grande majorité de mouron blanc (*Stellaria media*), de s'y développer. Les dernières récoltes sont réalisées mi-février. Le paillage plastique est alors retiré et la flore adventice en est séparée, puis mise de côté avant la préparation des planches pour la culture suivante.

Les travaux du sol détaillés dans ce paragraphe sont réalisés sur la totalité de la serre entre le 15 février et le 6 mars 2016. Ils permettent à la fois la mise en place des planches de culture et la destruction de l'engrais vert précédemment implanté. D'après l'agricultrice, ce dernier est peu développé à ce moment (sol facilement visible et hauteur du couvert inférieure à 20cm). Les opérations réalisées correspondent à un passage de cultivateur puis d'outils à disque (profondeur de travail inférieure à 10cm pour chacun) pour détruire l'engrais vert et préparer

le sol. Un passage de socs permet ensuite de former les planches de 1,20m x 50m. 1t/ha de tourteau de ricin (N-P-K : 5-2-1) et 1t/ha d'engrais organique Ovinalp (N-P-K : 4-5-10), engrais starters sous forme de bouchons sont apportés en surface des planches de culture. La biomasse adventice précédemment récupérée est placée en surface, sur la moitié d'une planche située en bordure de la serre, puis la totalité de celle-ci est paillée avec 1,6kg/m² environ de paille d'orge. Les autres planches de la serre sont paillées à l'aide d'un paillage plastique noir biodégradable. Une culture de tomates est ensuite implantée entre le 20 et le 25 mars. Les planches situées au centre de la serre comportent 2 rangs, avec un inter-rang de 80cm et celles en bordure en comportent 1 seul. L'espacement entre les plants est de 45cm. Les différentes variétés implantées sont indiquées sur la figure 5.

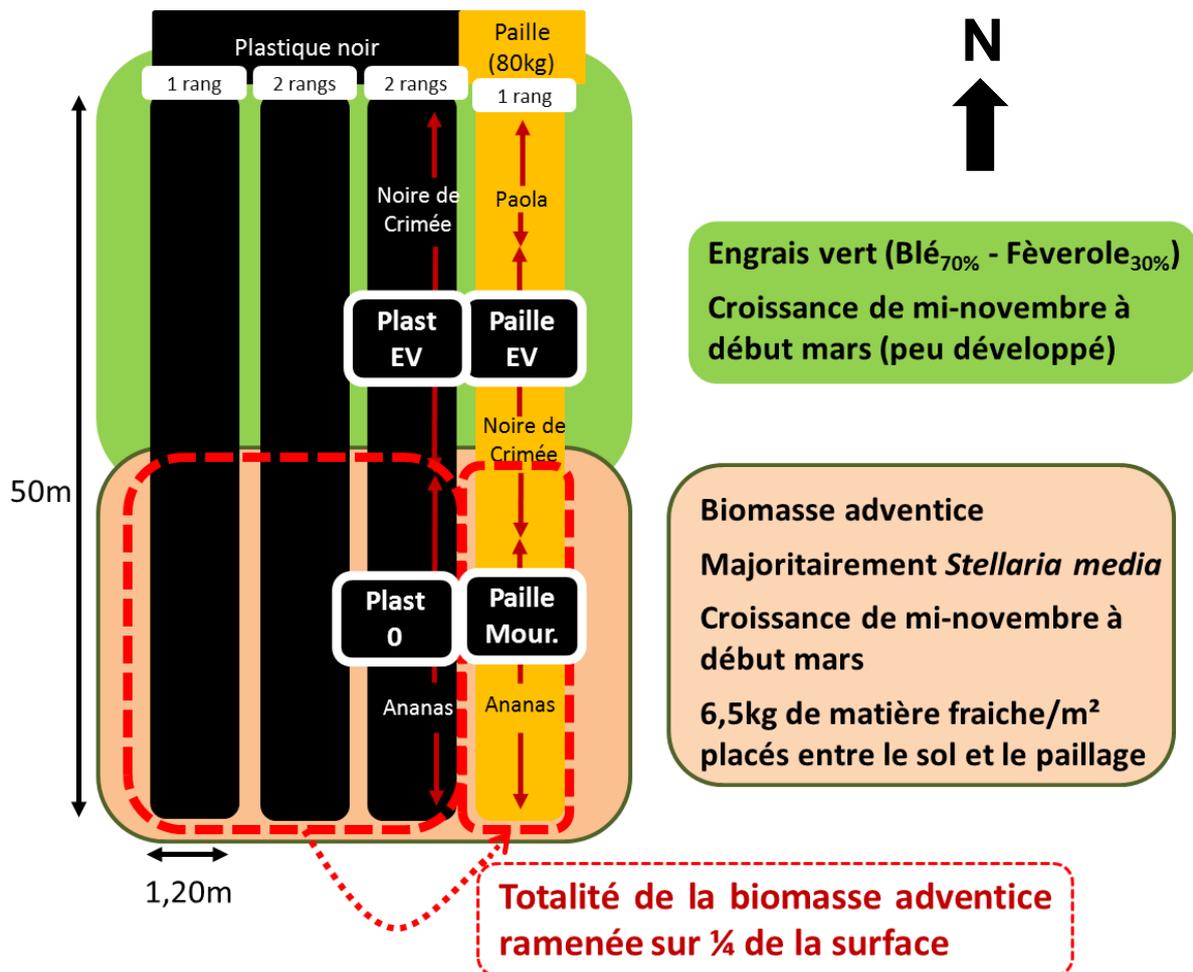


Figure 5 : DISPOSITIF D'ESSAI CHEZ SOLANGE FOLLET.

Comparaison de l'effet du type de paillage, d'un apport de biomasse adventice entre le sol et la paille de céréale et d'un engrais vert peu développé sur la dynamique de minéralisation de l'azote. Les modalités sont : Paille et engrais vert (Paille EV), Paille et biomasse adventice (Paille Mour.), Plastique et engrais vert (Plast EV) et Plastique avec biomasse adventice exportée (Plast 0).

L'irrigation est réalisée par système de goutte à goutte, selon des volumes de 10L/plant apportés en une fois toute les semaines pendant trois semaines à partir de la plantation, puis 5L/plant tous les 3 jours jusqu'à destruction.

2 ruches de bourdons sont mises en place le 13 mai pour assurer la pollinisation. Suite à des attaques de *Tuta absoluta* (larve de lépidoptère ravageur de plusieurs solanacées) débutant entre le 20 et le 24 juin, des pièges à hormones ainsi que des parasitoïdes (*Macrolophus* et trichogrammes) sont installés sur la culture. Cette dernière fait également l'objet de 3 traitements à base de *Bacillus thuringensis* pour réduire les dégâts. Malgré cela, la culture est détruite le 28 juillet, avant la fin des récoltes, car les dégâts sont trop importants et l'agricultrice souhaite limiter la propagation du ravageur aux autres cultures de tomates.

Les paramètres suivis sur chacune des modalités de l'essai sont :

- La teneur en nitrates du sol. Elle est mesurée toute les deux semaines à partir du 4 avril et sur les 4 modalités.
- La température du sol à 10cm de profondeur, à partir du 13 mai et à la même fréquence.

Le suivi de ces paramètres a pour but d'observer l'influence de chaque paillage sur la minéralisation de l'azote. Le second objectif est d'évaluer si l'emploi d'un paillage organique au C/N élevé entraîne une immobilisation de l'azote du sol, et si la présence d'un précédent engrais vert incorporé et d'une couche de biomasse adventice fraîche entre le paillage et le sol permettent de limiter ce phénomène.

Par ailleurs, l'évolution du nombre de bouquets floraux apparus par plants et le nombre de bouquets portant des fruits matures sont suivis pour les variétés suivantes :

- Variété Ananas sur paille avec biomasse d'adventices,
- Variété Ananas sur plastique avec export de la biomasse adventice,
- Variété Noire de Crimée sur paille avec biomasse adventice,
- Variété Noire de Crimée sur paille avec engrais vert,
- Variété Noire de Crimée sur plastique avec engrais vert.

Ces observations sont réalisées aux mêmes moments que les précédentes et ont pour objectif de déterminer l'effet du paillage sur la précocité de la culture, en lien avec les autres paramètres précédemment décrits.

1.3.2. Essai réalisé chez Marion PEYRIC - Evaluation de paillages plastique noir ou à l'aide de paille de blé et de l'effet précédent d'une prairie avec ou sans amendement

La parcelle d'essai est située à proximité de Céreste dans les Alpes de Haute Provence (04) (latitude : 43.849585° ; longitude : 5.567402°). D'après les informations fournies par l'agricultrice et la réalisation d'un test boudin, le sol est estimé être de type limon sableux, soit contenant moins de 10% d'argiles et entre 40 et 60% de limons (BAIZE, 1995). Celui-ci est de profondeur inconnue et repose sur une couche de safre⁶. La parcelle comporte une zone hydromorphe en son centre, prise en compte dans le choix du positionnement de l'essai dans la parcelle (éloignement supérieur à 5m). La parcelle d'essai n'a pas été cultivée depuis environ 40 ans et peut être considérée comme une prairie permanente. Les dernières opérations culturales avant sa mise en culture sont un semis de sainfoin en 2011, rapidement étouffé par la flore naturelle, et un décompactage en 2012. Elle est occasionnellement pâturée par des ânesses, et fauchée 1 an sur 3 et présente une pente estimée inférieure à 2%. La ferme est labellisée Agriculture Biologique depuis 2012.

Avant la mise en place du dispositif d'essai, la végétation présente est coupée à l'aide d'un gyrobroyeur. La prairie est détruite par les passages consécutifs d'un outil à dents fixes (profondeur de travail : 10cm), d'une herse rotative (profondeur de travail : 15cm) et d'un second passage du même outil à dents. Toutes ces interventions sont réalisées entre le 8 avril et le 7 mai.

Le dispositif est constitué de 2 planches de culture de 10m x 1m chacune, l'une paillée à l'aide d'environ 1kg/m² de paille de blé et l'autre à l'aide de polyéthylène noir. La moitié de chacune des planches est amendée à raison de 3,70kg de fumier de bovin composté, apporté tous les 50cm à l'emplacement des plants de tomates les 9 et 10 mai. Ce dispositif est répété sur deux variétés anciennes et une variété hybride de tomates, toutes précoces : Raisin Vert, Moon Glow et Diplom F1. La partie de parcelle choisie pour l'essai est en bordure de champ, du fait de son ensoleillement et de son éloignement avec la zone hydromorphe de la parcelle. Ce dispositif est détaillé sur la figure 6 suivante.

⁶ Roche semblable à un grès tendre et datant du Miocène.

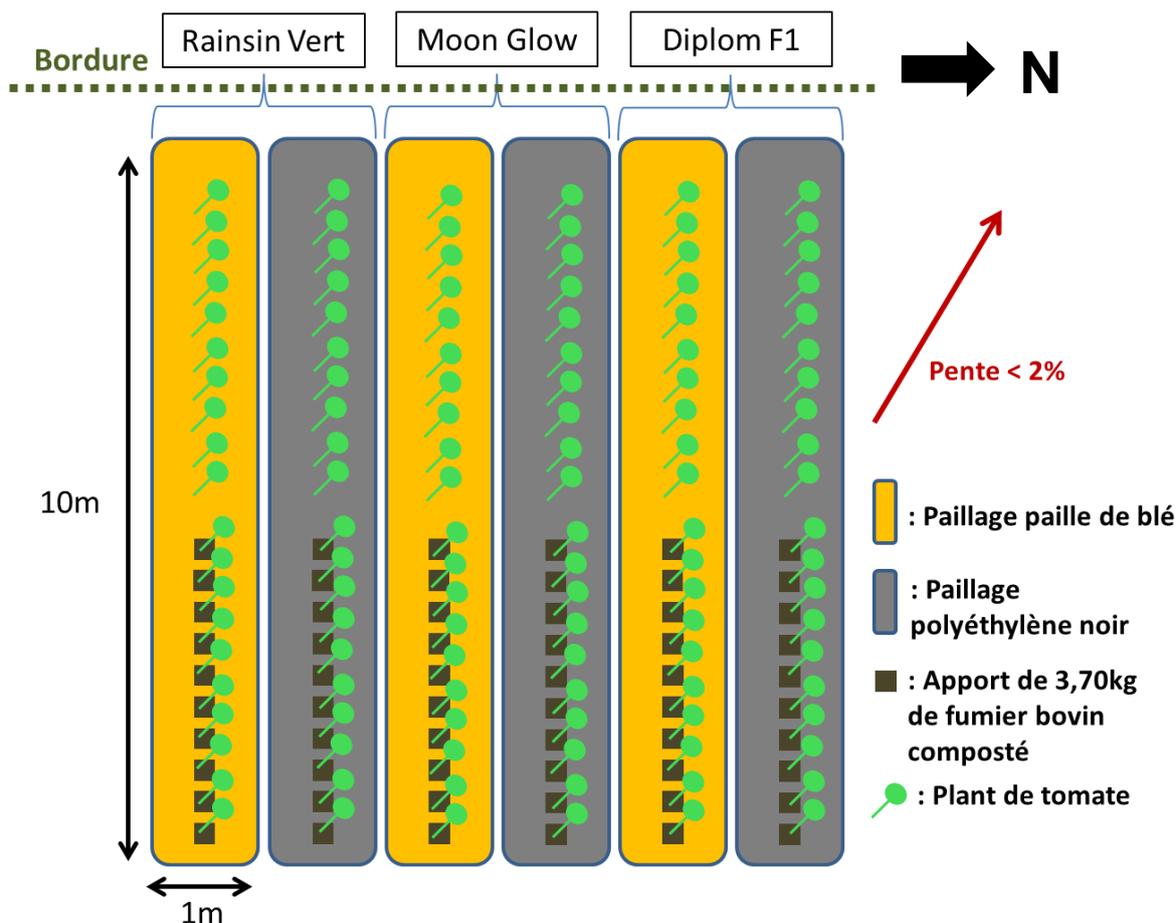


Figure 6 : DISPOSITIF D'ESSAI CHEZ MARION PEYRIC.

Comparaison de l'effet du type de paillage, d'un apport de fumier de bovin composté et de l'effet précédent de la prairie sur la dynamique de minéralisation de l'azote.

Les tomates sont implantées le 17 mai alors que le paillage plastique est en place depuis le 11 mai. L'agricultrice attend jusqu'au 13 juin pour installer la paille de blé, de manière à permettre un réchauffement suffisant du sol, resté nu jusqu'à cette date.

L'irrigation est effectuée par goutte à goutte. Les volumes apportés sont de 35L/plant en une seule fois à la plantation, de 10L/plant 2 fois par semaine entre le 13 juin et le 6 août et de 5L/plant tous les 2 jours à partir de cette dernière date. Il est important d'indiquer qu'un arrêté préfectoral prend lieu à partir du 15 juillet et restreint les volumes de prélèvement pour l'irrigation de 20% jusqu'au 15 octobre, pour cause de sécheresse. Celui-ci n'impacte cependant pas la culture de tomates, l'agricultrice la considérant comme l'une des cultures prioritaires.

Les paramètres suivis sur chacune des modalités de l'essai sont :

- La teneur en nitrates du sol. Elle est mesurée tous les mois compte tenu de l'éloignement de l'essai et à partir du 22 avril.
- La température du sol à 10cm de profondeur. Elle est mesurée toute les semaines par l'agricultrice à partir du 20 mai.
- L'évolution du nombre moyen de bouquets floraux formés par plants et du nombre de bouquet portant des fruits matures par plant est suivie par l'agricultrice toutes les semaines pour chaque variété et chaque modalité. Cette mesure débute à partir du 24 mai.

Le suivi de ces paramètres a pour but d'observer l'influence de chaque paillage, de l'apport d'amendement et de l'effet précédent de la prairie sur la dynamique de minéralisation de l'azote. L'évolution des nombres de bouquets formés ou portant des fruits matures a pour objectif de déterminer l'effet des paillages sur la précocité de la culture, en lien avec la température du sol et sa teneur en nitrates.

Par ailleurs, la mère de l'agricultrice relève les valeurs d'un poste météorologie de Météo-France dans le cadre d'un réseau bénévole. Les données de celui-ci ont pu être fournies à titre gracieux. Cela permet de connaître la température journalière moyenne de l'air (moyenne des minimales et des maximales), les volumes et dates des précipitations ainsi que la couverture nuageuse, et de savoir si ces paramètres ont pu influencer la température du sol.

2. Méthodes de récolte et de traitement des données

2.1. METHODES DE PRELEVEMENT ET DE MESURES ET TRAITEMENTS STATISTIQUES

2.1.1. Teneur en nitrates du sol

L'objectif de cette mesure est d'observer l'évolution de la quantité d'azote assimilable dans le sol afin de rendre compte des processus de minéralisation et d'immobilisation nette de cet élément.

Les prélèvements de sol sont réalisés à l'aide d'une tarière gouge (Figure 7). L'outil permet de prélever du sol sur une profondeur de 25cm. Prélever en une deuxième opération les horizons plus profonds entraîne une partie du sol de surface dans le trou et la mélange ainsi à l'échantillon. Par ailleurs, comme vu dans la synthèse bibliographique, la majorité de la minéralisation brute de l'azote a lieu dans l'horizon 0-10 cm en cas de travail du sol superficiel (MURPHY *et al.* 1998). Ainsi, la profondeur de prélèvement choisie est de 25cm.



Figure 7 : TARIERE GOUGE EMPLOYEE POUR LES PRELEVEMENTS DE SOL.

Pour chaque modalité suivie dans les essais, 10 prélèvements permettent de constituer un échantillon composite, conservé dans une glacière jusqu'à analyse. Le dosage des nitrates est réalisé le même jour ou le lendemain. Pour cela 100g d'échantillon frais tamisé (mailles : 2mm) et homogénéisé sont agités dans 100mL d'eau distillée. La teneur en nitrates du filtrat est ensuite effectuée en réalisant 3 mesures à l'aide de bandelettes Merckoquant et d'un Nitrachek® pour la lecture (Figure 8). La moyenne des 3 valeurs de lecture obtenue est conservée comme valeur de la teneur en nitrates du sol.



Figure 8 : NITRACHEK ET BADELLETES MERCKOQUANT UTILISES POUR LE DOSAGE DES NITRATES DANS LE SOL.

Les essais contenant des répétitions de modalités ne comportent pas les mêmes espèces ou variétés sur celles-ci. Il n'est donc pas possible de réaliser d'analyse statistique de ces dosages, et les trois valeurs de lecture ne constituent pas de réelles répétitions. Seules les tendances des résultats sont donc analysées et comparées à celles obtenues dans des traitements similaires lorsque cela est possible.

2.1.2. Densité apparente

Elle est déterminée par la méthode au cylindre décrite par YORO et GODO (1990). Cette mesure est inversement corrélée à la porosité totale du sol. Elle est ainsi souvent utilisée pour rendre compte de l'évolution de la structure d'un sol sous l'influence de phénomènes de prise en masse ou de compaction (HENIN, 1976 ; PEIGNE *et al.*, 2009).

Le principe de la mesure consiste à prélever un volume connu de sol non remanié et d'en mesurer le poids sec. La valeur obtenue exprime ainsi la densité du sol dans son état initial et prend donc en compte le volume occupé par l'air dans le cylindre. La valeur est appelée densité apparente (D_a) et exprimée en g/cm^3 . Les cylindres utilisés mesurent 50mm de diamètre et de longueur et sont enfoncés verticalement en surface pour les prélèvements d'horizons de profondeur 0-5cm, et horizontalement dans une fosse creusée pour les horizons plus profonds (Figure 9).



Figure 9 : PRELEVEMENT DE SOL DE L'HORIZON 10-15CM PAR LA METHODE DES CYLINDRES.

La mesure pour chaque modalité et chaque horizon est réalisée selon trois répétitions, répétées à 3 emplacements de la surface étudiée, soit un total de 9 répétitions. L'hétérogénéité du sol est prise en compte en positionnant les cylindres en fonction de la surface relative des différents états du sol observés sur le pan de la fosse prélevé. Les échantillons de sol sont séchés à l'étuve à $105^{\circ}C$ durant 48h avant d'être pesés. Les comparaisons de moyennes des 9 répétitions ainsi que le calcul de leurs intervalles de confiance sont réalisées par t.test sur le logiciel R.

2.1.3. Résistance mécanique du sol

Cette mesure est basée sur le principe de la résistance d'un sol à l'enfoncement d'une tige. Elle est effectuée à l'aide d'un pénétromètre manuel statique (Figure 10). Elle est fortement liée à la densité apparente du sol et permet d'avoir une idée de la pression que doivent exercer les racines des cultures pour pénétrer les différents horizons, bien que celle-ci

dépendent également beaucoup de la teneur en eau du sol (CASSEL, 1982 ; CAMPBELL and O'SULLIVAN, 1991; UNGER et JONES, 1998).



Figure 10 : PENETROMETRE STATIQUE MANUEL EMPLOYE POUR LA MESURE DE RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL.

La mesure pour chaque modalité et chaque horizon est réalisée à 6 emplacements différents, excepté dans l'essai réalisé chez Eric BARRIERE où la mesure est réalisée selon 16 répétitions car elle n'est effectuée qu'une seule fois. Les comparaisons de moyennes des 9 répétitions ainsi que le calcul de leurs intervalles de confiance sont réalisées par t.test sur le logiciel R. Lorsque cela n'est pas possible (répartition des données ne suivant pas une loi normale), ces calculs sont effectués sur les médianes (wilcox.test, test de Mann et Whitney). Dans le cas où ces dernières sont trop éloignées des moyennes, seuls les écarts types sont calculés à l'aide du logiciel Excel.

2.1.4. Température du sol

Elle est mesurée à l'aide d'un thermomètre électronique à sonde. La profondeur de mesure choisie est de 10cm. Celle-ci correspond à la longueur de la tige au bout de laquelle se trouve la sonde. Par ailleurs, de nombreuses études mesurant l'effet des paillages sur la température du sol réalisent cette observations à des profondeurs généralement comprises entre 5 et 15cm de profondeur, celle de 10cm étant utilisée plusieurs fois (BRISTOW 1988 ; TEASDALE et ABDUL-BAKI, 1995 ; LARSSON et BATH, 1996 ; LOCHER *et al.* 2005).

Les mesures réalisées chez Solange FOLLET sont toujours effectuées à 11h00 du matin, toujours dans le même ordre. 6 répétitions sont effectuées pour chaque modalité.

Marion PEYRIC réalise elle-même ces mesures sur l'essai réalisé chez elle. Trois répétitions sont effectuées pour chaque répétition de l'essai, soit au total 9 mesures par traitement. Les mesures sont également effectuées à la même heure et toujours dans le même ordre.

2.1.5. Données météorologiques – Marion PEYRIC

La température de l'air n'a pu être suivie que chez Marion PEYRIC. La mère de l'agricultrice relève les valeurs d'un poste météorologie de Météo-France dans le cadre d'un réseau bénévole. Les données de celui-ci ont pu être fournies à titre gracieux.

La moyenne des températures journalières de l'air (moyenne des températures minimales et maximales) est calculée pour les 7 jours précédents la mesure de la température du sol. Les données sur les volumes et dates des précipitations ainsi que sur la couverture nuageuse sont également disponibles et permettent de savoir si ces paramètres ont pu influencer la température du sol.

2.1.6. Evolution du nombre de bouquets floraux

Cette mesure correspond à une adaptation simplifiée de l'échelle BBCH des stades phénologiques des solanacées (FELLER *et al.*, 1995). Deux variables sont relevées : le nombre de bouquets floraux ou inflorescences apparues (premier bouton dressé) par plant et le nombre d'inflorescence comportant au moins un fruit mature ou déjà récolté. La première sert d'indicateur de la vitesse de développement des plantes, et la seconde de l'état d'avancement de la récolte sur chaque modalité. Pour cette dernière, l'observation du premier bouquet comportant au moins un fruit mature ou récolté indique la date de première récolte.

Dans l'essai réalisé chez Solange FOLLET, ces deux observations sont effectuées sur 10 plants choisis au hasard à chaque suivi et sur les variétés et modalités indiquées précédemment. La moyenne des différents nombres de bouquets est ensuite calculée.

Chez Marion PEYRIC, cette observation est réalisée par l'agricultrice. Pour éviter que cette mesure soit trop chronophage pour l'agricultrice, elle effectue une observation générale de développement des plants et note le stade majoritairement observé. Cependant il n'est considéré qu'un stade est atteint sur toute une modalité que lorsqu'au moins 50% des plantes y sont parvenues.

2.1.7. Rendements

Solange FOLLET n'a pu effectuer cette mesure que durant les trois dernières semaines de la culture, au moment où les dégâts de T. absoluta étaient déjà élevés. Ces données ne peuvent donc pas être exploitées de manière fiable.

Marion PEYRIC pèse les récoltes sur chaque modalité. Cependant la culture n'est pas arrivée à terme au moment du traitement des données et les variétés implantées n'ont pas exactement le même degré de précocité. Ces données ne sont donc pas exploitées dans le présent rapport mais feront l'objet d'analyses ultérieures.

La culture de haricots semée sur l'essai portant sur le travail du sol à la grelinette est récoltée jusqu'en octobre selon les conditions climatiques. Ici également ces données ne peuvent être exploitées car elles ne sont pas représentatives du rendement réellement obtenu.

En revanche, les rendements sont mesurés dans l'essai portant sur l'emploi d'un engrais vert de petit épeautre. Ils sont déterminés par l'agriculteur, qui pèse le poids moyen des fruits récoltés et les compte à chaque récolte. Ce choix est fait pour réduire le temps de mesure par

l'agriculteur. Le poids moyen des fruits est mesuré pour les deux planches de courgettes, récoltées à calibre constant, et séparément pour les deux planches d'aubergines.

2.2. RETOUR D'EXPERIENCE DES AGRICULTEURS SUR LA PRATIQUE TESTEE

Les entretiens semi-directifs se déroulent sur une demi-journée. Ils sont structurés en trois grandes étapes.

La première partie consiste à recueillir les observations spontanées réalisées par les maraîchers en cours de saison et qui n'ont pas pu être vues par le stagiaire lors des suivis. Cela permet également de connaître la perception de chaque agriculteur sur les différences observées entre les modalités ainsi que celles qu'il considère comme les plus marquantes

La seconde étape permet de savoir, dans les cas où cela est possible, si l'agriculteur considère que les objectifs pour lesquels la pratique est testée sont atteints. Le temps de travail de chaque intervention réalisée pour chaque modalité est ensuite estimé par l'agriculteur afin de faire ressortir d'éventuelles étapes lourdes à réaliser. Cela permet également de recueillir le ressenti de l'agriculteur sur la pénibilité d'une partie ou de la totalité de la pratique. Enfin, les modifications possible de la pratique testée sont déterminées afin de définir comment celle-ci peut être intégrée (organisation des étapes de l'itinéraire technique, éventuels conflits entre certaines interventions et d'autres tâches prioritaires dans l'exploitation, surface attribuée,...).

Lors de la dernière partie, les résultats de l'essai sont fournis à l'agriculteur, qui dans un premier temps en donne sa propre interprétation. Puis celle-ci est confrontée avec l'analyse du stagiaire pour recueillir certaines observations manquantes, relever d'éventuelles incohérences et expliquer, lorsque cela est possible, les possibles résultats surprenants par l'itinéraire technique ou des accidents de culture.

Les observations des agriculteurs et les échanges réalisés autour de l'interprétation des résultats sont intégrés dans la discussion des résultats issus des mesures. Le retour d'expérience de chaque agriculteur et de chaque agricultrice sur les changements et l'intégration de la pratique dans le système de production constitue une partie distincte et finale de la discussion de chaque essai. Elle permet de nuancer les conclusions tirées de l'analyse des résultats et de valoriser l'aspect ascendant de la démarche d'expérimentation.

Enfin, le suivi des essais permet des échanges réguliers entre le stagiaire et les agriculteurs, ce qui permet de recueillir certaines de leurs observations. Pour approfondir la discussion, les guides d'entretiens sont majoritairement orientés en fonction de ces observations. Ainsi, chaque guide est différent des autres pour la plus grande partie des questions posées. Ceux-ci sont présentés en Annexe 1.

V. RESULTATS, INTERPRETATION ET DISCUSSION

1. Effet du travail du sol à la grelinette sur la structure du sol et la minéralisation de l'azote organique.

Observations réalisées chez Eric BARRIERE

Les observations sont réalisées sur deux parcelles, dont les planches de culture présentent un horizon compacté, possiblement provoqué par le passage des roues du tracteur lors de leur création. La parcelle "non travaillée" ne comporte pas d'intervention de travail du sol depuis un passage de herse rotative (profondeur de travail : 10cm) au mois de mai. La planche choisie dans l'autre parcelle, dite "travaillée", reçoit la même intervention ainsi qu'un passage de grelinette (profondeur de travail : 20cm) au début du mois de mars. **La question initiale à l'origine de ces observations est de savoir si cette dernière intervention a permis de décompacter l'horizon tassé.** Les observations réalisées ont pour objectif de compléter les mesures réalisées chez Patrick VIDAL.

Essai réalisé chez Patrick VIDAL

Le sol de la parcelle est limono-sableux présentant un phénomène naturel de prise en masse en dessous de 10cm de profondeur. **L'agriculteur souhaite évaluer l'efficacité et la durée de l'effet du travail du sol à la grelinette pour remédier à ce problème.** L'essai comporte deux planches de culture, l'une travaillée le 11avril, l'autre non.

1.1. INFLUENCE DU TRAVAIL A LA GRELINETTE SUR LA STRUCTURE DU SOL

1.1.1. Densité apparente (Da)

1.1.1.1. Résultats

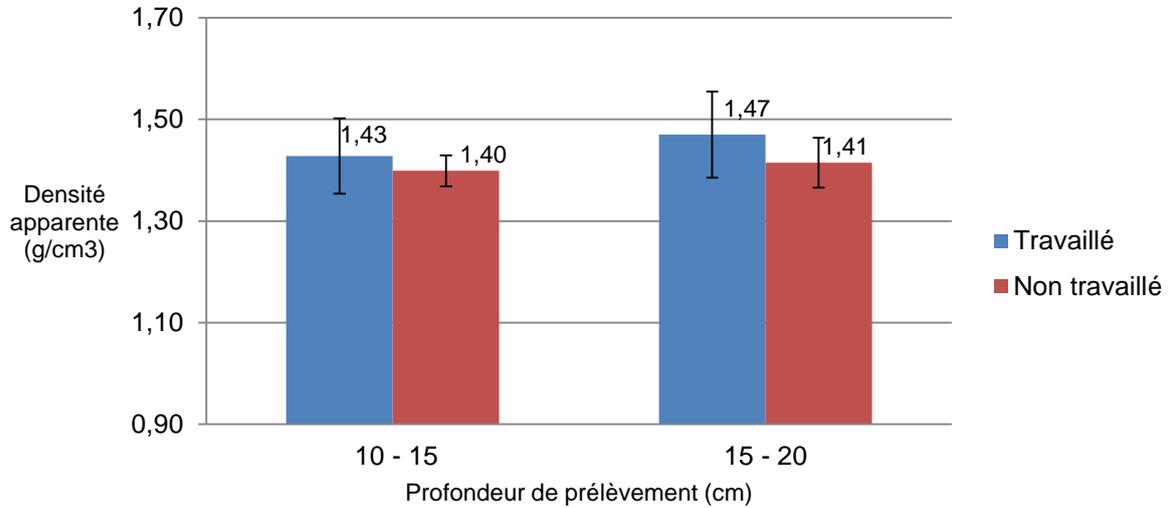


Figure 11 : COMPARAISON DES DENSITES APPARENTES (D_a) D'HORIZONS COMPACTE D'UNE PLANCHE TRAVAILLEE A LA GRELINETTE ET D'UN PLANCHE NON TRAVAILLEE (ERIC BARRIERE).

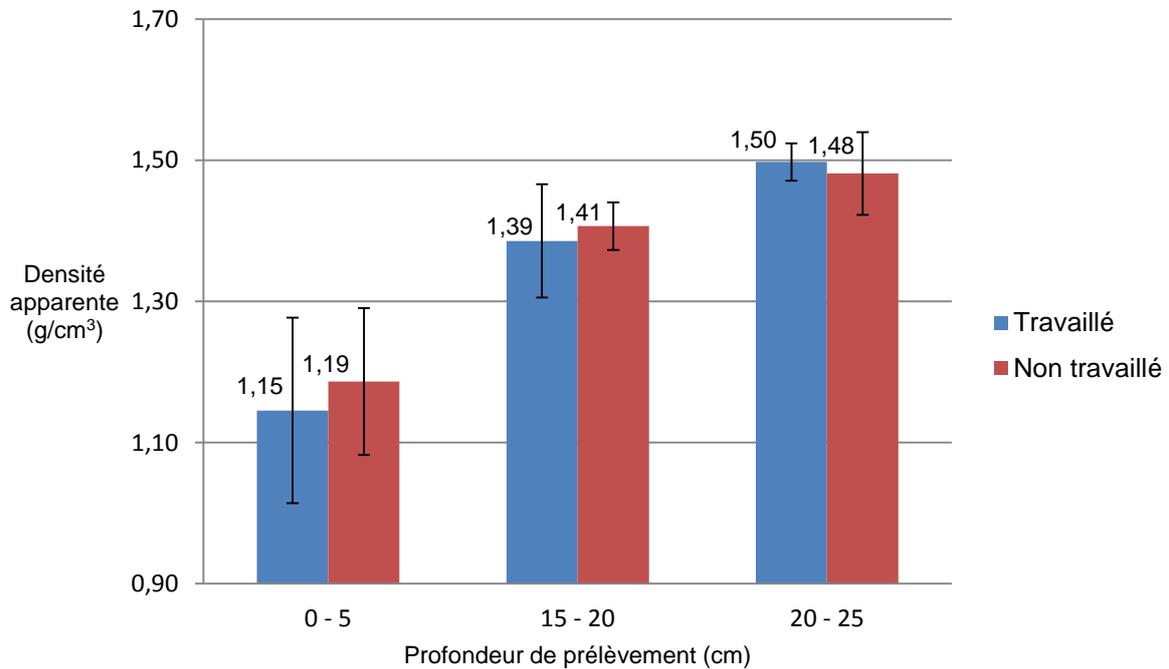


Figure 12 : COMPARAISON DES DENSITES APPARENTES (D_a) D'HORIZONS PRENANT EN MASSE D'UNE PLANCHE DE CULTURE TRAVAILLEE A LA GRELINETTE ET D'UNE PLANCHE NON TRAVAILLEE (PATRICK VIDAL).

La D_a augmente de façon significative avec la profondeur du sol, et ce pour chaque planche prélevée chez Patrick VIDAL (Figure 12) (t.test, p-value la plus élevée = 0,02157). Ce résultat n'est en revanche pas observé chez Eric BARRIERE (Figure 11).

Dans les deux essais, le passage de grelinette n'induit pas de changement significatif de densité apparente du sol, et cela pour tous les horizons et toutes les planches de cultures étudiées. Par ailleurs, les écarts observés sont faibles (entre 1 et 3% de variation). La mesure de densité apparente telle qu'elle a été réalisée (9 répétitions par mesure) ne permet donc pas de conclure quant à un effet de l'intervention.

1.1.1.2. *Interprétations, discussion*

L'augmentation de la densité apparente avec la profondeur de prélèvement observée chez Patrick VIDAL est cohérente avec les informations fournies par la littérature (CHAUDHARI *et al.*, 2013 ; LAMPURLANES et CANTERO-MARTINEZ, 2003). Cette augmentation s'explique par la baisse des teneurs en matières organiques et de la porosité produite par l'activité biologique (racines, macrofaune) (CHAUDHARI *et al.*, 2013).

L'écart observé entre les moyennes est très faible (0,02 à 0,04g/cm³) et semble indiquer que le passage de grelinette ne permet pas de réduire la prise en masse ou la compaction du sol. En effet, EVANS *et al.* (1996) observent qu'un sous-solage à 45cm de profondeur de sols argileux diminue significativement leurs densités apparentes d'environ 0,15 ou 0,17g/cm³ pour l'horizon 0-35cm lors de la première année d'utilisation. GAMEDA *et al.* (1993a) et REEDER *et al.* (1993) ont également démontré l'effet significatif d'un passage de sous-soleuse sur la D_a ou la porosité de sols argileux ou argilo-limoneux compactés. ADEOYE et MOHAMED-SALEEM (1990) observent également une diminution significative de la D_a sur sols sableux compactés, et QIN *et al.* (2008) obtiennent des résultats similaires en systèmes sans travail du sol sur sol sableux non compactés. La comparaison avec l'effet du sous-solage est choisie ici car c'est une intervention dont l'effet sur la densité apparente est largement référencé et qui est proche du mode d'action de la grelinette (scarification sans retournement).

Toutefois, l'absence de résultat significatifs peut également provenir de la variabilité des données, les moyennes variant dans des intervalles allant jusqu'à plus de 0,20g/cm³, soit plus que l'effet que peut produire un sous-solage. Il semble également intéressant d'ajouter que cette variabilité ne semble pas moins élevée chez Patrick VIDAL que chez Eric BARRIERE. L'effet suspecté de l'hétérogénéité spatiale du sol chez ce dernier ne semble donc pas avoir une incidence plus élevée sur la variabilité des mesures.

Mesurer la densité apparente du sol par la méthode des cylindres est fastidieux (environ 3 jours de prélèvements par essai). Ainsi, augmenter le nombre de répétitions pour pallier la variabilité des résultats semble peu réaliste. Par ailleurs, compte tenu de l'hétérogénéité des mesures, un plus grand nombre d'observations n'aurait pas garanti une réduction suffisante des intervalles de confiance pour rendre la mesure plus sensible. Des observations plus qualitatives par la réalisation de profils culturaux auraient pu permettre de distinguer davantage les différences de structure du sol. Il aurait également été intéressant d'effectuer ces observations avant et après le passage de l'outil, ainsi qu'à la fin de la saison de culture pour suivre l'évolution du sol durant cette période. Malgré cela, un niveau d'expertise supérieur

aurait été nécessaire. Bien qu'il n'était pas possible de le prédire, le choix de réaliser une mesure quantitative pour se soustraire à cette contrainte n'était ici pas pertinent.

1.1.2. Résistance mécanique à la pénétration

1.1.2.1. Résultats

Chez Eric BARRIERE, la résistance mécanique moyenne à la pénétration (16 répétitions par relevé) n'est pas significativement différente entre les horizons de profondeur 10-20cm de la planche travaillée et de la planche non travaillée (t.test sur R, p-value=0,3273). Aucune différence significative n'est non plus observée lorsque les données sont regroupées en 2, 3, 4 ou 5 classes (test exact de Fisher, p-value la plus faible=0,5467). Le nombre d'occurrences pour 5 et 2 classes de regroupement des valeurs de résistance mécanique sont toutefois donnés ci-dessous afin d'observer si des tendances s'en dégagent. Les résultats correspondent uniquement aux valeurs mesurées dans les horizons de 10-20cm de profondeur.

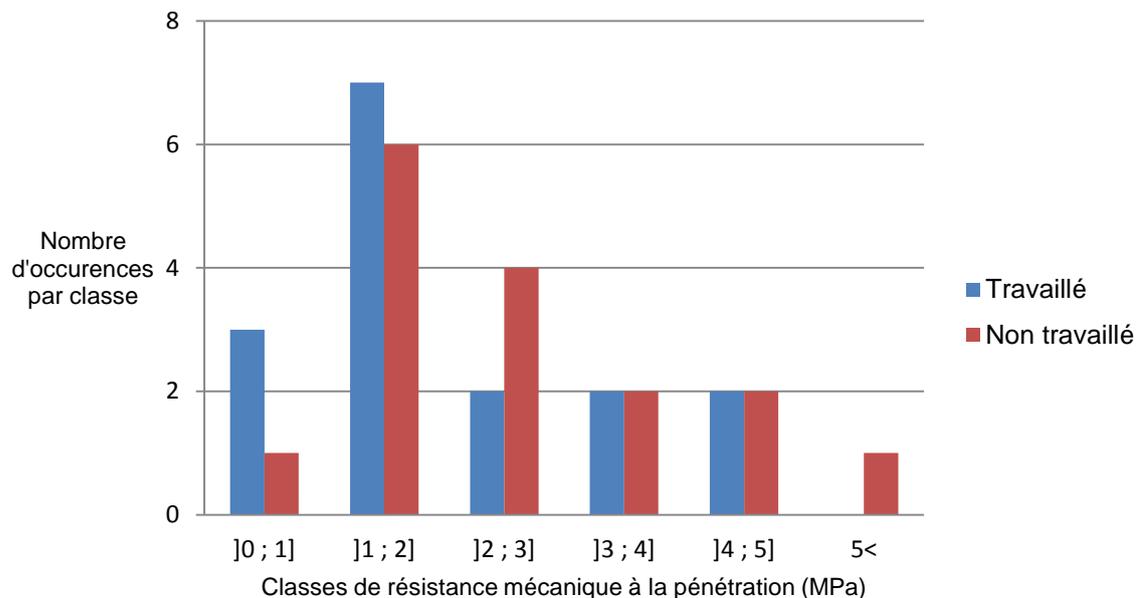


Figure 13 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 10-20CM D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (ERIC BARRIERE).

Les données sont réparties de façon à observer le nombre de mesures obtenus pour 6 classes de valeurs de résistance mécanique à la pénétration du sol. L'intervalle à l'intérieur de chaque classe est de 1MPa.

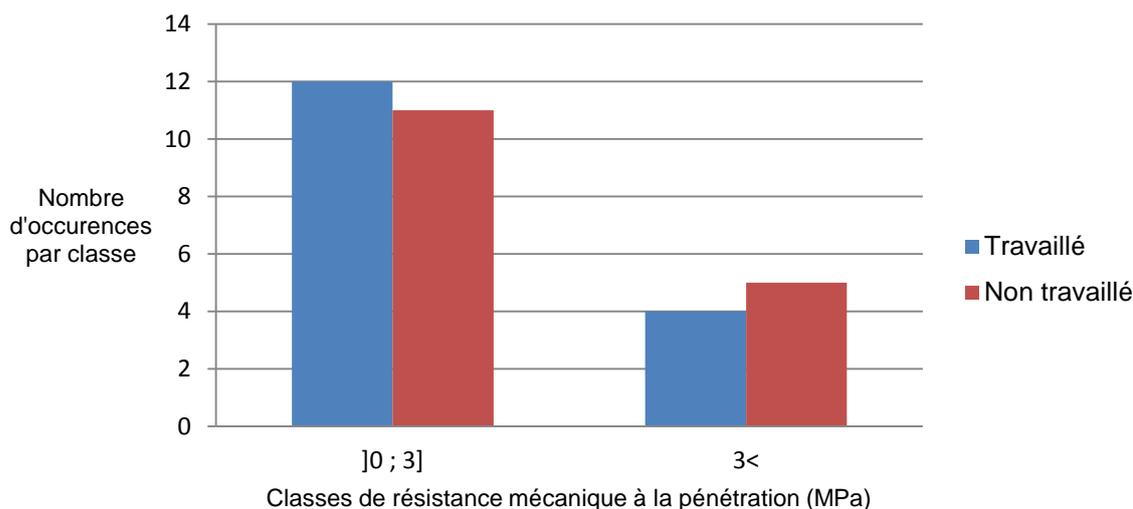


Figure 14 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 10-20CM D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (ERIC BARRIERE).

Les données sont réparties de selon 2 classes. La première regroupe le nombre de valeurs observées en dessous de 3MPa, comme étant la valeur seuil empêchant la croissance racinaire, la seconde les valeurs supérieures à ce seuil.

Le nombre plus élevé de données relevées chez Patrick VIDAL (36 par planche et par profondeur cumulés sur la saison) permet de calculer les intervalles de confiance sur les moyennes.

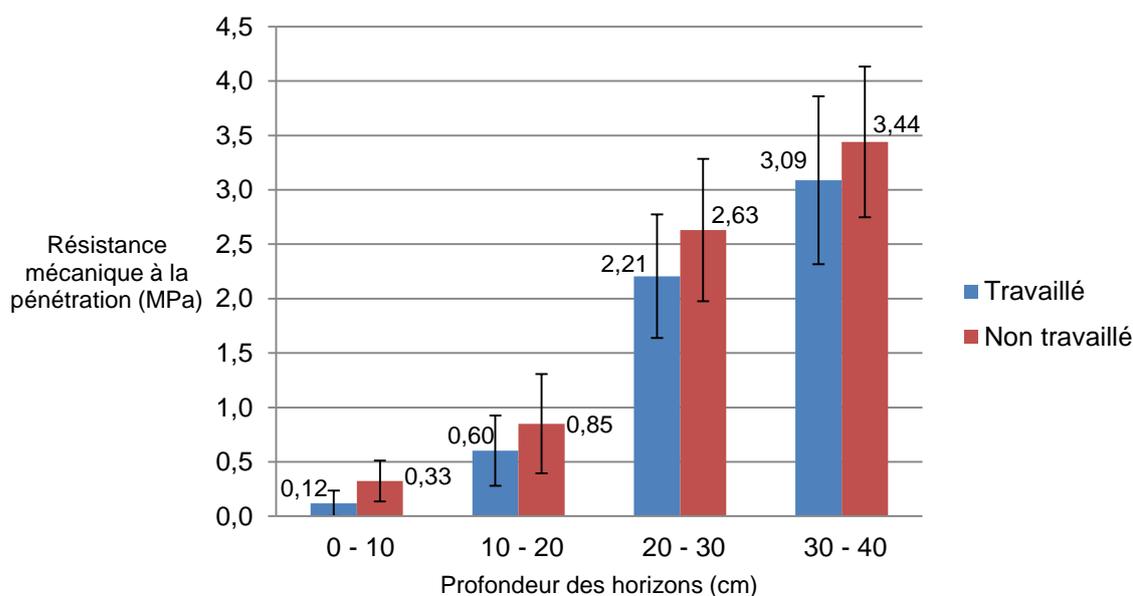


Figure 15 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE D'UN SOL TRAVAILLE A LA GRELINETTE ET D'UN SOL NON TRAVAILLE (PATRICK VIDAL).

Chez Eric BARRIERE, seulement 1 à 2 occurrences supplémentaires sont observées dans les classes]0 ; 1]MPa et]1 ; 2]MPa (Figure 13), et 1 occurrence supplémentaire dans la classe]0 ; 3]MPa (Figure 14) pour le sol travaillé à la grelinette. Ce dernier ne semble donc pas présenter un plus grand nombre de valeurs comprises dans des gammes de faible résistance mécanique du sol. Il paraît donc extrêmement hasardeux de conclure que cet outil ait permis de décompacter l'horizon tassé.

Les données obtenues chez Patrick VIDAL présentent une forte variabilité (Figure 15). Les résistances mécaniques moyennes ne sont pas significativement différentes entre le sol travaillé et celui non travaillé, tous horizons confondus. Malgré cela, les horizons du sol travaillé semblent systématiquement présenter des valeurs plus faibles que celles des horizons du sol non travaillé. Les écarts vont de 0,21MPa à 0,42MPa, soit de 10% pour l'horizon de profondeur 30-40cm à 63% pour celui de 0-5cm.

Cette tendance est également observée au-delà de 30cm profondeur, alors que les dents de l'outil ne sont censées pouvoir atteindre que les 25 premiers cm de sol d'après les dires de l'agriculteur. Des mesures permettent de déterminer la longueur de dents de l'outil, qui n'est que de 22cm.

On observe enfin que la résistance mécanique du sol augmente avec la profondeur, et ce pour chacune des planches. Cette augmentation n'est cependant pas systématiquement significative.

1.1.2.2. *Interprétations, discussion*

Dans l'essai réalisé chez Patrick VIDAL, la tendance du sol travaillé à présenter des valeurs de résistance mécanique à la pénétration plus faible au-delà de la profondeur travaillée par l'outil paraît surprenante. Elle indiquerait que les valeurs plus faibles relevées dans les horizons compris entre 0 et 30cm de profondeur du sol travaillé pourraient être liées à d'autres facteurs propres au sol de cette bande plutôt qu'à l'effet de l'outil.

Par ailleurs, chez ce dernier, l'augmentation de la résistance mécanique des sols avec la profondeur est cohérente avec les résultats de BRADFORD (1986), CAMPBELL et O'SULLIVAN (1991) et FRANZEN *et al.* (1994). Ces derniers indiquent que cette augmentation est due à l'accroissement des forces de friction du sol sur le cône du pénétromètre. Bien que cette augmentation ne soit pas systématiquement significative, il semble que les mesures réalisées permettent d'observer ce phénomène. Il se pourrait donc que les tendances observées entre sol travaillé et sol non travaillé soient réellement induites par la différence d'état de ces deux sols. De plus, l'un des facteurs influençant le plus la résistance mécanique à la pénétration est sa densité apparente (CASSEL, 1982 ; CAMPBELL and O'SULLIVAN, 1991; UNGER et JONES, 1998). Cette relation entre ces mesures semblerait être observée ici. Il serait alors possible de supposer que l'outil ait bien permis de réduire la prise en masse du sol. Malgré cela, les intervalles de confiances obtenus, l'observation d'une résistance mécanique plus faible dans les horizons non travaillés indiquant un possible effet de zone, ainsi que les résultats issus de l'essai chez Eric BARRIERE ne permettent pas de l'affirmer. Avec la densité apparente, la teneur en eau est le paramètre qui influence le plus la résistance mécanique à la pénétration d'un sol donné (CASSEL, 1982 ; CAMPBELL and O'SULLIVAN,

1991; UNGER et JONES, 1998). Chez Patrick VIDAL, les mesures ayant été réalisées à intervalles variables des périodes d'irrigation et de précipitations, cela peut ainsi expliquer pourquoi les résultats obtenus affichent une variabilité aussi importante.

Pour remédier à cette variabilité, il aurait fallu effectuer ces mesures à intervalles réguliers après chaque période d'irrigation et de précipitations. Or, l'irrigation est déclenchée par l'agriculteur lorsque celui-ci juge son sol trop sec et donc à intervalles irréguliers, contrairement à la mesure de la résistance mécanique, effectuée lors des prélèvements de sol pour les mesures des teneurs en nitrates.

1.2. EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL (PATRICK VIDAL)

1.2.1.1. Résultats

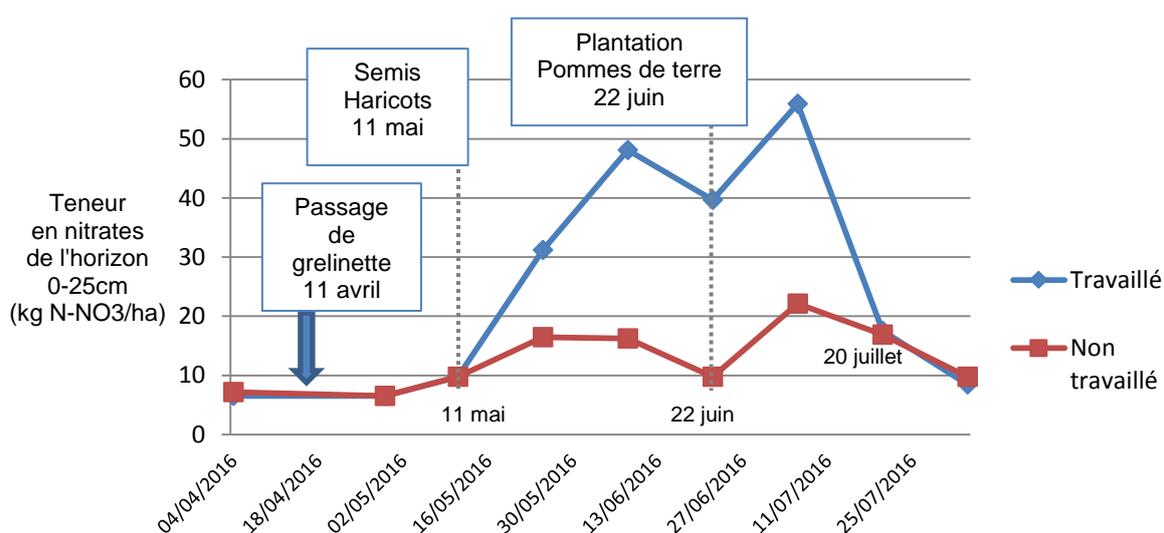


Figure 16 : EFFET DU TRAVAIL DU SOL A LA GRELINETTE SUR LA DYNAMIQUE DE MINERALISATION DE L'AZOTE (PATRICK VIDAL).

Bien que le passage de grelinette ait eu lieu le 11 avril, les teneurs en nitrates des deux planches de culture augmentent de façon identique du 29 avril jusqu'au 11 mai (Figure 16). Passée cette dernière date, la minéralisation de l'azote devient plus rapide dans le sol travaillé et sa teneur en nitrates reste toujours supérieure, avec des valeurs supérieures de 93 à 200% jusqu'au 20 juillet et un écart régulier entre les deux planches d'environ 30 unités d'azote (UN ou kg N-NO₃/ha) à partir du 8 juin. Il semble intéressant de noter que qu'une baisse similaire des valeurs est observée pour les deux planches le 22 juin. La teneur en nitrates baisse ensuite de 56UN à 17UN entre le 6 et le 20 juillet, atteignant ainsi la même valeur que celle mesurée dans la planche non travaillée. La teneur en nitrates décroît également dans cette

dernière, mais de façon moins rapide. La quantité d'azote assimilable dans le sol travaillé et le sol non travaillé continue ensuite de diminuer, passant alors à 8 et 10UN respectivement.

1.2.1.2. *Interprétations, discussion*

L'augmentation conjointe aux deux planches des teneurs en nitrates entre le 29 avril et le 11 mai est probablement liée à un début lent de réchauffement du sol, mais qui n'a pu être mesuré. L'élévation rapide des quantités de nitrates qui suit dans la planche travaillée pourrait être expliquée par des précipitations de 38mm, cumulées entre 8 et le 13 mai. Cependant, alors que la planche non travaillée reçoit la même quantité d'eau, l'augmentation des teneurs en nitrates y est beaucoup plus faible. Le travail du sol étant le seul paramètre qui différencie les deux planches, il est possible de suspecter que cette intervention est à l'origine de l'élévation supérieure des teneurs en nitrates dans la planche travaillée.

La diminution des teneurs en nitrates le 22 juin coïncide avec une augmentation non significative de la résistance mécanique du sol et plus rapide pour le sol non travaillé (non affichée ici). Cette grandeur est fortement dépendante de la teneur en eau du sol (CASSEL, 1982 ; CAMPBELL and O'SULLIVAN, 1991; UNGER et JONES, 1998). Cela est cohérent avec le fait que la mesure est réalisée juste avant un arrosage, c'est-à-dire à un moment auquel le sol est considéré comme trop sec par l'agriculteur. Ainsi, une faible disponibilité en eau quelques jours avant la mesure pourrait avoir ralenti les processus de minéralisation de l'azote (WATTS et TORBERT, 2014), qui en parallèle aurait été absorbé par la culture. En effet, REY *et al.* (2015) indiquent que la fixation symbiotique n'est efficace qu'à partir de la floraison des haricots, qui n'avait pas encore débuté au 22 juin (stades allant de 2 à 20 feuilles trifoliées environ).

La baisse des quantités d'azote assimilable observée entre le 6 et le 20 juillet peut être liée à l'implantation récente de la culture de pommes de terre, pouvant mobiliser 100UN durant son cycle (pour 25 T/ha de pommes de terre primeur (REY *et al.*, 2015)). Par ailleurs, la baisse plus rapide des valeurs dans la planche travaillée peut être expliquée par le fait que le travail du sol aurait permis un meilleur développement racinaire de la culture, alors capable d'absorber davantage de nitrates. Enfin, il est possible de supposer que la baisse des valeurs n'est pas aussi rapide dans la planche non travaillée, compte tenu de la faible fourniture en azote assimilable du sol au moment de la plantation des pommes de terre.

Ainsi, il semble que la minéralisation de l'azote ait été influencée par l'intervention de travail du sol. Cette interprétation est toutefois à mettre en lien avec les observations précédentes sur la structure du sol des deux planches.

1.3. DISCUSSION GENERALE

Le passage de grelinette induit une minéralisation nette supérieure à celle observée dans la planche non travaillée. Le sol étudié contenant moins de 10% d'argiles, il est possible que la protection de la matière organique par celles-ci soit faible (WATTS et TORBERT, 2014). L'exposition par le travail du sol de la matière organique protégée par les

argiles ne peut donc pas ici expliquer l'augmentation des teneurs en nitrates observée (HASSINK, 1992 ; WATTS et TORBERT, 2014).

Ainsi, l'effet le plus probable de cette intervention serait un changement de la structure du sol permettant l'amélioration des échanges de gaz et d'eau et un réchauffement plus rapide du sol, et favorisant une minéralisation nette accrue. En effet NIEDER et BENBI (2008) indiquent que les effets du travail du sol, en modifiant ses propriétés physiques telles que sa structure ou sa densité apparente, affectent les transferts d'eau, de chaleur et de gaz, qui influencent en conséquence la minéralisation de l'azote par les micro-organismes.

Après le travail du sol, aucun changement significatif de ses propriétés physiques n'est observé chez Patrick VIDAL. Les tendances observées sur la densité apparente et la résistance mécanique à la pénétration du sol sont pourtant cohérentes entre elles et semblent toutes deux indiquer une structure moins compacte du sol travaillé. Par ailleurs, bien que les écarts obtenus entre sol travaillé et non travaillé soient faibles, ils paraissent avoir un effet non négligeable sur la dynamique de minéralisation de l'azote du sol.

Enfin, il se peut également que l'emploi de la grelinette ait augmenté la surface de contact entre la matière organique du sol humifiée, concentrée en surface, et le sol sur la profondeur travaillée, permettant ainsi d'accroître la minéralisation de l'azote organique (NIEDER et BENBI, 2008 ; WHALEN *et al.* 2013). Ce phénomène a en effet été observé à certains endroits des planches de culture lors des prélèvements de sol par la méthode des cylindres. Cela expliquerait d'ailleurs pourquoi le niveau de minéralisation nette est maintenu à des valeurs supérieures pendant environ 1 mois, et qu'un réchauffement supérieur en début de saison ne pourrait expliquer seul.

1.4. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTEUR

Patrick VIDAL n'est pas satisfait par l'effet de cette pratique. Le passage de l'outil a créé des mottes en surface et donc une structure non souhaitée. Toutefois celui-ci indique avoir besoin d'attendre qu'un profil cultural, prévu après la destruction de la culture, soit réalisé pour pouvoir se prononcer sur l'efficacité de l'outil pour remédier à la prise en masse naturelle du sol. De plus, il n'observe pas de différence entre la planche travaillée et celle non travaillée, que ce soit sur le développement de la culture ou même sur l'enherbement. Ainsi, le maraîcher souhaitant travailler sans aucun travail du sol, cette pratique ne lui paraît pas satisfaisante.

Par ailleurs, bien qu'il ne l'ait pas évoqué comme une limite de cette intervention, il semble important d'indiquer que le travail d'une planche de culture à l'aide d'une grelinette lui prend entre 1 et 2 heures.

Selon lui, la pratique la plus intéressante pour remplacer celle-ci, serait d'implanter un engrais vert à fort pouvoir structurant, tel que le radis fourrager.

2. Effet d'un engrais vert de petit épeautre sur la minéralisation de l'azote organique

Rappel : L'essai est constitué de 2 planches comportant un engrais vert de petit épeautre semé le 1^{er} novembre 2015 (830kg/ha) et occulté le 20 avril par une bâche de polyéthylène noir sur une planche et par de la paille de luzerne sur l'autre, ainsi que deux planches témoins. Une culture de courgettes est implantée le 5 mai sur la planche d'engrais vert occulté par la paille de luzerne et une planche témoin. Des aubergines sont implantées le 19 mai sur les planches restantes. **L'agriculteur souhaite connaître l'effet de cet engrais vert sur la dynamique de minéralisation de l'azote, la résistance mécanique à la pénétration du sol ainsi que sur les cultures.**

2.1. INFLUENCE DU PRECEDENT ENGRAIS VERT SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL

La répartition des données, cumulées sur la saison de culture ou observée séparément pour chaque date de suivi, ne permet pas dans plus d'un cas sur deux de calculer les intervalles de confiance sur les moyennes. Ceux-ci peuvent être calculés sur les médianes, mais les écarts entre celles-ci et les moyennes sont souvent importants (22% d'écart en moyenne et 1 valeur sur 2 avec plus de 25% d'écart). Ainsi, afin de permettre une lecture compréhensible de la variabilité des données obtenues, les barres d'erreur affichées dans tous les graphiques suivants correspondent aux écarts types des données.

2.1.1. Etat moyen des sols entre le 25 mai et le 20 juillet

2.1.1.1. Résultats

Les valeurs de résistance mécanique mesurées durant l'occultation de l'engrais vert (25 mai) sont éliminées pour le calcul des moyennes présentées ci-dessous. Ces valeurs sont très élevées du fait de l'impossibilité d'introduire l'appareil de mesure dans le sol et biaisent l'interprétation de l'état du sol durant la saison.

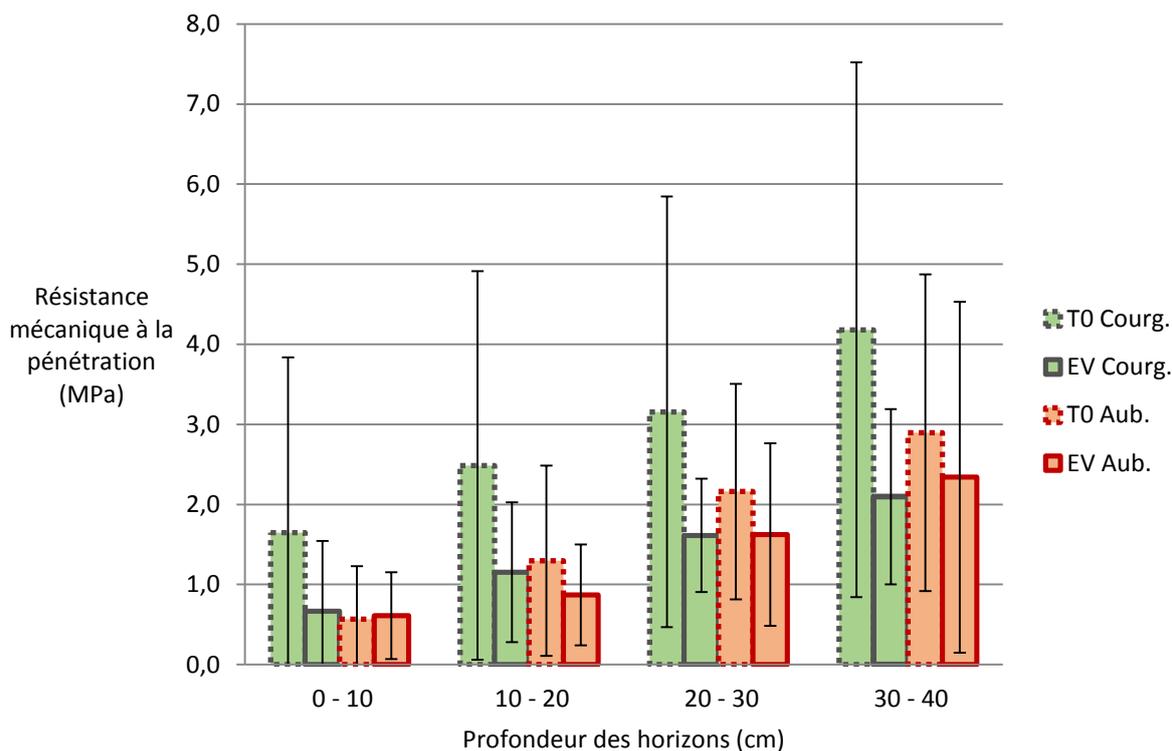


Figure 17 : COMPARAISON DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DU SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT DE PETIT EPEAUTRE.

Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.

La variabilité des résultats obtenus (Figure 17) est extrêmement importante et rend hasardeuse leur l'interprétation. Malgré cela, on observe tout de même une tendance d'augmentation des valeurs moyennes avec la profondeur du sol. Excepté pour l'horizon 0-10cm de la culture d'aubergines, il semblerait également que les planches d'engrais vert présentent des résistances mécaniques plus faibles que celles de leurs témoins respectifs, avec l'écart le plus important observé pour la culture de courgettes.

2.1.1.2. Interprétations, discussion

La variabilité importante des résistances mécaniques moyennes est liée à deux facteurs : la variabilité spatiale inhérente à cette mesure ainsi qu'aux teneurs en eau des sols souvent différentes entre les divers relevés effectués. Néanmoins, l'augmentation de la résistance mécanique du sol avec sa profondeur est cohérente avec les résultats des autres essais, ainsi qu'avec les informations fournies par la littérature (BRADFORD, 1986 ; CAMPBELL et O'SULLIVAN, 1991 ; FRANZEN *et al.*, 1994 ; TEKESTE, 2007). Par ailleurs, l'écart observé

entre le témoin et la planche d'engrais vert de la culture de courgettes est également cohérent avec un état plus sec de la planche témoin, apprécié au toucher lors des prélèvements de sol pour les mesures des teneurs en nitrates. Aucun apport supplémentaire de paillage n'est réalisé sur cette planche. L'état de dégradation avancée de la paille restante de l'année dernière ne lui permettait pas de couvrir la totalité de la surface de la planche et exposait donc celle-ci au rayonnement solaire direct et aux vents fréquents, favorisant ainsi l'évaporation de l'eau (GODWIN, 1992). Les résultats indiqueraient que les sols comportant un précédent engrais vert présentent une résistance mécanique inférieure à celle observée dans le cas d'une conduite classique. Par ailleurs, cet écart serait d'autant plus marqué lorsqu'aucun paillage n'est mis en place, ne limitant pas ainsi l'évaporation de l'eau du sol.

Ce résultat serait cohérent avec les informations fournies par BERTUZZI *et al.*, (2012), citant plusieurs études mesurant un effet positif des cultures intermédiaires sur la structure du sol, notamment par une diminution de sa résistance mécanique à la pénétration. La variabilité des résultats ne permet cependant pas de l'affirmer dans cet essai. Les recommandations pour remédier à cette variabilité sont les mêmes que celles citées précédemment : réaliser la mesure à intervalles réguliers après irrigation des planches de culture, et augmenter le nombre de répétitions.

2.1.2. Evolution de la résistance mécanique à la pénétration du sol en cours de saison

2.1.2.1. Résultats

Les résultats présentés correspondent à la moyenne calculée à partir des valeurs obtenues pour les horizons 0-10cm, 10-20cm et 20-30cm. Le choix a été fait de ne pas présenter les valeurs maximales sur ces trois profondeurs, qui aurait ainsi correspondu à la limite maximale de résistance mécanique opposée à la croissance des racines. Cela serait revenu, dans la totalité des cas, à présenter les résultats obtenus pour l'horizon 20-30cm. De plus, l'objectif est ici d'interpréter les données sur la profondeur la plus proche de celle choisie pour la mesure des teneurs en nitrates (0-25cm).

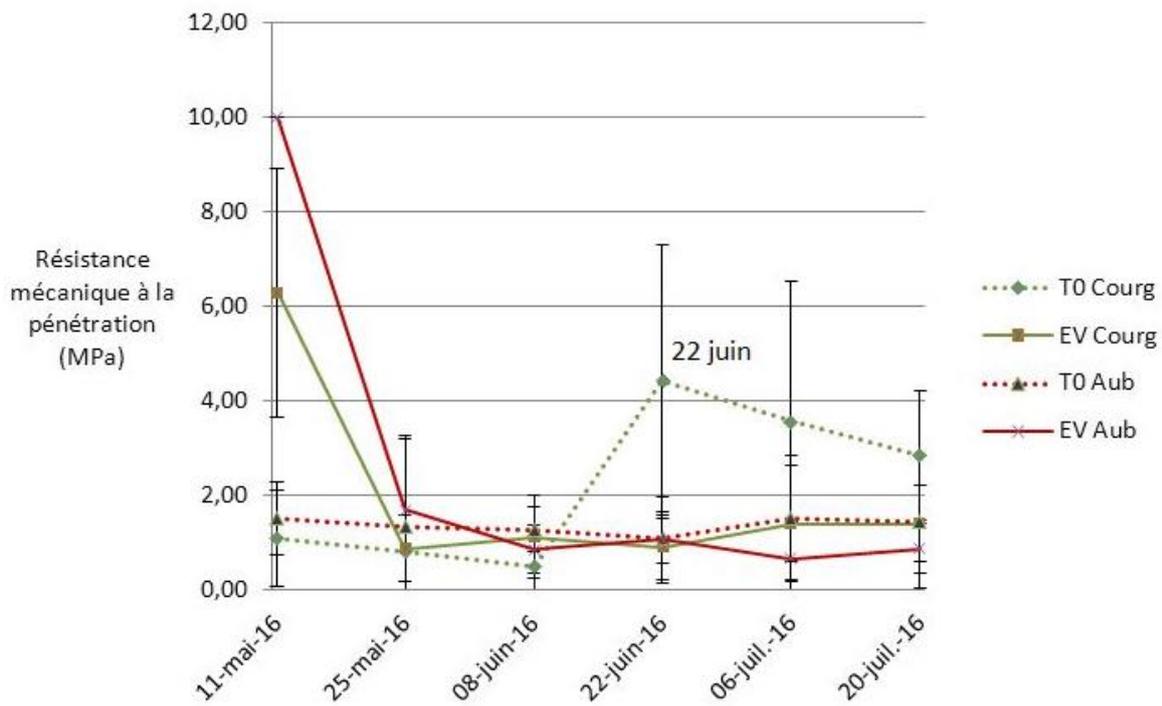


Figure 18 : EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 0-30cm DE SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.

Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.

Malgré une variabilité très élevée des données (Figure 18), les valeurs relevées le 11 mai sous les occultants sont nettement supérieures à celles mesurées dans les planches témoins. Les écarts types obtenus ne permettent d'interpréter ni les écarts observés entre les différentes courbes, ni leurs variations. Toutefois, il semble que, excepté pour la planche témoin de courgettes à partir du 22 juin et pour celle d'aubergines le 6 juillet, la résistance mécanique des sols étudiés reste comprise entre 0 et 2MPa. Enfin, il est possible de constater une forte augmentation des valeurs relevées dans la planche témoin de courgettes à partir du 22 juin, et dont les moyennes restent ensuite comprises entre 4 et 3MPa environ.

2.1.2.2. Interprétations, discussion

La variabilité des résultats ne paraît être que très faiblement liée au calcul de moyennes des valeurs d'horizons différents. Les allures des courbes pour chacun des horizons et chacune des planches de l'essai sont en effet similaires et les écarts types obtenus sont tout aussi importants que ceux observés sur les moyennes. Les graphiques réalisés pour chaque horizon sont présentés en Annexe 2. Ainsi, c'est surtout la variabilité inhérente à la mesure et

aux conditions dans lesquelles elle est réalisée (CASSEL, 1982 ; CAMPBELL and O'SULLIVAN, 1991; UNGER et JONES, 1998), comme expliqué précédemment, qui est à l'origine des écarts types obtenus.

Les valeurs extrêmement élevées du 11 mai reflètent l'état très sec du sol, observé durant la phase d'occultation (du 20 avril aux 5 et 19 mai). LEON (2014) préconise 1 à 2 mois de délai pour éviter les effets dépressifs de la destruction des CIPAN⁷ sur la disponibilité en eau pour la culture suivante. Il semble donc que, dans ce cas, l'irrigation des planches comportant l'ancien engrais vert permette de limiter cet effet mais également de réduire la résistance mécanique du sol pour permettre l'installation d'une culture. En effet le seuil de 2MPa est généralement considéré comme limitant pour la croissance des plantes, et les valeurs supérieures à 2,5MPa sont reportées comme significativement restrictives pour la croissance racinaire (LAMPURLANES et CANTERO-MARTINEZ, 2003 ; QUANG *et al.*, 2012). Ainsi, le fait que l'on ne puisse pas observer de différence entre les évolutions des résistances mécaniques des sols des planches d'engrais vert pour les deux cultures et pour la planche témoin de courgettes est négligeable. Les moyennes obtenues dans les horizons 0-30cm de ces trois planches varient dans la majorité des cas en dessous de 2MPa.

Enfin, l'augmentation de la résistance mécanique dans la planche témoin de courgettes semble expliquée par une élévation des températures (comprises entre 29 et 36°C du 21 juin au 12 juillet) et la présence d'un paillage épars. Une faible limitation de l'évaporation serait ainsi à l'origine d'un sol plus sec, observé lors des prélèvements de sol, et qui aurait entraîné une hausse importante de sa résistance mécanique. L'agriculteur donne par ailleurs la même interprétation de ces résultats.

⁷ Culture Intermédiaire Piège A Nitrates.

2.2. INFLUENCE DU PRECEDENT ENGRAIS VERT SUR L'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL :

2.2.1.1. Résultats

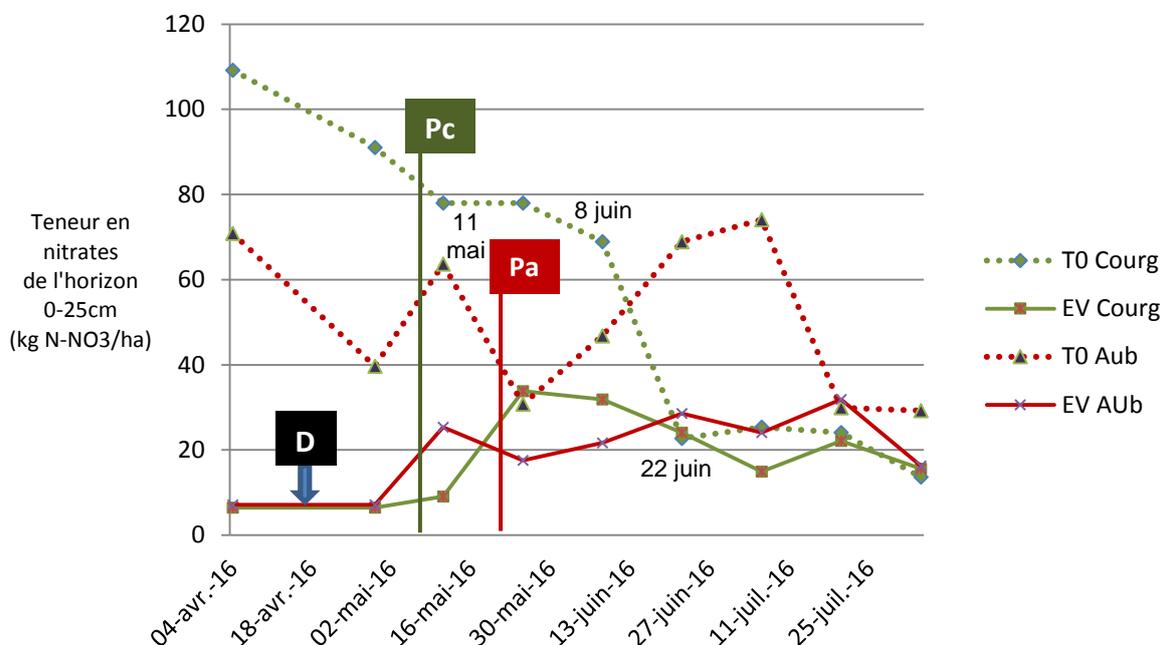


Figure 19 : EFFET D'UN ENGRAIS VERT DE PETIT ÉPEAUTRE SUR LA DYNAMIQUE DE MINÉRALISATION DE L'AZOTE.

La destruction par occultation du couvert est réalisée le 20 avril (D), la plantation des courgettes (Pc) le 5 mai et celle des aubergines (Pa) le 19 mai. Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.

Les planches témoins ont des teneurs en nitrates presque toujours supérieures à celles des bandes comportant le couvert présent ou détruit (Figure 19). Lors de la première mesure, les planches témoins, situées de part et d'autre des planches d'engrais vert, présentent des reliquats azotés au moins 10 fois supérieurs à ceux mesurés sous l'épeautre. Dans le sens de cette observation, il semble intéressant d'ajouter que deux autres bandes ne faisant pas partie de l'essai et n'ayant pas comporté d'engrais vert présentaient des teneurs de 86 et 98 kg de N-NO₃⁻/ha lors de cette première mesure.

Par ailleurs, les teneurs en NO₃⁻ des planches d'engrais vert sont toujours supérieures à celles observées lors de la première mesure. En revanche, les valeurs obtenues pour la planche témoins de courgettes diminuent presque toujours entre chaque relevé (baisse

globale de 85% sur la saison) et présentent une baisse de 65 unités d'azote entre le 8 et le 22 juin. A cette date, elles atteignent les mêmes valeurs que celles de la planche comportant anciennement l'engrais vert. L'évolution des teneurs en azote assimilable est cependant beaucoup plus variable dans la planche témoin d'aubergines. Il est possible d'y observer une augmentation rapide suivie d'une baisse des valeurs au 11 mai. Ce pic est également observé dans la planche d'engrais vert, mais son amplitude y est moins élevée. Suite à cela, la teneur en nitrates augmente de 31 à 74kg.N-NO₃/ha, soit une hausse de 58% entre le 25 mai et le 6 juillet. Après cette date, la teneur en nitrate de la planche témoin d'aubergines décroît rapidement (59% en 2 semaines), pour atteindre la même valeur que celle relevée dans la planche ayant comporté l'engrais vert.

2.3. COMPARAISON DES RENDEMENTS OBTENUS SUR LES PLANCHES AYANT COMPORTE OU NON UN ENGRAIS VERT :

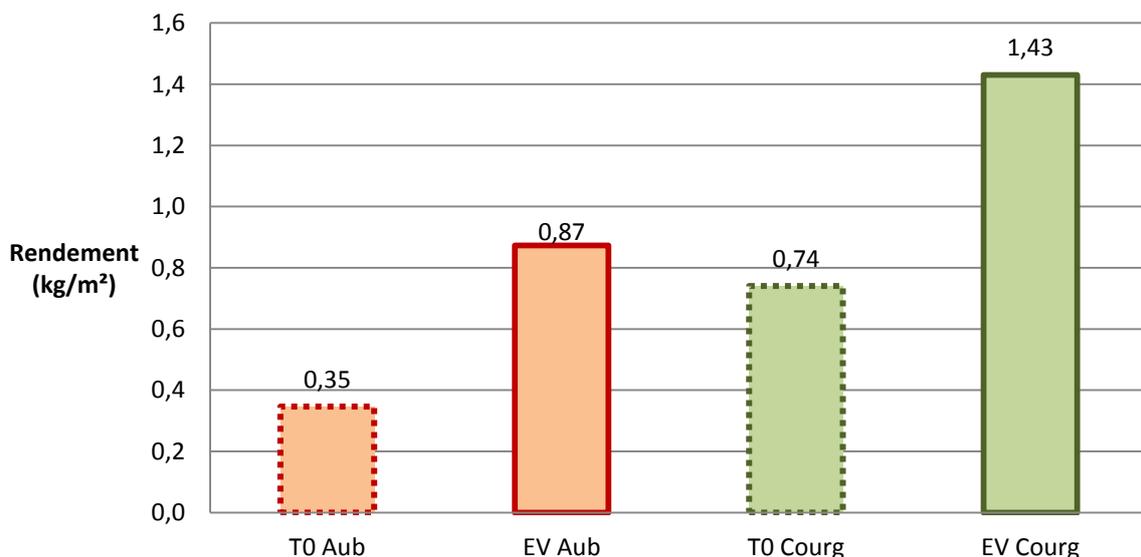


Figure 20 : COMPARAISON DES RENDEMENTS OBTENUS SUR UN SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.

Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.

Les rendements obtenus dans les planches ayant comporté l'engrais vert sont nettement supérieures à ceux observés dans les planches témoins : 152% pour les aubergines et 93% pour les courgettes (Figure 20). Les courgettes sont récoltées à un calibre constant par

l'agriculteur, en revanche, ceux obtenus pour les aubergines sont en moyenne de 33g/fruit pour la planche témoin et de 54g/fruit pour la planche d'engrais vert.

2.4. DISCUSSION GENERALE

L'écart élevé des teneurs en nitrates lors des premiers relevés et le fait que le précédent itinéraire technique ait été le même pour chaque paire de planche de l'essai semble indiquer une **immobilisation efficace de l'azote minéral par le couvert de petit épeautre au début du printemps**. Cet effet est certainement d'autant plus favorisé que la densité de semis du couvert est élevée (830kg/ha dans l'essai contre 180 à 200kg/ha recommandés pour un engrais vert de cette espèce (AGROSEMENS, 2014)).

La diminution rapide des teneurs en nitrates, observée entre le 8 et le 22 juin dans le sol de la culture de courgettes témoins, coïncide avec la formation des premiers fruits (première récolte le 25 juin), phase du cycle durant laquelle la culture absorbe le plus d'azote. Cela va également dans le sens des observations de TESI *et al.* (1981) in PIERRE *et al.* (2015), qui indiquent que les besoins en azote de la courgette augmentent fortement un mois après plantation en plein champ, le besoin maximal étant atteint deux mois après plantation. Elle correspond également à l'augmentation rapide de la résistance mécanique à la pénétration observée précédemment. Il se peut donc que cette baisse soit aussi liée à une minéralisation de l'azote organique moins élevée du fait d'un sol plus sec (WATTS et TORBERT, 2014). Le fait que ce phénomène ne soit pas observé dans la planche d'engrais vert peut être permis par la présence d'une quantité de paillage plus élevée, permettant ainsi de maintenir le sol plus humide et favoriser une activité de minéralisation des micro-organismes supérieure. Par ailleurs, la présence supplémentaire de matière organique facilement minéralisable dans la planche d'engrais vert peut avoir permis une fourniture en azote supérieure du sol lors du pic d'absorption des nitrates par la culture. ROUSK et BAATH (2007) indiquent que la luzerne a un rapport C/N de 15. L'épeautre au moment de sa destruction n'avait pas encore atteint le stade de montaison. Or, le C/N augmente fortement seulement pendant la montaison du fait de la forte croissance qui entraîne un phénomène de dilution de l'azote (LEMAIRE et SALETTE, 1984 ; CALOIN et YU, 1986). On suppose donc que la matière organique supplémentaire apportée sur la planche d'engrais vert a un rapport C/N lui permettant d'être rapidement dégradé et minéralisé.

Dans les deux planches comportant la culture d'aubergines, l'augmentation rapide des teneurs en nitrates le 11 mai peut être liée aux précipitations relativement élevées observées sur cette période, comme décrit pour l'essai précédent. Le fait que le sol soit sol plus sec sous l'occultant que dans la planche témoin peut avoir favorisé une minéralisation plus rapide de l'azote par une ré-humidification rapide de celui-ci (WATTS *et al.*, 2014). Bien que le sol soit couvert, ce phénomène semble possible par un mouvement d'eau latéral souterrain (LI *et al.*, 2003 in STEINMETZ *et al.*, 2016). Il semble cependant étonnant que cette augmentation rapide de la minéralisation n'ait pas également été provoquée par les précipitations dans le sol de la culture de courgettes. Celles-ci sont en effet peu développées à ce moment et la quantité d'azote qu'elles absorbent est estimée comme faible (TESI *et al.*, 1981 in PIERRE *et al.*, 2015).

Il semble difficile de déterminer pourquoi les nitrates présents dans la planche témoin d'aubergines semblent peu absorbés par la culture, dont les besoins en azote sont élevés (180UN mobilisés en plein champ (REY *et al.*, 2015)). En effet, sa biomasse aérienne paraît nettement plus faible que dans la planche d'engrais vert, malgré un écart important des teneurs en azote disponible. Toutefois, cela indique que les faibles quantités d'azote assimilable observées dans la planche témoin de courgettes ont de plus fortes chances d'être induites par leur absorption par la culture, plutôt que par leur lessivage. Enfin, la baisse rapide des teneurs en nitrates observée après le 6 juillet dans la culture témoin d'aubergines coïncide avec les dates de premières récoltes, supposées être une période à laquelle l'absorption de l'azote augmenterait rapidement (FEUVRIER, 2015).

Alors que les cultures de l'essai sont exigeantes en azote (180UN d'azote pour la culture d'aubergine et 150UN pour celle de courgette (REY *et al.*, 2015)) et que les teneurs en nitrates y sont les plus faibles, **les rendements obtenus sur les planches d'engrais vert sont 2 à 2,5 fois supérieurs à ceux mesurés dans les témoins**. Les cultures implantées après un engrais vert dans cet essai semblent donc avoir une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote que celles conduites sans engrais vert précédent.

Ce résultat pourrait être induit par une dégradation progressive de l'azote absorbé par le couvert précédent, et ainsi une répartition régulière des apports azotés pour la culture. Cela est certainement d'autant plus favorisé que la biomasse aérienne de l'engrais vert est laissée en surface et que son système racinaire a été conservé intact (POUSSET, 2011). Il est probable que la différence observée sur la culture de courgettes soit également induite par un moins bon développement racinaire de la culture dans la planche témoin. En effet, la quantité de paillage nettement inférieure est probablement à l'origine d'une plus faible disponibilité en eau et d'une résistance mécanique du sol supérieure au seuil de 2,5MPa (LAMPURLANES et CANTERO-MARTINEZ, 2003 ; QUANG *et al.*, 2012).

En revanche, le rendement plus faible dans la planche témoin d'aubergines ne peut être expliqué par les mêmes facteurs, la quantité de paillage apportée étant identique à celle reçue par la planche d'engrais vert. Une hétérogénéité propre à la parcelle pourrait expliquer cela. En effet, un développement inférieur au reste de la parcelle est constaté dans la prolongation de la planche témoin, sur une autre culture. Un profil de sol sera réalisé ultérieurement à l'analyse de ces résultats pour essayer de déterminer l'origine de ce phénomène. Par ailleurs, les mesures de résistance mécanique du sol indiquent que ce résultat n'est pas lié à une résistance à la pénétration du sol supérieure au seuil limitant la croissance racinaire.

Il est également possible que l'engrais vert ait une influence positive sur certaines caractéristiques physiques du sol, favorisant alors un meilleur développement des cultures. L'apport de matière organique en surface et dans la profondeur d'enracinement du couvert peut avoir permis une efficacité d'utilisation de l'eau accrue. En effet, plusieurs auteurs observent que l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures peut être améliorée par l'intégration de couverts en interculture (CURRIE et KLOCKE, 2005 ; ISMAIL *et al.* MARSHADI, 2012 ; MEDRANO *et al.*, 2015). HARTWIG (2002) indique que cet effet est permis par l'augmentation de la teneur du sol en matière organique, l'amélioration de la structure du sol et de l'infiltration de l'eau, une diminution de l'évaporation et de la température

du sol et une réduction de la pression de compétition des adventices. Bien que certains de ces bénéfiques ne puissent être obtenus qu'à moyen et long terme, il est possible que le réseau racinaire de l'engrais vert ait permis en se dégradant de créer une porosité favorisant le développement racinaire des cultures (POUSSET, 2011). Un chevelu racinaire nettement plus dense et concentré sur les 10 premiers cm du sol a en effet été observé dans la planche d'engrais vert comportant la culture de courgettes après prélèvement de plants effectués en fin de culture.

Dans cette même planche de culture, les effets précédents de l'engrais vert peuvent avoir été accrues du fait d'un apport important de paille de luzerne comme occultant. Cela semble cohérent avec les informations fournies par QIN *et al.* (2015), qui indiquent qu'une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau mais également de l'azote est généralement observée lors de l'utilisation de paillages organiques. En effet, la teneur en eau du sol est liée aux flux et donc à la disponibilité et à l'efficacité d'utilisation de la ressource en nitrates par les cultures (FAGERIA et BALIGAR, 2005).

2.1. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTEUR

Le maraîcher est satisfait par la pratique, du fait de rendements nettement supérieurs et de calibres plus élevés sur la culture d'aubergines (les courgettes sont récoltées à calibre constant). Il précise également que l'intérêt d'un tel effet n'est pas seulement une quantité produite plus importante, notamment d'un point de vue économique, mais également un gain possible en termes de surfaces nécessaires à un niveau de production satisfaisant. En revanche, l'agriculteur aurait souhaité que la production la biomasse produite par l'engrais vert lui soit suffisante pour pailler la planche sans réaliser d'apport supplémentaire. Par ailleurs, il indique que les deux méthodes d'occultation sont aussi efficaces l'une que l'autre pour détruire l'engrais vert. En effet, il n'a pas eu à en détruire de repousses.

L'occultation à l'aide de paille lui paraît toutefois nettement plus pratique comparée à l'utilisation d'une bâche. En effet, celle-ci, bien que lestée à l'aide de tréteaux, a dû être remplacée plus de 4 fois en 1 mois car elle était emportée par le vent. De plus, il lui est moins fastidieux d'implanter une culture dans un paillage déjà en place, ayant permis d'occulter un engrais vert et qui aurait été apporté de toute manière, comme cela a été fait pour la culture de courgettes. Devoir retirer la bâche, implanter la culture et surtout installer un paillage une fois cette dernière en place lui est beaucoup plus fastidieux.

Ainsi, il souhaite occulter les prochains engrais verts implantés systématiquement à l'aide de paille de luzerne. Le fait que celle-ci soit conditionnée en balle ronde et généralement humide et compacte la rend opaque et permet de façon efficace d'empêcher la lumière d'atteindre le sol, limitant ainsi l'éventuelle reprise du couvert. Enfin, il envisage de réaliser les futurs semis de couverts hivernaux de manière plus précoce, en septembre, et de les irriguer en début de croissance si nécessaire. De cette façon, cela lui permettrait de disposer d'une biomasse plus importante et potentiellement de l'utiliser pour le paillage de ses planches de culture.

3. Evaluation des pratiques de paillage et d'amendement

Essai réalisé chez Solange FOLLET :

L'essai consiste à comparer l'effet des paillages plastique noir biodégradable et de paille d'orge sur la température du sol, l'évolution du taux de nitrates du sol ainsi que la culture de tomates sous serre tunnel. L'objectif est également de déterminer l'efficacité de l'apport de 6kg/m² de biomasse d'adventices fraîches entre le sol et la paille de céréales pour limiter une éventuelle immobilisation de l'azote du sol. Enfin, cet effet est comparé avec celui d'un engrais vert incorporé.

Essai réalisé chez Marion PEYRIC :

Cette expérimentation a pour but de mesurer l'effet des paillages de paille de blé et de polyéthylène noir sur les mêmes paramètres que chez Solange FOLLET. L'influence de l'apport ou non de fumier de bovin peu composté, ainsi que de l'effet précédent de la destruction de la prairie présente sur la parcelle avant sa mise en culture pour l'essai, est aussi observé à l'aide de ces mêmes mesures.

3.1. EFFET DES PAILLAGES PLASTIQUE NOIR ET DE PAILLE DE CEREALES SUR LA TEMPERATURE DU SOL

3.1.1. Résultats

Chez Marion PEYRIC, un écart significatif de température du sol est observé pour la moitié des suivis, entre les zones amendées et non amendées des planches de culture. Afin de déterminer si ce phénomène est lié à l'apport de fumier ou à un effet de zone, la température est mesurée selon la même méthode que pour l'essai dans le sol situé entre les planches de l'essai (passe-pieds) et sur trois zones (bordures et centre de l'essai). Par ailleurs, la teneur en eau du sol à 25cm de profondeur de chaque modalité fait l'objet d'une observation ponctuelle (perte de masse après séchage à l'étuve). Ces données sont ainsi également séparées entre zone amendée et non amendée afin de déterminer si ce phénomène peut être lié à une teneur en eau du sol différente. Les résultats sont présentés ci-après.

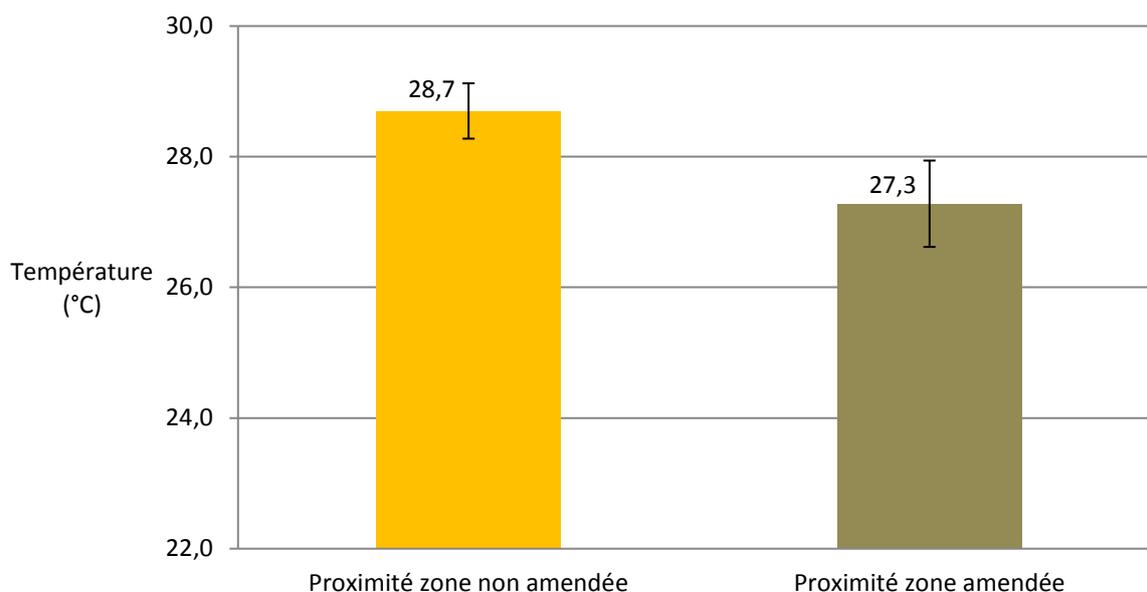


Figure 21 : COMPARAISON DES TEMPERATURES MESUREES A 10cm DE PROFONDEUR DANS LE SOL DES PASSE-PIEDS (MARION PEYRIC).

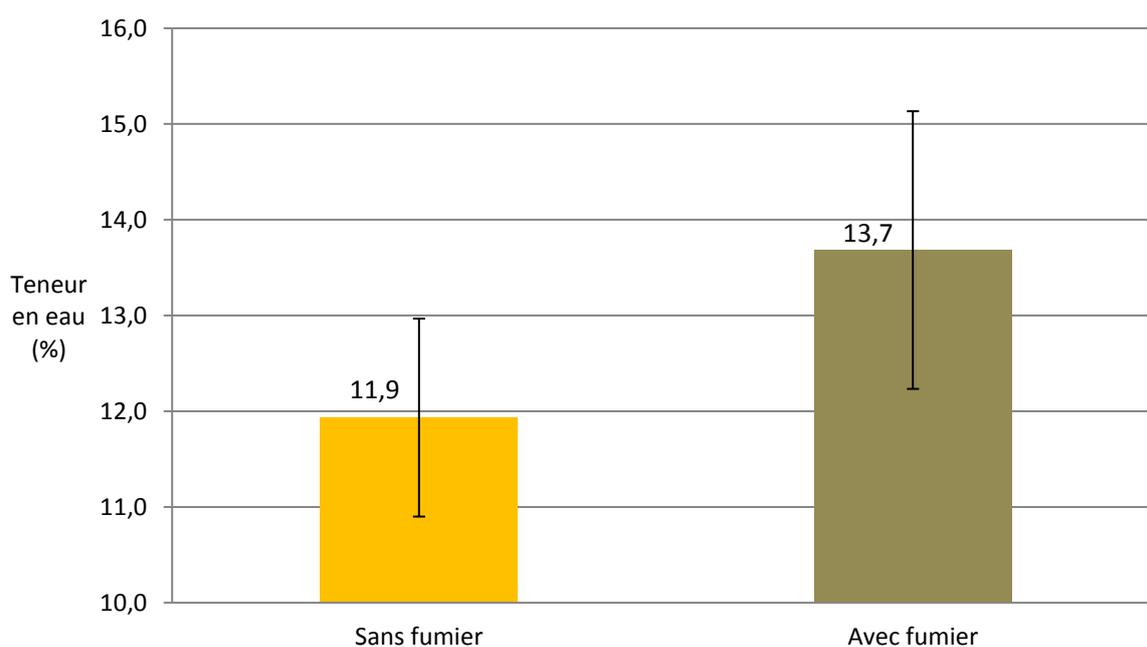


Figure 22 : COMPARAISON DES TENEURS EN EAU DU SOL, MESUREES SUR 0-25cm DE PROFONDEUR DANS LES PARTIES AMENDEES ET NON AMENDEES DES PLANCHES DE CULTURE (MARION PEYRIC).

La température dans le sol des passe pieds situés à proximité de la zone sans amendement est très hautement significativement supérieure à celle mesurée à proximité de la zone avec amendement (t.test, p-value=0,0002894) (Figure 21).

Les intervalles de confiance des teneurs en eau moyennes mesurées dans les parties amendées et non amendées des planches se croisent (Figure 22). Cependant, **la teneur en eau dans la partie des planches ne comportant pas de fumier est significativement inférieure à celle mesurée dans la partie avec fumier** (t.test, p-value=0,01504). Il semble intéressant de préciser que les teneurs en eau des mêmes échantillons, cette fois analysés en fonction du facteur *paillage*, ne présentent pas de différence significative (t.test, p-value=0,4685).

Ces résultats indiquent que pour être cohérente, la comparaison des effets des paillages dans cet essai doit être réalisée de façon distincte entre zone amendée et non amendée. Par ailleurs, les allures des courbes ainsi que les intervalles de confiance des températures moyennes étant similaires entre ces deux zones, seules les résultats obtenus pour la zone amendée sont présentés ici par souci de synthèse. Ceux obtenus pour la partie des planches de culture sans fumier sont donnés en Annexe 3.

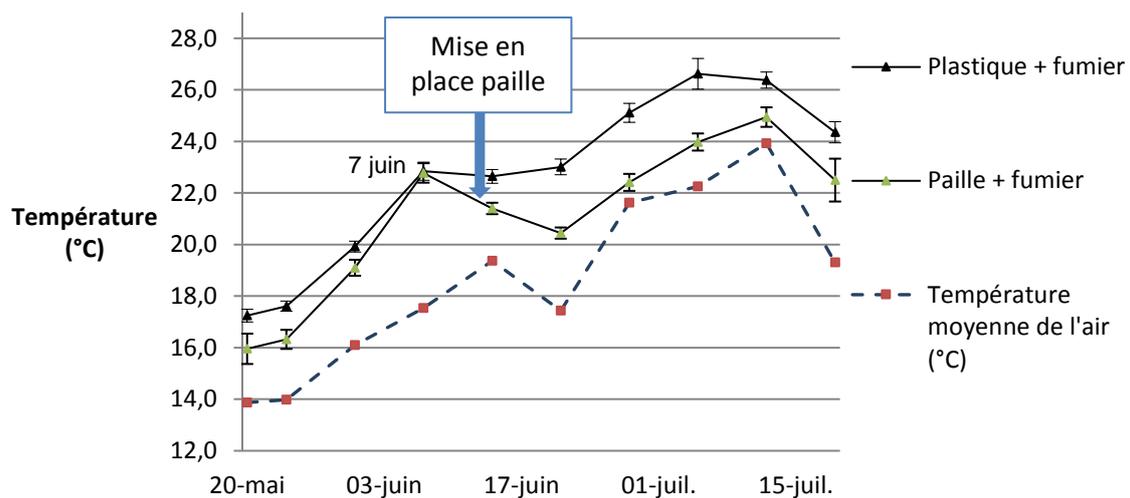


Figure 23 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR ET DE LA TEMPERATURE DU SOL A 10cm DE PROFONDEUR DU SOL AMENDE SOUS PAILLAGE PLASTIQUE NOIR OU PAILLE (MARION PEYRIC).

La température du sol des planches sous polyéthylène noir à 10cm de profondeur est significativement supérieure à celle mesurée dans les autres planches (Figure 23), excepté le 7 juin, date jusqu'à laquelle le sol qui doit recevoir la paille reste nu. Par ailleurs jusqu'au 7 juin, la température du sol nu et sous polyéthylène augmente en suivant une tendance similaire à celle de la température moyenne de l'air, et se rapprochent jusqu'à atteindre la même valeur. Lors des deux mesures suivantes, les valeurs relevées sous plastique restent comprises entre 22,5 et 23°C, alors que celles sous paille diminuent pour atteindre presque 20°C, malgré une

température de l'air qui continue d'augmenter jusqu'à 19°C le 14 juin puis décroît pour atteindre 17°C environ le 21 juin.

Par la suite l'évolution de la température dans les deux sols suit à nouveau celle de l'air, en augmentant à la même vitesse et celle du sol sous plastique présentant 1,9 à 2,7°C de plus que celle du sol sous paille. Il semble intéressant d'indiquer que les valeurs relevées dans ces deux sols évoluent de façon contraire entre le 5 et le 12 juillet. Celles du sol sous paille continuent d'augmenter de façon significative (t.test, p-value= $2,128 \cdot 10^{-4}$) en suivant l'évolution de la température de l'air, alors que celle sous le plastique restent autour de 26,5°C environ sans changement significatif (t.test, p-value=0.416).

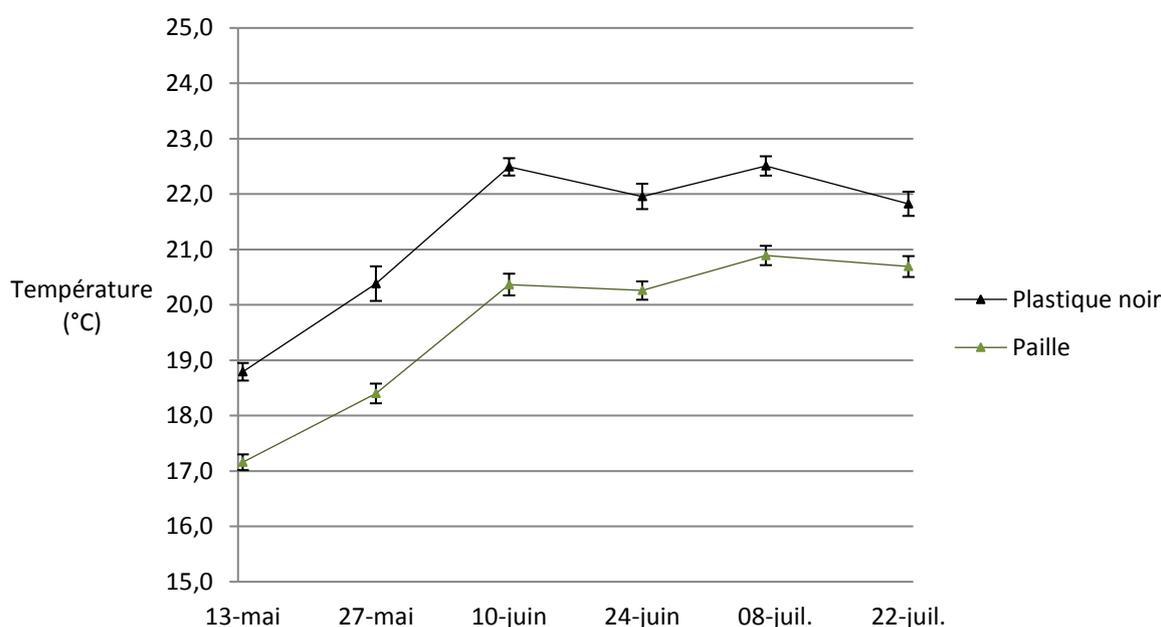


Figure 24 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE A 10cm DE PROFONDEUR DU SOL AMENDE SOUS PAILLAGE PLASTIQUE NOIR OU PAILLE (SOLANGE FOLLET)

Chez Solange FOLLET, dans le sol sous paillage plastique, aucune différence significative (t.test, p-value=0,3524) n'est observée entre la zone comprenant l'engrais vert et celle où la biomasse adventice a été exportée. Le même constat est réalisé sous paille, entre la zone avec engrais vert et celle où la biomasse adventice a été apportée (t.tes, p-value=0,7522). Ces résultats ne sont pas présentés ici par souci de synthèse.

La température sous paillage plastique est très hautement significativement supérieure à celle sous paillage paille (t.test, p-value la plus élevée= $8,05 \cdot 10^{-9}$), pour un écart moyen de 1,70°C, minimum de 1,1°C le 22 juillet et maximum de 2,1°C le 10 juin (Figure 24). Toutes deux suivent la même évolution, en augmentant du 13 mai au 10 juin, puis se stabilisent entre 20°C et 21°C pour le sol paillé, et entre 21,8°C et 22,5°C pour celui sous polyéthylène noir. Cependant, deux légères diminutions significatives de la température sont observées entre le 10 et le 24 juin ainsi qu'entre le 8 et le 22 juillet pour le sol sous plastique (t.test, p-

value= $2,166.10^{-4}$ et p-value= $1,243.10^{-5}$, respectivement), alors qu'aucune différence significative n'est observée sous paille entre ces dates (t.test, p-value=0,3634 et p-value=0,1008, respectivement). Enfin, il semblerait que l'écart de température entre les deux paillages se réduise progressivement à partir du 10 juin.

3.1.2. Discussion

L'écart de température observé entre les modalités amendées et celles non amendées chez Marion PEYRIC pourrait être lié aux propriétés de cet apport de matière organique permettant une meilleure rétention en eau dans cette zone (MURPHY, 2015), telle qu'elle a été mesurée, et ainsi une température plus faible du sol (KNOEPP et SWANK, 2002). Cela semble néanmoins peu probable, car la quantité de fumier frais apportée initialement ne représente que 1% environ de la masse de terre présente sur chaque planche et sur 25cm de profondeur. De plus, l'observation du même phénomène dans le sol des passe-pieds, qui ne comprend ni amendement, ni système d'irrigation, semble également infirmer cette hypothèse. Marion PEYRIC indique que cette différence n'est probablement pas liée à un défaut d'irrigation, la pression ayant de faibles chances de varier entre la partie amendée et la partie non amendée des planches (longueur de conduite de 10m et absence de coude et de pente) et les goutteurs étant tous identiques.

Marion PEYRIC avait signalé la présence d'une zone hydromorphe au centre de la parcelle. Bien que celle-ci ait été prise en compte et que la zone d'essai en ait été positionnée le plus loin possible, il est probable que son périmètre d'influence s'étende au-delà de ce qui avait pu être observé. Le côté amendé des planches de culture étant le plus proche de cette zone, celle-ci a pu y favoriser des teneurs en eau du sol plus élevées et ainsi des températures plus faibles.

Les deux essais permettent de vérifier l'effet relatif des deux paillages testés sur la température du sol. En effet, **la température mesurée sous plastique noir est toujours significativement supérieure à celle mesurée sous paille**. Cela est cohérent avec de nombreuses références indiquant que, comparés à un sol nu, les sols couverts de paillages plastique noir favorisent des températures supérieures de 3 à 6°C dans les 30 premiers centimètres de sol, alors que les paillages organiques induisent des températures inférieures (JACKS *et al.*, 1955 ; ROWE-DUTTON, 1957 ; HASSON et HUSSAIN, 1987 ; LARSSON et BATH, 1996 ; ZERMEÑO et MARTINEZ, 1998 ; TARARA, 2000 ; CHALKER-SCOTT, 2007 ; KASIRAJAN et NGOUAJIO, 2012 ; STEINMETZ *et al.*, 2016).

Par ailleurs, il semble que le réchauffement du sol à 10cm de profondeur ne soit pas plus rapide sous le paillage plastique que sous la paille. Cela est cohérent avec les résultats de LARSSON et BATH (1996), qui mesurent que la température du sol à 5cm de profondeur augmente à la même vitesse sous paillage organique que sous polyéthylène noir. En revanche, il semble que, chez Solange FOLLET, alors que la température diminue sous plastique noir, la paille permet au sol de conserver sa chaleur. Il paraît également que, chez Marion PEYRIC, lorsque la température continue d'augmenter avec la température de l'air, celle sous plastique ne change pas. Cela peut être expliqué par les propriétés optiques et thermiques de ces deux paillages. En effet, le polyéthylène noir est capable de transmettre 87% des radiations infrarouges de part et d'autre des compartiments qu'il sépare (HAM *et al.*,

1993). La paille, en revanche, limite les différents flux de chaleur provenant à la fois de l'atmosphère et du sol (NOVAK *et al.* 2000), permettant ainsi au sol de conserver la chaleur accumulée. Ainsi, le 12 juillet chez Marion PEYRIC, alors que la température de l'air est inférieure à celle du sol et que le ciel présente une couverture nuageuse, le paillage plastique transmet la chaleur du sol, contrairement au paillage organique qui agit comme un isolant. Bien qu'aucune donnée météorologique ne soit disponible pour l'essai réalisé chez Solange FOLLET, le plastique posé sur les armatures de la serre est blanchi le 23 juin, et le relevé de température du 22 juillet est effectué un jour de pluie, alors que les suivis précédant ces deux dates (10 juin et 7 juillet) sont tous deux réalisés lors de journées ensoleillées. Ainsi, la réduction du rayonnement solaire qui se produit lors de ces deux périodes semble favoriser la perte de chaleur du sol situé sous plastique noir, alors que la paille permet à l'autre planche de culture de la conserver.

Enfin, il semble important d'indiquer que, chez Marion PEYRIC, la température du sol ne comportant pas de paille jusqu'au 7 juin semble rejoindre progressivement celle du sol comportant le paillage de polyéthylène depuis le début des relevés. Cela paraît aller à l'encontre de plusieurs sources indiquant que ce type de paillage permet de conserver une température du sol supérieure à celle observée en sol nu (TEASDALE et ABDUL-BAKI, 1995 ; KASIRAJAN et NGOUAJIO, 2012 ; STEINMETZ *et al.*, 2016). Toutefois, TEASDALE et ABDUL-BAKI (1995) mesurent parfois des températures en sol nu équivalentes voire supérieures à celles observés sous polyéthylène noir, et ce en plein champ. Par ailleurs, BRISTOW (1988) indique qu'un sol plus sec, induit par l'absence de paillage, est capable de se réchauffer plus rapidement que lorsqu'un paillage lui permet de conserver son humidité. Cela serait en effet cohérent avec le régime d'irrigation de l'agricultrice, ayant indiqué apporter des volumes élevés lors de la plantation (plus de 35L par plante le 17 mai), puis réduits à la limite de provoquer un stress hydrique sur la culture jusqu'au 13 juin. Enfin, la baisse de la température du sol, observée sous les deux types de paillages lors du dernier relevé, semble être liée à une diminution importante de la température de l'air, mais est également expliquée par la réalisation de la mesure environ 1 heure après un arrosage.

3.2. EFFET DES PAILLAGES PLASTIQUE NOIR ET DE PAILLE DE CEREALES SUR LA PRECOCITE DE DIFFERENTES VARIETES DE TOMATE

3.2.1. Résultats

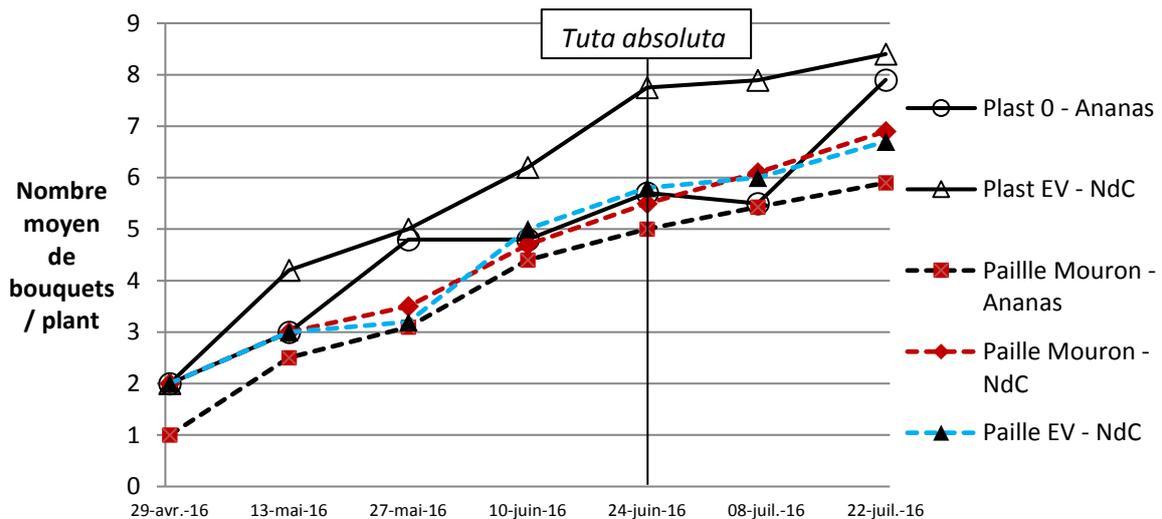


Figure 25 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGES ET D'AMENDEMENT. VARIETES « ANANAS » ET « NOIRE DE CRIMEE » (SOLANGE FOLLET).

Les traitements correspondent à la variété « Ananas » sur paillage plastique avec export de la biomasse adventice (Plast 0 – Ananas) et sur paille d'orge avec apport de 6,5kg/m² de biomasse fraîche d'adventices (Paille Mouron – Ananas), et à la variété « Noire de Crimée » après engrais vert sur paillage plastique (Plast EV – NdC) ou sur paille d'orge (Paille EV – NdC), et sur paille avec apport de 6,5kg/m² de biomasse fraîche d'adventices (Paille Mouron – NdC). Les dégâts de *Tuta absoluta* sont constatés sur les bouquets floraux à partir du 24 juin.

Les tomates de la variété « Ananas » semblent plus précoces que celle de la variété « Noire de Crimée » (Figure 25). En effet, sur "Paille Mouron" (seule modalité commune aux deux variétés) et alors qu'elles comportent le même nombre de bouquets lors de leur plantation, les « Noires de Crimée » ont généralement moins de bouquets formées que celles de la variété « Ananas ».

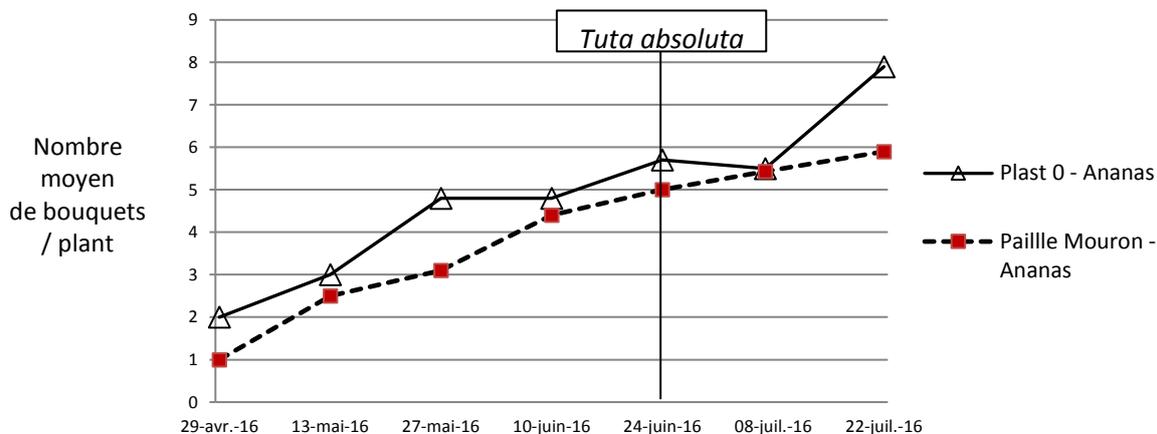


Figure 26 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET). VARIETE « ANANAS ».

Les traitements correspondent à la variété « Ananas » sur paillage plastique avec export de la biomasse adventice (Plast 0 – Ananas) et sur paille d’orge avec apport de 6,5kg/m² de biomasse fraîche d’adventices (Paille Mouron – Ananas). Les dégâts de *Tuta absoluta* sont constatés sur les bouquets floraux à partir du 24 juin.

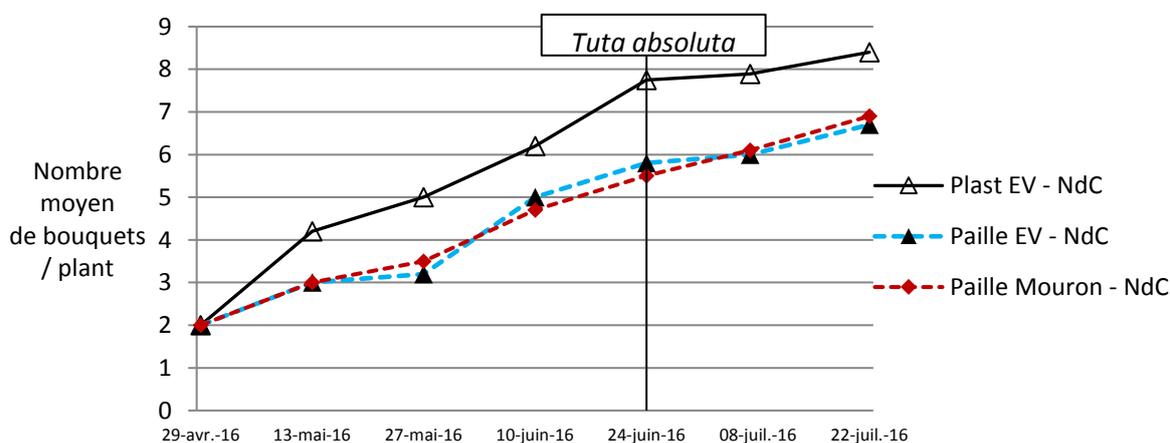


Figure 27 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET). VARIETE « NOIRE DE CRIMEE ».

Les traitements correspondent à la variété « Noire de Crimée » après engrais vert sur paillage plastique (Plast EV – NdC) ou sur paille d’orge (Paille EV – NdC), et sur paille avec apport de 6,5kg/m² de biomasse fraîche d’adventices (Paille Mouron – NdC). Les dégâts de *Tuta absoluta* sont constatés sur les bouquets floraux à partir du 24 juin.

Pour les deux variétés, il faut environ 2 à 3 semaines de plus à un plant de tomate sur paille pour former le même nombre de bouquets floraux qu'un plant de la même variété sur plastique (Figures 26 et 27). L'observation de ces écarts est limitée au 24 juin, date à partir de laquelle des dégâts de *Tuta absoluta* (larve de lépidoptère ravageur de plusieurs solanacées) sont observés sur les apex des plantes, les bouquets floraux en formation et les fruits, risquant ainsi de fausser le nombre de bouquets comptés. Par ailleurs, il semble y avoir peu de différences de précocité entre les « Noires de Crimée » paillées amendées à l'aide d'engrais vert et celles amendées à l'aide de mouron. Enfin, sur la variété « Ananas », il semble que l'évolution du nombre de bouquets floraux soit plus régulière sous paillage paille que sous plastique noir.

Les résultats obtenus chez Marion PEYRIC pour la variété « Raisin Vert » ne sont pas présentés ici. En effet, son port buissonnant rend l'observation du nombre de bouquets floraux fastidieuse, et les résultats relevés présentent des variations anormales (diminution du nombre de bouquets). Ceux-ci sont toutefois présentés en Annexe 4.

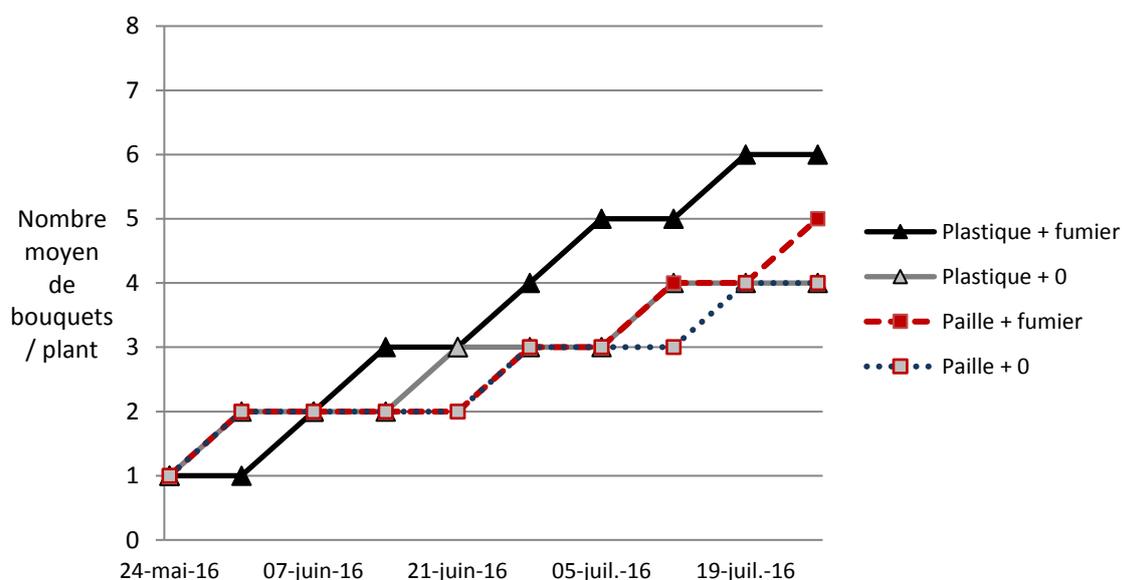


Figure 28 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « MOON GLOW ».

Les traitements correspondent au paillage plastique noir avec fumier (*Plastique + fumier*) ou sans (*Plastique + 0*) et au paillage de paille de blé avec fumier (*Paille + fumier*) ou sans (*Paille + 0*).

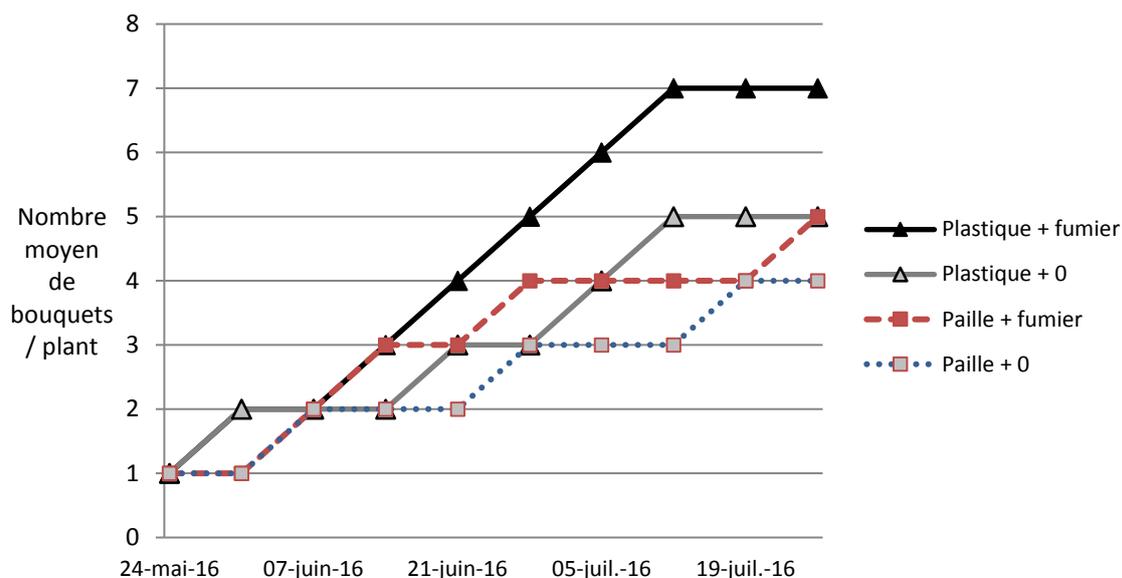


Figure 29 : EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « DIPLOM F1 ».

Les traitements correspondent au paillage plastique noir avec fumier (Plastique + fumier) ou sans (Plastique + 0) et au paillage de paille de blé avec fumier (Paille + fumier) ou sans (Paille +0).

La variété Diplom F1 apparaît comme étant plus précoce que la variété Moon Glow (Figures 28 et 29).

Pour la variété Moon Glow, à partir du 21 juin, les tomates se développant sur plastique avec fumier présentent systématiquement au moins 1 à 2 bouquets de plus que celles se développant sur les autres paillages et avec ou sans amendement (Figure 28). Il semble également que l'évolution du nombre de bouquets floraux sur ces derniers soit équivalente.

La même différence est observée pour les tomates de la variété Diplom F1 sur paillage plastique avec amendement, avec un écart relatif de 1 à 4 bouquets floraux par rapport aux autres modalités (Figure 29). L'évolution du nombre de bouquets est presque similaire entre plastique sans amendement et paille avec fumier, les écarts entre ces deux modalités s'inversant presque de manière alternative d'une semaine à l'autre. Enfin, les tomates sur paille sans amendement présentent le nombre de bouquets le plus faible ou égal à la valeur la moins élevée.

3.3. EFFET DU TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT SUR L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN NITRATES DANS LE SOL

3.3.1. Effet des paillasses plastique noir ou de paille de céréales et d'amendement à l'aide de la biomasse des adventices ou d'un précédent engrais vert – Solange FOLLET.

3.3.1.1. Résultats

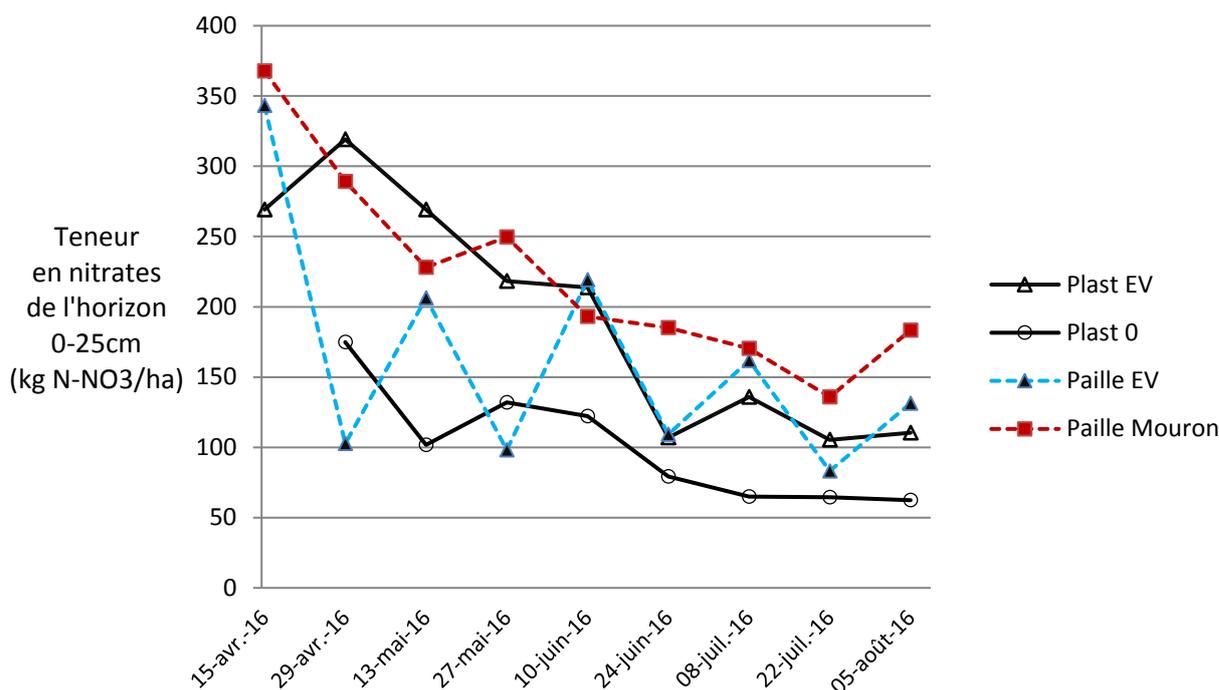


Figure 30 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (SOLANGE FOLLET).

Les traitements correspondent au paillage plastique avec export de la biomasse adventice (Plast 0) ou après un engrais vert de blé/fèverole incorporé à moins de 10cm de profondeur (Plast EV), et à la paille d'orge avec apport en surface du sol de 6,5kg/m² de biomasse fraîche d'adventices (Paille Mouron), ou après engrais vert de blé/fèverole (Paille EV).

Les teneurs en nitrates relevées dans toutes les planches de culture diminuent au fil de la saison (Figure 30).

La modalité ayant reçu l'amendement composé de la flore adventice ("Paille Mouron") présente les valeurs les plus élevées et la diminution la moins importante des teneurs en nitrates du sol (diminution de 50% contre 60% pour la modalité plastique avec engrais vert par

exemple). En revanche, la planche de culture à partir de laquelle cette biomasse a été exportée ("Plast 0") présente presque toujours les valeurs les plus faibles.

La quantité d'azote assimilable dans le sol sous paillage plastique avec engrais vert est élevée en début d'essai, puis chute rapidement entre le 10 et le 24 juin, période coïncidant avec le début des récoltes les plus importantes d'après l'agricultrice. Les valeurs qui y sont obtenues deviennent ensuite relativement proches de celles observées sur la planche paillée après l'engrais vert. Enfin, les valeurs relevées dans cette dernière sont les seules à présenter une variabilité aussi importante, l'écart le plus faible étant une augmentation de 48UN lors de la dernière mesure.

3.3.2. Effet des paillages plastique noir ou de paille de céréales et d'un précédent prairie avec ou sans apports de fumier de bovin composté – Marion PEYRIC.

3.3.2.1. Résultats

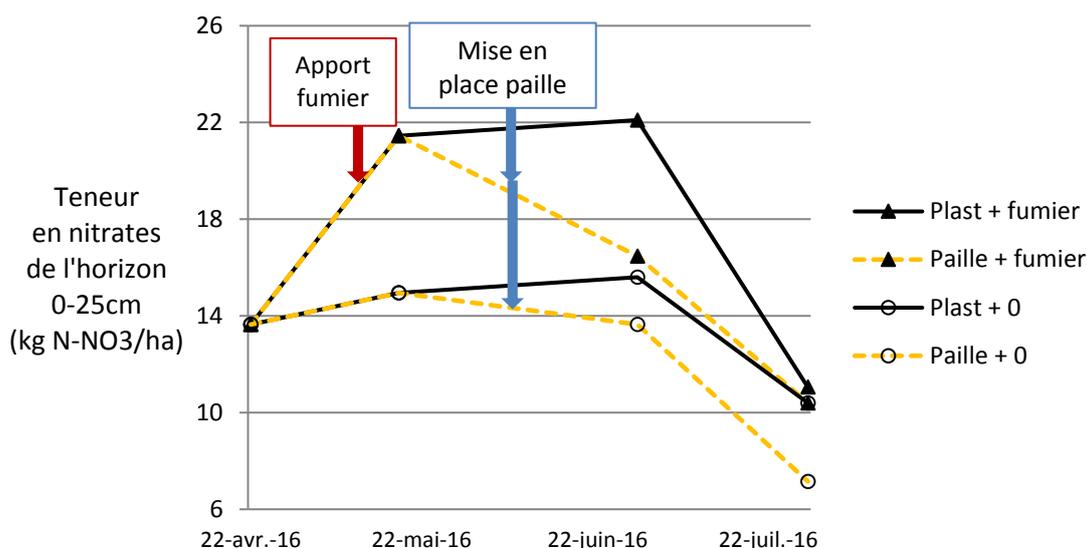


Figure 31 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « RAISIN VERT ».

Les traitements correspondent au paillage plastique avec apport de fumier (Plast + fumier) ou sans (Plast + 0) et à la paille de blé avec fumier (Paille + fumier) ou sans (Paille + 0). L'apport de fumier est réalisé le 9 et le 10 mai et la paille est installée le 13 juin (paillage plastique déjà en place à la première mesure).

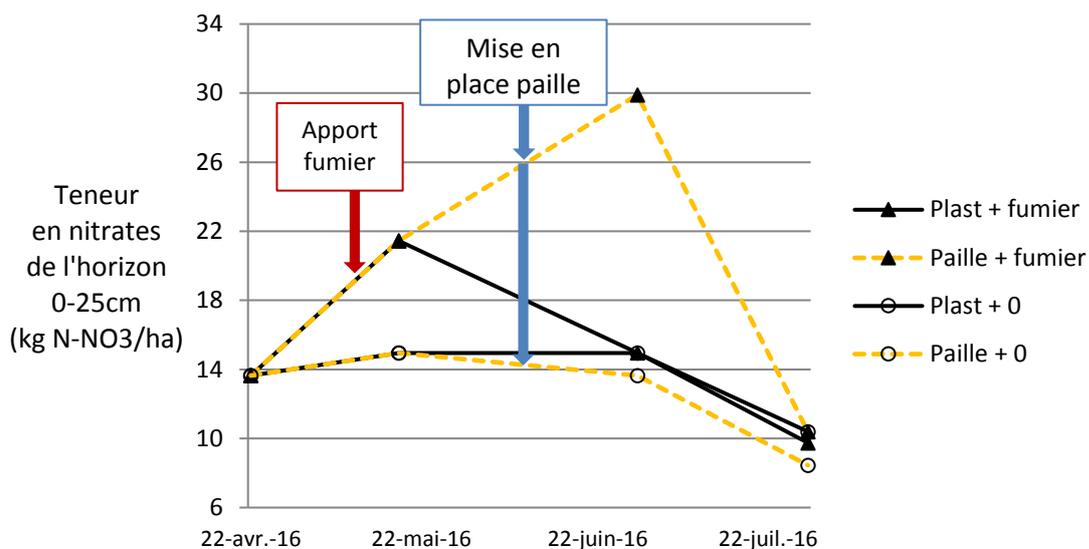


Figure 32 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « MOON GLOW »

Les traitements correspondent au paillage plastique avec apport de fumier (*Plast + fumier*) ou sans (*Plast + 0*) et à la paille de blé avec fumier (*Paille + fumier*) ou sans (*Paille + 0*). L'apport de fumier est réalisé le 9 et le 10 mai et la paille est installée le 13 juin (paillage plastique déjà en place à la première mesure).

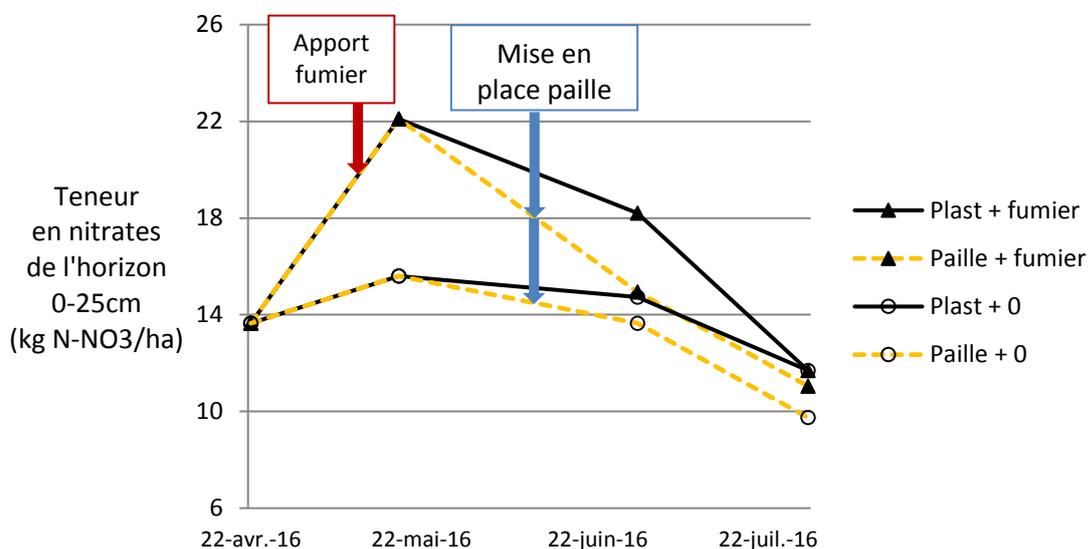


Figure 33 : EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES DU SOL SOUS DIFFERENTES MODALITES DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « DIPLOM F1 ».

Les traitements correspondent au paillage plastique avec apport de fumier (*Plast + fumier*) ou sans (*Plast + 0*) et à la paille de blé avec fumier (*Paille + fumier*) ou sans (*Paille + 0*). L'apport

de fumier est réalisé le 9 et le 10 mai et la paille est installée le 13 juin (paillage plastique déjà en place à la première mesure).

Les teneurs en nitrates mesurées dans toutes les modalités augmentent lors de la seconde mesure (Figures 31 à 33). Les valeurs obtenues dans le sol nu et le sol sous plastique noir sont identiques à ce moment. En revanche, le sol amendé comporte environ 6kgN-NO₃⁻/ha de plus que le sol non amendé, pour lequel cette valeur semble toutefois augmenter de 1 à 2UN, ce qui représente une variation négligeable.

Pour les variétés « Raisin Vert » et « Diplom F1 » (Figures 31 et 33, respectivement), il est ensuite possible d'observer que les quantités d'azote assimilable diminuent plus rapidement dans les sols paillés que ceux sous polyéthylène, les valeurs sous paille amendée et plastique non amendée étant similaires à l'avant dernière mesure. Enfin, les dernières mesures réalisées indiquent des teneurs en nitrates inférieures à celles observées trois semaines après la destruction de la prairie.

Les valeurs obtenues sur les modalités comportant la variété « Moon Glow » (Figure 32) ne comportent pas les mêmes tendances lors de la troisième mesure. En effet, le sol sous paille avec fumier présente des teneurs en nitrates supérieures d'environ 16UN par rapport à celles mesurées sous plastique amendé.

3.4. DISCUSSION GENERALE

Les ordres de grandeurs des teneurs en nitrates mesurées sont extrêmement différents entre l'essai réalisé chez Solange FOLLET (valeurs de début de saison comprises entre 175 et plus de 350UN) et celui suivi chez Marion PEYRIC (valeur maximale inférieure à 30UN). Les très faibles valeurs mesurées chez cette dernière semblent difficiles à expliquer compte tenu de la minéralisation attendue après destruction d'une prairie (BESNARD *et al.*, 2007). Chez Solange FOLLET les teneurs en nitrates extrêmement élevées peuvent être expliquées par un historique de fertilisation à doses parfois excédentaires (même fertilisation que pour cette culture et apport de fumier carin pour la mâche précédente par exemple), l'absence de lessivage du fait d'être sous abri et des conditions favorables à une minéralisation élevée (température et hygrométrie supérieures sous abri).

Chez Marion PEYRIC, l'augmentation de la teneur en nitrates lors de la deuxième mesure pour le sol non amendé est probablement liée à la minéralisation de la matière organique de la prairie détruite (LAURENT *et al.*, 2004). Malgré cela, les valeurs restent faibles comparées à celles que l'on aurait en attendre (de 1 à 3kg.N-NO₃⁻/jour d'après BESNARD *et al.* 2007). Les teneurs supérieures observées dans les planches amendées sont très vraisemblablement issues de l'azote minéral apporté par le fumier ainsi que de la minéralisation de l'azote organique qu'il contient.

La diminution des teneurs en nitrates observée dans les planches paillées comportant les variétés Raisin Vert et Diplom F1 peu probablement provoquée par une immobilisation de l'azote, liée au C/N élevé de la paille de blé apportée (C/N=100, BOGUSLAWSKI et DEBRUCK, 1977 *in* DORING *et al.*, 2005). En effet, la mesure des teneurs en nitrates n'est

réalisée que 15 jours environ après l'apport du paillage et la variation des valeurs relevées est faible (moins de 10kg N-NO₃/ha). L'origine la plus probable de cette légère baisse est une température du sol inférieure, qui entrainerait une minéralisation plus faible de l'azote organique alors que la culture absorbe les nitrates du sol. Par ailleurs, la baisse croissante de la quantité d'azote assimilable dans le sol qui suit la plantation des tomates (le 17 mai) est vraisemblablement provoquée par l'exportation de cette ressource par la culture, qui augmente de la plantation jusqu'à la récolte (HEUVELINK et DORAIS, 2005). Enfin, la fourniture d'azote du sol est très faible (inférieure à 12UN pour toutes les mesures) lors du dernier relevé, ce qui semble indiquer que la minéralisation de l'azote organique issu de la prairie précédente, mais également de l'amendement apporté serait insuffisante pour obtenir un rendement optimal. En effet, (REY *et al.*, 2015), indiquent qu'une culture de tomate exporte entre 200 et 300UN pour un rendement de 8kg/m².

Les valeurs obtenues lors de la troisième mesure sur les sols amendés pour la variété Moon Glow sont surprenants. Compte tenu des résultats observés pour les autres variétés, une inversion des échantillons de sol lors de la mesure de leurs teneurs en nitrates serait possible. Cependant le protocole semble avoir été respecté. Toutes les planches paillées de l'essai sont poursuivies par un paillage plastique à l'exception de celle où ces valeurs élevées sont mesurées. Le paillage de paille de céréale est prolongé sur 10m supplémentaires après celle-ci. Par ailleurs la parcelle présente une pente, estimée à moins de 2% à cet endroit. Il se pourrait que les précipitations de 10mm le 29 mai et de la même hauteur le 16 juin aient entraîné une partie de l'amendement situé en haut de la pente par ruissellement. Néanmoins, la durée sur laquelle ces précipitations se sont étalées n'est pas connue. Par ailleurs, à titre informatif, dans le cas où ces précipitations auraient été concentrée sur moins de 5 heures, il aurait fallu que le sol ait une très faible infiltrabilité (environ 2mm/h pour un sol argileux d'après CARSEL et PARRISH, 1998) ce qui semble peu probable compte tenu de la texture du sol de la parcelle (limon sableux, pas de croûte de battance observée). De plus, la présence de paillage sur le sol est connue pour limiter les ruissellements de surface (LEONARD et RAJOT, 1998). Il semble ainsi que ce phénomène soit provoqué par un effet de zone, dont l'origine paraît complexe à déterminer.

Il semble que l'effet combiné du paillage plastique sur la température du sol et de l'apport de fumier sur sa teneur en azote permette la vitesse d'apparition des bouquets floraux la plus élevée pour les trois variétés (résultats similaires pour « Raisin Vert », Annexe 4). Ce résultat paraît cohérent, en considérant que la nutrition azotée de la culture serait la moins limitante dans cette modalité, et compte tenu de l'effet du plastique sur une température du sol plus proche de l'optimum de la culture (TEASDALE et ABDUL-BAKI, 1995). Etant donné le faible écart d'unités d'azote observé après la mise en place de la paille entre le sol paillé avec amendement et le sol sous plastique sans amendement, cela permettrait également d'expliquer pourquoi les variétés « Diplom F1 » et « Moon Glow » présentent un nombre équivalent de bouquets sur ces modalités (TEASDALE et ABDUL-BAKI, 1995).

Enfin, il ne semble pas que la teneur en nitrates plus élevée dans la modalité paille avec fumier entraîne un développement plus rapide du nombre de bouquets de la variété Moon Glow. Cela serait cohérent avec les informations fournies par KASIRAJAN et NGOUAJIO (2012), qui indiquent que l'augmentation de la température du sol permise par les paillages plastiques entraîne un développement plus rapide et une récolte plus précoce des cultures.

Cette information semble en effet avérée pour les variétés Diplom F1 et Raisin Vert, qui sont respectivement récoltées 1 à 2 et 2 à 3 semaines plus tôt sur le paillage plastique avec ou sans fumier que sur la paille. En revanche, la première récolte de la variété Moon Glow est réalisée sur paille avec amendement. Cela pourrait alors indiquer que la teneur en nitrates du sol est limitante pour la précocité de la récolte dans toutes les autres modalités et variétés exceptée dans celle-ci où elle le serait moins. En effet, les résultats de NICOLA et BASOCCU (2000) indiquent qu'une relation linéaire existe entre la quantité d'azote disponible pour la culture et la précocité de la première récolte. Il serait alors possible d'en déduire que la fourniture en azote du sol est limitée dans toutes les modalités et que l'effet du type de paillage sur la température du sol a ainsi eu une incidence supérieure sur la précocité de la première récolte. Cela indiquerait également que la quantité d'azote disponible durant une partie du cycle de la variété Moon Glow a eu un effet plus important sur la précocité que celui de la température du sol. Enfin, ces informations semblent indiquer qu'à l'exception d'une partie du cycle réalisé sur cette dernière modalité, la quantité d'azote disponible du sol est limitante pour la culture, et ce malgré le précédent prairie et l'apport de fumier.

A l'opposé, les teneurs en nitrates chez Solange FOLLET sont très élevées. En effet seul le sol sous plastique sans mouron contient moins de 100UN à partir du 24 juin, et le sol sous paille avec engrais vert passe en dessous de cette limite le 22 juillet uniquement. Par ailleurs certaines valeurs dépassent les 350UN en début de saison (paillage plastique après engrais vert et paille avec apport de biomasse adventice). Ces valeurs bien qu'extrêmement élevées, ne sont pas pour autant aberrantes. En effet VEDIE *et al.* (2007) mesurent des teneurs en nitrates du sol sur 0-25cm de profondeur pouvant atteindre des valeurs supérieures à 250UN. De plus, les observations de cette étude sont réalisées sur en plein champ, sur des sols maraîchers du même type et dans la même région.

Les planches ayant avec engrais vert ont reçu la même fertilisation et comportaient le même précédent (chou chinois). Malgré une valeur plus élevée à la première mesure, le sol paillé présente des teneurs en nitrates plus faibles de 60 à 120UN lors des trois suivantes par rapport à la planche de culture sous plastique. Il se pourrait que cela soit l'effet d'une immobilisation temporaire de l'azote du sol (DORING *et al.*, 2005), provoquée par la présence d'un paillage au rapport C/N élevé (C/N de la paille d'orge compris entre 50 et 70 environ, dans CHOWDHURY *et al.*, 2014 et MUELLER *et al.*, 1998). Toutefois, compte tenu de la fluctuation de la mesure observée dans cette planche, la teneur en nitrates du sol avant l'installation du paillage n'étant pas connue et aucun témoin non paillé n'ayant été mis en place sur l'essai, il est seulement possible de suspecter ce phénomène.

Par ailleurs, l'absence de différence entre les volumes d'irrigation de chaque modalité, la réalisation des prélèvements et des mesures selon la même méthode et l'absence de telles fluctuations dans les autres planches de culture rendent l'interprétation de cette variabilité difficile. Ce phénomène paraît d'autant plus étonnant compte tenu de l'effet limitant de la paille sur les écarts de température du sol, seul facteur restant pouvant expliquer une minéralisation variable de l'azote (TEASDALE et ABDUL BAKI, 1995 ; WATTS et TORBERT, 2014). En effet, l'agricultrice ne réalise aucune intervention spécifique sur cette planche (fertigation par exemple), et les autres facteurs pouvant influencer la minéralisation de l'azote ne peuvent varier suffisamment pour entraîner de telles variations toutes les 2 semaines (WATTS et

TORBERT, 2014). Afin de déterminer l'origine de cette évolution, il aurait été nécessaire de suivre plus fréquemment les paramètres ayant l'influence la plus élevée sur ce phénomène : la température et la teneur en eau du sol.

Les plus faibles valeurs observées sur la planche *Plast 0* sont très probablement liées à l'export de l'azote du sol par la flore adventice. Celle-ci est composée en majorité de mouron blanc (*Stellaria media*), espèce considérée comme appartenant aux « groupements très nitrophiles » de la flore naturelle méditerranéenne (RAMEAU *et al.*, 2008). Il se peut donc que cette espèce soit capable d'exporter suffisamment d'azote dans sa biomasse pour provoquer cet effet. De plus, alors que la culture de mâche, anciennement présente sur *Plast 0*, n'exporte potentiellement que 30UN pour un rendement de 8t/ha (REY *et al.*, 2015), celle de choux chinois située sur *Plast EV* peut en avoir exporté 60 à 85UN selon les rendements (Baitilwake *et al.*, 2011). Il serait ainsi possible de s'attendre à mesurer l'influence de reliquats azotés plus faibles dans cette dernière, ce qui n'est pas le cas. En revanche, les restitutions azotées de l'engrais vert, et surtout de la fêverole, peuvent avoir favorisé une teneur en nitrates plus élevée sous le paillage plastique. Celle-ci serait en effet capable de restituer 15 à 150UN selon les sources (KOPKE et NEMECEK, 2010). Néanmoins, elle représentait 30% du poids du mélange semé et n'était pas encore entrée en floraison au moment de sa destruction, stade à partir duquel la fixation symbiotique de l'azote par ses nodosités augmente (KOPKE et NEMECEK, 2010). Par ailleurs, le transfert de biomasse adventice supposée riche en azote expliquerait pourquoi, alors que ces deux planches comportaient le même précédent, le sol où cette biomasse est exportée présente les teneurs en nitrates les plus faibles et celui où elle a été importée les plus élevées. Par ailleurs, il semblerait que sur cette planche paillée où 6,5kg de matière fraîche/m² de cette biomasse ont été apportés, il ne se produise pas le même phénomène d'immobilisation de l'azote, comme suspecté dans la planche paillée avec l'engrais vert. Cela pourrait également être lié au fait que cette biomasse a été apportée avant la mise en place du paillage, permettant ainsi une séparation physique entre le sol et le paillage. Il semble intéressant d'ajouter que la diminution rapide des teneurs en nitrates observée dans les autres planches entre le 10 et le 24 juin coïncide avec le moment où la culture a été la plus productive. Cette période correspond à l'étape du cycle de la tomate autour de laquelle ses besoins en azote assimilable sont les plus élevés (HEUVELINK et DORAIS, 2005). Enfin, cette diminution n'est pas observée dans la planche où l'apport de biomasse adventice a été réalisé. Il se pourrait donc que la quantité de nitrates issus de la minéralisation de cette matière organique soit suffisante pour ne pas y observer ce phénomène.

Il semble que la teneur en nitrates mesurée dans les différentes planches ne soit pas à l'origine des écarts de précocité observés sur les différentes modalités. En effet, les tomates de la variété « Ananas » sont situées sur les planches de culture présentant les quantités d'azote assimilable les plus élevées et les plus faibles de l'essai. Sur ces planches où l'azote est disponible en moindre quantité, le nombre de bouquets floraux est pourtant le plus élevé. Il semble ainsi que pour cette variété, ce soit l'effet du type de paillage sur la température du sol qui ait induit ce résultat. Il est également possible de constater que la variété « Noire de Crimée » se développe plus rapidement sur paillage plastique que sur paille. De plus, il ne semble pas y avoir de différence entre le développement des tomates situées là où l'engrais vert était présent et où une immobilisation de l'azote est suspectée, et celles placées sur la modalité avec apport de biomasse adventice où les teneurs en nitrates sont les plus élevées.

Enfin, il est constaté que la variété « Noire de Crimée » est récoltée une semaine plus tôt sur plastique que sur paille avec engrais vert ou avec biomasse adventice, mais que la récolte de la variété « Ananas » débute au même moment sur plastique que sur paille. Il est donc probable que la température plus élevée sous plastique ait permis une récolte plus précoce pour les « Noires de Crimée », mais que l'écart des teneurs en nitrates ait permis aux tomates « Ananas » paillées d'atteindre la maturité au même moment que celles sur plastique. Cette dernière interprétation est toutefois à considérer avec prudence, compte tenu des dégâts provoqués par *Tuta absoluta* à ce stade de la culture.

Chez Solange FOLLET, l'influence des pratiques de l'agricultrice sur le stock d'azote assimilable du sol, notamment par le transfert de la biomasse adventice, ne permet pas d'observer si l'effet du type de paillage sur la température du sol a ou non une influence sur la minéralisation de l'azote. En revanche, il est possible de suspecter un effet du C/N élevé de la paille produisant une immobilisation de l'azote du sol. La température plus élevée sous paillage plastique noir et son effet sur la précocité d'apparition des bouquets floraux est observée chez les deux agricultrices. Il semble également que cet effet du type de paillage permette d'influencer la date de première récolte. En revanche, cet écart de précocité semble se réduire lorsque les quantités d'azote disponibles présentent des différences importantes ou paraissent limitantes durant une partie du cycle de la culture.

Enfin, il apparaît que l'apport d'une quantité importante de biomasse d'adventices entre le sol et le paillage de paille soit efficace contre l'effet de cette dernière sur l'immobilisation de l'azote du sol. Ce résultat est probablement le produit d'un effet combiné de la quantité d'azote contenu dans cette biomasse, ainsi que de son positionnement permettant de limiter le contact entre la paille et le sol.

En revanche, chez Marion PEYRIC, l'effet précédent de la prairie et la quantité de fumier apportée ne semblent pas assez élevés pour fournir de l'azote en quantité suffisante à la culture.

Enfin, **on constate bien l'effet attendu du paillage plastique noir sur la température du sol et la précocité de la culture. Celui-ci permet généralement un gain d'une à trois semaines par rapport à la date de première récolte observée sur paille.** Toutefois, des écarts importants des teneurs en azote du sol peuvent entraîner une précocité similaire sur sol paillé.

3.5. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTRICE – SOLANGE FOLLET

La maraîchère indique observer un retard de croissance net des tomates placées sur paille. Celles-ci manquent de vigueur (densité et couleur du feuillage, vitesse de croissance) durant toute la durée de l'essai. D'après elle cela est lié à l'effet conjugué de la paille sur la température du sol et des faibles températures en début de saison. Elle indique également que cette pratique n'est pas adaptée dans le cas de cultures implantées précocement comme

ici, et l'obtention de récoltes précoces. En effet, un tel retard de croissance n'est pas constaté sur les autres tomates et les autres cultures implantées plus tardivement et paillées. En revanche, elle considère l'emploi de paille de céréales comme bénéfique pour le sol sur le long terme, car il constitue un amendement organique, et accepte les éventuelles pertes liées à cette pratique. Elle observe en effet une structure plus facile à travailler, plus grumeleuse et plus homogène après l'emploi de paille, alors que le sol sous paillage plastique lui semble prendre légèrement en masse. Par ailleurs, le paillage à l'aide de plastique ne constitue pas pour elle une pratique agréable à mettre en œuvre. En effet, la mise en place de celui-ci nécessite de la précision pour la conduite du tracteur, et le fait de travailler avec un engin sous une serre lui impose d'en respirer les gaz d'échappement. De plus, en tenant compte de l'attelage de la dérouleuse à paillage, le temps de travail pour pailler une planche à l'aide de plastique nécessite environ 40min pour une serre complète, alors qu'elle ne lui prend que 10min supplémentaires avec de la paille.

L'adaptation de sa pratique en cas d'emploi de paille de céréales pour des cultures précoces correspondrait à mettre en place le paillage après l'implantation de la culture. Celle-ci serait installée sur sol nu et les volumes d'irrigation seraient augmentés pour pallier une possible évaporation plus élevée de l'eau du fait de l'absence de paillage. L'agricultrice attendrait ensuite que la culture atteigne une vitesse de développement satisfaisante, indicateur d'un réchauffement suffisant du sol, pour mettre en place le paillage. Elle précise qu'il lui paraît nécessaire de disposer de critères de décisions sur l'état de vigueur de la culture dans un itinéraire technique pour déterminer s'il est possible d'effectuer une intervention ou non.

3.6. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'AGRICULTRICE – MARION PEYRIC

L'agricultrice n'est pas satisfaite du développement de la culture lorsqu'elle n'est pas amendée, et d'autant plus sur la paille de céréales. Elle indique être surprise par le faible apport de nutriments que semble avoir procuré la destruction de la prairie à la culture. En effet les différences de développement entre les zones amendées et non amendées sont flagrantes, surtout entre paille non amendée et paillage plastique amendé. Par ailleurs, elle indique que malgré l'ajout de fumier la culture paillée a un niveau de croissance inférieur à celui observé sur plastique, et qui persiste encore aux alentours du 15 août. Elle attribue ce constat à l'effet dépressif de la paille sur la température du sol, mais indique avoir besoin d'attendre la fin de la saison de production pour pouvoir se prononcer de façon fiable. En revanche, d'une manière similaire à celle évoquée par Solange FOLLET, elle précise que l'effet de la paille de céréale doit être considéré sur au moins deux années pour tenir compte des effets de l'amendement qu'elle constitue.

Marion PEYRIC indique que le paillage plastique noir a un effet positif « indiscutable » sur la vitesse de développement des cultures. Elle illustre ce propos en évoquant une culture d'oignons semés un mois plus tard sur ce type de paillage qu'une autre culture de la même espèce sur paille, et qui atteignent ensuite un niveau de développement supérieur. Toutefois,

elle ne souhaite pas généraliser cette pratique à toute son exploitation, car elle la considère comme violente pour le sol.

Elle envisage cependant d'utiliser ce paillage sur une partie de son exploitation pour assurer une production acceptable. Cette notion d'assurance concerne l'effet positif du paillage sur le rendement, la précocité des cultures ainsi que pour limiter les dégâts d'escargots, en revanche favorisés par la paille. Néanmoins, elle indique que les tomates produites sur paillage plastique sont moins fermes que celles récoltées sur paille, ce qui rend le transport pour la vente sur les marchés plus délicat. De plus, elle signale ne pas être satisfaite de la qualité gustative des tomates. L'importance accordée à la saveur de ses produits est également évoquée plusieurs fois par l'agricultrice lors de différents échanges précédant l'entretien. Elle constitue un critère essentiel dans ses objectifs de production. Ainsi, elle indique que la meilleure adaptation de l'emploi de ces types de paillages serait pour elle d'allouer 1/3 de la surface des cultures paillées au paillage plastique noir pour assurer un volume de production suffisant et les 2/3 restants à la paille de céréales pour répondre à son objectif d'obtenir des produits ayant une bonne saveur.

4. Synthèse générale

4.1. RETOUR D'EXPERIENCE DES AGRICULTEURS

L'aspect de praticité des pratiques testées est abordé par tous les agriculteurs mais ne semble pas prioritaire dans la comparaison des modalités testées. Patrick VIDAL aborde le fait que l'occultation à l'aide d'une bâche nécessite des étapes supplémentaires et plus fastidieuses, telles qu'installer le paillage une fois la culture implantée ou encore devoir replacer l'occultant en cas de vents. Solange FOLLET évoque un confort de travail supérieur pour la mise en place du paillage à l'aide de paille de céréales. Marion PEYRIC ne l'indique pas lors de l'entretien final, mais elle signale lors de précédents échanges que ce paillage est également plus commode pour elle pour des questions de mécanisation et de temps de travail supérieurs nécessaires à l'installation de paillages plastique.

Les aspects agronomiques tiennent une place plus importante dans le jugement que les maraîchers font des pratiques testées. Cela est probablement lié au fait que les différences de temps de travail et de praticité de chaque modalité sont ressenties comme étant faibles. Patrick VIDAL substituera certainement l'emploi de la grelinette, dont il juge l'effet sur la structure du sol peu souhaitable, par un engrais vert permettant une amélioration de ce facteur à moyen terme. Par ailleurs, Solange FOLLET accepte les pertes de rendement liées à l'emploi de la paille, pour bénéficier de son effet positif sur la structure du sol. Dans un autre cas de figure, Marion PEYRIC, qui considère l'emploi du paillage plastique comme une pratique « violente » pour le sol, envisage l'intégration de ce paillage sur une partie de sa surface cultivée, compte tenu de ses avantages en termes de précocité et de rendement (également observé sur d'autres cultures que celles de l'essai).

Enfin, des critères plus qualitatifs de la production (saveur des fruits pour la vente directe et fermeté pour leur transport) semblent importants à prendre en compte dans l'évaluation à posteriori des pratiques de l'agriculteur. Bien que ce ne soit relevé que par une seule agricultrice, ce critère paraît en effet pertinent, compte tenu du type d'exploitation maraîchère trouvé en région PACA, où les liens directs entre producteurs et consommateurs sont fréquents.

4.2. RESULTATS DES ESSAIS

Pour un même amendement, le facteur qui a le plus probablement induit des différences dans la dynamique de minéralisation de l'azote est la température du sol. Il se pourrait également qu'une immobilisation de l'azote ait eu lieu chez Solange FOLLET dans la modalité paillée après engrais vert, mais cette observation comporte de nombreuses incertitudes et ne peut être vérifiée. Une autre information intéressante dans l'essai réalisé chez cette dernière, est la capacité de la biomasse adventice principalement composée de *Stellaria media* à exporter et à restituer l'azote assimilable du sol.

La minéralisation de l'azote supposée élevée après destruction d'une prairie n'est pas observée dans l'essai réalisé chez Marion PEYRIC. La fourniture du sol pour la culture reste ainsi très limitée. La quantité d'azote fournie par le fumier de bovin paillé et peu composté est également restreinte, compte tenu des besoins élevés de la culture de tomates.

Les effets les plus probables du travail du sol à la grelinette sur la minéralisation de l'azote seraient un réchauffement plus rapide du sol en début de saison, conjugué à une meilleure disponibilité en oxygène dans le milieu permise par cette intervention. Cependant, ce serait surtout l'incorporation de la matière organique du sol, concentrée en surface, sur la profondeur travaillée qui serait le facteur le plus important. Cela expliquerait en effet pourquoi la teneur en azote est supérieure dans le sol travaillé durant plus d'un mois.

Enfin, les résultats obtenus sur les planches de courgettes dans le second essai réalisé chez Patrick VIDAL sont probablement majoritairement influencés par l'apport d'un paillage épais et au rapport C/N supposé faible en plus de la présence d'engrais vert. Les facteurs qui auraient ainsi le plus probablement joué seraient liés à une meilleure rétention en eau du sol et une fourniture en azote minéralisable supérieure à celle permise seulement par la présence d'un engrais vert. Toutefois, les résultats obtenus sur la culture d'aubergines indiquent tout de même que l'engrais vert a un effet sur la minéralisation de l'azote et au moins sur la culture. En effet, dans ce cas-ci, seul le facteur de présence et d'absence de l'engrais vert varie entre les deux planches comparées. Les effets les plus vraisemblables pourraient donc être attribués à la restitution progressive d'azote contenu dans la biomasse de l'engrais vert, supposée facilement dégradable, ainsi qu'à l'amélioration de la structure du sol par l'action précédente puis la dégradation du système racinaire du couvert.

4.3. LIMITES DES SUIVIS REALISES

La variabilité des données de densité apparente, très probablement liée à l'hétérogénéité spatiale des sols, limite les possibilités d'interprétation de de ces mesures. Des observations de sol à l'aide de profils culturaux auraient peut-être été plus sensibles aux changements d'état du milieu. Ceux-ci auraient permis d'observer l'état interne et la répartition des mottes de terre ainsi que celle de la matière organique et de la porosité visible, et l'enracinement de la culture en fin de saison. La méthode aurait également été moins destructive car le nombre de fosses creusées aurait été réduit. En effet, 3 fosses auraient été nécessaires pour la planche travaillée (avant et après le travail du sol, et en fin de saison), mais seulement 2 pour la planche témoin (en début et en fin de saison). Enfin, le temps de travail et le matériel requis pour réaliser les mesures auraient également été moins importants. Le choix de recourir à une méthode quantitative a été fait pour s'affranchir du manque d'expertise de l'expérimentateur. Par ailleurs, une telle variabilité des données ne pouvait être prévue à l'avance.

Le suivi des teneurs en eau du sol à l'aide de sondes tensiométriques aurait permis d'approfondir l'interprétation des données relevées à l'aide du pénétromètre. Il aurait également été possible de demander à l'agriculteur de prendre le temps de noter les dates et volumes d'irrigation. En revanche, cela n'aurait pas réduit pour autant la variabilité des données obtenues, et il semble peu envisageable de réaliser ce suivi en fonction des dates d'irrigation de l'agriculteur, celles-ci étant variables.

L'hétérogénéité spatiale du sol et les mesures des teneurs en nitrates permises par le Nitrachek étant moins précises en dessous de 50mg/L (ou 65kgN-NO₃⁻/ha) rend la distinction des valeurs obtenues hasardeuse dans plusieurs des essais (chez Marion PEYRIC par exemple). Les moyens disponibles ne permettent toutefois pas d'avoir recours à des dosages plus précis et il n'est pas non plus possible de demander aux agriculteurs de mettre en place plus de répétitions que ce dont ils ont besoin pour leur production. En revanche, le nombre de prélèvement pour constituer les échantillons composites pourrait être augmenté au nombre de 15 voire 20, bien que cela augmente le temps de prélèvement et de traitement des échantillons avant analyse. Il est ainsi nécessaire d'assumer et tenir compte des incertitudes liées aux appareils ainsi qu'aux dispositifs mis en place, ceux-ci permettant tout de même et dans la majorité des cas d'observer des différences entre les dynamiques de minéralisation de l'azote.

CONCLUSION

Le groupe de maraîchers impliqués dans le CASDAR MCAE veut disposer de plus de connaissances sur l'effet de l'emploi d'engrais verts, de la réduction du travail du sol et des matières organiques sur la fertilité du sol. Ce projet a également pour vocation de diffuser les connaissances générées, notamment à des échelles plus larges que la région PACA, via le réseau ADméd.

L'emploi d'un engrais vert de petit épeautre dense et peu développé démontre son intérêt, tant en termes de rendement que d'efficacité d'utilisation de l'azote par la culture. En revanche, même si le travail du sol à la grelinette au printemps entraîne une minéralisation plus élevée de l'azote, cet effet ne dure qu'un mois et l'intervention ne permet pas de remédier au problème de prise en masse du sol que rencontre l'agriculteur. Par ailleurs, comparés à la paille de céréales, les paillages plastiques noirs permettent d'élever la température du sol et une meilleure précocité de la culture de tomates. Dans l'un des essais, la biomasse de la flore adventice, principalement composée d'une espèce nitrophile (*Stellaria media*), semble être capable d'exporter des quantités non négligeables d'azote assimilable du sol mais également de fournir une source d'azote facilement minéralisable là où il est apporté.

La différence économique et en terme d'organisation est faible entre les traitements comparés. Les agriculteurs semblent accorder relativement plus d'importance aux critères agronomiques des pratiques, certaines telles que l'emploi de paillages végétaux devant être également considérées sur le long terme. Par ailleurs, des effets plus qualitatifs, comme celui du paillage plastique sur la saveur et la fermeté des tomates, émergent de l'un des entretiens. A une échelle plus systémique que celle des essais étudiés, ces critères paraissent pertinents pour des exploitations principalement axées sur la vente directe

Il reste à présent à valoriser les acquis du projet et trouver des moyens pertinents pour les diffuser. Par ailleurs, plus de questions subsistent à l'issue des essais qu'à leur début : A quel moment est-il judicieux de mettre en place des paillages végétaux sur des cultures précoces pour en limiter les effets dépressifs sur la vitesse de développement des cultures ? Quels indicateurs mettre en place pour cela ? Quel est l'effet relatif des paillages plastiques et organiques sur la structure du sol à court, moyen et long terme ? Ou encore : Quelle est l'efficacité d'un engrais vert à fort pouvoir structurant pour limiter les phénomènes de prise en masse du sol à court et moyen terme ? Les maraîchers et maraîchères continueront probablement à réaliser leurs propres expérimentations. Toutefois, ce projet montre l'intérêt des démarches ascendantes et le besoin de développer davantage les liens entre recherche et terrain.

BIBLIOGRAPHIE

ADMED. Accueil du site du réseau "Agriculture Durables en Méditerranée". **[en ligne]**. Disponible sur <http://ad-mediterranee.org/>. Consulté le 24.08.2016.

AFES. ; 2008. Référentiel pédologique français 2008. Paris : Quae.

AFIDOL. Bulletins Infolive 2016. **[en ligne]**. Disponible sur <http://afidol.org/oleiculteur/bulletins-infolive-2016/>. Consulté le 09.09.2016.

AGENCE BIO. CHIFFRES CLES. Chiffres clés de la bio. La bio en France. Chiffres de la bio en France en 2014. **[en ligne]**. Disponible sur <http://www.agencebio.org/la-bio-en-france>. Consulté le 09.04.2016.

AGROSEMENS. Catalogue professionnel 2014. **[en ligne]**. Disponible sur <http://www.agrosemens.com/telechargement/Agrosemens-catalogue-2014.pdf>. Consulté le 03.08.2016.

ALTIERI M. A., NICHOLLS C. I., HENAO A., LANA M. A. ; 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 869–890.

ANDRIANARISOA K.S. ; 2009. Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : effet du type de sol et de l'essence forestière. Nancy : Université Poincaré.

ANGERS D. A., SAMSON N., LEGERE, A. ; 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.*, 73: 51-59.

AUDRY P., COMBEAU A., HUMBEL F.X., ROOSE E., VIZIER J.F. ; 1973. Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin de Groupe de Travail. ORSTOM, Bondy, multigr. 1-254.

BAITILWAKE M.A., DE BOLLE S.D., SALOMEZ J., MREMA J.P., DE NEVE S.D. ; 2011. Effects of manure nitrogen on vegetables' yield and nitrogen efficiency in Tanzania. *International Journal of Plant Production.*, 5(4), 417-430.

BAIZE D. ; 1995. Guide pour la description des sols, INRA Editions.

BENBI D.K. et RICHTER J. ; 2002. A critical review of some approaches to modelling nitrogen mineralization. *Biol Fertil Soils.*, 35, 168–183.

BERTUZZI P., JUSTES E., LE BAS C., MARY B., SOUCHERES V. ; 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires Conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Chapitre 5. Effets des cultures intermédiaires sur l'érosion, les propriétés physiques du sol et le bilan carbone. 1-28.

BESNARD A., LAURENT F., HANOCQ D., VERTÈS F., NICOLARDOT B., MARY B., 2007. Effect of timing of grassland destruction on nitrogen mineralization kinetics. *Grassland Science in Europe.*, 12, 335-338.

BIRCH H.F. ; 1959. Further observations on humus decomposition and nitrification. *Plant Soil.*, 9, 262–286.

BODNER G., NAKHFOROOSH A., KAUL H.P. ; 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 35 (2), pp.401-442.

CALOIN M., OLIVIER Yu O. ; 1986. Relation entre dilution de l'azote et cinétique de croissance chez les graminées. *Agronomie*, EDP Sciences, 6 (2), pp.167-174.

CAMPBELL, D.J., O'SULLIVAN, M.F.; 1991. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. In: Smith, K.A. and Mullins, C.E. (Eds.), *Soil analysis. Physical methods*. Marcel Dekker, New York, USA, pp. 399-430.

CARSEL D.K., PARRISH R.S. ; 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24, pp. 755-769

CASSEL, D.K., 1982. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: Unger, P.W. and Van Doren, D.M. (Eds.), *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*. ASA-SSSA, Madison, USA, pp. 45-67.

CAVOSKI I., AL CHAMI Z., JARRAR M., MONDELLI D. ; 2016. Solutions for soil fertility management to overcome the challenges of the Mediterranean organic agriculture: tomato plant case study. *Soil Research.*, 54 (2), 125-133.

CHALKER-SCOTT L. ; 2007. Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment — A Review. *J. Environ. Hort.*, 25(4), 239–249.

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LANGUEDOC ROUSSILLON. ; 2012. Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon, tomes 1 et 2.

CHAMBRE D'AGRICULTURE PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR. Notre Agriculture. Productions végétales. **[en ligne]**. Disponible sur <http://www.paca.chambres-agriculture.fr/notre-agriculture/productions-vegetales/#c53934>. Consulté le 12.04.2016.

CHAUDHARI P.R., AHIRE D.V., AHIRE V.D., CHKRAVARTY M., MAITY S. ; 2013. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore. *Soil. Int J Sci Res. Pub.* 3, 1-8.

CHENU C., VIRTO I., PLANTE A.F., ELSASS F. ; 2009. Clay-size organo-mineral complexes in temperate soils: relative contributions of sorptive and physical protection. In: D.A. Laird, J. Cervini-Silva (Eds.), Carbon Stabilization by Clays. CMS workshop lectures. The Clay Minerals Society, Chantilly, VA, pp. 120-135.

CHEVALIER A. ; 1939. Les origines et l'évolution de l'agriculture méditerranéenne.. In: Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale, 19^e année, bulletin n°217-218, Septembre-octobre. 613-662.

CHOWDHURY M.A., de NEERGAARD A., JENSEN L.S. ; 2014. Composting of solids separated from anaerobically digested animal manure: Effect of different bulking agents and mixing ratios on emissions of greenhouse gases and ammonia. Biosystems Engineering., 124, 63-77.

COOLEY E.T., LOWERY B., KELLING K.A., WILNER S. ; 2007. Water dynamics in drip and overhead sprinkler irrigated potato hills and development of dry zones. Hydrological Processes. 21(17), 2390-2399.

CURRIE, R.S., KLOCKE, N.L. ; 2005. Impact of a terminated wheat cover crop in irrigated corn on atrazine rates and water use efficiency. Weed Science, 53 (5), 709-716.

DIACONO M. et MONTEMURRO F. ; 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agron. Sustain. Dev., 30 (2), 401-422.

DORE T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B., ROGER-ESTRADE J. ; 2006. L'agronomie aujourd'hui. Versailles : EDITION QUAE.

DURBIANO C., DE REPARAZ A. ; 1979. Le foncier agricole en Provence Alpes Côte d'Azur : spécificité, défense et restructuration. In: Méditerranée, troisième série, tome 37, 4. Evolution et mutations récentes des campagnes de la méditerranée nord occidentale. pp. 55-75.

ELDIN M., AUDET A., QUENCEY P. ; 1969. L'évapotranspiration potentielle : applications. Définition. Principales évaluations. Mesure. L'Agronomie Tropicale. Extrait du Vol. XXIV, n°9. 1-8.

FAGERIA N.K., BALIGAR V.C., BAILEY B.A. ; 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. Communications in Soil Science and Plant Analysis., 36 (19-20), pp. 2733-2757.

FELLER C., BLEIHOLDER H., BUHR L., HACK H., HESS M., KLOSE R., MEIER Y., STAUSS R., VAN DEN BOOM T., WEBER E. ; 1995. Phänologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen: II. Fruchtgemüse und Hülsenfrüchte. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 47, 217-232.

FEUVRIER E. ; 2015. Aubergine sol. Suivi de la fertilisation et de l'irrigation. Fiche APREL 15-083. 1-6.

FRASER D.G., DORAN J.W., SAHS W.W., LESOING G.W. ; 1988. Soil microbial populations and activities under conventional and organic management. J Environ Qual 17:585-590.

FRANZEN H., LAL R., EHLERS W. ; 1994. Tillage and mulching effects on soil physical properties of a tropical Alfisol. *Soil Till. Res.* 28, 329-346.

GODWIN R.G. ; 1992. Le génie agricole au service du développement : production vivrière en zones de faible pluviosité – façons culturales appropriées. *Bulletin des services agricoles de la FAO n°83*. Rome : ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE.

GREC-PACA. ; 2016. Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. 1-44.

GRIFFIN, T. S. ; 2008. Nitrogen availability. *Nitrogen in Agricultural Systems*. Agronomy Monograph. Madison : ASA, CSSA, et SSSA.

GUET G., CHOTARD A., RIMAN K. ; 2011. *Mémento d'agriculture biologique: guide pratique à usage professionnel*. 3^{ème} édition. Paris : EDITION FRANCE AGRICOLE.

HAM J.M., KLUITENBERG G.J., LAMONT W.J. ; 1993. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. *Journal of the American society for Horticultural Science*. 118, 188-193.

HARTWIG N.L., AMMON H.U. ; 2002. Cover Crops and Living Mulches. *Weed Science.*, 50(6), 688-699.

HASSINK J. ; 2012. Effects of soil texture and structure on carbon and nitrogen mineralization in grassland soils. *J. Biol Fertil Soils.*, 14(2), 126-134.

HASSON A.M., HUSSAIN R. ; 1987. Effect of polyethylene mulch on soil temperature variation under planted greenhouse in aridic region. *Solar & Wind Technology.*, 4(4), 459-465.

HAYNES R.J. ; 1986. Mineral nitrogen in the plant-soil system. The decomposition process: Mineralization, immobilization, humus formation, and degradation. Orlando : Academic Press.

HAYNES R.J. et NAIDU R. ; 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.*, 51, 123–137.

HENIN S. ; 1976. *Cours de physique du sol*. Volume 1. Texture – Structure – Aération. Initiations - documentations techniques n°28. 1-160.

HEUVELINK E., DORAIS M. ; 2005. CROP GROWTH AND YIELD. Tomatoes. *Crop Production Science in Horticulture*. 13, 85-137. Wallington : CABI PUBLISHING.

HUETT D.O. ; 1986. Response to Nitrogen and Potassium of Tomatoes Grown in Sand Culture. *Australian Journal of Experimental Agriculture.*, 26(1), 133 - 138.

ISMAIL S.M., ALMARSHADI M.H. ; 2012. Influence of green manure and effective microorganism on forage productivity and water use efficiency of alfalfa and pearl millet under sprinkler irrigation method. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10 (3-4), pp. 428-433.

JACKS G.V., BRIND W.D., SMITH R. ; 1955. Mulching. *Tech. Commun. Commonwealth Bureau of Soil Science*. 49, 1–87.

KASIRAJAN S., NGOUAJIO M. ; 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 32,501–529.

KEIFT T.L., SOROKER E., FIRESTONE M.K. ; 1987. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 119–126.

KNOEPP J.D., SWANK W.T. ; 2002. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization. *Biol Fertil Soils.*, 36, 177–182.

KÖPKE U., NEMECEK T. ; 2010. Ecological services of faba bean. *Field Crops Research.*, 115(3), 217-233.

LAMPURLANES J., CANTERO-MARTINEZ C. ; 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*. 95: 526-536.

LARSSON L., BATH A. ; 1996. Evaluation of soil temperature moderating and moisture conserving effects of various mulches during a growing season. *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci.*, 46, 153-160.

LAURENT F., BESNARD A., KERVEILLANT P., VERTES F. ; 2004. Azote et retournement de prairies : de nouvelles références pour la minéralisation de l'azote. *Perspectives agricoles.*, 306, 8-11.

LE TACON F. ; 1978. La présence de calcaire dans le sol. Influence sur le comportement de l'Epicéa commun (*Picea excelsa* Link.) et du Pin noir d'Autriche (*Pinus Nigra nigricans* Host.). *Annales des sciences forestières. INRA/EDP Sciences*, 35 (2), 165-174.

LEMAIRE G., SALETTE J., SIGOGNE M., TERRASSONJ.P. ; 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. II. - Etude de la variabilité entre génotypes. *Agronomie, EDP Sciences*, 4 (5), pp.431-436.

LEON F., 2014. Cultures intermédiaires en interculture longue. *Agronomie grandes cultures en pays de la Loire. Chambre régionale d'agriculture des Pays de la Loire.*

LEONARD J., RAJOT J.L. ; 1998. Effets induits du paillage post-culturel d'un sol sableux encroûté au Sahel Conséquences sur l'amélioration de son fonctionnement hydrique. *Agriculture et développement.*, 18, 39-45.

LOCHER J., OMBODI A., KASSAI T., DIMENY J. ; 2005. Influence of Coloured Mulches on Soil Temperature and Yield of Sweet Pepper. *Europ.J.Hort.Sci.*, 70(3), 135–141,

MAZOLLIER C., VEDIE H. ; 2008. Les engrais verts en maraîchage biologique. Fiche technique maraîchage. *TECHN'ITTAB*. 1-4.

MEDRANO, H., TOMAS, M., MARTORELL, S., ESCALONA, J.-M., POU, A., FUENTES, S., FLEXAS, J., BOTA, J. ; 2015. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (2), pp. 499-517.

MONTANARELLA A L. Europa. La Commission Européenne. Agriculture et Environnement. Le sol à l'interface de l'agriculture et de l'environnement. **[en ligne]**. Disponible sur http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/fr/inter_fr/report.htm. Consulté le 09.04.2016.

MUELLER T., JENSEN L.S., NIELSEN N.E., MAGID J. ; 1998. Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field. *Soil Biology and Biochemistry.*, 30(5),561-571.

MURPHY B.W. ; 2015. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research.*, 53, 605–635.

NICOLA S. and BASOCCU L. ; 2000. Timing of nitrogen application influences tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) seedling nitrogen content, growth rates and biomass partitioning, and field fruit earliness. *Acta Hortic.* 533, 127-134

NIEDER R., BENBI D.K. ; 2008. Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Springer Netherlands. 1: 161-218.

NOVAK M.D., CHEN W., ORCHANSKY A.L., KETLER R. ; 2000. Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part II: Thermal and moisture regimes. *Agricultural and Forest Meteorology.*, 102(2-3), 155-171.

NORDMEYER H., RICHTER J. ; 1985. Incubation experiments on nitrogen mineralization in loess and sandy soils. *Plant Soil.* 83, 433–445.

N'GAYEDAMIYE A. La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteurs climatiques et régies agricoles influençant les taux de minéralisation de l'azote. Colloque sur l'azote. Drummondville, 28 mars 2007. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec.

PAILLER P., CHAUVOT N., BACCAÏNI B ; 2011. Les terres agricoles face à la pression de l'urbanisation : une résistance et des enjeux différenciés. *INSEE ETUDES. PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR.*, 5, 1-4.

PDR – Programme de Développement Rural. ; 2013. Fonds européen agricole pour le développement rural. Programmation 2014-2020. Programme de développement rural. VO du 28 Juin 2013. Région Provence Alpes Côte d'Azur. 1-50.

PEIGNE J., VEDIE H., DEMEUSY J., GERBER M., VIAN J.F., GAUTRONNEAU Y. , CANNAVACCUOLO M., AVELINE A., GITEAU L.L., BERRY D. ; 2009. Techniques sans labour en agriculture biologique. Innovations Agronomiques., 4, 23-32.

PELEGRIN F., MORENO F., MARTIN-ARANDA J., CAMPS M.; 1990. The influence of tillage methods on soilphysical properties and water balance for a typical crop rotation in SW Spain. Soil Till. Res. 16, 345-358.

PINATEL C. ; 2015. L'olivier. Histoire ancienne et contemporaine. Oliviers de Haute Provence. 1^{ère} édition. Turriers : NATURALIA PUBLICATIONS.

POCH-MASSEGU R., JIMENEZ-MARTINEZ J., WALLIS K.J., RAMIREZ DE CARTAGENA F., CANDELA L. ; 2014. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. Agricultural Water Management., 134, 1-13.

POUSSET J. ; 2011. Engrais verts et fertilité des sols. Principes agronomiques. Pratiques agricoles. 3^{ème} édition. Paris : GROUPE FRANCE AGRICOLE.

QIN W., HU C., OENEMA O., 2015. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis. Sci. Rep. 5, 16210.

QIN S.H., CAO L., ZHANG J.L., WANG D., WANG D. ; 2016. Soil nutrient availability and microbial properties of a potato field under ridge-furrow and plastic mulch. Arid Land Research and Management., 30(2), 181-192.

QUANG P.V., JANSSON R.E., KHOA L.V. ; 2012. Soil Penetration Resistance and Its Dependence on Soil Moisture and Age of the Raised-Beds in the Mekong Delta, Vietnam. Internationa Journal of Engineering Research and Development. 4(8), 84-93.

RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G. ; 2008. Volume 3 de Flore forestière française : Flore forestière française : Région Méditerranéenne. Paris : Institut Pour Le Développement Forestier – CNPPF.

RASMUSSEN K.J. ; 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. Soil Till. Res. 53, 3-14.

REGION PACA. Concertations régionales pour le programme « Ambition Bio 2017 ». Cadre de questionnement et de réponse. **[en ligne]**. Disponible sur http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/PACA_cle08a131_cle836c89.pdf. Consulté le 09.04.2016.

REY F., COULOMBEL A., MELLIAND M.L., JONIS M., LECLERC B., AGOUARC'H J., CONSEIL M. ; 2015. Guide technique « Produire des légumes biologiques ». Tome 2 : fiches techniques par légume. Paris : ITAB.

ROBERTSON G. P. et GROFFMAN P. M. ; 2015. Soil Microbiology Ecology and Biochemistry. Chapter 14 - Nitrogen Transformations. 4^{ème} édition. Burlington : ACADEMIC PRESS, ELSEVIER.

ROUSK J., BAATH E. ; 2007. Fungal and bacterial growth in soil with plant materials of different C/N ratios. Federation of European Microbiological Societies. 62, 258-267.

ROWE-DUTTON P. ; 1957. The mulching of vegetables. Tech. Commun. Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops., 24, 1–169.

RUSSELL J.C. 1939. The effect of surface cover on soil moisture losses by evaporation. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 4:65–70.

SCHVARTZ C., DECROUX J., MULLER J.C. ; 2005. Produire mieux. Guide de la fertilisation raisonnée. Paris : Editions France Agricole.

SOMMERFELDT T.G., CHANG C., ENTZ T. ; 1988. Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio. Soil Sci Soc Am J., 52, 1668–1672.

ST. LUCE M., WHALEN J.K., ZIADI N., ZEBARTH B.J. ; 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. Advances in Agronomy, 112, 55-102.

STEINMETZ Z., WOLLMANN C., SCHAEFER M., BUCHMANN C., DAVID J., TRÖGER J., MUÑOZ K., FRÖR O., SCHAUMANN G.E. ; 2016. Review - Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? Sc. Of the Tot. Env. ; (550) : 690-705.

SUBBARAO G. V., ITO O., SAHRAWAT K. L., BERRY W. L., NAKAHARA K., ISHIKAWA T., WATANABE T., SUENAGA K., RONDON M., and RAO I. M. ; 2006. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems. Challenges and opportunities. Crit. Rev. Plant Sci. 25, 303–335.

TEASDALE J.R., ABDUL-BAKI A.A., 1995. Soil Temperature and Tomato Growth Associated with Black Polyethylene and Hairy Vetch Mulches. J. Amer. Soc. Hort. Sci. ; 120(5):848-853.

THOMAS F., DORING T.F., BRANDT M., HEß J., FINCKH M.R., SAUCKE H. ; 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. Field Crops Research., 94, 238–249.

TISDALE S.L., NELSON W.L., BEATON J.D. ; 1985. Soil fertility and fertilizers. 4^{ème} édition. New York : Macmillan Publishing Company.

TORBERT H.A., WOOD C. ; 1992. Effects of soil compaction and water-filled pore space on soil microbial activity and N losses. Commun Soil Sci Plant Anal., 23, 1321–1331.

UNGER, P.W., JONES, O.R., 1998. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil Till. Res.* 45, 39-57.

VEDIE H., TAULET A., PENEL J.P. ; 2007. Optimisation du travail du sol en AB : Comparaison de deux itinéraires en maraîchage. Bilan de 3 années d'essai. GRAB. 1-12.

VEDIE H. ; 2010. Dossier spécial fertilisation azotée en maraîchage biologique de plein champ : résultats des essais du GRAB. Maraichage bio infos n°64.

VEDIE H., SASSI A., AÏSSA MADANI C., DELESTRA E., DUBOIS P.Y., METAIS P. ; 2011. Optimisation du travail du sol en AB : Comparaison de deux itinéraires en maraîchage. Bilan 2009-2011. MARAICHAGE 2011. fiche N°03.02.02.19., 1-18.

VEDIE H., BUFFARD J. ; 2013. Systèmes innovants de travail du sol réduit en maraîchage biologique : synthèse bibliographique. MARAICHAGE 2013. 1-5.

VIGIL M.F., KISSEL D.E. ; 1995. Rate of nitrogen mineralized from incorporated crop residues as influenced by temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1636–1644.

VIAN J.F., PEIGNE J., CHAUSSOD R., ROGER-ESTRADE J. ; 2009. Effets du mode de travail du sol sur les microorganismes à l'échelle du profil cultural. *Étude et Gestion des Sols.*, 16, 355-364.

VIDAL R. ; 2015. Comment nourrir les villes ? Les Grands Dossiers des Sciences Humaines 9., 40, 18-18.

VITOSH ML, DAVIS JF, KNEZEK BD ; 1973. Long-term effects of manure, fertilizer, and plow depth on chemical properties of soils and nutrient movement in a monoculture corn system. *J Environ Qual* 2:296–299

WATTS D.B., TORBERT HA, PRIOR SA (2007) Mineralization of N in soils amended with dairy manure as affected by wetting/drying cycles. *Commun Soil Sci Plant Anal* 38:2103–2116

WATTS D.B., TORBERT H.A. ; 2014. Nitrogen mineralization in soils amended with manure as affected by environmental conditions. *Applied Manure and Nutrient Chemistry for Sustainable Agriculture and Environment*. New Orleans et Stillwater : Zhongqi He et Hailin Zhang.

WHALEN J. K. et SAMPEDRO L. ; 2010. *Soil Ecology and Management*. CAB International, UK.

WHALEN J.K., KERNECKER M.L., THOMAS B.W., SACHDEVA V., NGOSONG C. ; 2013. Soil food web controls on nitrogen mineralization are influenced by agricultural practices in humid temperate climates. *CAB Reviews.*, 8, 1-18.

YORO G., GODO G. ; 1990. Les méthodes de mesure de la densité apparente. Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, Vol. XXV, no 4, 423-429.

Annexe 1 : Guides d'entretiens sur le retour d'expérience des maraîchers

Marion PEYRIC

Première partie : Observations de l'agriculteur et informations tirées de l'essai sans suivi

Avant tout, peux-tu me dire quelles sont les informations ou les observations, les plus importantes selon toi, que tu as obtenues en réalisant cet essai ? Qu'est-ce que tu as remarqué dans cet essai qui te paraît être le plus important ? (information et observations de toutes origines : articles scientifiques échangés, observations hors cadre du suivi, résultats issus de mesures/observations sur l'essai,...)

Est-ce que tu as réalisé des observations sur le sol (structure, persistance de la "semelle de herse rotative", humidité,...) ?

Entre les modalités suivantes, qu'as-tu observé durant la saison, si possible en distinguant dans tes observations :

Culture (: développement/croissance, floraison, fructification, production. Distinguer si possible.)

Sol (: structure, humidité,...)

Séparer également les observations pour chaque variété !

Entre plastique et paille :

Sur la zone amendée :

REF :

A quoi cela est-il dû d'après toi ?

REF :

Sur la zone non amendée

REF :

A quoi cela est-il dû d'après toi ?

REF :

Les écarts entre les deux paillages sont-ils les mêmes sur la zone amendée et la zone non amendée ? Observe-t-on les mêmes écarts entre paille et plastique sur la culture selon si l'on a apporté de l'amendement ou non ?

REF :

Pourquoi selon toi ?

REF :

Qu'est-ce que tu penses pouvoir en déduire sur l'évolution de l'azote dans le sol ? (éviter de relancer, si indispensable, rappeler les facteurs influençant la minéralisation : T°, H°, C/N, N_{org} dispo, pH)

REF :

Entre zone amendée et zone non amendée :

Sur le paillage plastique :

REF :

A quoi cela est-il dû d'après toi ?

REF :

Sur le paillage paille :

REF :

A quoi cela est-il dû d'après toi ?

REF :

Les écarts entre zone amendée et zone non amendée sont-ils les mêmes sur les deux paillages ? Observe-t-on les mêmes écarts entre zone amendée et zone non amendée selon si l'on a paillé avec de la paille ou du plastique ?

REF :

Pourquoi selon toi ? (éviter de relancer, si indispensable, rappeler les facteurs pouvant induire des dynamiques de minéralisation différente : T°, H°, C/N et faim d'azote, N_{org} dispo, pH).

REF :

Entre plastique non amendé et paille avec amendement

A quoi cela est-il dû d'après toi ?

REF :

Rappel des questions initiales :

Effet des paillages

L'effet supérieur du paillage plastique par rapport à la paille sur le réchauffement du sol, la précocité de la culture ainsi que la sécurisation de la production est-il prouvé ?

D'après ce que tu as réalisé comme mesures et observé, peux-tu répondre à cette question ?

Est-ce que ce sont des choses que tu as également observé en dehors de l'essai (toujours sur tomates et excepté le réchauffement du sol) ?

Important ici : la question de sécuriser la production provient d'accidents de sécheresse passés (2015). Cette année les conditions sont les mêmes (sécheresse niveau 2 ?) → moyen réel de vérifier l'intérêt du plastique face à la sécheresse. Comparaison avec les rendements obtenus les années sans sécheresse,...

Tu me disais prévoir environ 2,5L/plante/jour (1h de goutte-à-goutte/jour en début de cycle puis tous les 2-3 jours ensuite), combien as-tu pu apporter finalement ?

La sécheresse de cette année est-elle plus ou moins importante que celle de l'année dernière (comparaison des niveaux (1, 2 et 3)) ? (**volume d'eau disponible**) Est-ce que tu as accès à plus de volume, moins de volume ou le même volume d'eau que l'année dernière ?

REF : *Donc tu as pu plus/moins/autant irriguer tes tomates que l'année dernière.*

Donc est-ce que sur les tomates conduites de la même manière que l'année dernière (avec plus/moins/autant d'eau ?), donc avec paille et fumier (?), et à ce stade de la saison, tu as constaté des dégâts (liés au stress hydrique) plus, moins ou aussi importants que l'année dernière dans l'essai ? (**effets relatifs sur la production de tomates**)

REF : *Donc cette année, tes tomates souffrent plus /moins/autant de stress hydriques que l'année dernière.*

Est-ce que ce sont des choses que tu as également observé en dehors de l'essai (toujours sur tomates) ?

Et donc est-ce que tu as l'impression que, comparées aux tomates de cette année sur paille et fumier de l'essai, les tomates sur paillage plastique souffrent plus/moins/autant du stress hydrique ? (**effet limitant du paillage plastique sur les stress hydriques ?**)

Donc, est-ce que tu as l'impression que, dans l'essai, le plastique te permet de sécuriser la production comparé à ta conduite habituelle ? Est-ce que, comparé à ta pratique habituelle, tu arrives à avoir une production satisfaisante sur plastique malgré la sécheresse ? (**sécurisation de la production par le paillage plastique en cas de sécheresse ?**)

Est-ce que ce sont des choses que tu as également observé en dehors de l'essai ?

Dans le cas où la sécheresse est plus sévère que celle de l'année dernière : Est-ce que tu as l'impression que le paillage plastique permet aux tomates de subir moins de stress hydrique et d'assurer une production satisfaisante comparé à ce que tu as observé l'année dernière ?

Effet précédent de la prairie et économie d'amendements

"Année d'installation : l'implantation de cultures sur d'anciennes prairies retournées (ET NON AMENDEES ???) a permis une « bonne » production. Cet effet est-il également observé sur cette parcelle ?" = Le rendement est-il satisfaisant lorsque seule la minéralisation de l'azote de la prairie détruite fournit de l'azote à la culture ? → D'accord avec cette reformulation ?

L'effet précédent prairie permanente est-il suffisant pour assurer la nutrition minérale d'une culture exigeante comme la tomate ? → D'accord avec cette reformulation/ajout ?

D'abord, qu'est-ce que tu considères comme une *production satisfaisante* (demander des exemples : 4kg/m² pour les variétés anciennes et 8kg/m² pour les hybrides sont les références de l'ITAB, quelles sont les siennes) ?

D'après ce que tu as observé, peux-tu répondre aux questions précédentes ? Est-ce que à ce stade de la saison, tu as l'impression d'obtenir une production satisfaisante lorsque tu n'apportes pas d'amendement ? (*laisser répondre si ne demande pas pour quel paillage*). Est-ce que tu en arrives aux mêmes conclusions sous paille et sous plastique et pourquoi à ton avis ?

Autre question initiale : L'absence de fertilisation de la culture de tomate suite à la destruction d'une prairie permanente entraine-t-elle une baisse de rendement et si oui laquelle ?

A moi d'y répondre avec les résultats (oui/non : x kg/m²), mais jusqu'ici, quand tu réalises les pesées, est-ce que sur zones sans amendement tu obtiens des valeurs faibles/identiques/élevées comparé à ce que tu attendais ?

Faire un rappel rapide des différences observées entre les modalités : qu'est-ce que tu penses pouvoir déduire de toutes ces observations sur la dynamique de l'azote dans les différentes modalités ?

Deuxième partie : Avantages inconvénients de la pratique

Description des aspects organisationnels et du coût de la pratique.

Validation de l'ITK :

- Destruction de la prairie à l'aide d'une herse rotative (quelle profondeur ?) :
8 avril
- 2 passages de griffon (profondeur ?) pour affiner et détruire les repousses :
23 avril - 7 mai
- Amendement à l'aide de fumier de bovin composté :
3,70kg/plant - QUELLE DATE ?
- Mise en place du paillage plastique (polyéthylène ??) :
11 mai
- Plantation des pieds de tomate :
17 mai
- Mise en place du paillage paille :
13 juin

Quels sont les volumes et fréquence d'irrigation – dose ?

As-tu mis du tourteau de ricin ? Quelle quantité ? A quelle date ?

As-tu apporté du purin d'orties (et pourquoi ?) ? A quelles dates/fréquence et à quelles quantités ?

As-tu désherbé certaines parties de l'essai ? Quand et quelles parties ?

As-tu taillé les plants (égourmandage ?) ? A quelles dates/fréquence et sur quelles modalités ?

Intervention	Temps de travail	Coût ou consommation (travail du sol)
Herse rotative		

Griffon (pour 1 passage)		
Amendement (fumier de bovin composté)		
(Tourteau de ricin)		
Paillage plastique		
Paillage paille		
Plantation		
Semences F1		
Purin d'orties		
(Désherbage/chaque modalité)		
(Taille des plants)		
Surface de la parcelle entière =		

Intérêt de détailler la destruction de la prairie : permet de comparer le temps et coût supplémentaires qu'induit l'apport de fumier, s'il constitue un investissement négligeable par rapport à la destruction de la prairie.

Quelle est la facilité d'accès à la paille, au plastique et au fumier ? Est-ce difficile à trouver pour toi ?

((Quel paillage considères-tu le plus pratique à employer ?)) / Même en considérant la gestion de la date d'application de la paille en fonction de la température du sol ?

Parmi toutes les étapes de l'ITK citées précédemment, est-ce que l'une d'elles (ou plusieurs) est entrée en compétition avec d'autres interventions? Si oui lesquelles et comment as-tu choisi (pourquoi avoir donné la priorité à une intervention plutôt qu'à une autre) ?

Quels critères te paraissent les plus importants a posteriori pour choisir de la mise en place de cette pratique (hors bénéfices agronomiques et en tenant compte de la méthode de destruction) ?

Quelles informations sur la pratique (observations des effets sur la culture, mise en œuvre) l'essai t'a-t-il apporté pour savoir si tu la mettrais en place ou non ?

Informations complémentaires si non abordées :

Au premier entretien tu m'as dit 2 choses : cette parcelle est en prairie permanente depuis 2012 (semis de sainfoin en 2010-2011 et décompactage en 2012, plus rien depuis) et que c'est une parcelle d'herbe depuis une 40aine d'années. Est-ce que c'est une parcelle conduite comme une prairie permanente avec des interventions régulières (travail du sol, semis,...) depuis 40 ans et ce qui est décrit depuis 2010-2011 correspond à la dernière intervention ? + Excepté le sainfoin, quelles espèces étaient semées dans cette prairie avant le sainfoin ? **Y avait-il des légumineuses (lesquelles) ?** Ou bien que des graminées ? Si c'était un mélange que contenait-il et en quelles proportions ?

Début tardif et fin précoce de la saison estivale = exemples ? Par rapport aux maraîchers du Sud Luberon ?

Année de certification bio ?

Temps d'expérience dans le maraichage = 15 ans ?

Solange FOLLET

Première partie : Observations de l'agricultrice et informations tirées de l'essai sans suivi

Est-ce que tu as remarqué des différences de développement/rendement des tomates (essai et hors essai) entre la zone d'engrais vert et celle où il y avait le mouron sur le paillage plastique ? Si oui, comment l'expliques-tu ?

Sur les Ananas, côté mouron, quelles différences as-tu observé sur les plantes sur paille et celles sur plastique (état des plantes, dynamique de développement, vigueur, sévérité des maladies/attaques) ? Comment les expliques-tu ?

Même question pour les Noires de Crimée : côté engrais vert, quelles différences as-tu observé entre paille et plastique au cours de la saison ? Comment les expliques-tu ?

Et d'une manière générale, entre paille et plastique (reformulation de l'effet global des paillages d'après les différences observées pour chacune des deux variétés) :

Dans le cas où la paille semble entrainer un développement moins rapide que le plastique, un effet de bordure ne pourrait-il pas en être la cause ?

As-tu remarqué des différences entre l'état ou le développement des noires de Crimée sur paille+EV et celles sur paille+Mouron (C-D et E-F) ? Si oui, comment les expliquerais-tu (T° , H° , NO_3^- , P, K,...) ? Et quelles différences as-tu vu entre les Noires de Crimée sur paille+Mouron et celles sur plastique+EV ? Comment l'expliquerais-tu ?

As-tu réalisé des observations de sol (peut être seulement l'humidité sous paille pour savoir quand arroser) ? Si oui, as-tu observé des différences ? Lesquelles ? Et pourquoi selon toi ?

Rappel des questions initiales : → **Quelles réponses peux-tu y apporter avec ce que tu as observé ?**

Quel est l'effet du paillage plastique noir et du paillage paille de céréale sur la température du sol et sur la précocité de la culture de tomate ? Peux-tu décliner ta réponse pour la rapidité de développement des plantes et pour la précocité de la production (première récolte et évolution des quantités récoltées) ?

L'apport de matière végétale fraîche et peu lignifiée sous paillage paille permet-il de réduire le risque de faim d'azote induit par ce dernier ? Et quelle est la matière la plus efficace pour cela : Adventices ou Engrais Vert ?

As-tu observé une faim d'azote sur les tomates paillées de l'essai ? Et si oui, sur quel côté (Mouron vs. EV) ?

*Non = Efficacité de la pratique (EV **ET** mouron) d'un apport de biomasse sous la paille pour limiter la faim d'azote.*

Oui = L'amendement X est le plus efficace pour limiter la faim d'azote.

Deuxième partie : Avantages inconvénients de la pratique

Validation de l'ITK

Destruction mâche :

- Outil (action et profondeur) :
- Date :

Destruction chou chinois :

- Outil (action et profondeur) :
- Date :

Semis de l'engrais vert :

En novembre : cultivateur (profondeur ?) – semis (outil ?) – cultivateur (profondeur ?) – rouleau

- Temps de travail pour la totalité ou séparément :
- Irrigation en post levée ? Plusieurs ? Sur toute la serre ou seulement moitié nord ?

Destruction de l'engrais vert :

En février : Cultivateur (quelle profondeur ? nombre de passages ?)

Uniquement sur la moitié nord de la serre ?

- Temps de travail :

Arrachage de la flore naturelle :

Début mars : Arrachage manuel – sorti de la serre

- Temps de travail :

Mise en place des planches :

- Date :
- Outil (noté cultivateur...) :
- Temps de travail :

Fertilisation positionnée sur les planches :

- Date :
- 1T/ha de 4-5-10 + 1T/ha de 5-2-1
⇒ Ovinalp ? Bouchons ?

- Temps de travail :
- Coût :

Mise en place du système de goutte à goutte

- Date :

Repositionnement de la biomasse de mouron sur la planche sud-Est

Temps de travail :

Paillage au Polyéthylène (référence inconnue ?) :

- Date :
- Temps de travail :
- Coût (donné) :

Paillage planche Est (orge), 80kg pour la totalité de la planche

- Date :
- Temps de travail :
- Coût (autoproduit) :

Plantation des tomates : 25 mars ?

- Temps de travail :

Irrigation :

- Quels jours de la semaine :
- Combien de temps et débit des goutteurs :

Taille – égourmandage :

- Quelle fréquence ? :

Désherbage :

- Combien et quelles dates/périodes :
- Y a-t-il eu plus de désherbages effectués sur une partie de l'essai plutôt qu'un autre ?

Autres interventions ? ➔

Mise en place des ruches de bourdons

Traitements *Bt*

Installation des auxiliaires (Koppert)

(Installation de pièges colorés ?)

Est-ce que parmi les étapes suivantes :

- Semis de l'engrais vert (y compris préparation du sol)
- Destruction de l'engrais vert
- Arrachage Mouron + déplacement +repositionnement sur la planche

→ L'un d'elles est-elle entrée en compétition avec une ou plusieurs interventions à réaliser sur l'exploitation ? Lesquelles et comment s'est fait le choix ?

Tu disais que tu préfères employer de la paille de céréale car :

- Autoproduite (=0€)
- Disponible sur place
- Respecte davantage l'objectif de favoriser les échanges (interface perméable) entre les différents compartiments de la parcelle
- Investissement sur le long terme (maintien de la teneur en MO du sol)
- D'autres avantages ?

Quels sont pour toi les avantages et inconvénients du paillage plastique ?

Quelle est pour toi la pratique la plus commode à mettre en place entre engrais vert et utilisation de la flore naturelle ? (certainement adventices : pas de passages d'outils et levée assurée. Mais pas de choix de l'espèce, ne peut assurer la composition de la flore qui se développe et peut devenir difficile à contrôler ?)

Entre paillage et type d'amendement, quelle est la pratique qui te satisfait le plus dans sa globalité (niveau agronomique, rendement et praticité) ?

Patrick Vidal – Essai Grelinette

Première partie : Observations de l'agriculteur et informations tirées de l'essai sans suivi

Différences sur le sol

Comment décrirais-tu la structure des sols des deux planches après le passage de grelinette (le 11 avril) ?

Qu'est-ce que tu as observé comme différence entre la structure du sol de tes deux planches lorsque tu as réalisé le semis des haricots (à quelle profondeur ? Le 11 mai) ?

Et lors du semis des pommes de terre (plus tard et plus profond) ? (à quelle profondeur et à quelle date ?)

Est-ce que tu as réalisé d'autres observations de sol en dehors de celles dont on vient de parler (test bêche par exemple, observations "à la main") ? Si oui, qu'as-tu observé ?

As-tu observé une différence d'enherbement entre des deux planches (au début, en cours de saison,...) ? → Densité / espèces différentes ?

(As-tu plus souvent désherbé une planche plutôt que l'autre ?)

As-tu observé une différence entre la rétention en eau des deux planches ? Y en a-t-il une des deux qui séchait plus vite que l'autre et si oui pourquoi ?

Différences sur la culture ?

Quelles différences observes-tu en ce moment sur les haricots ? Et comment les expliques-tu ?

As-tu observé une différence sur le développement de la culture ? Ont-ils évolué différemment au cours de la saison (~~croissance végétative et stades reproducteurs : intensité de la floraison, avortements, précocité de la floraison et quantités récoltées à la première récolte et aux suivantes~~) ? Si oui, comment l'expliques-tu ?

Est-ce que tu as observé une différence sur le développement des pommes de terre ?

La culture précédente sur ces deux planches était des fèves (?), quand les as-tu détruites ?

Tu disais avoir travaillé le sol à la grelinette là où il y avait du chiendent dans la parcelle, l'avais-tu passée sur l'une de ces deux planches, les deux ou aucune ? Si oui, te souviens-tu à quel endroit de la (des) planche(s) ? (insister, indispensable pour l'interprétation des résultats)

Rappel des questions initiales : → Quelles réponses peux-tu y apporter avec ce que tu as observé ?

Le travail du sol à la gelinette est-il efficace pour limiter les effets de la prise en masse de ce sol ?

Quelle incidence a-t-il sur les cultures ?

Donc tu as la réponse à ton hypothèse : meilleur développement et rendement de la culture après passage de grelinette ? (ajoutais "mais la prise en masse en fin de saison sera plus élevée" → quelles seraient les causes de ce phénomène ? Mesure de D_a finale pas encore réalisée.)

Autre hypothèse : la minéralisation de l'azote est rapide après le passage de grelinette, mais devrait ensuite être inférieure à celle observée sur le sol non travaillé, où ce phénomène sera plus progressif. → Avec tes observations, as-tu une idée de la réponse à cette hypothèse ?

D'après toutes les observations dont on vient de parler, sais-tu si tu passeras la grelinette sur certaines (ou toutes ou aucunes) planches l'année prochaine et pourquoi ?

Deuxième partie : Avantages et inconvénients de la pratique

Validation de l'ITK :

- Semaine du **11 avril** :

Passage de grelinette :

- Temps de travail ?
- Coût à l'achat de la grelinette ?

(Si arrachage manuel des adventices en pré-semis : temps de travail ?)

Paillage de la planche **non** travaillée :

- Quelle paille ?*
- Coût et temps de travail ?*
- 15kg environ (3 bottes carrées à \simeq 5kg/botte) ?*

- Paillage de la planche travaillée :

- Semaine du **18 avril** ? (pas assez de paille disponible la semaine précédente)
- Mêmes questions *

- Semis des haricots :

- Dorés de Venise ?
- Le **11 mai** ?
- Coût de la semence et temps de travail ?

- Désherbage à **6/8 semaines après semis** :
 - Réalisé ?
 - Si oui combien de temps après semis ?
 - Temps de travail ?

- Mise en place des tuteurs :
 - Date ? (entre 8 et 22 juin)
 - Temps de travail ?

- Semis des pommes de terre (**pourquoi cette décision ?**) :
 - Date ?
 - Coût de la semence et temps de travail ?

- Irrigation :
 - Fréquence(s) et quantité(s) ?

- Autres interventions ?

Est-ce que le passage de grelinette (non) ou les désherbages supplémentaires (planche non travaillée) sont entrés en compétitions avec d'autres interventions ? Si oui, comment as-tu choisi ?

Patrick Vidal – Essai Engrais Vert

Première partie : Observations de l'agriculteur et informations tirées de l'essai sans suivi

Qu'est-ce que tu as observé comme différences entre les modalités durant la saison ?

Culture (: développement/croissance, floraison, fructification. Distinguer si possible.)

Sol (: structure (facilité de travail), humidité,...)

Comment expliques-tu ces différences ?

Qu'est-ce que tu penses pouvoir déduire sur les paramètres suivis (azote et résistance mécanique) d'après ces observations ? (sans les mesures effectuées, quelles conclusions aurais-tu tiré sur les paramètres qui te paraissent importants ?)

Rappel des questions initiales :

Est-ce que l'engrais vert permet d'améliorer la structure du sol (difficile à travailler) davantage que la paille seule ? (*pas encore observé, profil à réaliser*)

...*Relance* : Le travail du sol (à la plantation seulement : piochon pour courgettes et plantoir à bulbes pour aubergines) a-t-il paru plus facile (sol moins collant, mieux ressuyé, moins dense,...) sur les planches ayant comporté l'engrais vert ?

As-tu observé une différence entre les sols de l'engrais vert occulté par la bâche et celui occulté par la paille (plantations réalisées à dates différentes) ?

Tu faisais l'hypothèse d'un meilleur développement et éventuellement d'un meilleur rendement après engrais vert, l'as-tu vérifiée ?

A quoi est-ce lié d'après toi ?

Si non abordés, parler de la mauvaise maîtrise de l'irrigation (placement des asperseur et orientation des vents dominants) et l'irrégularité propre à la parcelle déjà évoqués → à discuter :

- Maîtrise de l'irrigation : est-ce que tu as des planches sur lesquelles les asperseurs sont placés au même endroit que sur la planche témoin et qui présentent les mêmes symptômes (faible développement de la culture et/ou faibles rendements comparé à ce qu'il observe d'habitude) (si pas de comparaison possible entre deux planches de la même culture, juge-t-il que ces planches-là sont moins productives ?) ? Est-ce que c'est quelque chose que tu avais déjà observé l'an dernier ? Sur l'autre parcelle ?
- Maîtrise de l'irrigation : as-tu déjà regardé si ton sol était plus sec sur témoin (ou planches similaires) après avoir irrigué ou le déduis-tu uniquement de l'état des plantes ?

- Y avait-il eu une différence entre les deux planches de courgettes et d'aubergines l'année dernière ? Si non, les asperseurs étaient-ils placés aux mêmes endroits ? Est-ce que quelque chose a changé dans l'irrigation cette année (plus de problèmes rencontrés (fuites, manque de pression,..), changement de certains éléments du réseau) ? La quantité de paille était-elle la même sur chaque paire de planches ? Si oui, comment l'avais-tu expliqué ?
- Est-ce que tu as pensé à d'autres causes ? (Pourquoi ?)

(D'après ce que tu as observé sur la structure du sol (partir de faits, pas de supposition : pas d'observation → pas de question), est-ce que tu penses que cela a eu une influence sur ce que tu as observé sur la culture ? Par quel(s) mécanisme(s) ? Qu'est-ce qui te fait dire ça ?)

Question hors cadre du projet : l'objectif de l'engrais vert était également de réduire la pression de limaces : as-tu eu moins de dégâts sur les planches d'engrais vert ?

En plus des problèmes de maîtrise de l'aspersion, tu pensais peut être passer au goutte à goutte si la pression de limaces était trop élevée. A la place tu as employé de l'anti-limace (métaldéhyde ? Ferramol ?) : pourquoi ?

Tu voulais suivre la dynamique de l'azote, d'après ce que tu as observé sur les cultures, quelle allure penses-tu qu'elle ait ?

Et en tenant compte de la présence de l'engrais vert peu avant la plantation (destruction 20 avril, courgettes plantées première semaine de mai, aubergines le 19 mai) ?

Deuxième partie : Avantages inconvénients de la pratique

Description des aspects organisationnels et du coût de la pratique.

Implantation de l'engrais vert

Coût de la semence ? (coût de la totalité de la semence achetée et volume relatif (poids si possible) utilisé sur la quantité totale)

→

Temps nécessaire pour le semis d'une planche ?

- Préparation du sol : déplacement de la paille + passage d'outil à dents (lequel ?)

→

- Semis à la volée

→

- Remise en place de la paille et apport de paille broyée (pourquoi ?)

→

Autres opérations réalisées sur le couvert (re-semis, irrigation,...) ? Confirmer. Si oui, coût et temps de travail des opérations :

→

Destruction de l'engrais vert

Quel outil ? Quelle technique (ex : tient les tiges avec la main, coupe à ras du sol et laisse sur place ?)

Temps nécessaire pour la fauche d'une planche ?

Temps nécessaire pour la pose (+lestage) de la bâche ?

Origine et coût de la bâche ? (référence si possible !)

Temps nécessaire pour l'application, origine (disponibilité), coût et quantité de foin utilisée pour pailler la planche après avoir retiré la bâche ?

Temps nécessaire pour la pose de la paille de luzerne ?

Tu avais l'air de dire que c'est fastidieux, pourquoi ?

Origine et coût de la paille de luzerne ? Facilité d'approvisionnement ?

Y a-t-il eu des repousses d'épeautre ?

Si oui, y en a-t-il eu plus sur un mode de destruction qu'un autre ?

Temps de destruction des repousses :

EV Aub :

EV Courg :

Est-ce qu'un mode de destruction te paraît préférable à un autre (temps de travail, coût et disponibilité des intrants, efficacité et éthique) ?

Lequel conserveras-tu si tu devais le refaire ? Pourquoi ?

Temps de désherbage de chaque planche ? (sous-entendu : est-ce que tu as passé plus ou moins de temps à désherber sur certaines planches ?)

T₀ Aub :

EV Aub :

T₀ Courg :

EV Courg :

Voilà les différentes interventions que nécessite la mise en place de la pratique

Communes aux deux planches d'engrais vert :

Semis de l'engrais vert

Fauche de l'engrais vert

Dans le cas de l'occultation avec une bâche :

Pose (+lestage) de la bâche

Paillage de la planche après avoir retiré la bâche

Dans le cas de l'occultation avec de la paille de luzerne :

Pose de la paille de luzerne

Communes aux deux planches d'engrais vert :

Destruction des repousses d'engrais vert

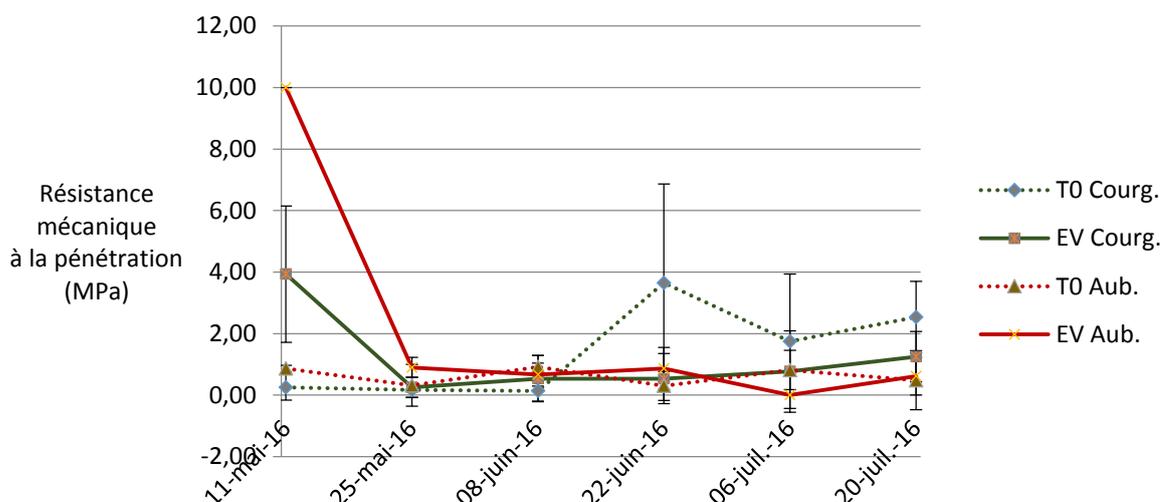
Dans le cas où la pratique a induit une pression d'adventice supérieure à celle des témoins : temps de désherbage

→ Est-ce que l'une de ces étapes (ou plusieurs) est entrée en compétition avec d'autres interventions? Si oui lesquelles et comment as-tu choisi (pourquoi avoir donné la priorité à une intervention plutôt qu'à une autre) ?

Quels critères te paraissent les plus importants a posteriori pour choisir de la mise en place de cette pratique (hors bénéfices agronomiques et en tenant compte de la méthode de destruction) ? =

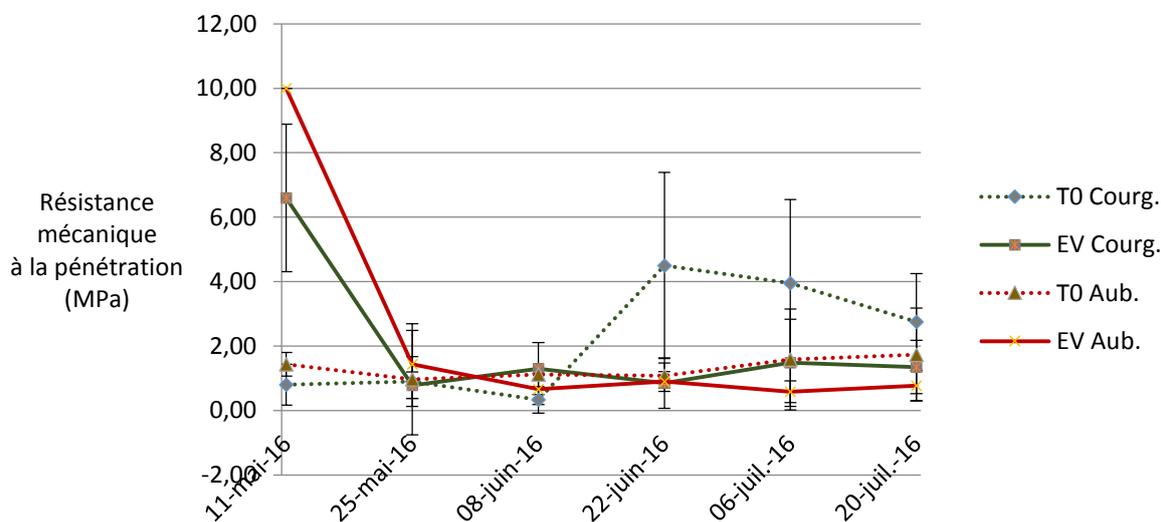
Quelles informations sur la pratique (résultats, mise en œuvre) l'essai t'a-t-il apporté pour savoir si tu la mettrais en place ou non ?

Annexe 2 : Evolution de la résistance mécanique à la pénétration du sol en cours de saison



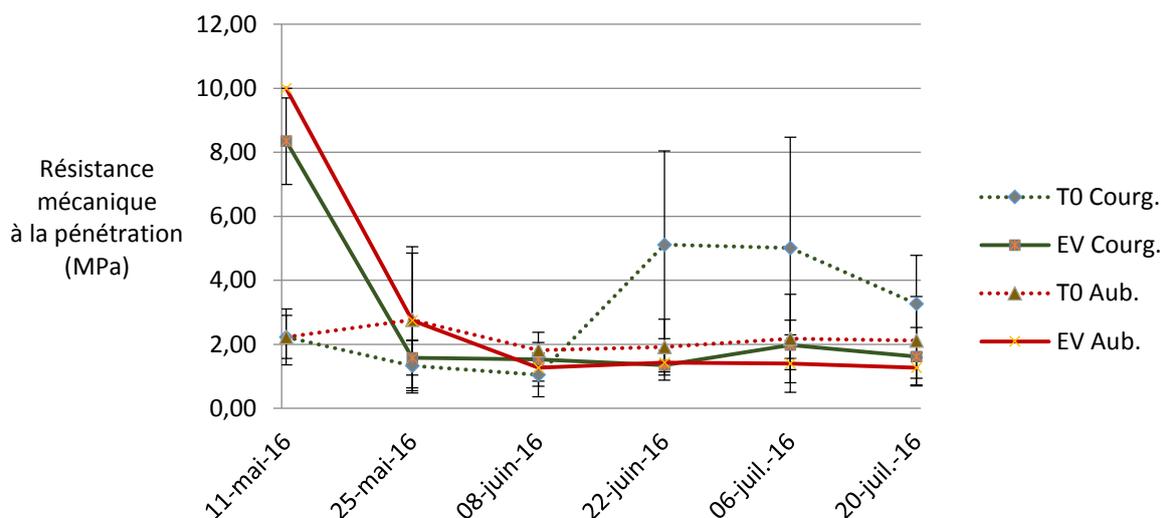
EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 0-10cm DE SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.

Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.



EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 10-20cm DE SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.

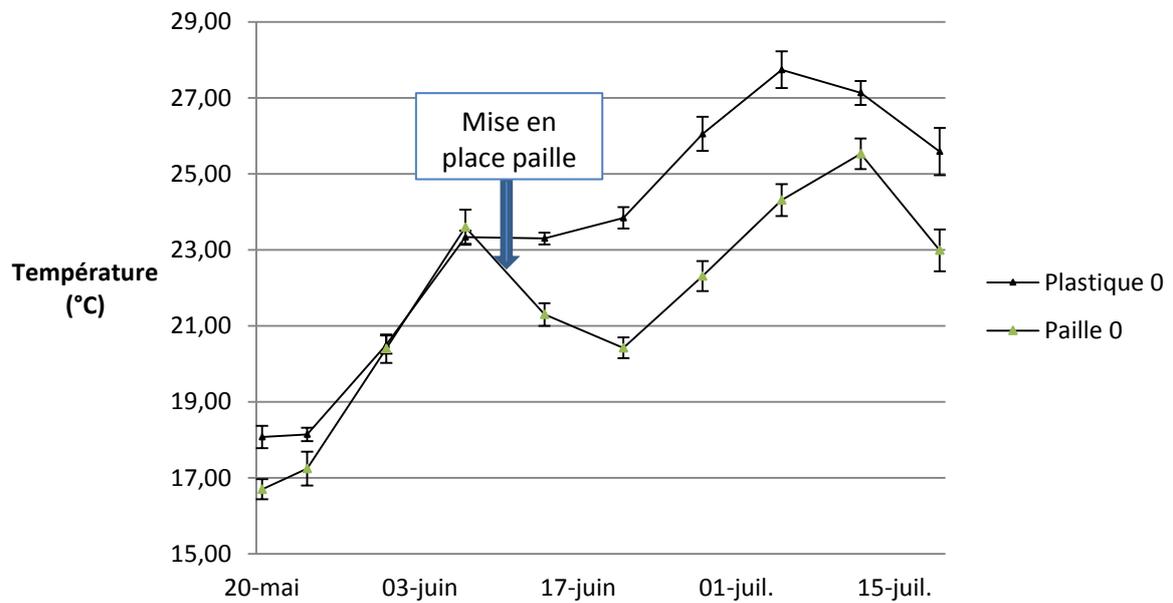
Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.



EVOLUTION DE LA RESISTANCE MECANIQUE MOYENNE A LA PENETRATION DE L'HORIZON 20-30cm DE SOL AVEC OU SANS PRECEDENT ENGRAIS VERT.

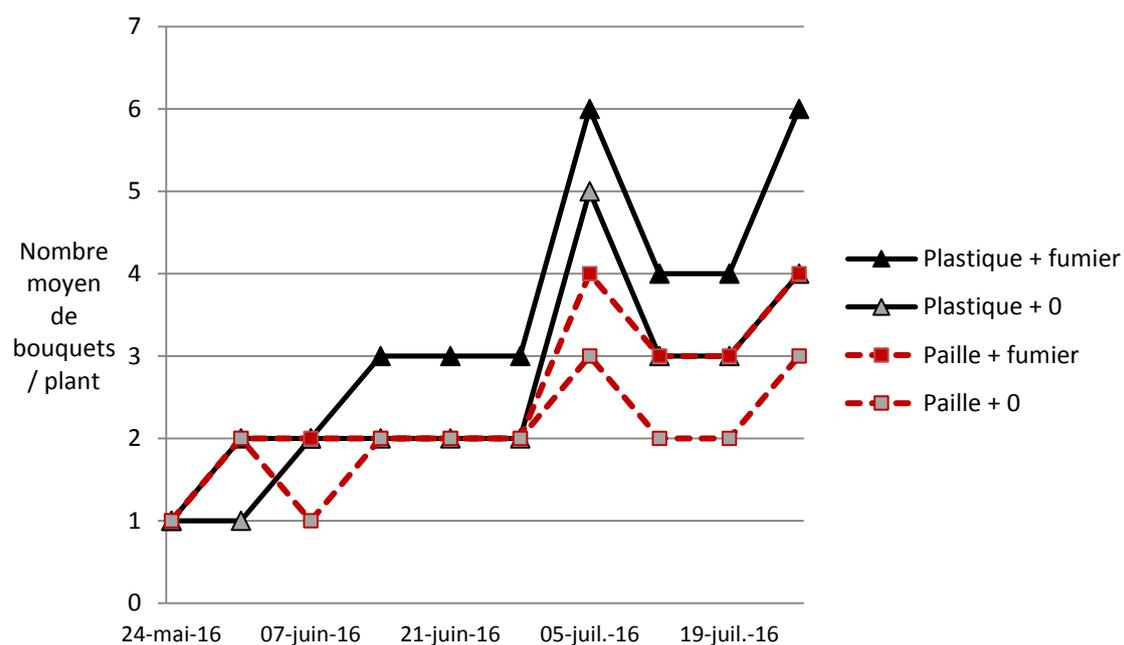
Les traitements correspondent à l'engrais vert détruit à l'aide d'une bâche plastique noire pour la culture d'aubergine (EV Aub.) et à l'aide d'environ 4kg de matière fraîche/m² (paille de luzerne) pour la culture d'aubergine (EV Courg.). Le témoin pour la culture d'aubergines (T0 Aub.) ne diffère que par l'absence d'un précédent engrais vert. En revanche celui pour la culture de courgettes (T0 Courg.) ne reçoit aucun apport de paillage sur toute la durée de l'essai.

ANNEXE 3 : Suivi de la température du sol chez Marion PEYRIC.



EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR ET DE LA TEMPERATURE DU SOL A 10cm DE PROFONDEUR DU SOL AMENDE SOUS PAILLAGE PLASTIQUE NOIR OU PAILLE (MARION PEYRIC).

ANNEXE 4 : Evolution du nombre de bouquets floraux de la variété « Raisin Vert » chez Marion PEYRIC



EVOLUTION DU NOMBRE DE BOUQUETS FLORAUX SELON LE TYPE DE PAILLAGE ET D'AMENDEMENT (MARION PEYRIC). VARIETE « RAISIN VERT ».

Les traitements correspondent au paillage plastique noir avec fumier (Plastique + fumier) ou sans (Plastique + 0) et au paillage de paille de blé avec fumier (Paille + fumier) ou sans (Paille +0).