



UNIVERSITÉ DES ANTILLES

- École doctorale pluridisciplinaire -

UMR 7205, ISYEB - équipe Biologie de la Mangrove

THÈSE

présentée par **Coraline MOULIN**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université des Antilles**

Thèse soutenue le 18 Décembre 2020 à l'Université des Antilles

Alternatives agroécologiques basées sur la restauration de la biodiversité édaphique dans les systèmes de culture maraîchers tropicaux

THÈSE dirigée par :

Mme LORANGER-MERCIRIS Gladys, Maître de conférences HDR, Université des Antilles, UMR ISYEB
M. VAILLANT Victor, Ingénieur HDR, INRAE, UR ASTRO

RAPPORTEURS :

Mme ANDRIEUX Nadine, Chercheuse HDR, CIRAD, UMR Innovation
M. BLANCHART Eric, Directeur de Recherche, IRD, UMR Eco&Sols

JURY :

Mme ANDRIEUX Nadine, Chercheuse HDR au CIRAD, Guadeloupe
Mme ANGEON Valérie, Directrice de Recherche à l'INRAE PACA - Avignon
M. BATES Samuel, Professeur à l'Université d'Angers
M. BLANCHART Eric, Directeur de Recherche à l'IRD Montpellier
Mme LORANGER-MERCIRIS Gladys, Maître de conférences HDR à l'Université des Antilles
M. VAILLANT Victor, Ingénieur HDR à l'INRAE Antilles Guyane



Je dédie cette thèse à ma mère, une femme exceptionnelle

Remerciements

L'exercice des remerciements est toujours périlleux tant il est difficile d'être totalement exhaustif et de n'oublier personne. Je commence donc par saluer tous ceux que je n'ai pas nominativement cités dans le texte qui suit et qui ont contribué de près ou de loin à ce travail de thèse.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à ma directrice de thèse, Gladys Loranger-Merciris, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui m'ont guidée dans mon travail et m'ont aidée à trouver des solutions pour avancer. Merci infiniment pour ta confiance, ton accompagnement, et tes encouragements. Je remercie mon co-directeur, Victor Vaillant, pour ses conseils avisés et sa bonne humeur (lors de nos prélèvements sur le terrain). Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes directeurs de thèse pour leur disponibilité, leur rigueur scientifique qui a enrichi mon travail de recherche. Leurs critiques et conseils m'ont énormément aidée à finaliser la rédaction du manuscrit. Ils ont su avoir les mots pour me motiver et me permettre de me surpasser.

Je tiens à remercier mes deux rapporteurs Nadine Andrieu et Éric Blanchart qui ont accepté de juger mon travail de thèse et de faire partie de mon jury, mais aussi les deux autres membres de mon jury : Valérie Angeon et Samuel Bates qui m'ont accordé leur temps et leur expertise.

Je souhaite particulièrement remercier Jean-Louis Diman et Ludovic Pruneau pour leur précieuse aide à la relecture et à la correction de ma thèse.

Je tiens à saisir cette occasion et adresser mes profonds remerciements et ma profonde reconnaissance au personnel de l'INRAE, en particulier l'unité de recherche ASTRO pour leur aide dans la réalisation de cette thèse. Fred Burner m'a beaucoup aidée à mener les enquêtes sur le terrain (nous avons découvert des endroits insoupçonnés), pour les prélèvements et la mise en place de la parcelle. Merci à Christophe Latchman, pour ses précieux conseils, ses encouragements, sa bonne humeur lors de nos démarches (devis, matériels,... dans la jungle de Jarry) et lors des travaux sur la parcelle expérimentale. Je rends hommage à Philippe Julianus, Chantal Fléreau (merci pour tes magnifiques cantiques et tes bons petits plats), David Hammouya, Fabrice Mause, Pascale Bade, Jean-Luc Irep et José Lator pour leurs aides techniques et pour leur gentillesse. Un grand merci à Jean-Luc Daupin pour son aide très précieuse sur la parcelle expérimentale et sa bonne humeur en continu malgré le soleil de plomb de Petit-Canal. La présence de Jean-Louis Diman qui a su répondre présent à chaque

fois à mes sollicitations, ses encouragements et son excellent jus de canne (qui était toujours le bienvenu après nos longues heures passées sur la parcelle) ont rendu mon travail de meilleure qualité. Que Valérie Angeon et Eduardo Chia soient remerciés pour leur aide dans l'élaboration de l'atelier participatif.

Ma reconnaissance va à Lucienne Desfontaines qui nous a permis d'utiliser son laboratoire pour broyer le sol, mais aussi Jocelyne Leinster pour son aide dans les mesures de pH, le duo Jean-Baptiste Nanette et Thierry Bajazet pour la station météo, Nadine Jovial, Maryse Cyrille, Patricia Traffond, Dalila Petro, Pierre Mulciba (pour ses conseils en matière de compost),...

Je salue aussi les stagiaires qui ont participé aux prélèvements, particulièrement Laurence Gisors et Audrey Nankou pour leur rigueur, leur créativité, leur bonne humeur et pour les délicieuses gourmandises.

Mes remerciements s'adressent à la Fondation de France, la Région Guadeloupe, NB Finances et ARECA qui ont financé cette thèse me permettant ainsi de me consacrer entièrement à ce travail de recherche.

Mes pensées vont aussi à ma famille qui m'a toujours épaulée dans mes projets, ce qui m'a permis d'accomplir ce travail de thèse.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je termine en ayant une douce pensée pour mon compagnon, pour son soutien inconditionnel, sa patience et son réconfort.

Résumé

Le sol est l'un des habitats les plus riches de la biosphère. Il est le support de la production primaire et fournit de nombreux services écosystémiques. L'agriculture est une activité vitale pour les sociétés humaines car c'est une source irremplaçable pour leur alimentation. Cependant, les pratiques artificialisantes de l'agriculture conventionnelle ont conduit à des impacts négatifs sur les sols causant un fort déclin de leur biodiversité. Ces perturbations du milieu ont pour conséquence de dégrader certains des services écosystémiques fournis par les sols. Suite à ce constat, de nouvelles pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement ont été développées pour préserver les sols. Ces pratiques innovantes dites agroécologiques s'appuient principalement sur la réduction du travail du sol, l'installation d'un couvert permanent ou temporaire ou encore la diversification végétale au sein des parcelles. C'est dans ce contexte de mutation des pratiques agricoles que s'inscrit ce sujet de thèse qui vise à mieux comprendre les effets de l'adoption des pratiques de gestion agroécologiques dans les systèmes maraîchers de Guadeloupe sur i) la composition et la diversité des communautés d'organismes édaphiques, ii) les propriétés du sol et iii) la fourniture de services écosystémiques (production de nourriture, recyclage des nutriments, structuration des sols, régulation des bioagresseurs). Dans le premier chapitre de résultats, nos objectifs étaient i) d'effectuer un bilan de la diversité des pratiques de gestion des agriculteurs sur la totalité du territoire guadeloupéen et ii) de mettre en évidence l'impact de ces pratiques paysannes sur le sol. Nos résultats ont montré que les pratiques agroécologiques mises en œuvre par les maraîchers guadeloupéens ne permettent pas de préserver les propriétés physico-chimiques et la biodiversité des sols. Face à ce constat, une réflexion a été menée sur les pratiques agroécologiques à mettre en place dans les systèmes de culture maraîchers de Guadeloupe dans la suite de ce travail. Dans le second chapitre de résultats, nos objectifs étaient i) d'identifier un ensemble de pratiques agroécologiques innovantes à mettre en œuvre dans un système de culture maraîcher, ii) de tester en station expérimentale ces systèmes innovants et iii) d'estimer leurs performances via une évaluation multicritère. Deux systèmes innovants ont été co-conçus avec les maraîchers à la suite d'ateliers participatifs. L'évaluation de ces systèmes a montré qu'ils étaient durables sur le plan environnemental. Dans le troisième chapitre de résultats, l'objectif principal était l'analyse de l'impact des deux systèmes innovants co-conçus sur la biodiversité et les fonctionnalités du sol ainsi que sur les services écosystémiques. Nos résultats montrent que l'activité biologique du sol des deux systèmes agroécologiques a pu être stimulée par les différentes pratiques innovantes mises en place :

labour peu profond, augmentation de la diversité végétale, apports réguliers de vermicompost, présence de paillage végétal. En termes de services écosystémiques, la production de nourriture dans ces systèmes innovants est similaire à la production observée dans les systèmes conventionnels. La régulation naturelle des bioagresseurs est possible et la structuration des sols est améliorée dans les systèmes agroécologiques.

Les résultats majeurs de ce travail de thèse montrent le rôle déterminant des communautés édaphiques dans les activités liées au fonctionnement des agroécosystèmes. Ces conclusions ont une importance tout à fait particulière dans un contexte de mutation de l'agriculture et la proposition de nouvelles pratiques susceptibles de modifier le fonctionnement biologique des sols. La mise en place de systèmes de culture basés sur la restauration de la biodiversité des sols permettra ainsi de contribuer à la transition écologique de l'agriculture du territoire guadeloupéen.

Mots-clés : diagnostic agroécologique, écologie fonctionnelle, évaluation multicritère, macrofaune, plantes de services, production de nourriture, régulation bioagresseurs, structure du sol

Abstract

Soil is one of the more diverse habitats of the biosphere. It supports primary production and provides many ecosystem services. Agriculture is a vital activity for human societies because it is an irreplaceable source of food. However, conventional agriculture practices have led to negative impacts on soils causing a sharp decline in their biodiversity. As a result, these environmental disturbances have degraded some of the ecosystem services provided by soils. Following these observations, new agricultural and environmentally friendly practices have been developed to preserve soils. These innovative so-called agroecological practices are mainly rely on reducing tillage, installing permanent or temporary covers or plant diversification within plots. The topic of this thesis mirrors this context of changing agricultural practices, and aims to better understand the effects of the adoption of agroecological management practices in the market gardening systems of Guadeloupe on i) the composition and diversity of communities of edaphic organisms, ii) soil properties and iii) provision of ecosystem services (food production, nutrient recycling, soil structure, pest control). In the first chapter of results, our objectives were i) to take stock of the diversity of farmer management practices throughout Guadeloupe and ii) to highlight the impact of these peasant practices on the soil. Our results showed that agroecological practices implemented by Guadeloupean market gardeners hamper the preservation of soil physicochemical properties and soil biodiversity. Considering this, we pondered the launch of agroecological practices in Guadeloupe's market gardening systems, to further this work. In the second result chapter, our objectives were to i) identify a set of innovative agroecological practices in view of setting up a market gardening system, ii) to test these innovative systems in an experimental station and iii) to evaluate their performance through a multi-criteria assessment. Two innovative systems were co-designed with market gardeners following participatory workshops. The review of these systems showed that they were environmentally sustainable. In the third result chapter, the main objective was to analyze the impact of the two innovative co-designed systems on biodiversity and soil functions as well as on ecosystem services. Our results show that soil biological activity of the two agroecological systems could be stimulated by the various innovative practices put in place: shallow plowing, increased plant diversity, regular inputs of vermicompost, presence of organic mulch. In terms of ecosystem services, the production of food in these innovative systems is similar to the production observed in conventional systems. The natural regulation of pests is possible and soil structure is also improved in agroecological systems.

The key results of this thesis show the decisive role of edaphic communities in activities linked to the way agroecosystems operate. These conclusions are of particular importance in a context of changes in agriculture and rise of new practices likely to modify soils biological functioning. Establishing cropping systems based on the restoration of soil biodiversity will thus contribute to the ecological transition of agriculture in Guadeloupe.

Keywords: agroecological diagnosis, functional ecology, multi-criteria assessment, macrofauna, service plants, food production, pest control, soil structure

Table des matières

Remerciements	A
Résumé.....	C
Abstract	E
Liste des Figures	IV
Liste des tableaux.....	V
Liste des annexes.....	VI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I. Cadre de la thèse	2
II. Synthèse bibliographique	3
1. L’agriculture conventionnelle, une réponse à une demande alimentaire croissante	3
2. L’avènement de l’agroécologie.....	6
3. L’agriculture de conservation et ses principes	7
4. Le maraîchage, source alimentaire mondiale.....	10
5. La diversité des organismes du sol et leurs fonctions	12
6. Les services écosystémiques fournis par la biodiversité du sol.....	16
III. Objectifs de recherche.....	18
IV. Site d’étude	19
RÉSULTATS	22
CHAPITRE 1 : Pratiques agricoles dans les exploitations maraîchères guadeloupéennes	23
1. Introduction.....	24
2. Matériels et Méthodes	26
2.1. Enquête de terrain.....	26
2.2. Sélection de parcelles maraîchères sur vertisol	27
2.3. Diagnostic agroécologique	30
2.3.1. Échantillonnage du sol.....	30
2.3.2. Macrofaune du sol.....	30
2.3.3. Mesure de l’activité microbienne du sol	31
2.3.4. Propriétés chimiques du sol	31
2.3.5. État structural du sol	32
2.3.6. Analyses des données.....	32
3. Résultats	33
3.1. Enquête de terrain.....	33
3.2. Analyse des parcelles sélectionnées sur vertisol	36
3.3. Diagnostic agroécologique sur vertisol.....	39
3.3.1. Macrofaune	40
3.3.2. Activité microbienne totale	41
3.3.3. Propriétés chimiques du sol	41
3.3.4. État structural du sol	43
4. Discussion	44
4.1. Les pratiques agricoles des maraîchers guadeloupéens.....	44
4.2. Impact des pratiques maraîchères sur le sol	48
5. Conclusion	51
CHAPITRE 2 :..... Co-conception et évaluation multicritère de systèmes de culture maraîchers innovants	53
1. Introduction.....	54
2. Matériels et méthodes	56

2.1. Co-conception de prototypes de systèmes de culture maraîchers innovants	56
2.2. Évaluation multicritère des prototypes innovants	58
3. Résultats	61
3.1. Co-conception de prototypes innovants	61
3.2. Les systèmes agroécologiques maraîchers mis en expérimentation en station.....	63
3.3. Diagnostic de durabilité.....	71
3.3.1. Évaluation environnementale	71
3.3.2. Évaluation économique	74
4. Discussion	76
4.1. Co-construction des systèmes de culture.....	76
4.2. Evaluation agroenvironnementale et économique	78
5. Conclusion	80
CHAPITRE 3 : Impact de pratiques agroécologiques sur la biodiversité et les services	
écosystémiques en plein champ	81
1. Introduction.....	82
2. Matériels et méthodes	83
2.1. Les systèmes de cultures étudiés	83
2.2. Échantillonnage du sol.....	85
2.2.1. Macrofaune	85
2.2.2. Mésofaune.....	85
2.2.3. Mesure de l'activité microbienne du sol	86
2.3. Propriétés chimiques du sol	86
2.4. État structural du sol	86
2.5. Activité alimentaire (test Bait Lamina)	87
2.6. Suivi des systèmes agroécologiques.....	87
2.6.1. Biomasse aérienne et racinaire	87
2.6.2. Production culturale	88
2.7. Atelier de restitution	89
2.8. Analyses statistiques	89
3. Résultats	89
3.1. Diversité biologique.....	89
3.1.1. Macrofaune	89
3.1.2. Mésofaune.....	92
3.1.3. Activité microbienne	93
3.2. Services agro-écosystémiques.....	93
3.2.1. État structural du sol	93
3.2.2. Fertilité du sol.....	95
3.2.3. Activité alimentaire	97
3.2.4. Biomasse aérienne et racinaire et production	97
3.2.5. Nombre de boutons floraux, de fleurs et de fruits	99
3.2.6. Les observations de la biodiversité aérienne	101
3.3. Atelier de restitution des parcelles agroécologiques	101
4. Discussion	102
4.1. Biodiversité édaphique.....	102
4.2. Services agro-écosystémiques des systèmes maraîchers.....	103
5. Conclusion	106
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	107
1. Synthèse des résultats.....	108
2. Pratiques agricoles et services agro-écosystémiques.....	110

3. Perspectives.....	115
3.1. Co-conception et évaluation multicritère.....	115
3.2. Pratiques agroécologiques, biodiversité et services écosystémiques	115
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117
ANNEXES	143

Liste des Figures

Figure 1: Principes de l'agriculture de conservation	7
Figure 2 : Organismes de la microflore	13
Figure 3 : Organismes de la microfaune	13
Figure 4: Organismes de la mésofaune	15
Figure 5: Organismes de la macrofaune	16
Figure 6: Biodiversité du sol et services écosystémiques	17
Figure 7: Carte de l'archipel guadeloupéen	20
Figure 8 : Carte des sols de la Guadeloupe	21
Figure 9: Prélèvements de sol sur une parcelle maraîchère	30
Figure 10: Échantillonnage de la macrofaune dans les parcelles agricole	31
Figure 11 : Utilisation des sols dans 28 parcelles maraîchères de Basse-Terre	34
Figure 12 : Utilisation des sols dans 21 parcelles maraîchères de Grande-Terre.....	34
Figure 13 : Projection des variables de l'analyse en composantes principales.....	37
Figure 14 :Dendrogramme obtenu par la classification hiérarchique (CAH)	38
Figure 15 : État structural du sol dans 18 parcelles sur vertisol en Grande-Terre.	44
Figure 16 : Atelier participatif pour la co-conception de systèmes agricoles maraîchers.....	56
Figure 17 : Localisation des deux systèmes co-conçus sur le domaine INRAE de Godet	58
Figure 18 : Quelques organismes du sol	62
Figure 19 : Disposition spatiale des systèmes agroécologiques maraîchers.....	64
Figure 20: Schéma (a) et photo (b) de parcelle agroécologique AG	66
Figure 21: Schéma(a) et photo (b) de parcelle agroécologique AGSPP	68
Figure 22 : Évaluation environnementale des systèmes AG et AGSPP en 2017.....	72
Figure 23 : Évaluation environnementale des systèmes AG et AGSPP en 2018.....	73
Figure 24 : Évaluation économique des systèmes agroécologique AG et AGSPP en 2017.....	75
Figure 25 : Évaluation économique des systèmes agroécologique AG et AGSPP en 2018.....	76
Figure 26 : Extraction de la mésofaune (méthode Berlèse)	86
Figure 27 : Étapes de prélèvements et pesée de la biomasse (laitue)	88
Figure 28 : Groupes fonctionnels de la macrofaune.	91
Figure 29 : Abondance de la mésofaune.....	93
Figure 30 : État structural du sol des parcelles maraîchères à l'état initial	94
Figure 31 : État structural du sol des parcelles maraîchères à dix-huit mois.....	95
Figure 32: Suivi du cycle de tomates des parcelles AG et des parcelles AGSPP en 2018.....	100
Figure 33 : Bilan du système agroécologique à biodiversité renforcée (AGSSP)	114

Liste des tableaux

Tableau 1 :Synthèse du questionnaire d'enquête	26
Tableau 2: Paramètres sélectionnés pour les analyses sur vertisol	29
Tableau 3: Caractéristiques des 18 parcelles maraîchères sélectionnées.....	39
Tableau 4: Densités moyennes des groupes fonctionnels de macrofaune à T0.....	40
Tableau 5 : Densités moyennes des groupes fonctionnels de macrofaune à T18	41
Tableau 6 : Analyses chimiques du sol à T0.....	42
Tableau 7 : Analyses chimiques du sols à T18	43
Tableau 8 : Indicateurs retenus selon les méthodes IDEA et RAD.....	60
Tableau 9 : Caractéristiques de l'itinéraire technique AG	70
Tableau 10 : Caractéristiques de l'itinéraire technique AGSPP	71
Tableau 11 : Caractérisation des opérations culturales des parcelles.....	84
Tableau 12 : Densité moyenne des groupes fonctionnels de macrofaune	90
Tableau 13 : Caractéristiques chimiques du sol à l'état initial.	96
Tableau 14 : Caractéristiques chimiques du sol à 18 mois	97
Tableau 15 : Biomasse sèches aérienne, racinaire et totale (2017)	98
Tableau 16 : Biomasse sèches aérienne, racinaire et totale (2018)	99

Liste des annexes

Annexe 1: Questionnaire d'enquête.....	144
Annexe 2: Atelier participatif.....	148
Annexe 3 : Méthodes IDEA et RAD	150
Annexe 4 : Indicateurs retenus pour l'évaluation économique.....	154
Annexe 5: Tableaux de production AG 2017	156
Annexe 6 : Tableau de production AGSPP 2017	157
Annexe 7 : Tableaux de suivi AG et AGSPP 2017	158
Annexe 8 : Tableau de production AG 2018.....	159
Annexe 9 : Tableau de production AGSPP 2018	160
Annexe 10 : Suivi AG et AGSPP 2018	161
Annexe 11 : Identification de la macrofaune (morphospèce) à dix-huit mois	163
Annexe 12 : Articles	164

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Cadre de la thèse

Le sol est un milieu vivant, dont le fonctionnement résulte de l'interaction de facteurs abiotiques (climat, roche mère) et biotiques (végétaux, communautés d'organismes du sol), (Lavelle & Spain, 2001). C'est l'un des habitats les plus riches de la biosphère car de nombreux organismes présents sur terre y vivent au moins durant une partie de leur cycle de vie (Wolters, 2001). Les communautés d'organismes du sol jouent un rôle fondamental dans la fourniture de services écosystémiques, tels que le recyclage des éléments nutritifs, la décomposition de la matière organique, la production primaire, la structuration des sols, la régulation des bioagresseurs, le stockage du carbone, la régulation de l'érosion ou encore la régulation du climat (Brussaard et al., 1997, Daily et al., 1997 ; Turbé et al., 2010 ; Parther, 2013 ; Bertrand et al., 2015).

L'agriculture est l'une des activités humaines qui s'appuie de manière essentielle sur le sol comme support mais également comme ressource. L'agriculture est une activité vitale pour les sociétés humaines car c'est une source irremplaçable pour leur alimentation. Durant toute la seconde moitié du 20^e siècle, l'agriculture conventionnelle basée sur l'utilisation de variétés à haut rendement, d'intrants de synthèse, d'irrigation et d'une mécanisation lourde a permis d'augmenter la production agricole afin de faire face à la demande sans cesse croissante de la population mondiale (Clermont-Dauphin et al., 2014). Cependant, les pratiques artificialisantes de l'agriculture conventionnelle ont souvent eu des impacts négatifs sur l'environnement, telles que la contamination des nappes phréatiques (e.g., Britto et al., 1999), la diminution de la biodiversité (e.g., Pimm & Raben, 2000) ou encore la dégradation des sols (e.g., Sebastian et al., 2000). Ces perturbations du milieu ont pour conséquence de dégrader certains des services écosystémiques fournis par les sols.

En rupture avec cette agriculture conventionnelle, des systèmes de production alternatifs basés sur des pratiques agroécologiques plus respectueuses de l'environnement, existent (Blouet & Pervanchon, 2002). La réduction du travail du sol, la rotation des cultures, l'augmentation de la diversité végétale ou encore la fertilisation des cultures et l'amendement des sols par l'apport de matière organique, sont autant de pratiques plébiscitées dans les systèmes de production agroécologiques (Hani et al., 2004 ; Aubertot et al., 2005 ; Deguine et al., 2008). L'effet des pratiques agroécologiques sur la composition et la diversité des communautés d'organismes édaphiques, les propriétés du sol et la fourniture de services écosystémiques correspondants demeure toutefois encore assez mal documenté (Duru et al., 2015 ; El Mujtar et al., 2019 ; Therond & Duru, 2019).

Notre recherche s'articule autour de la question fondamentale suivante : « **Comment la biodiversité édaphique agit-elle sur les services écosystémiques au travers des pratiques agricoles ?** ». C'est dans ce cadre que nous nous sommes intéressés aux pratiques culturales dans les systèmes maraîchers de Guadeloupe en lien avec la biodiversité et l'activité biologique du sol.

Organisation du manuscrit

Le manuscrit comprend une introduction générale divisée en quatre parties : i) le cadre de la thèse, ii) la synthèse bibliographique, iii) l'objectif de recherche et iv) le site de l'étude. Viennent ensuite trois chapitres présentant les résultats obtenus et enfin une conclusion générale. Les chapitres de résultats ont été rédigés sous forme d'articles scientifiques.

II. Synthèse bibliographique

Présentation de la synthèse bibliographique

Le cadre conceptuel de cette étude s'appuie sur les fonctions relatives aux sols, la biodiversité fonctionnelle édaphique, l'agriculture conventionnelle, l'agroécologie, l'agriculture de conservation et les services écosystémiques. Dans cette synthèse, j'aborde dans un premier temps les conséquences de l'agriculture conventionnelle sur l'environnement et singulièrement sur les sols. Dans un second temps, je développe la notion d'agriculture plus respectueuse de l'environnement avec les concepts d'agroécologie et d'agriculture de conservation. Dans une troisième partie, j'introduis notre modèle de système de culture le maraîchage. Puis, je présente l'importance de la biodiversité du sol et son impact sur les services écosystémiques. Les objectifs de recherche sont ensuite décrits. Enfin, je présente le site d'étude de ce travail de thèse.

1. L'agriculture conventionnelle, une réponse à une demande alimentaire croissante

L'agriculture est une pratique ancienne dont les premières traces remontent au Néolithique. Suite à l'accroissement de la population mondiale dans les années 1950, l'agriculture mise à mal durant la Seconde Guerre Mondiale, fut mise au défi de produire de manière à assurer l'autosuffisance alimentaire des hommes. La Révolution Verte comme il est convenu de l'appeler depuis, s'appuie alors sur de nouvelles techniques agricoles qui ont été développées à partir des technologies militaires, comme la mécanisation lourde, la sélection génétique de

variétés à haut rendement et le recours à des intrants de synthèse issus de l'industrie chimique (Meynard et al., 2013 ; Sutton et al., 2013) pour la fertilisation d'une part et pour l'élimination des bioagresseurs d'autre part. Le labour profond devient une opération technique largement répandue dans les systèmes agricoles conventionnels (Köller, 2003). Il a pour objectif de fracturer les agrégats et d'améliorer ainsi la disponibilité en eau pour les plantes, de faciliter l'incorporation des résidus dans le sol, de supprimer les herbes invasives ainsi que les parasites et de limiter l'évaporation (Köller, 2003 ; Maharjan et al., 2018). De plus, lors de la plantation, le labour vise à améliorer la préparation du lit de semences, la pénétration des racines des plantes et la redistribution des éléments nutritifs dans le sol pour une absorption efficace par la plante (Wang et al., 2015 ; Maharjan et al., 2018).

En agriculture conventionnelle, la monoculture, c'est-à-dire le fait de ne cultiver qu'une seule espèce végétale, voire une seule variété et à grande échelle, est une pratique courante. La monoculture permet d'avoir une production efficace et régulière, organisée selon un schéma industriel, reposant sur le recours à du capital matériel en grande quantité. La spécialisation des activités et des tâches favorise la réduction des coûts (Barbault, 2009). Elle permet également de maximiser l'utilisation cartésienne du foncier. Les agriculteurs sélectionnent une production marchande, qui est cultivée à grande échelle dans un milieu donné dont on tâchera de standardiser la réponse par rapport à l'espèce commerciale choisie par l'artificialisation (Nuama, 2006). Outre un meilleur usage des ressources (matériel, main d'œuvre, foncier, finances...), la monoculture permet la simplification des techniques, par exemple pour l'irrigation et la lutte contre les bioagresseurs (Gliessman, 2015).

L'apport d'éléments minéraux (essentiellement N, P et K) sous forme d'engrais de synthèse est également largement répandu en agriculture conventionnelle. Selon Chen (2006), les fertilisants de synthèse présentent plusieurs avantages : 1) les éléments nutritifs sont solubles et immédiatement disponibles pour les plantes, et par conséquent les effets sont directs et rapides; 2) les fertilisants de synthèse sont très concentrés en éléments nutritifs, et sont donc très efficaces sur la croissance des plantes même en quantités relativement faibles. La production et l'utilisation accrue de fertilisants de synthèse a joué un rôle important dans l'accroissement de la production agricole durant la période de la Révolution Verte (Tilman, 1998) dans de nombreuses régions du monde en développement, et plus particulièrement en Asie et en Amérique latine, en faisant doubler le rendement des principales cultures céréalières comme le riz, le blé et le maïs (Evenson & Gollin, 2003).

La découverte, en 1939, des propriétés biocides du DDT (ou dichlorodiphényltrichloroéthane), a conduit à la production de pesticides à base de d'hydrocarbures chlorés et à base d'organophosphates pendant la Seconde Guerre Mondiale (Boland et al., 2004). Depuis 1945, de nombreux pesticides ont vu le jour, des herbicides (urées substituées, ammoniums quaternaires et triazines), des fongicides (benzimidazole, pyrimides imidazoliques et triazoliques), ainsi que des insecticides (pyréthrinoïdes, carbamates, organophosphorés et organochlorés), (Boland et al., 2004 ; Vanniere, 2012). Ces pesticides permettent de lutter contre les nombreux organismes considérés comme nuisibles (insectes, champignons et bactéries pathogènes, nématodes,...) par les agriculteurs.

L'agriculture conventionnelle conduit donc à une uniformisation et à une standardisation des pratiques agricoles, permettant ainsi une simplification du travail et une spécialisation des systèmes de production (Meynard, 2013 ; Duru et al., 2014).

Dans les années 1980, les pratiques artificialisantes de l'agriculture conventionnelle (sélection génétique, démocratisation de l'utilisation des intrants de synthèse, mécanisation lourde et conduite simplifiée des systèmes de culture à haut rendement) sont remises en question (Hazell & Wood, 2008 ; Kibblewhite et al., 2008 ; Pingali, 2012 ; Henneron et al., 2014). En effet, l'intensification des pratiques agricoles conventionnelles a eu pour conséquence une augmentation considérable de l'usage d'intrants de synthèse, allant jusqu'à dépasser les capacités d'assimilation par les plantes cultivées (Gardner & Drinkwater, 2009). Ces applications excessives ont des répercussions néfastes sur l'environnement ; une des conséquences étant la lixiviation d'azote minéral qui vient polluer les nappes phréatiques (Britto et al., 1999 ; Galloway et al., 2003). En plus de la contamination des eaux souterraines par les nitrates, ces méthodes culturales ont conduit à l'eutrophisation des lacs et des rivières (FAO, 1996 ; Tilman et al., 2002 ; MAE, 2005). La production des fertilisants de synthèse est par ailleurs consommatrice en énergies fossiles et contribue donc fortement aux émissions de gaz à effet de serre (Kendall, 1994 ; Horrigan et al., 2002) qui sont une des causes du réchauffement climatique actuel avec les conséquences collatérales désastreuses qu'on lui connaît en terme environnemental. De plus, certains intrants de synthèse affectent la santé humaine, provoquant ainsi des cancers, des maladies neurologiques et des troubles de la reproduction (Inserm, 2013). De manière générale, l'agriculture conventionnelle a également entraîné une détérioration des sols (érosion et perte de fertilité), une perte de la biodiversité et une résistance des ravageurs (MEA, 2005 ; Halberg et al., 2009). Tandis que la demande alimentaire continue de croître, les répercussions négatives de l'agriculture conventionnelle

sont devenues une préoccupation majeure pour la société (Hennenon et al., 2014). Le modèle agricole basé uniquement sur la productivité, est donc remis en question en faveur d'un modèle plus respectueux de l'environnement.

2. L'avènement de l'agroécologie

Selon la FAO (2009), la population mondiale devrait atteindre 9,1 milliards de personnes en 2050. L'agriculture du 21^e siècle est confrontée à de multiples défis, car elle doit produire plus de denrées alimentaires tout en ayant une production agricole plus respectueuse de l'environnement (Blouet & Pervanchon, 2002 ; Hobbs, 2007 ; FAO, 2009). L'agroécologie repose sur l'utilisation de principes et concepts issus de l'écologie appliqués à l'agriculture (Gliessman, 2007).

En 1928, Bensing, un agronome russe, utilise pour la première fois le terme « agroécologique » faisant référence à l'introduction de méthodes écologiques dans le domaine de la recherche agronomique (Wezel et al., 2009). Gliessman (1998) définit l'agroécologie comme « l'application de l'écologie à l'étude, la conception et à la gestion d'agro-écosystèmes durables ». Ce concept repose sur des pratiques agricoles efficaces et innovantes qui permettent de satisfaire les besoins alimentaires de la population tout en préservant les ressources naturelles (Gliessman, 2015). Sur le plan scientifique, l'agroécologie s'appuie sur des connaissances et des méthodes écologiques pour en extraire des principes qui peuvent être utilisés afin de concevoir et de gérer des systèmes agricoles. Sur le plan pratique, l'agroécologie valorise les connaissances locales et empiriques des agriculteurs et le partage de ces connaissances. Enfin, sur le plan social, l'agroécologie prône les changements économiques et sociaux qui mèneront à la sécurité alimentaire pour tous, mais cherche également à connaître les moyens par lesquels ces changements peuvent être activés et soutenus.

L'agroécologie n'est pas une forme précise d'agriculture car elle ne possède aucune réglementation ni certification. Elle propose des concepts, des outils et des pratiques permettant l'utilisation cohérente des processus écologiques et la valorisation des ressources naturelles (David et al., 2011). L'agroécologie repose sur une hétérogénéité de pratiques agricoles (réduction du travail du sol, rotation des cultures, augmentation de la diversité végétale, fertilisation organique des cultures ou gestion de l'enherbement) (Gliessman, 2007 ; 2015) qui sont utilisées en agriculture de conservation, en agriculture biologique ou encore en agroforesterie (Stassart et al., 2012 ; Wezel, 2014). L'effet de ces pratiques sur la

composition et la diversité des communautés d'organismes édaphiques, les propriétés du sol et la fourniture de services écosystémiques mérite d'être approfondi (Duru et al., 2015 ; El Mujtar et al., 2019 ; Therond & Duru, 2019).

3. L'agriculture de conservation et ses principes

L'agriculture de conservation a pour objectif de contribuer à la conservation et à la stimulation des processus biologiques naturels (FAO, 2012 ; Alaoui, 2015). De plus, elle permet une réduction du temps de travail, de la consommation d'énergies fossiles, une diminution de l'érosion et une meilleure gestion de l'eau (Rocks et al., 2016). Le terme est proposé par la FAO en 2001, lors du « First World Congress on Conservation Agriculture », à Madrid. L'agriculture de conservation repose sur trois grands principes appliqués simultanément : i) une forte réduction voire une suppression du travail du sol, ii) une couverture permanente des sols et iii) des successions culturales diversifiées (FAO, 2005). Ces trois principes ont pour objectifs de réduire la dégradation des sols et d'améliorer leur fertilité tout en préservant les ressources organiques, la biodiversité édaphique et aérienne (Schaller, 2013) (Figure 1).

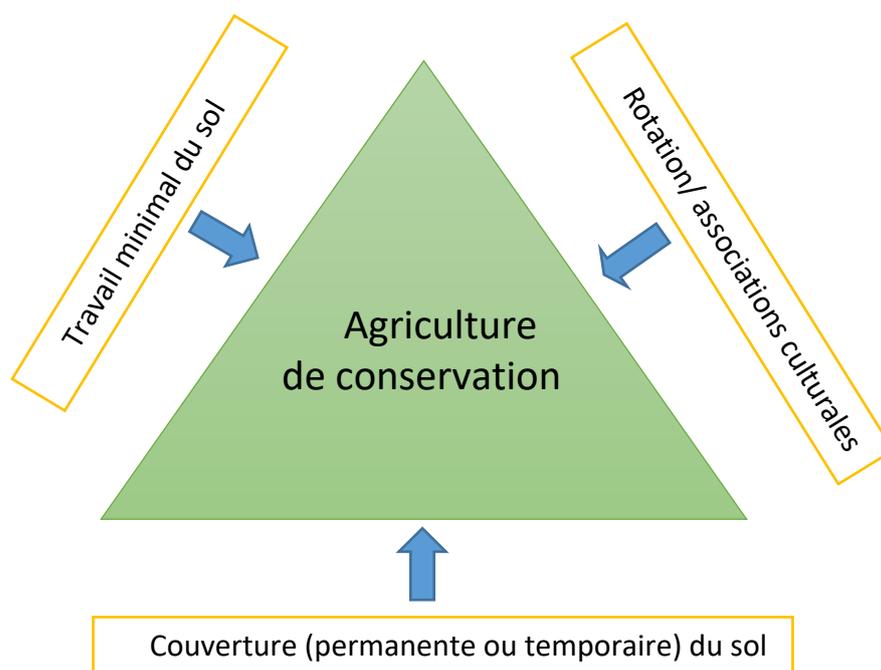


Figure 1: Principes de l'agriculture de conservation (FAO, 2005).

Le **travail minimal du sol** a pour objectif de remplacer le labour systématique, profond et mécanique par différentes pratiques (Schaller, 2013), comme :

- Le pseudo-labour encore appelé sous-solage ou décompactage. Le travail est effectué sans retourner ou mélanger le sol, entre 15 à 40 cm de profondeur.

- Le travail du sol superficiel est réalisé avec des outils à disques ou à dents (déchaumage ou strip-till par exemple). Il est effectué entre 3 à 15 cm de profondeur.
- Le semis direct se fait généralement en l'absence de tout travail du sol. Toutefois, un travail du sol très superficiel (profondeur faible, < 5 cm) peut être réalisé sur la ligne de semis par des semoirs à disques.

Ces différentes pratiques peuvent être appliquées de manière systématique ou occasionnelle. Elles peuvent toute être utilisées sur une même exploitation et être adaptées en fonction des besoins des cultures et des parcelles (Schaller, 2013).



Pseudo-labour (source : www.hellopro.fr)

Travail du sol superficiel (source : www.terre-net.com)

Semis direct (source : www.aurensan.com)

La **couverture du sol** consiste à recouvrir le sol nu de manière permanente ou temporaire. Cette pratique a pour objectif de limiter la prolifération des plantes indésirables dans le milieu (Sharma et al., 2018). Elle permet également de protéger la surface des sols en réduisant l'évapotranspiration, en conservant l'humidité de l'irrigation et des précipitations, en favorisant l'activité biologique et en réduisant l'érosion (Steenwerth & Belina, 2008 ; Nicholls et al., 2016 ; Sharma et al., 2018). La couverture du sol contribue donc à la régulation du carbone organique, au recyclage de l'eau, à l'amélioration de la structure du sol, à la pollinisation et à la production de matière organique (Lal, 2004 ; Hoorman, 2009 ; Mitchell et al., 2017).



Paillage avec de la matière végétale morte

(source : www.agricultureaucameroun.net)



Paillage plastique

(source : www.agriavis.com)

Les **rotations/ associations culturales** ont pour objectif de diversifier les cultures afin de limiter la propagation et la spécialisation des adventices et des nuisibles dans les parcelles agricoles (Ball et al., 2005). Ces pratiques favorisent une structuration des sols, une diversité de la flore et de la faune et un meilleur recyclage des nutriments (Ball et al., 2005 ; FAO, 2005).



Associations culturales : Courgettes/Laitues (à gauche, source : www.permaculturedesign.fr) et Melon/ Œillet d'inde (à droite, source : www.astuces-pratiques.fr)

L'agriculture de conservation a des effets bénéfiques en termes de réduction des coûts de production due à la minimisation du travail du sol (Hobbs, 2007; Wall, 2007). L'amélioration du rendement des cultures a également été démontrée dans ces systèmes agroécologiques (Derpsch & Friedrich, 2009; Ngwira et al., 2013; Thierfelder et al., 2013). Ces systèmes favorisent également la fixation de l'azote dans le sol, la rétention d'eau et minimisent les variations de température du sol (Sims et al., 2009). Selon Thierfelder et al. (2012), l'agriculture de conservation permet d'augmenter la teneur en matière organique du sol. Une étude menée par Hobbs et al. (2008) a également mis en évidence un meilleur contrôle des

nuisibles (Coléoptères, Diptères, Dermaptères) dans un système de culture de conservation. Cependant d'après Schaller (2013), il est particulièrement difficile d'évaluer les systèmes issus de l'agriculture de conservation car ces derniers font l'objet d'une grande flexibilité dans l'application des trois principes, d'où la grande diversité des pratiques appliquées (Scopel et al., 2013). C'est pourquoi des recherches sont nécessaires afin d'approfondir les connaissances existantes sur l'impact des pratiques agricoles de conservation, sur la biodiversité et l'environnement.

4. Le maraîchage, source alimentaire mondiale

Le maraîchage se caractérise par une grande diversité de cultures, de systèmes de production et de modèles économiques (Jeannequin et al., 2011). Les cultures maraîchères couvrent un large spectre de différentes familles botaniques comme les Solanacées, les Cucurbitacées, les Fabacées, les Liliacées ou les Astéracées destinées à la consommation humaine (INRAE, 2018).

Du point de vue de la nutrition, les cultures maraîchères ont des ressources en fibres, vitamines, minéraux et microconstituants divers (Lester, 2006 ; Slavin & Llyord, 2013). Ces ressources peuvent jouer un rôle dans la prévention de maladies chroniques. Les fibres ont des effets sur la satiété et sur le transit intestinal. Les vitamines A sont connues pour leurs rôles dans la prévention des pathologies de l'œil en agissant sur la physiologie des cellules nerveuses de la rétine (IMPM, 2001). Le potassium et le sodium permettent de maintenir l'équilibre acido-basique du corps ; une alimentation riche en potassium permettrait d'éviter le développement de l'hypertension artérielle (Amiot-Carlin et al., 2007). Cependant, les teneurs en nutriments dépendent de plusieurs paramètres dont les espèces végétales et les pratiques culturales (Amiot-Carlin et al., 2007). Une étude a été menée sur la comparaison des teneurs en nutriments de trois cultivars de tomates ('Gardener's Delight', Cervil et WVa700) en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique. Les résultats obtenus ont montré que les teneurs en vitamine C, en caroténoïdes et en polyphénols étaient plus importantes dans les fruits de tomates cultivées en agriculture biologique qu'en culture conventionnelle (Amiot-Carlin et al., 2004).

Selon la FAOSTAT (2019), la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et la Turquie sont les plus grands producteurs et consommateurs de *Solanum lycopersicum* (tomates). En 2018, la production mondiale de tomates s'élevait à 61 523 462 tonnes en Chine, 19 377 000 tonnes en Inde, 12 612 139 tonnes aux États-Unis et 12 150 000 tonnes en Turquie (FAOSTAT, 2019). Le chiffre

d'affaire annuel relatif aux exportations de dérivés de tomates a été estimé à plus de 110 millions d'USD pour la Chine et à 269 millions USD pour les États-Unis, en 2017-2018 (Branthôme, 2019). Les systèmes de culture maraîchers nécessitent en agriculture conventionnelle de grandes quantités de fertilisants de synthèse, une irrigation fréquente et des opérations répétées de labour (Jackson et al., 2004; Willekens et al., 2014 Norris & Congreves, 2018).

Cependant, il existe des systèmes maraîchers basés sur l'utilisation de pratiques alternatives, agroécologiques, plus respectueuses des ressources naturelles. Parmi ces pratiques, l'utilisation de fertilisants organiques, comme le compost, est courante. Le compost résulte d'un processus de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et/ou animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobie, conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stable (Francou, 2003). Le compost est utilisé afin d'apporter les éléments nutritifs nécessaires à la culture implantée et d'optimiser le rendement. Kitabala et al. (2016), au Congo a mis en évidence que le compost a un effet positif sur l'augmentation des rendements de *S. lycopersicum* mais qu'au-delà de 30t ha⁻¹ l'apport de compost devient néfaste pour la plante. Une étude similaire réalisée par Morra et al. (2010) a montré que l'apport répété de compost dans des cultures de tomates et de laitues, augmente la quantité de carbone organique dans le milieu. Cependant, au-delà de 30t ha⁻¹, le compost entraîne une diminution de la quantité de carbone organique et provoque une augmentation du taux de nitrate. D'autres études ont montré que l'augmentation du carbone organique par l'ajout de compost aide à l'amélioration de la capacité de rétention de l'eau sur des sols sableux (Ramos & Martínez-Casasnovas ; 2006 ; Brown & Cotton, 2011). De plus, le compost pourrait participer à l'amélioration de la stabilité des agrégats des sols, en influençant les communautés d'organismes du sol via la teneur élevée en matière organique dans le milieu (Bouajila & Sanaa, 2011 ; Edwards & Hailu, 2011 ; Amlinger et al., 2007).

Le paillage du sol est également mis en place dans les systèmes de culture maraîchers agroécologiques (Ruffo & Bollero, 2003). Ce paillage peut être organique, en utilisant des plantes de couverture (légumineuses ou non légumineuses) ou inorganique (Fageria et al., 2005 ; Sanchez et al., 2008). Une étude menée par Sanchez et al. (2008) pendant deux ans, dans des cultures de *Cucumis sativus* (concombre), a mis en évidence que l'application de papier journal et de paille de blé (*Triticum aestivum*), diminue la croissance des plantes indésirables de manière générale. Les résultats de cette étude ont montré que pour les deux années, le papier journal permettait un meilleur contrôle de l'enherbement. Le paillage joue

également un rôle dans la réduction des nuisibles dans les cultures. Par exemple, les plantes de couverture comme *Crotalaria* spp. sont utilisées pour lutter contre les nématodes et certains microorganismes phytopathogènes compte tenu des substances sécrétées par leurs exudats racinaires (Wang et al., 2002). De plus, l'application de paillage participe à la prévention de l'érosion des sols. D'après Dabney et al. (2001), les plantes de couverture permettent la protection des sols en améliorant la teneur en carbone, la capacité d'échange cationique, la stabilité des agrégats et l'infiltrabilité de l'eau. La couverture végétale peut être une source de nutriments pour les cultures principales mais cet effet est variable selon le type de plante de couverture. Perdigão et al. (2010) ont testé l'impact de deux espèces de plantes de couverture sur la mise à disposition de l'azote. Dans cette étude, *Lupinus luteus* L. (Fabacées) fournit à la plante principale un apport en azote plus conséquent que *Lolium multiflorum* Lam. (Poacées).

Il y a encore peu d'études sur l'impact des cultures maraîchères agroécologiques sur le sol, les communautés d'organismes du sol et la fourniture de services écosystémiques.

5. La diversité des organismes du sol et leurs fonctions

Le sol abrite la plus grande partie de la biodiversité terrestre (Gobat, 1998 ; Wolters, 2001). En effet, plus d'un quart de toutes les espèces vivantes sur terre sont des habitants stricts du sol ou de la litière (Decaëns et al., 2006). Ainsi, il a été estimé qu'un gramme de sol peut contenir un milliard de bactéries comprenant des dizaines de milliers d'espèces, mais également une importante diversité d'hyphes, de champignons, de nématodes, de vers de terre et d'arthropodes (Bargett & van der Puttern, 2014). Les organismes vivant dans le sol jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres de par leurs impacts complémentaires dans le recyclage et la transformation de la matière organique, la production primaire, le régime hydrique, l'aération ou la composition en gaz (Brussaard et al., 1997; Daily et al., 1997; Turbé et al., 2000).

Pour appréhender l'incommensurable diversité existant dans le sol, les organismes édaphiques sont catégorisés selon leur taille mais également selon leur impact sur l'environnement (classification fonctionnelle) (Lavelle et al., 2001 ; Turbé et al., 2010) :

La microflore (microorganismes) comprend les bactéries, les champignons, les actinomycètes et les microalgues ; ce sont des organismes dont la taille est inférieure à 100 µm (Swift et al., 1979 ; Wurst et al., 2012) (Figure 2). Ces micro-organismes sont qualifiés d'**ingénieurs chimiques** dans la classification fonctionnelle. Ils interviennent au premier

niveau de la chaîne alimentaire. Les ingénieurs chimiques sont responsables de la majeure partie des transformations biochimiques du sol et en particulier de la décomposition de la matière organique et de la mise à disposition des éléments nutritifs sous des formes facilement assimilables par les plantes (Wardle, 1999; Barrios 2007; Pattison et al., 2008).

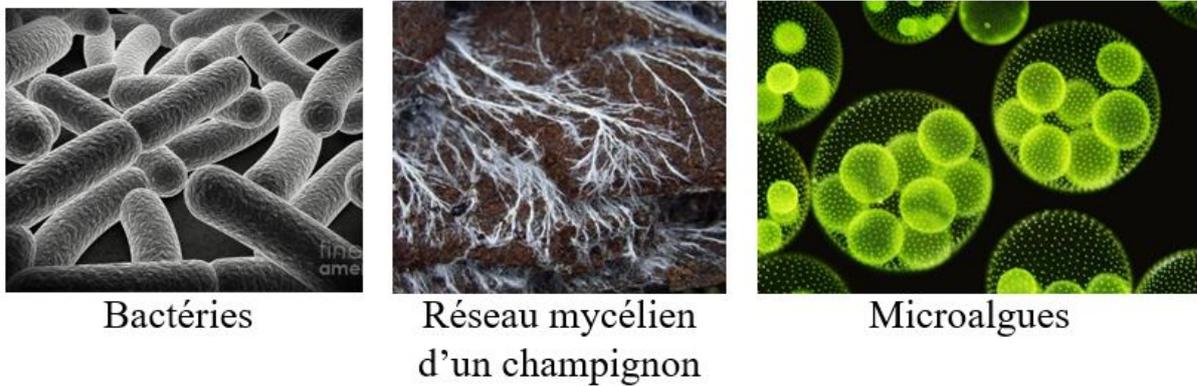


Figure 2 : Organismes de la microflore (sources : www.champignoncomestibles.com; www.fineartamerica.com; www.astrishop.de)

La **microfaune** comprend majoritairement les nématodes et les protozoaires ; ce sont les organismes qui mesurent moins de 0,2 mm (Figure 3). Les organismes de la microfaune sont qualifiés de **micro-prédateurs** dans la classification fonctionnelle (Turbé et al., 2010). En se nourrissant de microorganismes (bactéries et/ou champignons), ils régulent leurs activités (Deprince, 2003).

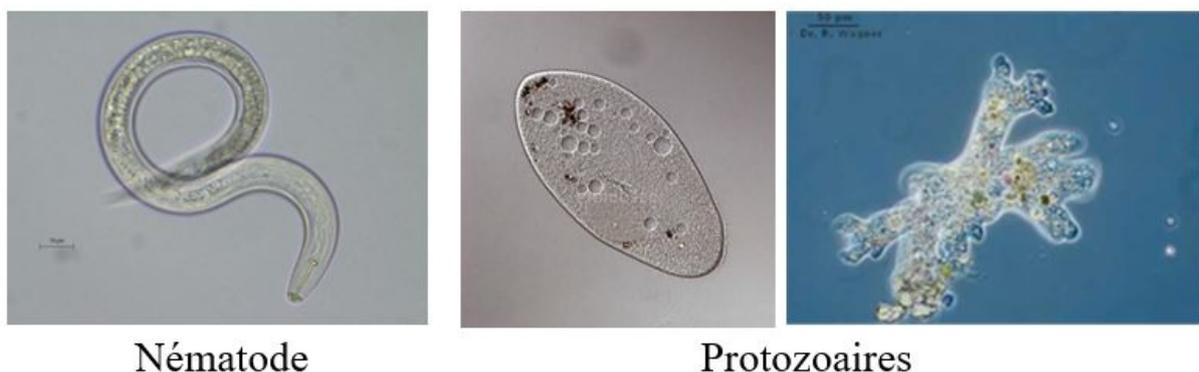


Figure 3 : Organismes de la microfaune (sources : www.rennes.inra.fr ; www.fotosearch.es)

La **mésafaune** regroupe les microarthropodes (Acariens, Collemboles, petits Myriapodes tels les polyxénides, petits Arachnides tels les pseudoscorpions,...) ainsi que les enchytréides

qui sont des Annélides Oligochètes (Figure 4). Leur taille est comprise entre 0,2 mm et 2 mm (Gobat et al., 2010). Les organismes de la mésofaune contribuent à l'élaboration et au maintien de la microporosité nécessaire à leurs déplacements dans le sol (Anfray, 2017). Dans la classification fonctionnelle, ils occupent diverses places en fonction de leur régime alimentaire. Ils peuvent être des **transformateurs de litière** ou des **prédateurs**. Les transformateurs de litière (ex : acariens Oribates, collemboles, enchytréides) sont des invertébrés saprophages, rhizophages ou phytophages qui fragmentent les débris végétaux et assurent le brassage de la matière organique dans le sol (Brussaard et al., 1998). Ces organismes régulent également les populations de microorganismes, notamment par la fragmentation de la matière végétale et la mise à disposition de fragments plus petits pour cette microflore (Whipps & Budge, 1993). Ils favorisent également la dissémination de la microflore dans les premiers centimètres de sol (Jeffery et al., 2013 ; Anfray, 2017). Les prédateurs (ex : pseudoscorpions, acariens Gamasides), quant à eux, jouent un rôle dans le maintien de la démographie des populations, en se nourrissant de nématodes, de microarthropodes et d'Oligochètes (Anfray, 2017).

Acariens



Oribate



Gamaside

Collemboles



Symphyléone



Isotomide



Entomobryomorpe

Myriapodes



*Figure 4: Organismes de la mésofaune (sources: www.aramel.free.fr;
www.bugguide.net; www.collemebola.org; www.projects.ncsu.edu; www.aquaportail.com;
www.inaturalist.org; www.revolv.com; www.michel-ehrhart.e-monsite.com;
<https://omnilogie.fr>)*

La **macrofaune** comprend les macroarthropodes (ex : fourmis, termites, myriapodes, araignées, coléoptères, larves d'insectes) et les vers de terre (Annélides Oligochètes). Ils ont une taille comprise entre 2 et 80 mm (Turbé et al., 2010), (Figure 5). Dans la classification fonctionnelle, les organismes de la macrofaune peuvent être des transformateurs de litière, des prédateurs ou encore des **ingénieurs de l'écosystème**. Les nombreuses larves d'insectes présentes dans le sol (diptères, coléoptères, lépidoptères) deviendront à maturité des transformateurs de litière ou des prédateurs (Deprince, 2003 ; Wurst et al., 2012). Les vers de terre, les fourmis et les termites sont eux définis comme des ingénieurs de l'écosystème du sol. Ces ingénieurs mettent à disposition des ressources pour les autres organismes en modifiant de manière directe ou indirecte l'environnement biotique ou abiotique (Jones et al., 1997 ; Wolters et al., 2000). Ils transforment et incorporent la matière organique dans le sol par le biais des turricules, des galeries, des termitières et des fourmilières (Lavelle & Spain, 2001 ; Bottinelli et al., 2014 ; Turbé et al., 2010). Ils modifient donc les propriétés physiques et chimiques du sol, les habitats et les ressources pour d'autres organismes, en particulier les plantes et les microorganismes du sol (Decaëns et al., 2002, Lach et al., 2009).

Myriapodes Diplopedes



Myriapodes Chilopodes



Géophile

Scolopendre

Coléoptères



Staphylinidae



Scarabaeidae



Fourmi

Ver de terre



Arachnide



Figure 5: Organismes de la macrofaune (sources: www.flickr.com; www.bourgogne-nature.fr; www.bugguide.net; www.biodiversiteantilles.blogspot.com)

6. Les services écosystémiques fournis par la biodiversité du sol

En 2005, le Millenium Ecosystem Assessment (MEA) définit les services écosystémiques comme étant les bénéfices que les hommes peuvent tirer des écosystèmes (IAD, 2011). Les services écosystémiques liés au sol sont subdivisés en plusieurs catégories (FAO, 2007 ; Turbé et al., 2010) (Figure 6). Les **services dits d’approvisionnement** sont les produits tirés des écosystèmes tels que la production forestière ou agricole, la production de matières premières (métaux, sables, pierres), de produits pharmaceutiques et de ressources génétiques. Les **services de régulation** sont les avantages tirés de la régulation des processus écosystémiques. Par exemple, les organismes du sol contribuent à la régulation des bio-agresseurs, la régulation de l’eau, la régulation de l’érosion ou de l’effet de serre. Le sol constitue un patrimoine éducatif, écotouristique et culturel de par sa richesse géologique, archéologique et les paysages qu’il engendre. Il est donc essentiel pour nombre de **services**

culturels. Pour finir, les **services de soutien** sont nécessaires pour la production de tous les autres services écosystémiques. Ils englobent la décomposition de la matière organique, le recyclage des nutriments, la production primaire, la formation des sols ou le recyclage de l'eau (FAO, 2007).

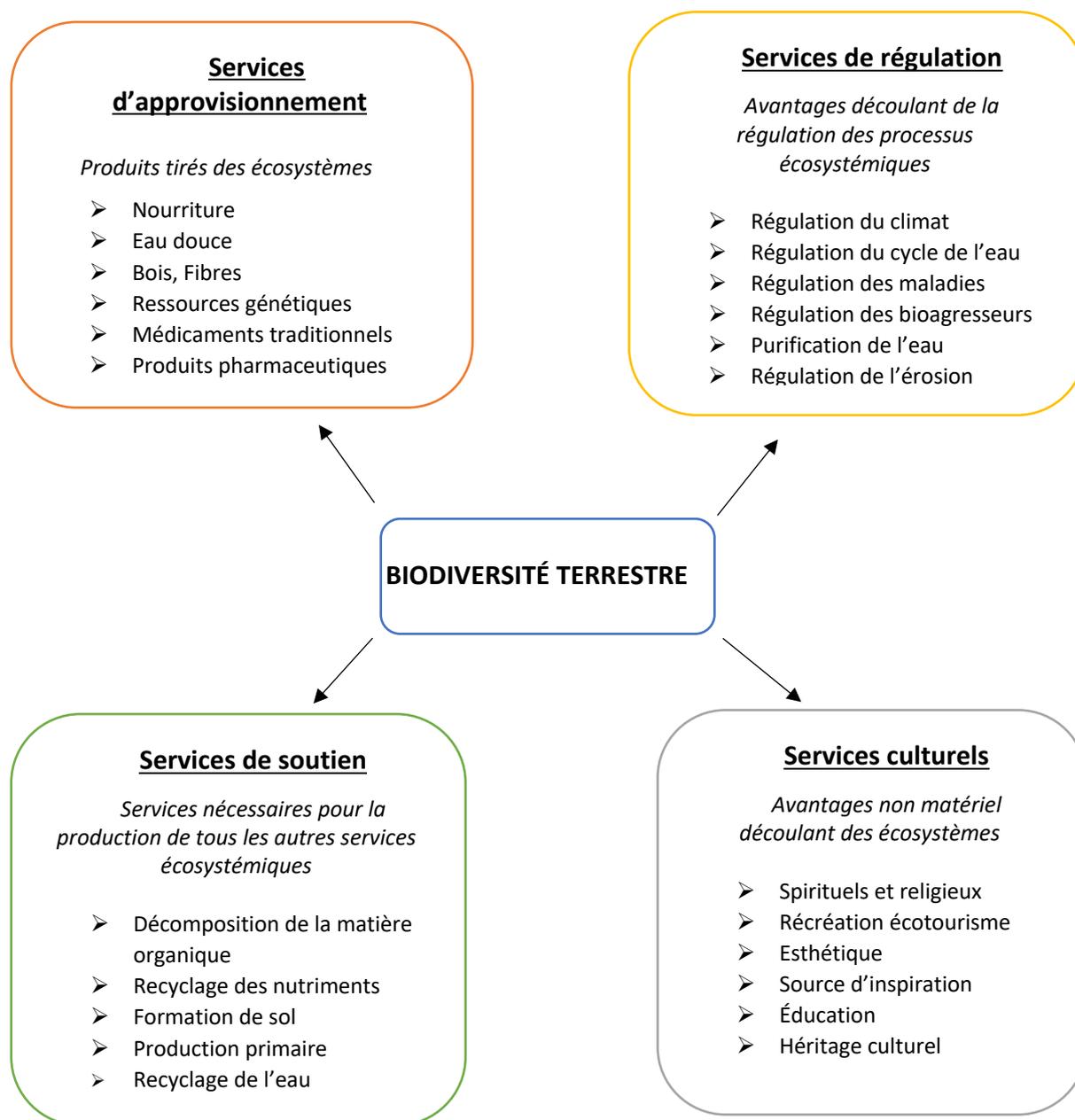


Figure 6: Biodiversité du sol et services écosystémiques (sources: FAO, 2007; Turbé et al., 2010)

Le sol, et en particulier la diversité des organismes présents, joue un rôle central dans la fourniture de ces services au niveau des écosystèmes terrestres, (Lavelle et al., 2006 ; Turbé et al., 2010).

Les **ingénieurs chimiques** sont impliqués dans les processus de décomposition et de minéralisation de la matière organique (services de soutien). Ces organismes, via le recyclage des nutriments, mettent à disposition des éléments nutritifs sous des formes plus facilement assimilables par les plantes (Turbé et al., 2010). Ils jouent un rôle dans les transformations biochimiques et la bioremédiation en accumulant des substances polluantes dans leur corps, en dégradant ces substances en molécules non toxiques, ou en modifiant le métabolisme des molécules présentes dans les substances. Les ingénieurs chimiques contribuent à la microagrégation des sols via la sécrétion de protéines qui permettent l'adhésion des particules organiques et minérales (Turbé et al., 2010).

Les **micro-prédateurs** et les **prédateurs** participent aux services de régulation. Ils jouent un rôle dans la régulation des populations de bioagresseurs (Turbé et al., 2010).

Les **transformateurs de litière** interviennent dans les services de soutien (décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments), en participant à la fragmentation et la multiplication des débris végétaux. De plus, ils affectent la production primaire en influençant la mise à disposition des nutriments pour les plantes (Filser, 2002). Ils participent aussi aux services de régulation, en réduisant ou en stimulant l'activité des communautés microbiennes présentes dans les boulettes fécales (Kibblewhite et al., 2008 ; Jeffery et al., 2013 ; Anfray, 2017).

Les **ingénieurs de l'écosystème** interviennent dans les services de soutien. En brassant les horizons, ils stimulent la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments en mettant en contact les ingénieurs chimiques et les transformateurs de litière avec les débris organiques (Godat et al., 2010). De plus, les ingénieurs de l'écosystème contribuent à la structuration et à la formation des sols par la création d'agrégats biogéniques stables (Turbé et al., 2010). Ils agissent sur la porosité et la perméabilité du sol lors de la création des galeries (Lavelle et al., 1997 ; Bertrand et al., 2015). Ils contribuent à l'infiltration et à la circulation de l'eau à travers la formation de galeries (services de régulation de l'eau). Ils participent au contrôle de l'érosion des sols via la création d'agrégats stables (Buhl et al., 2004 ; Perna et al., 2008).

III. Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce travail de thèse est de comprendre l'effet des pratiques agricoles en œuvre dans les systèmes maraîchers de Guadeloupe sur la biodiversité édaphique, les

fonctions du sol et les services écosystémiques. Cet objectif se décline en sous-objectifs qui sont traités au cours des trois chapitres de résultats de ce travail de thèse :

- Dans le **premier chapitre de résultats**, nous focalisons notre attention sur l'analyse des pratiques agricoles en production maraîchère sur l'ensemble du territoire guadeloupéen. Les objectifs sont : i) d'effectuer un bilan de la diversité des pratiques productives des agriculteurs sur la totalité du territoire et ii) de mettre en évidence l'impact de ces pratiques paysannes sur le sol et sur la fourniture de services écosystémiques. Pour ce faire, une enquête suivie d'un diagnostic agroécologique seront réalisés.
- Le **deuxième chapitre de résultats** a comme objectifs : i) d'identifier un ensemble de pratiques agroécologiques innovantes à mettre en œuvre dans un système de culture maraîcher, ii) de tester en station expérimentale les agroécosystèmes alternatifs conçus sur la base de ces pratiques et iii) d'évaluer la performance de ces systèmes agroécologiques.
- Dans le **troisième chapitre de résultats**, l'objectif principal est l'analyse de l'impact des pratiques innovantes préalablement identifiées sur la biodiversité et les fonctionnalités du sol ainsi que sur les services écosystémiques.

IV. Site d'étude

Situé dans l'arc des Petites Antilles, la Guadeloupe a une superficie de 1628 km². C'est un archipel composé de deux îles principales, la Grande-Terre et la Basse-Terre mais il regroupe aussi les îles de Marie-Galante, de la Désirade et des Saintes (Figure 7). La Grande-Terre est un plateau calcaire de faible altitude. Sa pluviométrie annuelle est comprise entre 1300 mm et 1600 mm (www.meteofrance.gp). Sa configuration géographique est propice à l'élevage et à la culture de la canne à sucre. Au relief opposé, la Basse-Terre est un massif montagneux présentant une roche mère volcanique. Cette partie de la Guadeloupe est recouverte majoritairement par une forêt tropicale très dense où la pluviométrie annuelle est comprise entre 1400 mm et 3500 mm (www.meteofrance.gp). Le climat de Guadeloupe est rythmé en grande partie par les vents des Alizés. L'archipel est marqué par deux saisons distinctes : la saison sèche, appelée le carême (Janvier à Juin) et l'hivernage correspondant à la saison des

pluies (Juillet à Décembre). La température annuelle de l'archipel est comprise entre 20,1°C et 31,9°C.



Figure 7: Carte de l'archipel guadeloupéen (source : www.reflectim.fr)

La Guadeloupe possède une diversité importante de sols, représentatifs des grandes zones tropicales. D'après Sierra & Desfontaines (2018), la formation des sols de la Guadeloupe repose sur trois critères, le type de roche mère (volcanique ou sédimentaire), la durée de la genèse et le climat. La formation des sols est un processus qui n'est pas continu dans le temps et il est assujéti aux phénomènes (éruptions volcaniques, enfouissement/soulèvements de terrains, érosion, sources hydrothermales) (Sierra & Desfontaines, 2018). Ces phénomènes créent une hétérogénéité au sein d'un même site géologique. La Guadeloupe possède donc une diversité de sols spécifique à la Basse-Terre et à la Grande-Terre (Figure 8) :

-Les ferralsols sont issus de formations volcaniques anciennes et sont situés au Nord et au Centre de la Basse-Terre. Pour ces sols, le processus de genèse s'est réalisé sur une longue période entraînant ainsi la formation d'oxyhydroxydes de fer et d'argiles. Les ferralsols sont très argileux, friables et perméables, avec un pH acide (Cabidoche, 2011a).

- Les nitisols sont assez similaires aux ferralsols mais plus jeunes et moins désaturés. Ils sont d'origine volcanique également et ont une teneur en cations (Ca, Mg et K) plus élevée que les ferralsols (Sierra & Desfontaines, 2018). Les nitisols sont caractérisés par des horizons très argileux et possèdent une bonne réserve en eau.

- Les andosols sont des sols jeunes et peu évolués. Ils se forment sur des dépôts volcaniques récents situés dans un environnement très pluvieux, comme les hauteurs du sud Basse-Terre. Les andosols se composent d'argiles à allophanes qui exercent une forte protection de la matière organique (Sierra & Desfontaines, 2018).

- La formation des vertisols dépend de l'influence du climat, subhumide durant la saison sèche ; ils se développent sur roches sédimentaires ou volcaniques. Les vertisols qui se développent sur un support volcanique sont riches en Mg et Ca et ceux dont la roche-mère est d'origine sédimentaire sont plus riches en Ca (Sierra & Desfontaines, 2018).

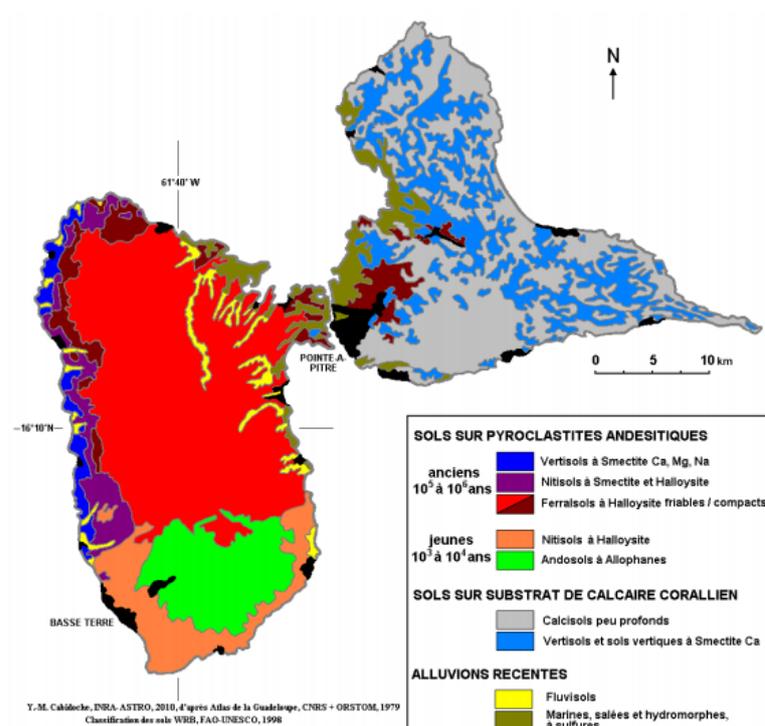


Figure 8 : Carte des sols de la Guadeloupe (source : Y.M. Cabidoche, INRA-APC, 1997, d'après Atlas de la Guadeloupe, CNRS + ORSTOM, 19790029)

La Guadeloupe constitue ainsi un laboratoire d'étude pertinent pour l'agroécologie grâce à la présence de climats contrastés et de la diversité de ses sols, représentatifs de l'ensemble des sols tropicaux.

RÉSULTATS

CHAPITRE 1 :

Pratiques agricoles dans les exploitations maraîchères guadeloupéennes

1. Introduction

Le paysage agricole de la Guadeloupe est caractérisé par la grande diversité de ses systèmes de production en lien avec l'histoire du territoire et les contraintes socioéconomiques propres au milieu tropical insulaire. Le secteur agricole représente une part primordiale de l'activité économique. En 2015, on comptabilisait 4000 emplois dans l'agriculture (INSEE, 2016) dont une majorité allouée au secteur de la banane et la canne à sucre, qui sont les principales cultures agricoles alimentant des filières d'exportation (Agreste, 2011). La filière du maraîchage en Guadeloupe représentait 28908 tonnes de produits récoltés pour 2345 hectares cultivés en 2018 (Agreste, 2019). Les principales productions maraîchères destinées à l'exportation sont *Cucumis melo* (melons) (5492 tonnes) et *Citrullus lanatus* (pastèques) (3319 tonnes). Les autres produits les plus cultivés en maraîchage sont les *Solanum lycopersicum* (tomates) (5278 tonnes), *Cucumis sativus* (concombres) (4043 tonnes), *Sechium edule* (christophines) (2327 tonnes), *Lactuca sativa* (laitues) (1905 tonnes) et *Cucurbita maxima* (giraumons) (1545 tonnes), qui sont destinés au marché local (Agreste, 2019). Cette diversité de cultures sous-entend qu'il existe une multitude de pratiques culturelles dans les systèmes maraîchers de Guadeloupe. Cependant, ces systèmes de culture sont peu étudiés, contrairement à la banane et à la canne à sucre. L'analyse préliminaire des travaux antérieurs montre qu'il existe peu de références disponibles sur les cultures maraîchères aux Antilles, notamment en Guadeloupe (Temple, 1997 ; Sierra et al., 2017). Sierra et al. (2017) font référence aux cultures maraîchères existant sur le territoire guadeloupéen mais ne mettent pas en avant les différentes pratiques agricoles appliquées dans ces systèmes maraîchers. D'autre part, aucune étude concernant l'impact des pratiques maraîchères des paysans sur les caractéristiques du sol n'a été réalisée aux Antilles. L'objectif général de ce chapitre est d'analyser la diversité des pratiques agricoles existant chez les maraîchers de Guadeloupe afin de les relier à la biodiversité et aux propriétés du sol. Pour répondre à cet objectif, une enquête sera menée sur l'ensemble du territoire, afin de caractériser dans les systèmes maraîchers guadeloupéens i) la structure des exploitations et ii) les logiques et pratiques de production (itinéraires techniques). Dans un second temps, une typologie des parcelles sera effectuée à partir de l'analyse des données de l'enquête de terrain. Enfin, sur une sélection de parcelles, un diagnostic agroécologique permettra d'évaluer, avec des données chiffrées, les impacts des performances agricoles sur l'activité du sol dans chacun des types d'exploitations identifiés. L'évolution des indicateurs des caractéristiques chimiques, structurales et biologiques des sols au sein de ces parcelles

marais en fonction des pratiques permettra d'analyser l'impact de ces dernières sur les fonctions du sol.

Lors de ce diagnostic, la qualité du sol est évaluée à l'aide des propriétés chimiques, de l'état structural du sol et de la biodiversité. Les propriétés chimiques correspondent à la capacité du sol à fournir et à stocker les éléments minéraux bénéfiques à la croissance des plantes (Velasquez et al., 2007). L'analyse des principales caractéristiques chimiques d'un sol (pH, éléments minéraux majeurs et oligo-éléments) donnent des informations sur la concentration de ces divers éléments, et donc sur la fertilité potentielle de ce sol (Larson & Pierce, 1994 ; Lavelle & Spain, 2006 ; Legout et al., 2014).

L'état structural du sol sera évalué grâce à l'analyse de la morphologie du sol qui correspond au pourcentage d'agrégats d'origine diverse (Velasquez et al., 2007). D'après Velasquez et al. (2007), la morphologie du sol permet d'évaluer les divers types d'agrégats (physique et biogénique) et d'autres composants du sol (graviers, débris de végétaux). Ces éléments affectent les propriétés hydrauliques (infiltration et stockage de l'eau), physiques et biologiques du sol. À titre d'exemple, les agrégats biogéniques sont étroitement liés à l'activité biologique du sol, notamment celle des vers de terre (Decaëns et al., 2001). Une grande proportion de ces agrégats est considérée comme un indicateur de bonne qualité du sol et d'une activité biologique élevée (Blanchart et al., 1999 ; Ponge et al., 1999 ; Topoliantz et al., 2000).

Dans le cadre de notre étude, nous nous limiterons à la caractérisation des compartiments microbiens et de la macrofaune du sol pour la caractérisation de la biodiversité. Les microorganismes du sol jouent un rôle majeur dans la décomposition de la matière organique, la production d'enzymes extracellulaires capables d'hydrolyser certaines liaisons chimiques des molécules et la mise à disposition des éléments minéraux dans le milieu (Sylvia et al., 2005 ; Lemanceau et al., 2015). L'activité de ces microorganismes est donc étroitement liée à la fertilité des sols. D'après plusieurs études, la composition et l'abondance des organismes de la macrofaune sont des indicateurs de l'intensité de l'activité biologique du sol (Lavelle, 1997; Pulleman et al., 2005; Mathieu et al., 2005 ; Therond & Duru, 2019). Ces organismes sont de plus reconnus pour avoir un effet sur les services écosystémiques, comme la structuration du sol, la régulation des bioagresseurs, la décomposition de la matière organique (Bender et al., 2016 ; El Mujtar et al., 2019). Nous testerons au cours de ce chapitre l'hypothèse que les pratiques agroécologiques utilisées par les agriculteurs maraîchers

conservent ou renforcent la biodiversité édaphique et la qualité du sol. Cette partie de l'étude a fait l'objet d'une première publication (Annexe 12).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Enquête de terrain

Une enquête de terrain a été conduite sur l'ensemble du territoire guadeloupéen de septembre à novembre 2016, afin de mettre en évidence la diversité des systèmes de culture maraîchers présents au sein de ce territoire (tableau 1). Durant cette période, 49 exploitations ont été enquêtées aléatoirement : 21 en Grande-Terre et 28 en Basse-Terre. Ces exploitations ont une activité consacrée partiellement ou totalement à l'agriculture maraîchère. Les enquêtes ont été réalisées sous forme d'entretien semi-directif. L'entretien semi-directif s'appuie sur un guide d'entretien qui contient un ensemble de thèmes à aborder au cours de l'entretien (Desanti & Cardon, 2007). À l'intérieur de chaque thème, l'enquêté est libre de ses réponses (Fenneteau, 2015). Néanmoins l'enquêteur peut formuler des questions afin d'approfondir certaines réponses (Duchesne, 2000). Les entretiens ont duré entre 15 à 25 minutes, et ont été menés par deux personnes.

Tableau 1 : Synthèse du questionnaire d'enquête mené auprès des agriculteurs maraîchers de Guadeloupe.

1. Identification de l'exploitant	Nom, Prénom, Localisation
2. Structure et description de l'exploitation	Affiliation (organisation professionnelle) Année d'installation Surface agricole Historique de l'exploitation Cultures présentes
3. Structure et description de la parcelle maraîchère sélectionnée	Type de culture Surface de la parcelle maraîchère Age de la culture Type de sol
3.1. Cultures (type et/ou fréquence)	Culture précédente, actuelle et suivante Système d'irrigation

	Type de travail du sol effectué Produits phytosanitaires utilisés
3.2. Apport à la culture actuelle (type/fréquence/ apport annuel)	Chaulage Matière organique Engrais chimiques Autres apports
3.3. Flux des résidus de la culture actuelle	Devenir des résidus Paillage Brûlis
4. Questions diverses	1. Connaissance du plan Écophyto 2. Dans quelle catégorie les agriculteurs situent leurs pratiques agricoles 3. Les innovations réalisées par l'agriculteur 4. Les contraintes de ces innovations

Au cours de cette enquête de terrain, une observation rapide de l'activité des organismes du sol a été également réalisée en comptant le nombre de nids de fourmis et de turricules de vers de terre présents. Cette observation a été effectuée dans 5 quadras d'une surface de 1 m² répartis dans la parcelle maraîchère sélectionnée. Un indicateur de diversité a été calculé pour chaque parcelle en additionnant le nombre de nids de fourmis et le nombre de turricules des 5 quadras.

2.2. Sélection de parcelles maraîchères sur vertisol

Un premier traitement statistique sur l'ensemble des données provenant des enquêtes de terrain a été effectué (Annexe 1). Il avait pour objectif de classer les agriculteurs maraîchers en fonction de leurs pratiques. Face à la diversité des pratiques agricoles dans les systèmes de culture maraîchers existant en Guadeloupe, l'obtention d'une typologie à partir de l'ensemble des données n'a pu être réalisée. Une autre méthodologie a été mise en place afin de pouvoir traiter ces données.

Dans un premier temps, une analyse a été faite sur les 49 exploitations enquêtées, en comparant les pratiques agricoles des agriculteurs maraîchers de la Basse-Terre à ceux de la Grande-Terre. Dans un second temps, une sélection de 18 parcelles, localisées sur vertisol en Grande-Terre, a été analysée de façon plus approfondie. Ce choix a été guidé par plusieurs

critères. Tout d'abord, il est à noter que depuis les années 1970, la construction des réseaux d'irrigation en Grande-Terre a contribué à la diversification des productions maraîchères (SAFER-MICA, 2001). La Grande-Terre occupe ainsi la plus grande surface agricole utile (SAU) de la Guadeloupe en maraîchage, soient 1025 ha cultivés (Dubuc, 2004). Le volume de production maraîchère est plus important en Grande-Terre (54%) qu'en Basse-Terre (46%) (Agreste, 2017). Ensuite, il nous a paru également essentiel de nous positionner dans des conditions pédoclimatiques proches d'où le choix d'un seul type de sol, le vertisol calcimagnésien présent en Grande-Terre. Ces sols sont calciques, stables physiquement (Blanchart et al., 2000) et ont une haute fertilité minérale (Guillaume & Cabidoche, 1999, Cabidoche et al., 2004).

Pour la réalisation de ces analyses sur vertisol, 8 paramètres ont été sélectionnés à partir des informations collectées lors de l'enquête de terrain. Les paramètres sélectionnés représentent les pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle maraîchère qui ont un impact potentiel sur la biodiversité de sol (tableau 2).

Tableau 2: Paramètres sélectionnés pour les analyses sur vertisol

Paramètres	Niveaux
1. Labour	1.1. Superficiel (0-20cm) 1.2. Profond (>20cm)
2. Traitements insecticides ou antifongiques	2.1. Traitements chimiques - insecticides : Decis Protech® (molécule active : deltaméthrine), Karate Zéon® (molécule active : lambda-cyhalotrin), Vermitec® (molécule active : abamectine), - fongicides : Dithane Neotec® (molécule active : mancozèbe), Octiva® (molécule active : azoxystrobine) 2.2. Traitements biologiques - insecticides et acaricides : Oviphyt® (substance active : huile de paraffine) - fongicides : Bouillie bordelaise (substance active : cuivre et chaux) - insecticides et fongicides : Savon noir (substance active : sels potassiques et huile végétale d'olive ou de lin), Purin de Neem (Azadirachta indica) (fermentation végétale) - insecticides : Dipel DF® (substance active : Bacillus thuringiensis) 2.3. Absence de traitement
3. Herbicides	3.1. Intensif (≥ 3 apports d'herbicides chimiques/cycle) 3.2. Moyen (2 apports/cycle) 3.3. Occasionnel (1 apport/cycle)
4. Désherbage physique	4.1. Mécanique (Romplow, Griffage, Gyrobroyeur, Pulvérisateur) 4.2. Manuel
5. Fertilisation	5.1. Fertilisants de synthèse : engrais NPK, Phosphate diammonique (DAP), Phosphate monoammonique (MAP) 5.2. Matière organique : Fumier (bovin, cheval, poule), Matière végétale (bananier, bois, bagasse, jachère) 5.3. Mixte : fertilisants de synthèse et matière organique 5.4. Aucun apport
6. Paillage	6.1. Présence de paillage 6.2. Absence de paillage
7. Gestion des résidus	7.1. Incorporés au sol 7.2. Laissés à la surface du sol 7.3. Exportés de la parcelle
8. Indicateur de l'activité biologique de surface (nombre total de nids de fourmis et de turricules/parcelle)	8.1. Importante > 90 8.2. Moyenne : 30-90 8.3. Faible : 1-30 8.4. Pas d'activité observée : 0

2.3. Diagnostic agroécologique

Un diagnostic agroécologique a ensuite été réalisé sur les 18 parcelles sélectionnées sur vertisol, au moment de leur mise en place (après labour, T0) et 18 mois après leur mise en place (T18). Ce diagnostic a été centré sur les propriétés chimiques, l'état structural et la biodiversité du sol. En parallèle, durant 18 mois, un suivi téléphonique régulier a été effectué avec les agriculteurs pour savoir quelles interventions avaient été effectuées durant le cycle de culture (traitement, apport de fertilisants ou de matière organique, désherbage...). Une visite in situ, chez chacun des agriculteurs, a également été effectuée pour compléter ce suivi.

2.3.1. Échantillonnage du sol

Deux prélèvements ont été réalisés dans les 18 parcelles agricoles sur vertisol. Un premier prélèvement après le labour des parcelles, entre Décembre 2016 et Janvier 2017, qui marque le début du suivi des parcelles (T0), et un autre prélèvement qui a été effectué 18 mois après la mise en place (T18), à la fin d'un cycle de récolte (Mai-Juin 2018). Afin d'éviter tout effet de bordure, l'ensemble des prélèvements a été effectué à l'intérieur des parcelles de maraîchage, de 1 à 2 mètres de distance des bordures. De plus, une distance de 20 mètres entre les 5 points de prélèvement a été respectée (Figure 9).

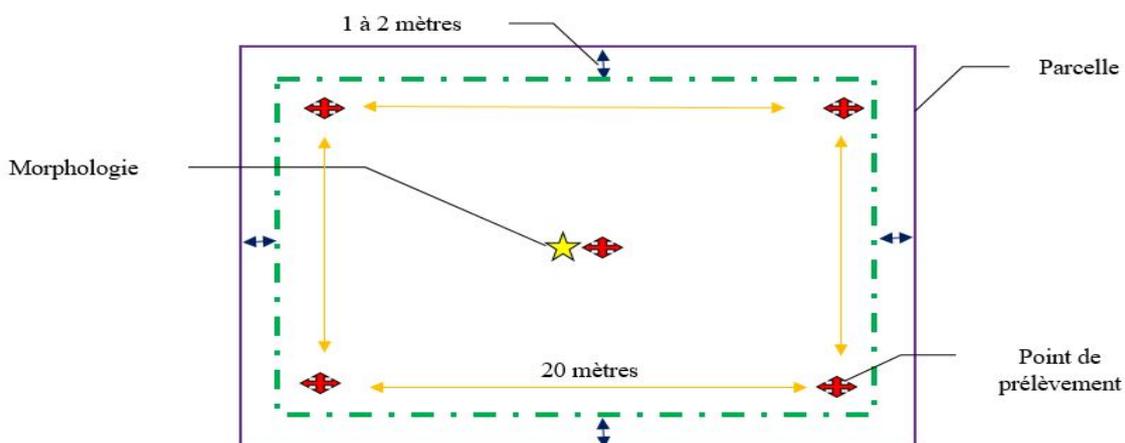


Figure 9: Prélèvements de sol sur une parcelle maraîchère

2.3.2. Macrofaune du sol

Dans chaque parcelle, 5 prélèvements de sol ont été effectués à l'aide d'un cadre métallique de dimension 25 × 25 × 20cm en utilisant la méthode ISO 23611-S (ISO, 2011). Le sol a été trié manuellement pour récupérer la macrofaune (45 échantillons) (Figure 10). La

macrofaune collectée a été conservée dans des flacons, contenant de l'alcool à 80°C. Par la suite, les invertébrés ont été identifiés à la morphospèce puis classés selon leurs groupes fonctionnels au laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire.



Figure 10: Échantillonnage de la macrofaune dans les parcelles agricoles (méthode ISO 23611-S)

2.3.3. Mesure de l'activité microbienne du sol

À chaque point de prélèvement de la macrofaune, le sol a été mélangé délicatement afin d'obtenir un échantillon homogène, puis conservé à 4°C jusqu'à analyse. 100 g de sol ont été prélevés à chaque point afin d'effectuer les mesures de l'activité microbienne totale du sol à l'aide du dosage de la Fluorescéine diacétate hydrolase (Schnürer & Rosswall, 1982). Tout d'abord, le diacétate de fluorescéine est dégradé par une réaction d'hydrolyse, qui a lieu sous l'action de diverses hydrolases non spécifiques (protéases, lipases et estérases). Par la suite, le diacétate de fluorescéine (incolore) libère de la fluorescéine qui peut être mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 490 nm. L'activité microbienne totale du sol est exprimée en microgrammes de fluorescéine libérée par gramme de sol et par heure ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$).

2.3.4. Propriétés chimiques du sol

Comme précédemment, à chaque point de prélèvement de la macrofaune, le sol a été mélangé délicatement afin d'obtenir un échantillon homogène. 200g de sol ont été prélevés à chaque point pour effectuer les analyses chimiques. Les $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ et pH_{KCl} ont été déterminés sur du sol sec tamisé à 2 mm, à l'aide d'un pH mètre (NF ISO 1770, 3696 et 11464). Les autres analyses de sol ont été réalisées par un organisme accrédité, la SADEF. La détermination de la teneur en N total a été faite par la méthode DUMAS (NF ISO 13 878), la teneur en C total par la technique répondant à la norme NF ISO 10 694, et le rapport C/N par la technique répondant à la norme NF ISO 13 878. Le P total et le K total ont été mesurés par dosage ICP-MS (NF EN

ISO 17294 et NFX 31-147). La CEC a été déterminée par la méthode interne IF07-10D (NFX 31-130). Le P assimilable a été mesuré par la méthode Olsen modifiée Dabin. Finalement, la teneur en cations échangeables a été déterminée par dosage ICP AES (NFX 31-108).

2.3.5. État structural du sol

L'étude de l'état structural du sol a été réalisée à l'aide de l'analyse de la morphologie des agrégats (Velasquez et al., 2007). Au centre de chaque parcelle, un prélèvement de sol a été fait à l'aide d'un cylindre de 8 cm de diamètre et 8.5 cm de hauteur. Dans chaque prélèvement, divers éléments ont été identifiés au laboratoire, séchés puis pesés :

- Les agrégats biogéniques de forme arrondie, créés par les macro-invertébrés, dont les vers de terre ;
- Les agrégats physiques de forme anguleuse, produits par les processus physiques du sol (notamment alternance des périodes sèches et humides) ;
- Les débris végétaux regroupant racines, feuilles, fragments de tiges, graines et morceaux de bois ;
- Les cailloux et les éléments divers (matière végétale, faune et débris de matériaux agricoles).

2.3.6. Analyses des données

Dans un premier temps, les données récoltées pendant la phase d'enquête ont été analysées en comparant les pratiques des agriculteurs en Basse-Terre et en Grande-Terre. Cette analyse a permis d'obtenir une image globale des pratiques existant en maraîchage sur le territoire guadeloupéen.

Dans un second temps, une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été réalisées sur 18 exploitations agricoles maraîchères sélectionnées sur vertisol (Duby & Robin, 2006 ; Chessel et al., 2010). Pour la CAH, la distance de similarité de Gower a été utilisée pour déterminer dans quelle mesure deux individus étaient semblables. L'indice de Gower varie entre 0 et 1. Si l'indice vaut 1, les deux individus sont identiques. À l'opposé, s'il vaut 0, les deux individus considérés n'ont pas de points communs (Chessel et al., 2010). À l'issue de la CAH, un diagramme arborescent a été obtenu en regroupant les parcelles d'agriculteurs ayant des pratiques similaires. Une typologie a été réalisée à partir de ces analyses. Enfin, des tests non-paramétriques t-test Welch ont été effectués afin de comparer les caractéristiques biologiques, chimiques et structurales des

différents types de parcelles maraîchères suivies lors du diagnostic agroécologique. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio.

3. Résultats

3.1. Enquête de terrain

Le premier objectif de cette enquête était d'identifier les différentes cultures maraîchères présentes sur le territoire guadeloupéen. L'enquête montre que certaines cultures sont retrouvées communément dans les deux parties de l'île : tomates, aubergines et piments (Solanacées), laitues (Astéracées), et courgettes (Cucurbitacées). D'autres cultures sont observées préférentiellement en Basse-Terre : giraumon (Cucurbitacées), chou (Brassicacées), gombos (Malvacées), et cives (Amaryllidacées). Les cultures de melon (Cucurbitacées) sont, elles, principalement observées en Grande-Terre (Figures 11 et 12). De plus, nos résultats indiquent qu'en Basse-Terre, les cultures maraîchères sont plus diversifiées en termes d'espèces végétales, soit 15 espèces cultivées en Grande-Terre contre 24 en Basse-Terre. Dans notre étude, la présence de cultures associées a été observée à la fois en Basse-Terre et en Grande-Terre (25% en Basse-Terre et 14% en Grande-Terre). Nos résultats montrent que 21% des agriculteurs guadeloupéens ont recours à l'association de plantes maraîchères au sein d'une même parcelle. La jachère (état temporaire de repos de certaines parcelles maraîchères durant la période des pluies) est une pratique présente dans les deux parties de l'île. Elle représente 29% des parcelles enquêtées en Grande-Terre et 14% en Basse-Terre.

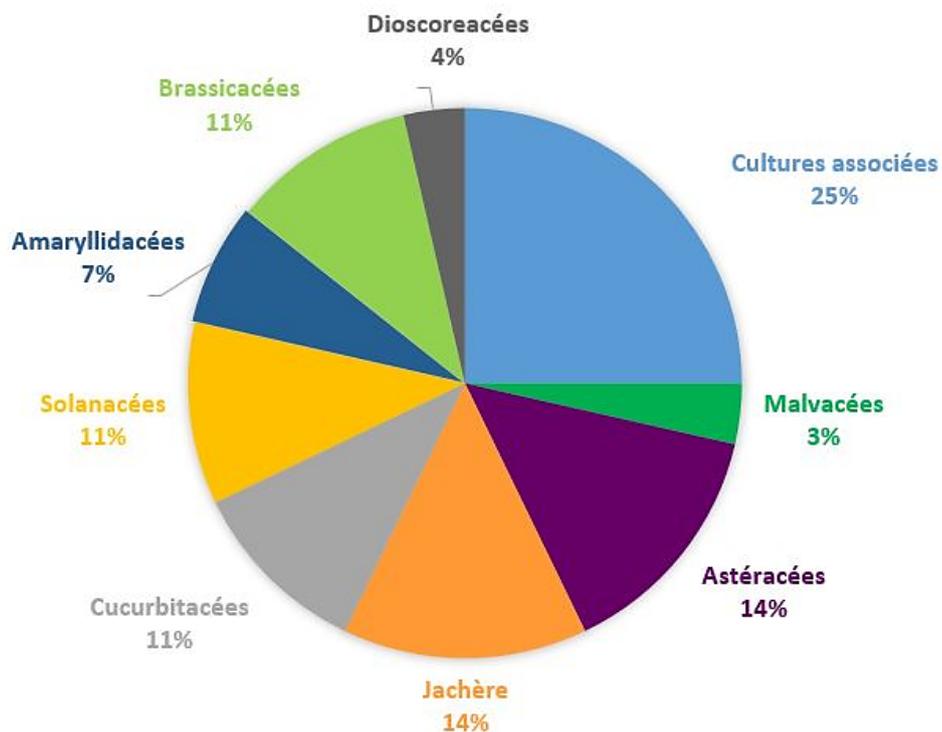


Figure 11 : Utilisation des sols dans 28 parcelles maraîchères de Basse-Terre

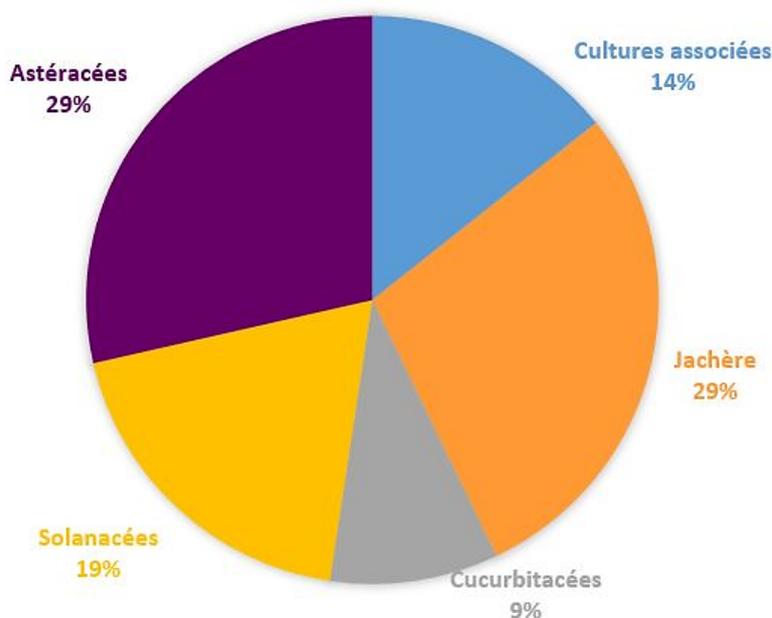


Figure 12 : Utilisation des sols dans 21 parcelles maraîchères de Grande-Terre

Nos résultats d'enquête montrent qu'en Basse-Terre, les agriculteurs implantent des cultures maraîchères sur différents types de sol. Les produits maraîchers sont cultivés sur nitisol (50%), andosol (25%), ferralsol (18%) et vertisol (7%). En revanche, en Grande-Terre, les cultures maraîchères sont majoritairement cultivées sur vertisol (76%) et sur ferralsol (24%). Le travail du sol est généralement réalisé par un labour des parcelles, qui peut être

superficiel ou profond. En Basse-Terre, 71% des agriculteurs enquêtés pratiquent le labour superficiel contre 29% un labour profond. La tendance s'inverse en Grande-Terre, où les agriculteurs optent pour un labour majoritairement profond (76% en labour profond et 24% en labour superficiel).

Les agriculteurs maraîchers utilisent une multiplicité de pratiques contre les bioagresseurs. La majorité des producteurs ont recours à la lutte chimique (tableau 2, §Matériels et Méthodes). Les insecticides utilisés sont variés : Décis Protech[®], Karate Zeon[®], et Vermitec[®] qui est un insecticide/acaricide. Les agriculteurs utilisent également des fongicides de type Dithane Neotec[®] et Ortiva[®]. 46% des agriculteurs ont déclaré avoir recours à la lutte chimique en Basse-Terre contre 67% en Grande-Terre. D'autres agriculteurs pratiquent la lutte biologique (32% en Basse-Terre contre 14% en Grande-Terre) en utilisant des produits de biocontrôle, comme le Savon noir qui est un fongicide/insecticide, et la Bouillie bordelaise qui est un fongicide. Les agriculteurs utilisent également des produits qui ont un double effet. Nous pouvons citer à titre d'exemple, Oviphyt[®] qui est un insecticide/acaricide, et le Purin de Neem un insecticide/fongicide. Certains producteurs déclarent n'avoir recours à aucun traitement, ni chimique ni biologique (22% en Basse-Terre et 19% en Grande-Terre).

Les fertilisants sous diverses formes sont apportés dans les parcelles maraîchères, afin de stimuler le développement des plantes en culture. Nous notons que 11% des producteurs maraîchers de Basse-Terre ont déclaré avoir recours aux fertilisants de synthèse contre 33% en Grande-Terre. 24% des exploitations maraîchères en Basse-Terre et 25% en Grande-Terre utilisent des fertilisants organiques. Une partie des exploitants agricoles (55% en Basse-Terre et 32% en Grande-Terre) applique un mélange de matière organique et de fertilisants de synthèse dans leurs parcelles maraîchères. Les autres agriculteurs (10% en Basse-Terre et en Grande-Terre) ont stipulé qu'ils n'apportaient aucun fertilisant.

Le devenir des résidus de culture en fin de cycle varie selon l'agriculteur. Les exploitants interrogés laissent majoritairement les résidus de culture à la surface de la parcelle (68% en Basse-Terre et 52% en Grande-Terre). D'autres agriculteurs, en revanche, enfouissent les résidus dans le sol (14% en Basse-Terre et 19% en Grande-Terre) ou les exportent hors des parcelles pour servir de nourriture à leurs animaux de pâture (18% en Basse-Terre et 29% en Grande-Terre).

Enfin, l'activité des organismes du sol a été rapidement mesurée à travers l'évaluation de la présence de nids de fourmis et de turricules de vers de terre. 44 % des parcelles ont une activité biologique moyenne (de 30 à 90 nids de fourmis et de turricules par parcelle), 22% ont

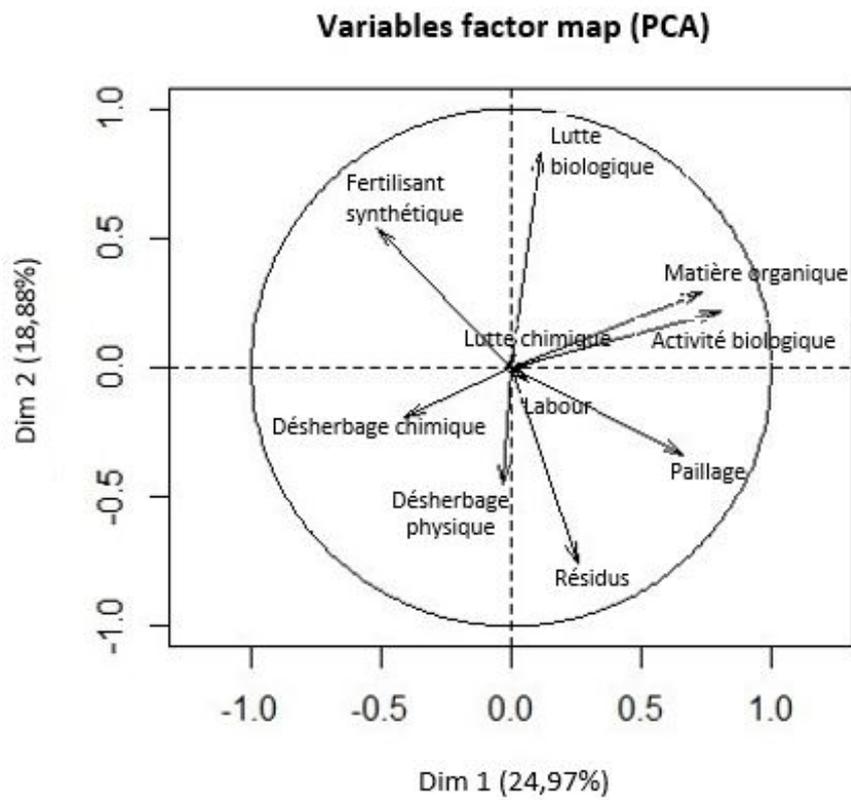
une activité biologique dense (supérieur à 90 nids de fourmis et de turricules par parcelle) et 18% ont une activité biologique faible (de 1 à 30 nids de fourmis et de turricules par parcelle). Dans 14% des parcelles aucune activité biologique n'a été observée.

L'enquête a permis de faire un état des lieux des systèmes agricoles maraîchers existant sur l'ensemble du territoire guadeloupéen. L'analyse plus approfondie des données d'enquêtes sur les parcelles sélectionnées sur vertisol permet dans la seconde partie d'étudier les corrélations entre pratiques agricoles et caractéristiques du sol.

3.2. Analyse des parcelles sélectionnées sur vertisol

Sur l'ensemble des 49 exploitations enquêtées, 18 parcelles localisées en Grande-Terre sur vertisol ont été retenues pour effectuer une analyse plus poussée qui permet d'aboutir à une typologie des systèmes de cultures maraîchers présents en Grande-Terre. Les deux premiers axes de l'ACP permettent d'expliquer près de 44% de la variation des données (Figure 13). Les résultats de l'ACP indiquent que l'axe F1 est positivement corrélé à l'apport de matière organique et à l'activité biologique observée (Figure 13a). À l'opposé, l'axe F1 a une corrélation négative avec les pratiques telles le désherbage chimique et l'apport de fertilisants de synthèse. L'axe F2 oppose les parcelles ayant recours à l'utilisation de produits phytosanitaires autorisés en Agriculture biologique et à l'apport de matière organique, avec celles qui ont recours à un désherbage mécanique. D'après ces premiers résultats, nous pouvons distinguer deux types d'exploitations agricoles. À première vue, les exploitants agricoles situés à gauche de la Figure 13b auraient plus recours à des pratiques issues de l'agriculture conventionnelle (fertilisation chimique, apport d'herbicides). À droite de la Figure 13b, les exploitations auraient tendance à recourir à des pratiques plus respectueuses de l'environnement (apport de matière organique, paillage).

a)



b)

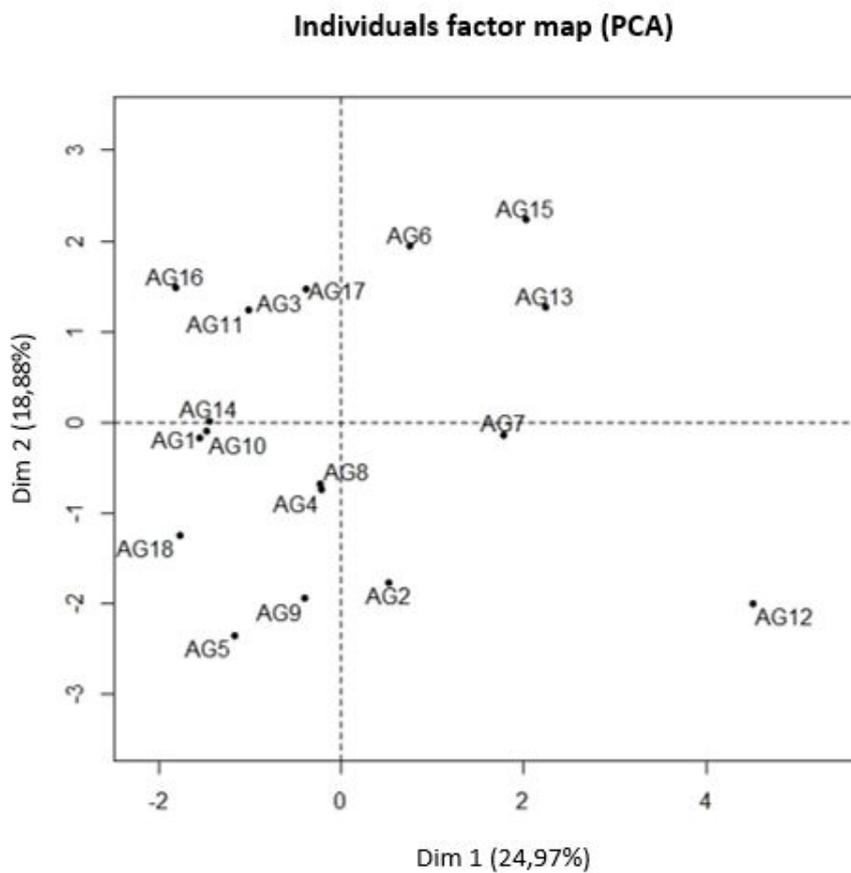


Figure 13 : (a) Projection des variables de l'analyse en composantes principales (ACP) des parcelles maraîchères de Grande-Terre sur vertisol, (b) Projection des exploitations agricoles maraîchères de Grande-Terre sur vertisol, faite à partir de l'ACP.

Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur le même jeu de données que l'ACP, afin de compléter l'analyse. Les résultats de la CAH (Figure 14) confirment l'existence de deux grands groupes d'agriculteurs. Le groupe 1 est constitué de 12 agriculteurs et le groupe 2 est composé de 6 agriculteurs. L'analyse des données issues de l'enquête a permis de caractériser les pratiques communes à chacun des deux groupes d'agriculteurs maraîchers sur vertisol (tableau 3).

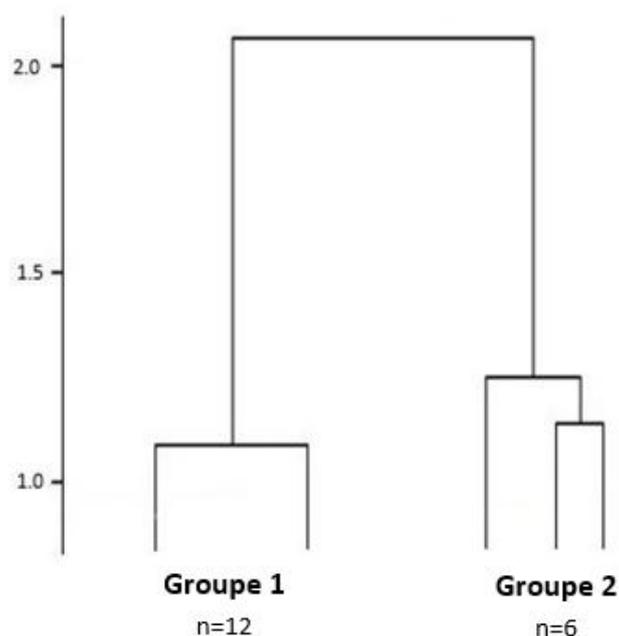


Figure 14 : Dendrogramme obtenu par la classification hiérarchique (CAH) des parcelles maraîchères de Grande-Terre sur vertisol.

Tableau 3: Caractéristiques des 18 parcelles maraîchères sélectionnées en Grande-Terre (Guadeloupe) réparties en deux groupes (analyse approfondie des résultats d'enquêtes).

Caractéristiques des groupes	Descriptif des pratiques agricoles
Groupe 1	<ul style="list-style-type: none"> • Lutte chimique contre les bioagresseurs, • Désherbage chimique intensif, • Application de fertilisants de synthèse, • Absence de paillage, • Exportation des résidus de culture.
Groupe 2	<ul style="list-style-type: none"> • Lutte biologique et chimique contre les bioagresseurs, • Désherbage chimique modéré à faible, • Application de matière organique et/ou mixte (synthèse et matière organique) • Paillage (matière végétale ou plastique), • Résidus de culture incorporés au sol ou laissés en surface.

Ces résultats confirment les premiers constats de l'ACP, deux groupes d'agriculteurs se distinguent. Le groupe 1 représente les agriculteurs ayant des pratiques conventionnelles et le groupe 2 correspond aux agriculteurs ayant des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Selon leurs caractéristiques, les parcelles du groupe 2 se rapprochent des pratiques agroécologiques (tableau 3). De ce fait, l'appellation « groupe 2 » sera remplacée par « parcelles agroécologiques » ou « agroécologie » dans la suite de l'étude. Il en est de même pour le « groupe 1 » qui est renommé « parcelles conventionnelles » ou « conventionnel ». À partir de cette typologie, un diagnostic agroécologique a été effectué sur les deux catégories de parcelles, afin de collecter des données chiffrées et d'analyser l'effet des pratiques agricoles sur les caractéristiques du sol.

3.3. Diagnostic agroécologique sur vertisol

Au sein des exploitations agricoles maraîchères, des parcelles ont été identifiées comme les parcelles référentes pour le suivi et le diagnostic agroécologique. Sur ces parcelles, les

agriculteurs s'engagent à faire du maraîchage pendant 18 mois et à suivre les pratiques culturales identifiées lors de l'enquête. Tous les agriculteurs pratiquent le labour profond au début de la mise en culture de la parcelle et c'est ce qui marque le début du suivi.

3.3.1. Macrofaune

Au début du suivi (après labour des parcelles), aucune différence significative n'est observée entre les parcelles pour ce qui concerne le groupe des prédateurs et des ingénieurs de l'écosystème ainsi que l'abondance totale de la macrofaune (tableau 4). Toutefois, il y a significativement plus de transformateurs de litière dans les parcelles agroécologiques que dans les parcelles conventionnelles (tableau 4).

Tableau 4: Densités moyennes (\pm SE) des groupes fonctionnels de macrofaune au début du suivi (T0) dans 18 parcelles maraîchères conventionnelles et agroécologiques localisées en Grande-Terre sur vertisol (Guadeloupe).

Densité moyenne (nombre d'individu par m ²)	Parcelles conventionnelles	Parcelles agroécologiques	p-value
Ingénieurs de l'écosystème	116 \pm 41	432 \pm 229	p=0,21
Transformateurs de litière	30 \pm 10	72 \pm 18	p=0,02
Prédateurs	24 \pm 6	49 \pm 17	p=0,15
Abondance totale	171 \pm 52	554 \pm 239	p=0,13

Dix-huit mois après la mise en place des systèmes de culture, les densités de macrofaune du sol ne sont pas significativement différentes entre les parcelles conventionnelles et agroécologiques (tableau 5). Néanmoins, nos résultats montrent que la macrofaune du sol a recolonisé les parcelles maraîchères après dix-huit mois de culture. On passe de 171 \pm 52 individus.m⁻² (T0) à 1860 \pm 512 individus.m⁻² (T18) dans les parcelles conventionnelles et de 554 \pm 239 individus.m⁻² (T0) à 2083 \pm 788 individus.m⁻² (T18) dans les parcelles agroécologiques. La forte abondance des ingénieurs de l'écosystème à dix-huit mois est notamment due à la forte quantité de fourmis présentes dans les parcelles conventionnelles (1511 \pm 495 individus.m⁻²) et agroécologiques (1783 \pm 800 individus.m⁻²).

Tableau 5 : Densités moyennes (\pm SE) des groupes fonctionnels de macrofaune au bout de dix-huit mois (T18) dans 18 parcelles maraîchères conventionnelles et agroécologiques localisées en Grande-Terre sur vertisol (Guadeloupe).

Densité moyenne (nombre d'individu en m ²)	Parcelles conventionnelles	Parcelles agroécologiques	p-value
Ingénieurs de l'écosystème	1533 \pm 469	1806 \pm 802	p=0,77
Transformateurs de litière	180 \pm 39	88 \pm 27	p=0,06
Prédateurs	147 \pm 31	189 \pm 63	p=0,56
Abondance totale	1860 \pm 512	2083 \pm 788	p=0,81

3.3.2. Activité microbienne totale

Initialement, l'activité microbienne totale du sol est significativement différente entre les deux types de parcelles maraîchères ($p=0,008$). Elle est de $32,26\pm 3,58$ μg de fluorescéine. g^{-1} . h^{-1} pour les parcelles agroécologiques et $17,76\pm 1,32$ μg de fluorescéine g^{-1} . h^{-1} pour les parcelles conventionnelles. Dix-huit mois après la mise en place des systèmes, l'activité microbienne totale du sol est $29\pm 2,67$ μg fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour les parcelles agroécologiques et $19,65\pm 1,76$ μg fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour les parcelles conventionnelles. Tout comme à l'état initial, il y a une différence significative entre les deux types de parcelles ($p=0,003$).

3.3.3. Propriétés chimiques du sol

Au début du suivi, la composition chimique du sol n'est pas significativement différente entre les deux types de parcelles maraîchères, excepté pour le P qui est plus important dans les parcelles conventionnelles (tableau 6).

Tableau 6 : Analyses chimiques du sol (moyennes \pm SE) dans 18 parcelles maraîchères conventionnelles et agroécologiques localisées en Grande-Terre sur vertisol (Guadeloupe), à T0 (au début du suivi). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes (test de Welch).

	Parcelles conventionnelles	Parcelles agroécologiques	p-value
pH _{H2O}	7,73 \pm 0,10 (a)	7,33 \pm 0,25 (a)	0,14
pH _{KCl}	6,93 \pm 0,14 (a)	6,63 \pm 0,26 (a)	0,32
N _{total} (‰)	2,54 \pm 0,23 (a)	2,89 \pm 0,21 (a)	0,25
C _{total} (‰)	45,82 \pm 6,22 (a)	45,92 \pm 5,38 (a)	0,99
C/N	16,4 \pm 1,33 (a)	15,35 \pm 0,96 (a)	0,52
K _{total} (‰)	4,63 \pm 0,47 (a)	3,82 \pm 0,51 (a)	0,25
P _{total} (‰)	0,84 \pm 0,05(a)	0,53 \pm 0,06 (b)	<0,001
CEC (me/Kg)	417 \pm 21 (a)	385 \pm 24 (a)	0,31

Dix-huit mois après la mise en place des parcelles par les agriculteurs, il y a des différences significatives entre les deux parcelles. Les teneurs en N et C sont plus élevées dans les parcelles agroécologiques. Le pH_{H2O} et la teneur en P total sont plus élevées dans les parcelles conventionnelles (tableau 7).

Tableau 7 : Analyses chimiques du sol (moyennes \pm SE) dans 18 parcelles maraîchères conventionnelles et agroécologiques localisées en Grande-Terre sur du vertisol (Guadeloupe), à T18 (à la fin du suivi). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes (test de Welch).

	Parcelles conventionnelles	Parcelles agroécologiques	p-value
pH _{H2O}	7,87 \pm 0,06 (a)	7,19 \pm 0,27 (b)	0,02
pH _{KC1}	7,1 \pm 0,11 (a)	7,65 \pm 0,27 (a)	0,13
N _{total} (‰)	2,49 \pm 0,19 (a)	3,27 \pm 0,22 (b)	0,01
C _{total} (‰)	26,2 \pm 1,73 (a)	37,47 \pm 2,26 (b)	0,003
C/N	10,85 \pm 0,25 (a)	11,61 \pm 0,31 (a)	0,06
K _{total} (‰)	1,11 \pm 0,08 (a)	0,65 \pm 0,07 (a)	0,38
P _{total} (‰)	4,94 \pm 0,57(a)	4,24 \pm 0,57 (b)	<0,001
CEC (me/Kg)	463 \pm 26 (a)	440 \pm 26 (a)	0,53

3.3.4. État structural du sol

Initialement, il n'y a pas de différence significative entre les deux types de parcelles concernant l'état structural du sol. Nos résultats montrent que les valeurs pour les agrégats biogéniques sont de 24% pour les parcelles conventionnelles et 17% pour les parcelles agroécologiques (p-value= 0,47). Pour les agrégats physiques, les valeurs sont de 22% pour les parcelles conventionnelles et de 18% pour les parcelles agroécologiques (p-value=0,79). Les valeurs du sol non agrégé sont de 52% pour les parcelles agroécologiques et de 43% pour les parcelles conventionnelles (p-value=0,52).

Après dix-huit mois de culture, il n'y a pas de différence significative entre les pratiques conventionnelles et agroécologiques concernant l'état structural du sol (Figure 15). Les valeurs du sol non agrégé sont de 38% pour les parcelles conventionnelles et de 37% pour les parcelles agroécologiques (p-value=0,46). Toutefois, nos résultats ont mis en évidence une augmentation du taux d'agrégats physiques (36% en parcelles conventionnelles et 42% en parcelles agroécologiques (p=0,83) et une diminution du taux d'agrégats biogéniques (8% en parcelles conventionnelles et 7% en parcelles agroécologiques) (p= 0,91) après dix-huit mois de culture dans les deux types de parcelles maraîchères.

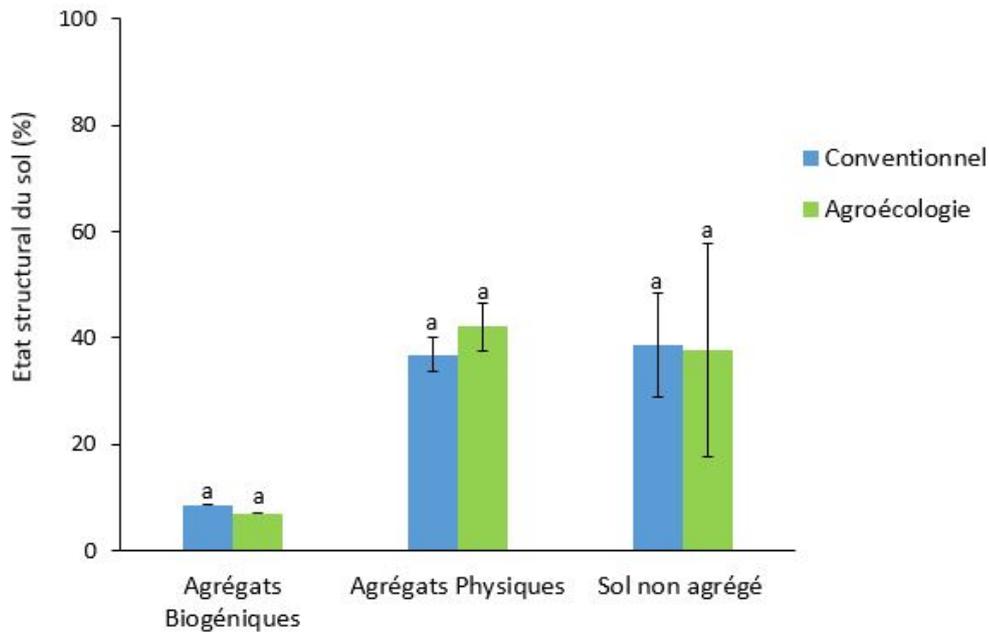


Figure 15 : État structural du sol dans 18 parcelles conventionnelles et agroécologiques sur vertisol en Grande-Terre (Guadeloupe), 18 mois après leur mise en place (à la fin de suivi). Les lettres différentes représentent des valeurs significativement différentes (test de Welch). Les barres représentent les erreurs standards

4. Discussion

4.1. Les pratiques agricoles des maraîchers guadeloupéens

Les données collectées à l'issue de l'enquête ont permis d'identifier les différentes cultures maraîchères exploitées sur le territoire guadeloupéen. En 2016, parallèlement à notre enquête une étude a montré que la production maraîchère guadeloupéenne se composait principalement de : melons (6020 tonnes), tomates (5061 tonnes), laitues (1766 tonnes) et giraumons (1546 tonnes) (Agreste, 2018). Les résultats de notre enquête sont assez conformes à cette étude. Toutefois, les rapports annuels réalisés sur les productions agricoles de Guadeloupe, par la Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF), ne tiennent pas compte des différences existant entre Grande-Terre et Basse-Terre pour les types de cultures. C'est donc une précision que nous apporte l'actuelle enquête. Nos résultats montrent qu'en Basse-Terre, les cultures maraîchères sont plus diversifiées en termes d'espèces végétales. Cette diversité pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité des sols existant en Basse-Terre (Sierra & Desfontaines, 2018). De plus, les andosols qui représentent 11% des sols en Basse-Terre sont considérés comme étant des sols très fertiles à cause de leur grande teneur en N, P et S (Yerima & Van Ranst, 2005). Ils peuvent accueillir une grande diversité de

cultures (FAO, 2001). Les andosols et les nitisols ont des pH avoisinant 5 à 6,5 (Sierra et al., 2015), qui sont optimaux pour les cultures de tomates (Ajayi & Olasehinde, 2009), d'aubergines (Smith, 2003), et de choux (Pons, 2016).

L'enquête a également indiqué que dans 21% des exploitations maraîchères guadeloupéennes, une période de jachère était observée durant la saison des pluies (de septembre à décembre). Ainsi, la parcelle cultivée est mise au repos, en laissant le champ libre à la végétation naturelle. L'intégration d'une période de jachère durant la saison des pluies permettrait aux agriculteurs de limiter ainsi les pertes financières. Au-delà de l'aspect financier, la jachère aurait un impact positif sur la fertilité du sol (Sanchez, 1995) en aidant à la restauration de la biomasse et des nutriments dans le sol (Barrios et al., 1997 ; Kettler, 1997). D'après Bonneville et al. (2015), la jachère est une pratique de non culture permettant de reconstituer les réserves nutritives du sol, en conservant la biodiversité aérienne et souterraine, et de contribuer ainsi à régénérer la parcelle pour la culture suivante (Sébillotte et al., 1993 ; Marshall & Moonen, 2002 ; Hendrickx et al., 2007). En effet, elle participe à l'apport de matière organique, à l'accumulation de carbone organique et d'azote dans le sol (Almeida et al., 2017 ; Willy et al., 2019), ainsi qu'à la lutte contre les adventices, et donc à la réduction des bioagresseurs (Styger & Fernandes, 2006).

Les itinéraires techniques appliqués aux différentes cultures varient également. Les monocultures côtoient les cultures en association ; ce choix dépend de l'agriculteur, de ses objectifs et de ses moyens. D'après Bedoussac et al. (2013), la culture associée est une pratique agricole qui consiste à implanter dans une parcelle au moins deux espèces de plantes pendant une période significative de leur croissance, sans qu'elles soient nécessairement semées et/ou récoltées simultanément. Ces associations dans les milieux tropicaux sont souvent liés à des bénéfices économiques (Anil et al., 1998 ; Lithourgidis et al., 2006). Une étude menée au Sénégal par Dugué et al. (2016), a montré que les agriculteurs utilisent cette méthode afin d'optimiser l'usage des terres à cause de la réduction des surfaces agricoles et du coût élevé des fertilisants. Dans cette étude, les agriculteurs sénégalais associent deux cultures aux systèmes racinaires différents, le concombre (enracinement superficiel) avec l'aubergine (enracinement avec un pivot profond), afin de limiter les pertes en nutriments. À Madagascar, une étude sur 240 exploitations (Raharison et al., 2017) a mis en évidence que 78% des exploitations comptent au moins une parcelle cultivée en association. Les associations sont très diverses et sont généralement couplées à l'élevage (bovin, porc et

avicole) pour les apports en fumures. Du point de vue économique, cette pratique est moins onéreuse pour les petites surfaces agricoles (Côte et al., 2018).

Le travail du sol est généralement réalisé par un labour des parcelles, qui peut être superficiel ou profond. En Basse-Terre, la majorité des agriculteurs enquêtés pratiquent le labour superficiel. La tendance s'inverse en Grande-Terre, où les agriculteurs optent pour un labour majoritairement profond. Cette différence pourrait s'expliquer par les types de sol présents en Basse-Terre et en Grande-Terre. Les sols dominants en Basse-Terre sur lesquels on retrouve des cultures maraîchères sont des ferralsols, nitisols et andosols. D'après Sierra & Desfontaines (2018), ces sols sont meubles et riches en matériaux volcaniques. De plus, le relief montagneux de la Basse-Terre ne permet pas toujours aux agriculteurs d'avoir recours à un travail du sol mécanisable (Sierra & Desfontaines, 2018). En revanche, en Grande-Terre les cultures maraîchères sont majoritairement sur vertisol qui est un sol argileux qui devient extrêmement dur en période de sécheresse et comprend des fentes et des structures polygonales (Baize & Girard, 2008). Néanmoins, les fentes peuvent être effacées par un travail du sol profond (Sierra & Desfontaines, 2018). Il est à noter que le labour engendre des changements rapides dans les sols du point de vue physique, chimique et biologique dans un court laps de temps (Estrade et al., 2010). Le labour accélère le processus de décomposition et réduit la matière organique disponible dans le sol (Galdos et al., 2009; Silva-Olaya et al., 2013). Par conséquent, il engendre une accélération de l'érosion du sol (Gliessman, 2015). Le labour a également une influence négative sur la disponibilité en eau, en affectant la porosité du sol (Pires et al., 2017). A contrario, la réduction du labour a des effets positifs sur le recyclage de la matière organique et sur la biodiversité du sol (Lal, 2015 ; Pareja-Sánchez et al., 2017).

En milieu tropical, les exploitations agricoles sont soumises à de fortes pressions phytosanitaires en raison de conditions environnementales favorables à la prolifération des bioagresseurs (Lewis et al., 2016). Nos résultats confirment cette tendance ; les agriculteurs enquêtés utilisent majoritairement des produits phytosanitaires de synthèse à fort impact négatif pour l'environnement, comme les insecticides à base de pyréthrinoïdes. En 2016, les pyréthrinoïdes représentaient plus de la moitié du marché mondial des insecticides (Hénault-Ethier & Gagné, 2016). Ces insecticides agissent par contact et par ingestion ; ils interfèrent avec le fonctionnement du système nerveux des arthropodes (Rabhi, 2015 ; Hénault-Ethier & Gagné, 2016). En France, les pyréthrinoïdes sont retrouvés dans les produits phytosanitaires contenant de la deltaméthrine (Décis) et de la lambda-cyhalothrine (Karate) (Testud & Grillet,

2006). Ces insecticides ciblent principalement les Coléoptères, les Lépidoptères, et les Diptères (ANSES, 2019). Notre étude a également mis en évidence d'autres molécules actives comme la mancozèbe (Dithane), l'azoxystrobine (Ortiva) et l'abamectine (Vertimec) utilisées par les agriculteurs enquêtés. Un rapport de l'Office de l'Eau en Guadeloupe, réalisé entre 2009 et 2013, a montré que certaines de ces molécules actives sont retrouvées dans les rivières, notamment l'azoxystrobine (Office de l'Eau Guadeloupe, 2015). Cette dernière molécule utilisée comme fongicide en culture maraîchère, présente une toxicité élevée pour les organismes aquatiques (ANSES, 2015).

En Guadeloupe, les producteurs maraîchers doivent faire face à la multiplication des adventices. L'analyse des questionnaires d'enquêtes montre que la fréquence d'application des herbicides est propre à la zone de culture. Les agriculteurs de la Grande-Terre combinent l'application des herbicides avec le labour profond. L'usage combiné de ces deux techniques culturales aide à la régulation des adventices dans les exploitations (Mishra & Singh, 2012). En effet, Chauhan & Johnson (2008) ont montré que l'enfouissement en profondeur des graines des adventices entraîne un taux de germination très faible. De plus, l'enquête a révélé l'application d'herbicides sous forme de glyphosate (Roundup et Touchdown) dans les parcelles. Le glyphosate est l'un des herbicides le plus répandu dans le monde depuis sa commercialisation en 1974 (Duke & Powless, 2008 ; Benbrook, 2016). Ce produit est utilisé aussi bien par les professionnels que les particuliers, pour lutter contre un large spectre de plantes adventices (Solomon et al., 2007). Plusieurs études (Kremer & Means, 2009; Nguyen et al., 2016 ; Allegrini et al., 2017) ont montré que les perturbations causées par l'application de glyphosate modifient le nombre, l'activité et la composition des communautés d'organismes du sol. Ces perturbations ont un impact sur la décomposition de la matière organique et la structuration du sol (Romano-Armada et al., 2019).

Les fertilisants de synthèse sont utilisés pour pallier les déficits nutritifs des plantes, afin d'assurer une croissance optimale et des récoltes florissantes (Khan et al., 2018). Ils ont cependant des impacts négatifs sur les propriétés du sol ainsi que sur sa diversité (Blanco et al., 2002 ; Batey, 2009). La matière organique est un autre type de fertilisant utilisé dans les exploitations maraîchères guadeloupéennes. 25% des exploitations maraîchères en Grande-Terre et 24% en Basse-Terre utilisent de la matière organique en guise de fertilisants. La matière organique n'est pas seulement une source de nutriments pour les végétaux du sol ; elle permet également de restaurer ou d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Celestina et al., 2019). Elle joue un rôle important dans la préservation

de la fertilité des sols, la réduction de l'érosion du sol, le cycle des nutriments, la rétention de l'eau et la suppression des maladies (Loveland & Webb, 2003 ; Murphy, 2015). Les résultats de l'analyse de l'enquête ont également établi que la majorité des agriculteurs appliquaient un mélange de matière organique et de fertilisants de synthèse dans leur parcelle. Une méta-analyse, menée en Afrique subsaharienne, démontre que l'utilisation combinée des deux types de fertilisants conduit à des récoltes plus importantes (Chivenge et al., 2010). D'autres études ont montré que les apports organiques empêchaient la lixiviation rapide des engrais azotés en immobilisant l'azote temporairement (Vanlauwe et al., 2002 ; Bekunda et al., 2010 ; Pincus et al., 2016).

Les résidus de culture peuvent améliorer la structure du sol, augmenter la matière organique dans le sol et réduire l'évaporation (Liang & Wang, 2012). Les agriculteurs interrogés laissent majoritairement les résidus de culture à la surface de leurs parcelles. À la fin des cycles de culture, les résidus présents sur les parcelles peuvent être une source alimentaire pour les organismes du sol (Feng et al., 2017). D'après Errouissi et al. (2011), la présence de résidus en surface sans labour, permettrait une augmentation de l'activité de la biodiversité du sol, et en particulier celle des vers de terre. Les résidus en surface procurent un climat favorable et une ressource alimentaire carbonée bénéfique à la prolifération des vers de terre (Chan, 2001; Chan & Heenan, 2006). D'autres agriculteurs maraîchers enquêtés, moins nombreux, incorporent les résidus dans le sol. Wuest et al. (2005) a montré que l'enfouissement des résidus végétaux peut avoir également un effet sur les populations de vers de terre. Cette pratique serait plus avantageuse pour les vers de terre endogés, qui se nourrissent de la matière organique présente dans le sol (Keith & Robinson, 2012). Cependant, d'autres études ont montré qu'au contraire, l'incorporation des résidus à un impact négatif sur la population des vers de terre épigés et anéciques (Chan, 2001 ; Frazão et al., 2019). Une autre étude (Wetzck et al., 2007) a également mis en évidence une diminution de la population des vers de terre anéciques dans les parcelles, résultant de la réduction du labour profond et l'incorporation des résidus sous forme de billon.

Les principaux résultats obtenus à partir de l'enquête permettent d'avoir une meilleure compréhension des pratiques appliquées dans les cultures maraîchères en Guadeloupe.

4.2. Impact des pratiques maraîchères sur le sol

À l'issue d'un suivi de 18 mois et d'un diagnostic agroécologique mené sur des parcelles sélectionnées en Grande-Terre sur vertisol, des données chiffrées ont été collectées dans des

parcelles d'agriculteurs qualifiées de conventionnelles et des parcelles qualifiées d'agroécologiques. Les pratiques conventionnelles sont connues pour avoir des effets négatifs sur la macrofaune du sol (e.g., Clermont-Dauphin et al., 2014). D'autre part, le surdosage des fertilisants de synthèse contribue à la détérioration du sol, à la pollution des nappes phréatiques, à l'acidification du sol et à la diminution du rendement des cultures (Tilman et al., 2001 ; Clermont-Dauphin et al., 2014 ; Smith & Siciliano, 2015 ; Zhu et al., 2018). Enfin, l'application d'herbicides de synthèse à forte dose a également un effet négatif sur la faune du sol, en réduisant son abondance, son habitat et les ressources alimentaires à sa disposition (Prosser et al., 2016). Cependant les résultats de notre étude n'ont pas permis de confirmer cette tendance dans les parcelles qualifiées de conventionnelles après dix-huit mois.

Il est à noter que la forte abondance des ingénieurs de l'écosystème au bout de 18 mois est principalement due à une profusion de fourmis dans les deux types de parcelles. Cette dominance peut avoir comme conséquence une baisse de l'abondance et de la diversité des autres groupes de la macrofaune du sol. En effet, les fourmis collectent de grandes quantités de nutriments et de résidus alimentaires qui sont acheminés dans leurs fourmilières (Frouz et al., 2003). Dès lors, elles peuvent participer à la réduction de la matière organique et engendrer une perte des ressources pour les autres organismes du sol (Frouz & Jilokova, 2008). De plus, les fourmis sont territoriales et défendent leur fourmilière contre tous organismes étrangers à leur colonie (Benckiser, 2011). Elles peuvent également être d'importants prédateurs pour certains organismes du sol et participer à la réduction de la densité des vers de terre (Frouz & Jilokova, 2008 ; Schoning et al., 2010). En complément, la faible abondance d'agrégats biogéniques démontre que l'activité biologique est peu élevée dans les parcelles conventionnelles et agroécologiques. Le recours au labour profond, dû au type de sol (vertisol), dans les parcelles étudiées pourrait aussi expliquer la réduction de l'abondance des vers de terre et d'autres groupes d'organismes du sol (Le Roux et al., 2008).

Outre le labour, les produits phytosanitaires de synthèse sont considérés comme l'un des responsables majeurs du déclin de la biodiversité dans les agrosystèmes (Le Roux et al., 2008). En zone tropicale, l'utilisation de ces produits phytosanitaires est assez fréquente. En agriculture conventionnelle, l'utilisation soutenue de fertilisants de synthèse, d'herbicides et de pesticides couplée au labour profond est reconnue pour avoir des effets négatifs sur la biodiversité du sol (Angst et al., 2017). En agroécologie, une méthode alternative à la lutte phytosanitaire conventionnelle est utilisée : ce sont les pesticides biologiques, qui proviennent de matières naturelles (animaux, végétaux et bactéries). Ils sont généralement

moins rémanents dans le sol (Deravel et al., 2014). Néanmoins, ils peuvent aussi cibler des organismes édaphiques non nuisibles pour les cultures (Bravo et al., 2011), et donc avoir un impact négatif sur la biodiversité du sol. Des études ont montré que la bouillie bordelaise, qui est un fongicide et un bactéricide utilisé dans les systèmes de cultures maraîchers agroécologiques (Weingartner et al., 2006 ; Kungolos et al., 2009), a une action létale sur les collemboles, les acariens, les fourmis et les vers de terre (Pozzebon et al., 2010; Hammad & Gurkan, 2012). Ceci est dû au sulfate de cuivre qui à forte dose devient toxique pour les organismes du sol (Ardestani et al., 2013). Une autre substance utilisée contre les bioagresseurs en agroécologie est le purin de Neem (*Azadirachta indica*), dont la plante est originaire d'Inde (Fernandes et al., 2006). Elle se compose de principes actifs dont l'azadirachtine, qui est présent en grande quantité dans les graines de fruits mûrs. Il s'agit du principal composant responsable des effets toxiques sur les insectes. En altérant le processus de maturation de la nymphe, il provoque le vieillissement des larves (Souza et al., 2015, Zanuncio et al., 2016, Archana et al., 2017). D'après Souza et al. (2015) et Zanuncio et al. (2016), le purin de Neem à forte concentration est létal pour des prédateurs naturels comme la punaise *Psodisus nigrispinus* et la coccinelle *Cycloneda sanguine*. Il peut donc avoir également un impact négatif sur la biodiversité édaphique.

D'autres pratiques agroécologiques utilisées par les maraîchers guadeloupéens peuvent avoir des impacts négatifs sur l'activité biologique du sol. Le paillage consiste à couvrir la surface du sol de matière inorganique ou organique (plastique, paille, résidus de cultures de couverture ou plantes vivantes). Il est utilisé pour prévenir l'érosion du sol et augmenter la rétention d'eau, et participer à la lutte antiparasitaire et la lutte contre les adventices (Saxton et al., 2000; Gonzalez-Martin, 2014 ; Quintanilla-Tornel et al., 2016). Cependant, des travaux de recherches montrent que l'utilisation du paillage plastique à long terme, entraîne une pollution des sols par les additifs présents dans le plastique (gri et al., 2016). Ainsi, le paillage plastique aurait des effets négatifs sur les organismes du sol, comme sur les ingénieurs de l'écosystème et les prédateurs (Schonbeck & Evanylo, 1998 ; Striling, 2008).

Contrairement aux parcelles conventionnelles, les parcelles agroécologiques sont amendées avec de la matière organique, qui a un effet bénéfique sur divers processus biologiques dans les sols (Roger Estrade et al., 2010 ; Ayuke et al., 2011). D'après Li et al. (2018), la matière organique joue un rôle prédominant dans la croissance microbienne. La biomasse microbienne est en effet corrélée aux quantités d'N et de C/N présents dans les sols (Lauber et al., 2008). Une autre étude a également mis en avant que l'apport de matière

végétale combiné au fumier de bovin entraîne une augmentation de la biomasse microbienne (Li et al., 2018). Nos résultats montrent que l'activité microbienne totale est significativement plus importante dans les parcelles agroécologiques probablement en raison de l'apport de matière organique.

Le diagnostic agroécologique a permis d'évaluer l'impact des pratiques appliquées dans les cultures maraîchères sur vertisol. De manière générale, les résultats obtenus pour les parcelles conventionnelles et les parcelles agroécologiques sont similaires. Cette similarité pourrait s'expliquer par une utilisation maladroite des pratiques agroécologiques, comme le surdosage des pesticides biologiques ou le paillage en plastique. En conséquence, les pratiques agroécologiques utilisées par les agriculteurs maraîchers que nous avons sélectionnés ont un impact négatif sur la biodiversité édaphique. Ce diagnostic a permis de mettre en évidence que certaines pratiques agroécologiques utilisées par les agriculteurs doivent être repensées et adaptées au besoin réel de la parcelle afin d'être bénéfiques pour la biodiversité et la qualité du sol.

5. Conclusion

Les systèmes de culture sont continuellement modifiés en fonction de divers paramètres : le climat, la demande du marché, les nouvelles techniques et les avancées scientifiques (Altieri et al., 2012). À partir de l'enquête de terrain, les systèmes de culture maraîchers guadeloupéens ont pu être décrits. L'enquête a dévoilé qu'il existe une diversité de culture en association et monoculture ainsi que de nombreuses pratiques agricoles. Notre étude a montré que ces systèmes sont fortement dépendants de la localisation de l'exploitation (Grande-Terre ou Basse-Terre). L'analyse de l'enquête a mis en évidence l'utilisation à grande échelle de produits phytosanitaires nocifs pour la biodiversité du sol et dont les molécules persistent dans l'environnement.

Les analyses approfondies réalisées en Grande-Terre sur vertisol ont permis d'étudier l'impact des pratiques conventionnelles et agroécologiques des maraîchers sur la diversité biologique et les propriétés physico-chimiques du sol. Les résultats ont montré que les pratiques agroécologiques des agriculteurs sont encore trop influencées par les pratiques conventionnelles, comme le labour profond. L'utilisation de produits phytosanitaires, notamment pour la gestion de l'enherbement et la lutte contre les bioagresseurs sont des problématiques importantes pour les agriculteurs. Les résultats laissent supposer que

certaines pratiques agroécologiques, comme l'utilisation de paillage plastique et/ou un fort dosage des pesticides biologiques, ont des effets négatifs sur les organismes du sol. Cette première partie démontre que les pratiques culturales utilisées par les maraîchers guadeloupéens ne permettent pas de préserver les propriétés physico-chimiques et la biodiversité des sols. Face à ce constat, une réflexion doit être menée sur les pratiques agroécologiques à mettre en place dans les systèmes de culture maraîchers de Guadeloupe sur vertisol avec l'objectif de contribuer à la transition écologique de l'agriculture du territoire.

CHAPITRE 2 :

Co-conception et évaluation multicritère de systèmes de culture maraîchers innovants

1. Introduction

À la moitié du XX^e siècle, la mission confiée à l'agriculture était de produire une nourriture abondante et à bas prix afin de répondre à l'accroissement des populations (Krush, 2001). Ainsi, l'agriculture s'est appuyée sur des pratiques artificialisantes qualifiées aujourd'hui de conventionnelles. Ces pratiques sont remises en question car elles ont des répercussions négatives sur l'environnement et la santé humaine (Hazell & Wood, 2008 ; Kibblewhite et al., 2008 ; Pingali, 2012 ; Henneron et al., 2014). Dans une problématique de production agricole plus respectueuse de l'environnement, l'agriculture du XXI^e siècle doit donc amener les agriculteurs à repenser leurs systèmes de culture (Caquet et al., 2020). D'après Caquet et al. (2020), l'agroécologie apparaît comme un bon compromis entre agriculture et préservation de l'environnement. L'agroécologie vise à la valorisation des processus biologiques pour répondre à la fois aux attentes de la production agricole (services d'approvisionnement) et à d'autres services écosystémiques (protection des ressources, régulation des bioagresseurs, décomposition de la matière organique, ...), (Caquet et al., 2020). La construction des systèmes agroécologiques nécessite le plus souvent une reconfiguration des systèmes de culture existants. La transition agroécologique implique que l'agriculteur développe ses capacités d'apprentissage et conçoive des pratiques nouvelles en rupture avec l'agriculture conventionnelle (Chantal et al., 2014). L'enjeu pour l'agriculteur est de pouvoir restaurer et piloter un agroécosystème de manière à valoriser les ressources locales tout en gérant la complexité et les incertitudes de cet agroécosystème (Magrini et al., 2019). La gestion d'un système complexe dans un environnement changeant et l'incertitude des stratégies appliquées peuvent être des freins à la transition agroécologique (Caquet et al., 2020). La conception de système de culture permet d'aider les agriculteurs dans cette démarche de transition.

La conception innovante est basée sur l'exploration de concepts et de connaissances utiles pour l'innovation. Elle apporte des éléments nouveaux liés à la préservation de l'environnement (Meynard, 2008). Les systèmes agricoles issus de la conception innovante peuvent avoir des origines très diverses : des agriculteurs inventifs, des chercheurs ou des ingénieurs en charge des projets de conception (Meynard, 2012). Selon Meynard (2008), la conception innovante peut être appréhendée de deux façons, « pas à pas » ou « de novo ». La conception « pas à pas » consiste à améliorer les systèmes de culture existants en apportant graduellement des innovations (Meynard, 2008). Cette approche permet aux agriculteurs d'apprendre progressivement à maîtriser les modifications apportées au système

et à réorganiser leur travail et leurs moyens de production (Dedieu et al., 2011 ; Meynard et al., 2012 ; Meynard & Dourmad, 2014). La conception « de novo » vise à concevoir des systèmes de culture qui se détachent des systèmes existants. Elle permet une exploration très large des combinaisons de techniques applicables (Reau & Doré, 2008). Ce type de conception peut être une source d'inspiration pour la conception « pas à pas » (Meynard et al., 2012). Le travail de conception innovante prend une autre dimension lorsqu'il s'appuie sur la participation de d'acteurs d'origines diverses. Cette association donne naissance à de la co-conception innovante. La co-conception permet la construction graduelle d'un consensus entre l'ensemble des acteurs et l'édification d'un système de culture pertinent et adapté aux attentes et contraintes des participants à la démarche (Meynard, 2012 ; Debos et al., 2017). Dans notre étude, nous nous appuyerons sur de la co-conception « de novo » pour un certain nombre de raisons. La première est la mise en commun des connaissances des agriculteurs et des résultats de la recherche. La deuxième est que la conception « de novo » fait appel à la construction de systèmes de culture innovants en rupture avec l'existant (Reau et al., 2012). Les techniques innovantes, qui découlent de la co-conception, font appel à une diversité de techniques agronomiques associées à des processus écologiques (Wezel et al., 2009). La co-conception « de novo » passe souvent par des prototypes théoriques qui peuvent être mis à l'épreuve, par test expérimental. Le test peut être réalisé sous forme d'expérimentation au champ et il permet alors de référencer les performances et les risques inhérents aux systèmes innovants mis en place (Meynard & Dourmad, 2014).

Les performances des systèmes agricoles peuvent être évaluées selon différents critères. Il existe des évaluations classiques qui se basent sur l'évaluation économique, qui est un critère fondamental pour l'agriculture conventionnelle (Barbier & Lopez-Ridaura, 2010). Pour notre étude, nous privilégierons des méthodes d'évaluation multicritère pour estimer les performances des systèmes innovants. En effet, les méthodes d'évaluation multicritère sur lesquelles nous comptons nous appuyer sont fondées sur les trois piliers du développement durable. La dimension environnementale, qui englobe tout ce qui caractérise la capacité du système à préserver les ressources naturelles à long terme en réduisant leur surexploitation au profit d'énergies renouvelables. La dimension sociale qui englobe toutes les capacités du système à assurer la cohésion sociale en veillant à la réduction de la pauvreté et des inégalités, au partage équitable de la richesse en fonction de la contribution de chacun. Elle doit garantir l'accès de tous aux services de base (alimentation, santé, éducation,...). La dimension économique, qui englobe les critères qui doivent permettre d'évaluer le système dans sa

capacité à produire pour répondre aux besoins des générations présentes et futures (Yelkouni et al., 2018). L'évaluation multicritère des systèmes de culture permet ainsi d'estimer les atouts et les points à améliorer pour ces trois dimensions (Lairez & Feschet, 2016).

Les objectifs de ce chapitre sont i) de co-concevoir un prototype théorique de système de culture maraîcher et ii) de mettre en place puis d'évaluer la durabilité de ce système innovant. Nous présumons que la mise en œuvre de systèmes de culture innovants est plus efficace lorsqu'elle est issue d'apprentissages collectifs (Berthet et al., 2015). Dans un premier temps, un atelier de co-conception a été réalisé avec les agriculteurs maraîchers enquêtés sur l'ensemble du territoire guadeloupéen. À l'issue de cet atelier, le système innovant proposé a été mis en place en station expérimentale et une évaluation multicritère a permis d'en évaluer les performances en termes de contribution au développement durable.

2. Matériels et méthodes

2.1. Co-conception de prototypes de systèmes de culture maraîchers innovants

Afin d'identifier pratiques et techniques innovantes applicables en culture maraîchère (§ conclusion chapitre 1), un atelier participatif regroupant des agriculteurs, des chercheurs et des techniciens a été mis en place en Janvier 2017 (Figure 16). Cette étape avait pour ambition d'identifier les pratiques et techniques agroécologiques présentant un intérêt pour les agriculteurs mais considérées comme risquées (en matière de stabilité des rendements, de lutte contre les bio-agresseurs, d'organisation du travail sur l'exploitation, de coût de la main d'œuvre).



Figure 16 : Atelier participatif pour la co-conception de systèmes agricoles maraîchers innovants (photos : E. Chia)

L'atelier avait pour objectif la construction collective d'un système de culture maraîcher à expérimenter en respectant un cadre de contraintes agronomiques, et singulièrement un élément dont nous faisons l'hypothèse qu'il est central pour la performance du système de

culture au regard du développement durable et de la transition agroécologique, c'est-à-dire la dynamique biologique du sol. Cet atelier alternant des séquences de réflexion collective et individuelle a été structuré selon 3 étapes (Annexe 2) :

Étape 1 : Quelle est votre connaissance des organismes présents dans le sol ?

Un exercice de photo-élicitation a été élaboré. Il consistait à amener les agriculteurs à identifier quelques organismes du sol, à l'aide de photographies. Pour ce faire, trois questions ont été posées aux agriculteurs :

- Quel est cet organisme ?
- En avez-vous dans vos sols ?
- Quelle est son action sur le sol ?

Après un temps de réflexion individuelle où chaque agriculteur préparait ses réponses aux questions posées, une discussion collective a été engagée par la suite avec les chercheurs qui ont validé et précisé les connaissances échangées.

Étape 2 : Êtes-vous conscients du fait que les opérations culturales ont un impact sur les organismes du sol ?

Dans cette seconde étape, il s'agit d'échanger sur l'impact des opérations culturales sur les organismes du sol. Quatre familles d'opérations culturales sont soumises à la réflexion :

- Le travail du sol (labour peu profond versus labour profond) ;
- La protection phytosanitaire (utilisation ou non de pesticides) ;
- La fertilisation (engrais de synthèse versus fertilisation organique) ;
- Le choix d'architecture du peuplement cultivé (monoculture versus cultures associées).

Trois questions sont à nouveau posées aux agriculteurs :

- À votre avis, quel est l'impact de chaque opération sur les organismes du sol ?
- Quelle est l'intensité de ces impacts ? Selon une grille (0 : pas intense/ 1 : intense)
- Ces impacts sont-ils durables ?

Après un temps de réflexion individuelle, une discussion collective a été engagée sur les mécanismes et processus écologiques en jeu. Les agriculteurs élaborent collectivement une

carte cognitive, qui permet d'identifier les techniques qui leurs sont familières et de repérer celles qu'ils pourraient adopter ou non.

Étape 3 : Concevoir collectivement un système maraîcher qui préserve la biodiversité du sol.

Pour cette étape, un cadre de contraintes agronomiques, découlant de la réflexion menée lors de l'étape 2, est imposé pour chacune des familles d'opérations culturales. L'objectif est que les agriculteurs sélectionnent les opérations (travail du sol, protection phytosanitaire, fertilisation, choix des cultures) qui favorisent la biodiversité du sol, selon leur expérience et selon les connaissances qu'ils ont acquises au cours de l'atelier.

Pour le travail du sol, il devra avoir un impact minimal sur les organismes du sol (peu ou pas de labour). Pour la protection phytosanitaire, on n'utilisera pas de produits nocifs pour les organismes du sol. La fertilisation sera organique et on privilégiera les cultures associées.

À la suite de ce premier travail collectif, un nouvel atelier réunissant des techniciens et scientifiques a permis d'affiner les itinéraires techniques ainsi que l'aménagement spatial des parcelles. Les prototypes co-conçus lors des ateliers ont été mis en place sur le domaine expérimental de l'INRAE à Godet (Petit-Canal, Guadeloupe), (Figure 17). Un suivi a été effectué sur le sol, la biodiversité édaphique et les productions culturales lors de la mise en place des parcelles et 18 mois après.



Figure 17 : Localisation des deux systèmes co-conçus sur le domaine INRAE de Godet (Petit-Canal, Guadeloupe)

2.2. Évaluation multicritère des prototypes innovants

Afin de réaliser une évaluation des systèmes innovants proposés, nous nous sommes inspirés des méthodes IDEA (Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles) et RAD

(Réseau Agricole Durable), développées pour un usage à l'échelle de l'exploitation agricole (Annexe 3). La méthode IDEA, initiée en 1998, est un outil d'évaluation de la contribution des exploitations agricoles au développement durable, qui s'appuie sur trois piliers (agroécologique, socio-territorial et économique). Elle permet de suivre l'évolution de l'exploitation, d'identifier les points faibles et les marges d'amélioration (Biquel et al., 2001 ; Zham et al., 2008). La construction de l'outil repose sur un ensemble d'indicateurs pour chaque pilier du développement durable (Cabot et al. 2018). La méthode RAD est un outil intuitif, simple, rapide qui s'adapte à tous les systèmes de production : végétale, animale et polyculture-élevage (CIVAM, 2016). Elle évalue la durabilité d'une exploitation agricole à l'échelle environnementale, sociale et économique, en s'appuyant sur des indicateurs. RAD propose des moyens simples et adaptés à chaque situation locale pour montrer les voies d'amélioration possible. Cette méthode évalue de manière quantitative la contribution au développement durable. RAD permet de produire des références technico-économiques et environnementales.

Dans notre cas d'étude, nous nous situons à l'échelle parcellaire. La méthodologie utilisée s'inspire de RAD et d'IDEA, adaptées à cette échelle. Les indicateurs retenus ont été notés selon un barème allant de 0 à 5 (0 correspondant à une mauvaise note et 5 à une bonne note). Le contexte d'analyse se limite, dans la collecte de données, à des parcelles agroécologiques, de ce fait nous n'avons pas les données nécessaires pour remplir la batterie d'indicateurs des méthodes IDEA et RAD. Une sélection d'indicateurs pertinents et adaptés aux parcelles étudiées a été réalisée. La contribution au développement durable a été évaluée à partir de 11 indicateurs structurés selon deux dimensions indépendantes : la dimension agroenvironnementale (6 indicateurs) et la dimension économique (5 indicateurs). La note globale de contribution au développement durable n'a pas été prise en compte dans notre étude.

Pour la dimension agroenvironnementale, les indicateurs ont été évalués via « une grille d'évaluation de performances » et à dire d'experts (tableau 8).

Tableau 8 : Indicateurs retenus pour l'évaluation agroenvironnementale des systèmes selon les méthodes IDEA et RAD.

NOTES ATTRIBUÉES	0	1	2	3	4	5
Indicateurs et variables mesurés						
1. PESTICIDES						
Autoévaluation : "absence de passage de pesticides" = 5 ; "passages occasionnels" = 2 ; "passages fréquents" = 0						
2. LA BIODIVERSITÉ						
(Si oui on attribut 1 aux conditions suivantes sinon 0 et on additionne les points pour avoir un total sur 5) TOTAL :						
- Présence de bandes interculturelles						
- Destruction mécanique des résidus (non chimique)						
- Création et entretien de haies plurispécifiques non traitées (plantes mellifères, essences locales...)						
- Préservation et entretien des zones humides						
- Présence de macrofaune sol et insectes aériens						
3. GESTION DES SOLS						
Degrés d'érosion d'un sol : 0% = 5 ; 0 à 25%=4 ; 2,5 à 5%=3 ; 5 à 7,5%=2 ; 7,5 à 10%=1 ; >10% = 0						
4. PROTECTION DE LA RESSOURCE SOL						
(Si oui on attribut 1 aux conditions suivantes sinon 0 et on additionne les points pour avoir un total sur 5) TOTAL :						
- Travail du sol sans retournement						
- Absence de désherbant chimique						
- Paillage des cultures						
- Enfouissement des résidus						
- Aménagement et pratiques antiérosifs (bandes enherbées, terrasses, couvert végétal...)						
5. DIVERSITÉ DES CULTURES						
<= 2 espèces = 0 ; 2 espèces = 1 ; 4 espèces = 2 ; 6 espèces = 3 ; 8 espèces = 4 ; ≥ 10 espèces = 5						
6. GESTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE						
Apport annuel de matière organique : 100%=5 ; 80%=4 ; 60%=3 ; 40%=2 ; 20%=1 ; 0% =0						

Pour la dimension économique, les indicateurs ont été construits à partir de valeurs quantitatives. L'un des objectifs de cette étude était de pouvoir contribuer à mettre en place un référencement technico-économique en maraîchage agroécologique. Sachant qu'en Guadeloupe, les productions maraîchères se font majoritairement sur des petites surfaces agricoles, il nous a semblé plus rationnel et plus représentatif du territoire de ramener les données technico-économiques à 1 000 m² (Annexes 5 à 10). Les indicateurs retenus pour l'évaluation économique sont :

- L'efficacité du processus productif ([Produit-Intrant]/Produit) ;

- L'efficacité économique (Valeur ajoutée (VA) / Produit) ;
- L'autonomie économique (Marge brute globale/Produit de l'activité) ;
- La rémunération du travail (Résultat social/ [VA+Aide]) ;
- Le taux de spécialisation (Produit brut de la production principale/Produit de l'activité).

Les différents indicateurs économiques sont présentés en détail à l'annexe 4.

3. Résultats

3.1. Co-conception de prototypes innovants

Sur l'ensemble des agriculteurs enquêtés (§ chapitre 1), 11 ont répondu présents à l'atelier participatif. Cet échantillon comprenait à la fois, des agriculteurs ayant des pratiques conventionnelles, délétères pour la vie du sol (7/11) et des agriculteurs développant des pratiques plus respectueuses de l'environnement (4/11). L'atelier était organisé en 3 étapes.

Étape 1 : Acquisition et partage des connaissances sur les organismes du sol.

Cet exercice consistait à identifier un certain nombre d'organismes du sol, à l'aide de photographies (Figure 18). La majorité des agriculteurs ont identifié correctement le ver de terre (Annélide Oligochète, photo 6), le scolopendre (Myriapode Chilopode, photo 7), le "Kongolio" (Myriapode Diplopode, photo 4) et la larve de hanneton (Coléoptère Scarabaeidae, photo 5). Ils ont également observé ces organismes dans leur exploitation, mais peu d'entre eux savaient leur contribution à la vie du sol. Les autres organismes proposés ont été difficilement identifiés par les agriculteurs (champignon, photo 1 ; nématode, photo 2 ; et collembolle, photo 3). Les discussions menées ont montré que les agriculteurs avaient peu de connaissances sur le rôle des organismes édaphiques dans le fonctionnement du sol.



Figure 18 : Quelques organismes du sol

Étape 2 : Impact des pratiques agricoles sur les organismes du sol.

Dans cette partie de l'atelier, l'impact des pratiques agricoles sur le sol a été discuté par les agriculteurs :

- Le labour profond a été décrit comme une pratique qui engendre une diminution de l'abondance des organismes du sol. Les agriculteurs sont conscients que le labour profond modifie la composition de la faune en enfouissant les organismes de surface dans les couches profondes. Le labour profond peut avoir un impact très prononcé et durable dans le temps. À l'inverse, le labour peu profond a été décrit comme une pratique de préservation des organismes du sol.
- Concernant la fertilisation, les agriculteurs ont souligné que son application était utile lors du démarrage d'une nouvelle culture. Les agriculteurs n'ont pas perçu les engrais de synthèse comme un élément néfaste pour les organismes du sol. Toutefois, la fertilisation organique a été décrite comme une pratique qui pourrait stimuler et développer l'activité biologique du sol.
- Les agriculteurs perçoivent que l'usage des pesticides engendre un déséquilibre de la vie du sol et la destruction de certains organismes. Les agriculteurs ont souligné que l'intensité des effets dépend des doses utilisées.
- Selon les agriculteurs, la monoculture permet une gestion ciblée des nuisibles. Cependant certains agriculteurs ont souligné que cette pratique favorise la

prolifération des nuisibles en créant une résistance aux pesticides appliqués. Au contraire, les cultures associées bouleversent le cycle de reproduction des nuisibles et favorisent la diversité biologique du sol.

Étape 3 : Création d'un système maraîcher innovant

À partir des connaissances acquises lors des deux précédentes étapes de l'atelier, la dernière étape a débouché sur la construction collective d'un prototype de système de culture maraîcher, respectueux de la biodiversité édaphique :

- **Travail du sol** : compte-tenu du type de sol, un travail du sol devra être effectué. Ce travail du sol doit être peu profond (utilisation d'un pulvérisateur ou gyrobroyeur) ;

- **Protection phytosanitaire** : des produits phytosanitaires autorisés en agriculture biologique pourront être utilisés en cas de besoin ; l'application de paille de canne ou de bois raméal fragmenté (BRF) permettra de gérer l'enherbement ; des plantes répulsives et des plantes hôtes seront plantées autour de la parcelle pour gérer les bioagresseurs : *Thymus vulgaris* (thym), *Ocimum basilicum* (basilic), *Rosmarinus officinalis* (romarin), *Plectranthus neochilus* (doliprane), *Zea mays* (maïs) et *Hibiscus sabdариifa* (groseille) ;

- **Fertilisation** : apport régulier de vermicompost ;

- **Choix de la succession culturale** : tomates et laitues (2 cycles) (5 mois) ; haricots (2 mois) ; jachère contrôlée de pois canne (4 mois) ; pastèques (2 mois) ; piments végétariens (11 mois) et giraumons (5 mois).

3.2. Les systèmes agroécologiques maraîchers mis en expérimentation en station

Deux prototypes agroécologiques en maraîchage ont été conçus à l'issue des ateliers :

-Un système agroécologique (**AG**) où l'utilisation de produits phytosanitaires utilisés en agriculture biologique est autorisée si nécessaire, conformément à celui proposé dans l'atelier de co-conception de janvier 2017 ;

-Un système agroécologique à biodiversité renforcée (**AGSPP**) dans lequel la diversité des plantes répulsives et pollinisatrices a été renforcée et où l'application de produits phytosanitaires n'est pas autorisée. La deuxième barrière végétale se compose de : *Plectranthus amboinicus* (gros thym), *Tagetes patula* (œillet de d'inde), et *Cosmos sulphureus* (cosmos). Ces plantes avaient été citées par les agriculteurs mais n'ont pas été retenues dans la conception du système agroécologique.

Des micro-parcelles ont été préparées sur le domaine expérimental INRAE de Godet à Petit-Canal. Le dispositif global a une longueur de 37 m et une largeur de 18 m. Les micro-parcelles ont chacune une superficie de 25 m². Pour chaque itinéraire technique, il y a 5 répétitions (Figure 19). Le placement des micro-parcelles est orienté en fonction du sens des vents dominants, pour éviter que les traitements phytosanitaires autorisés en AG n'aillent sur les parcelles AGSPP.

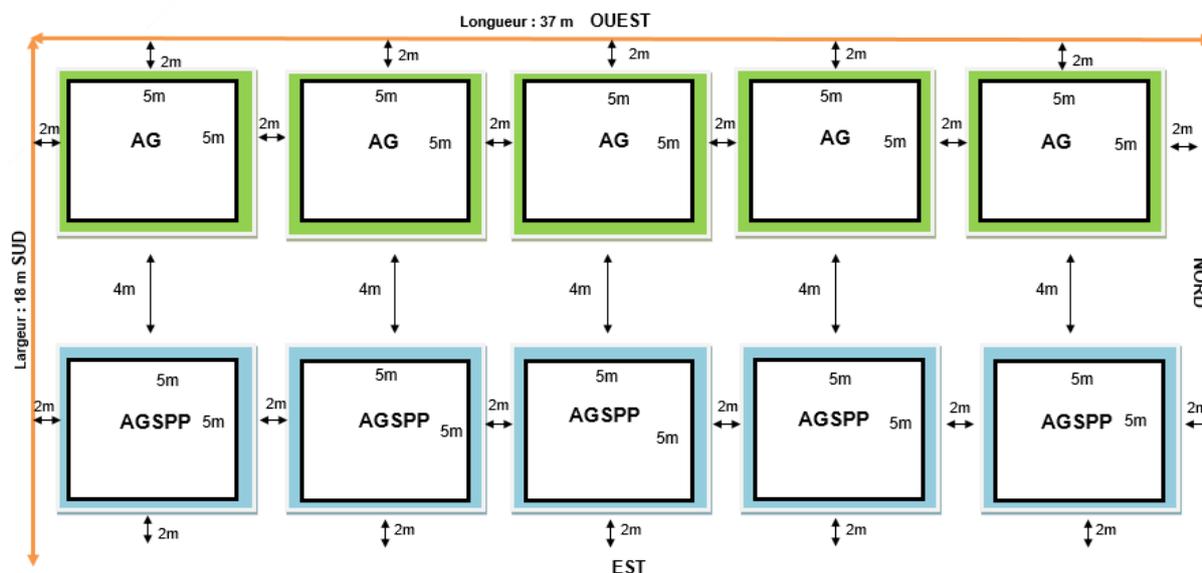


Figure 19 : Disposition spatiale des systèmes agroécologiques maraîchers (AG : avec traitement phytosanitaire biologique possible/ AGSPP : sans traitement phytosanitaire biologique possible)

Avant la mise en place des parcelles AG et AGSPP, un travail superficiel du sol a été réalisé à l'aide d'un pulvérisateur, puis la plantation de la barrière végétale a été effectuée. Un mois après la plantation de la barrière végétale, le premier cycle de cultures principales *Solanum lycopersicum* (tomate, variété Heatmaster) et *Lactuca sativa* (laitue, variété Batavia Blonde) a été mis en place dans chaque micro-parcelle selon les schémas de plantation (Figures 20 et 21). Dans chaque micro-parcelle, 27 plants de tomate et 50 plants de laitue ont été implantés avec un apport de 100 g de vermicompost pour chaque plant (tableaux 9 et 10). La deuxième barrière végétale pour AGSPP a été plantée en même temps que les cultures principales. Après le cycle tomate/laitue, le cycle haricot a été mis en place à son tour. Les plantules d'haricots ayant subi une attaque de ravageurs (escargots) et de fortes pluies dues à la saison cyclonique particulièrement active cette année-là, les résultats de ce second cycle de culture n'ont pas pu être exploités. La conséquence de cette année perturbée est qu'en 2018, la succession de

culture prévue en 2017 a été reconduite à l'identique (tomates et laitues/haricots/jachère contrôlée de pois canne).

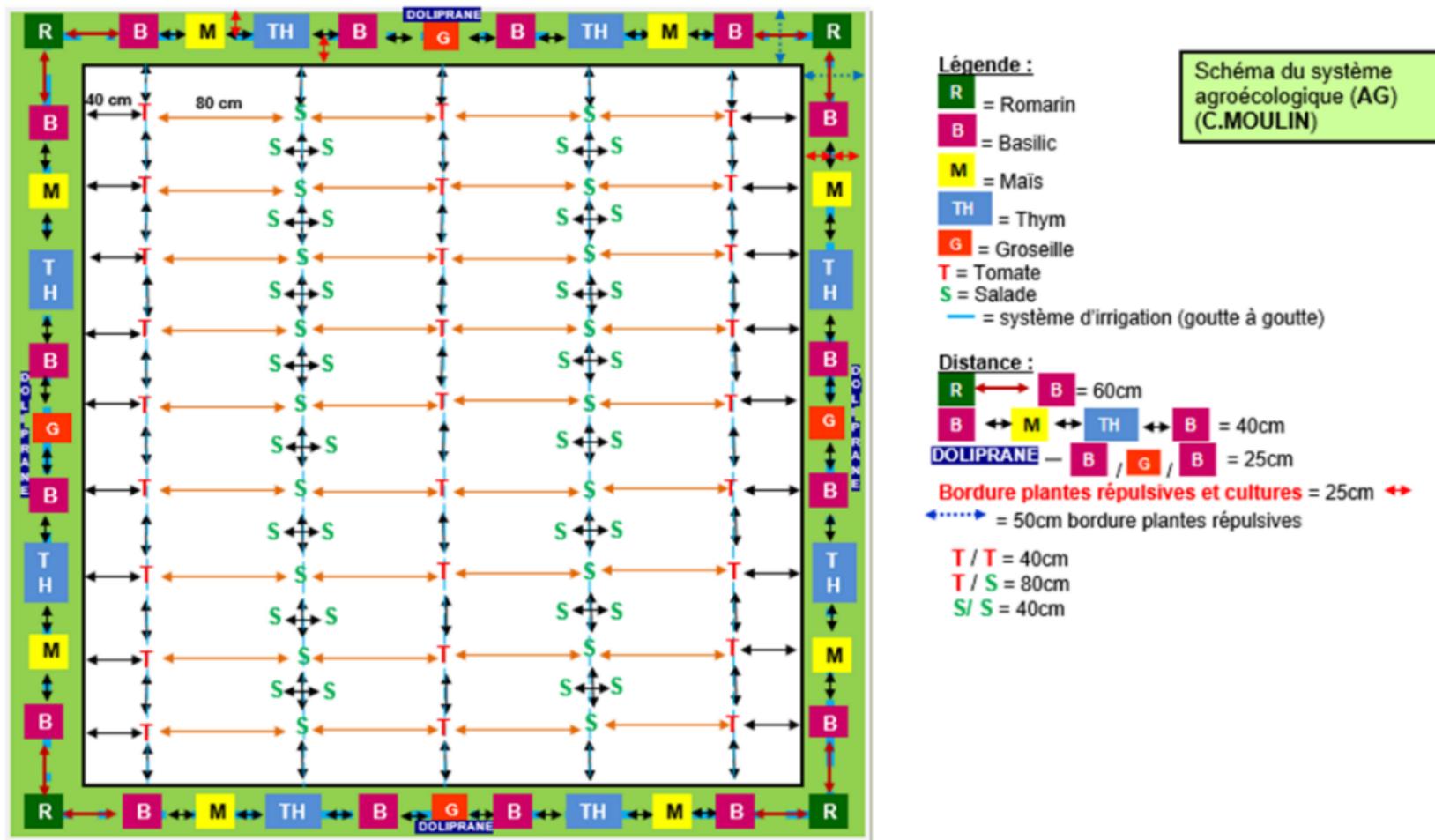
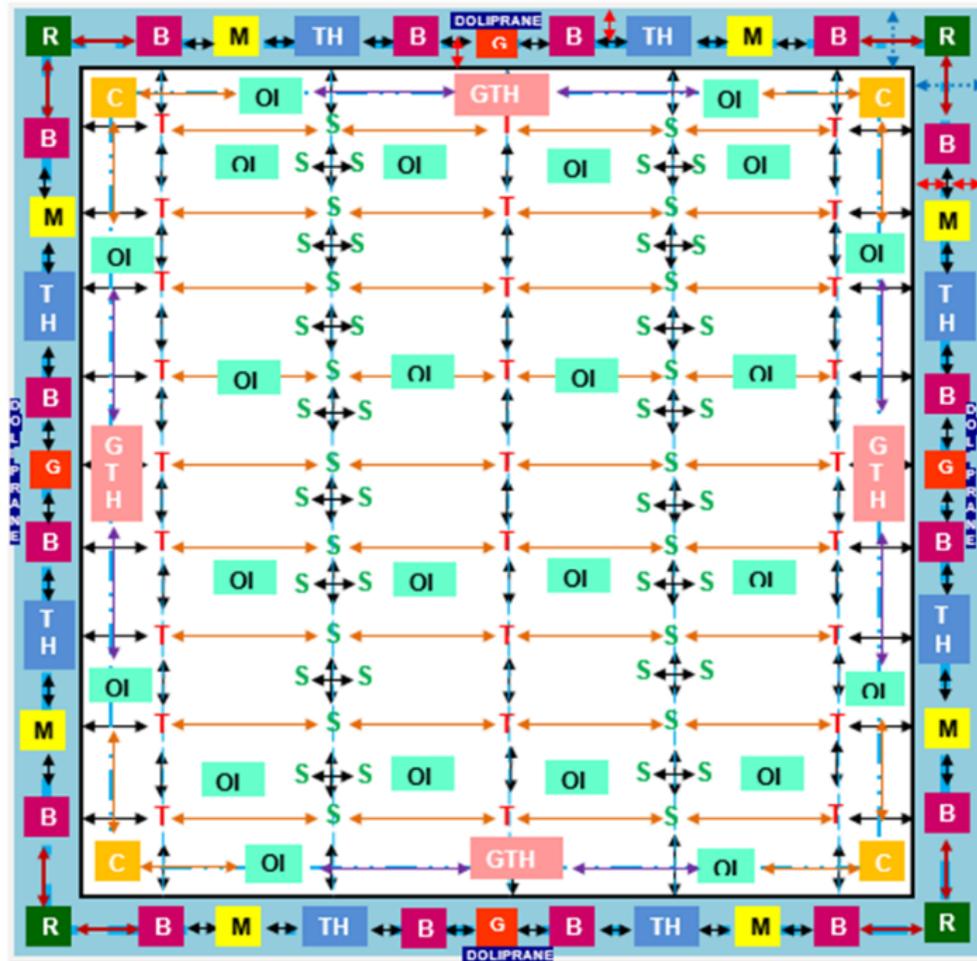


Figure 20 (a): Schéma de parcelle agroécologique AG des cultures de tomate et de laitue



Figure 20 (b): Photo de parcelle agroécologique AG des cultures de tomate et de laitue



Légende :

- R** = Romarin
- B** = Basilic
- M** = Maïs
- TH** = Thym
- G** = Groseille
- C** = Cosmos
- GTH** = Gros thym
- OI** = Céillet d'inde

- T** = Tomate
- S** = Salade
- = système d'irrigation (goutte à goutte)

Distance :

- R** ↔ **B** = 60cm
- B** ↔ **M** ↔ **TH** ↔ **B** = 40cm
- DOLIPRANE** — **B** / **G** / **B** = 25cm
- Bordure plantes répulsives et cultures** = 25cm ↔
- C** ↔ **OI** = 60cm
- GTH** ↔ **OI** = 80 cm

- OI** — **S** = 25cm
- T** / **T** = 40cm
- T** / **S** = 80cm
- S** / **S** = 40cm

20cm entre la bordure de la culture et **OI** **GTH** **C**

↔ = 50cm bordure plantes répulsives

Schéma du système agroécologique sans protection phytosanitaire (AGSP) (C.MOULIN)

Figure 21 (a): Schéma de parcelle agroécologique AGSP des cultures de tomate et de laitue



Figure 21 (b): Photo de parcelle agroécologique AGSPP des cultures de tomate et de laitue

Tableau 9 : Caractéristiques de l'itinéraire technique AG

PARCELLE AG : cycle tomate/laitue	
Variétés	<p>Cultures principales : <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate, Heatmaster) et <i>Lactuca sativa</i> (laitue, Batavia Blonde)</p> <p>Cultures secondaires : <i>Thymus vulgaris</i> (thym), <i>Ocimum basilicum</i> (basilic), <i>Rosmarinus officinalis</i> (romarin), <i>Plectranthus neochilus</i> (doliprane), <i>Zea mays</i> (maïs) et <i>Hibiscus sabdaria</i> (groseille)</p>
Densité	135 plants de tomates, 250 plants de laitues, 20 romarins, 80 basilics, 90 maïs, 40 thym, 40 groseilles et 40 dolipranes
Surface d'étude de la parcelle	125m ² (5 micro-parcelles de 25m ²)
Irrigation	Système de goutte à goutte
Apport en matière organique	100 g de vermicompost (2 fois par cycle)
Traitement phytosanitaire	Passage d'insecticides (Dipel DF®), fongicides (Bouillie bordelaise), insecticides/ fongicides (Savon noir ou Purin de Neem) en cas de besoin
Gestion de l'enherbement	Paillage de canne (2017)/Copeaux de bois (2018)

Tableau 10 : Caractéristiques de l’itinéraire technique AGSPP

PARCELLE AGSPP : cycle tomate/laitue	
Variétés	<p>Cultures principales : <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate, var. Heatmaster) et <i>Lactuca sativa</i> (laitue, var. Batavia Blonde)</p> <p>Cultures secondaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1^{ère} barrière végétale : <i>Thymus vulgaris</i> (thym), <i>Ocimum basilicum</i> (basilic), <i>Rosmarinus officinalis</i> (romarin), <i>Plectranthus neochilus</i> (doliprane), <i>Zea mays</i> (maïs), et <i>Hibiscus sabdariifa</i> (groseille) - 2^{ème} barrière végétale : <i>Plectranthus amboinicus</i> (gros thym), <i>Tagetes patula</i> (œillet de d’inde), et <i>Cosmos sulphureus</i> (cosmos)
Densité	135 plants de tomates, 250 plants de laitues, 20 romarins, 80 basilics, 90 maïs, 40 thym, 40 groseilles, 40 dolipranes, 120 œillets d’inde, 40 gros thym et 40 cosmos
Surface d’étude de la parcelle	125m ² (5 micro-parcelles de 25m ²)
Irrigation	Système de goutte à goutte
Apport en matière organique	100 g de vermicompost (2 fois par cycle)
Traitement phytosanitaire	Aucun traitement n’est autorisé
Gestion de l’enherbement	Paillage de canne (2017)/Copeaux de bois (2018)

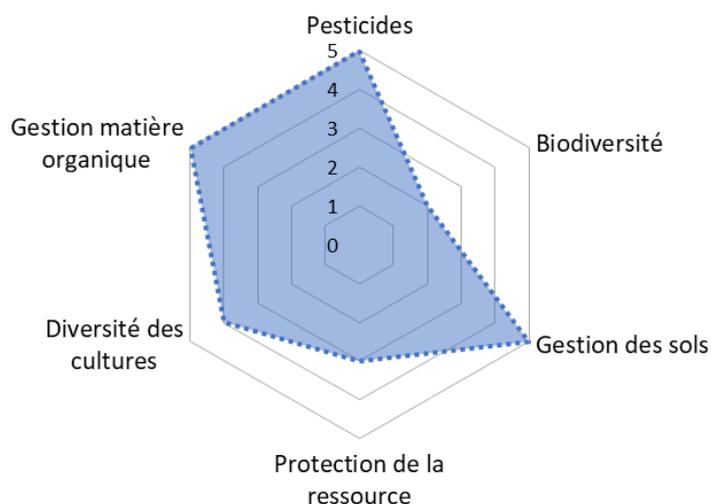
3.3. Diagnostic de durabilité

3.3.1. Évaluation environnementale

En 2017, les prototypes AG et AGSPP ont obtenu la note maximale pour l’indicateur « pesticides » car aucun passage de pesticides n’a été effectué sur les parcelles (Figure 22). L’indicateur « gestion de la matière organique » a également obtenu la note de 5/5 car un apport régulier de vermicompost a été effectué. L’indicateur « gestion des sols », a obtenu la note maximale car nos observations n’ont pas permis de déceler d’érosion du sol au sein des parcelles. Pour l’indicateur « protection de la ressource », les deux systèmes sont notés 3/5 à

cause du travail du sol effectué avant la mise en place des parcelles et du fait que les résidus de fin de cycle n'ont pas été enfouis dans le sol. L'indicateur « biodiversité » est noté 2/5 pour le système AG (création et entretien de haies, présence de macrofaune et insectes aériens). Pour AGSPP, l'indicateur « biodiversité » est notée 3/5 compte tenu de la présence de bandes interculturelles, la création et l'entretien de haies plurispécifiques non traitées et la présence de macrofaune du sol et d'insectes aériens. L'indicateur « diversité des cultures » a une valeur plus élevée dans le système AGSPP car il a une plus grande diversité de plantes cultivées.

AG 2017



AGSPP 2017

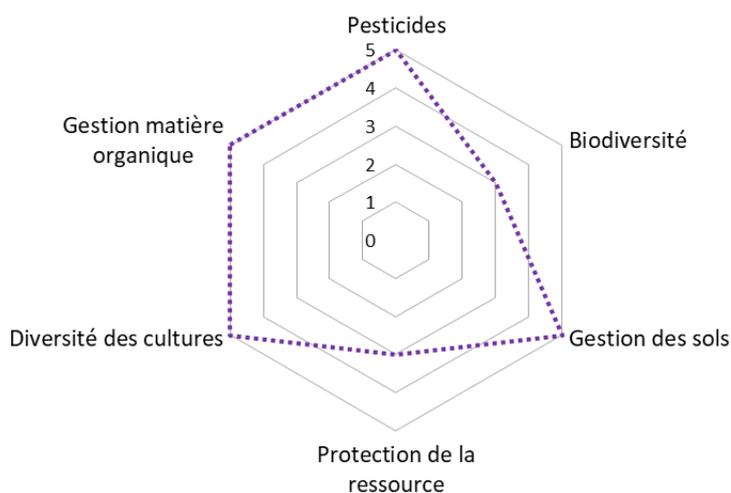


Figure 22 : Évaluation environnementale des systèmes AG et AGSPP en 2017

En 2018, les indicateurs « gestion de la matière organique », « gestion des sols », « diversité des cultures » et « biodiversité » sont les mêmes qu'en 2017 (Figure 23). L'indicateur

« protection de la ressource » a obtenu la note de 5/5, car il n’y a pas eu de travail du sol au préalable. L’indicateur « pesticides » a vu sa note réduite à 4/5 dans le système AG, car un traitement biopesticide a été réalisé.

Entre l’année 2017 et l’année 2018, l’évaluation environnementale a montré peu de différence. Toutefois, on observe qu’en 2018, les deux systèmes ont obtenu une meilleure note pour la « protection de la ressource », compte tenu du maintien des parcelles en l’état, sans travaux du sol additionnels.

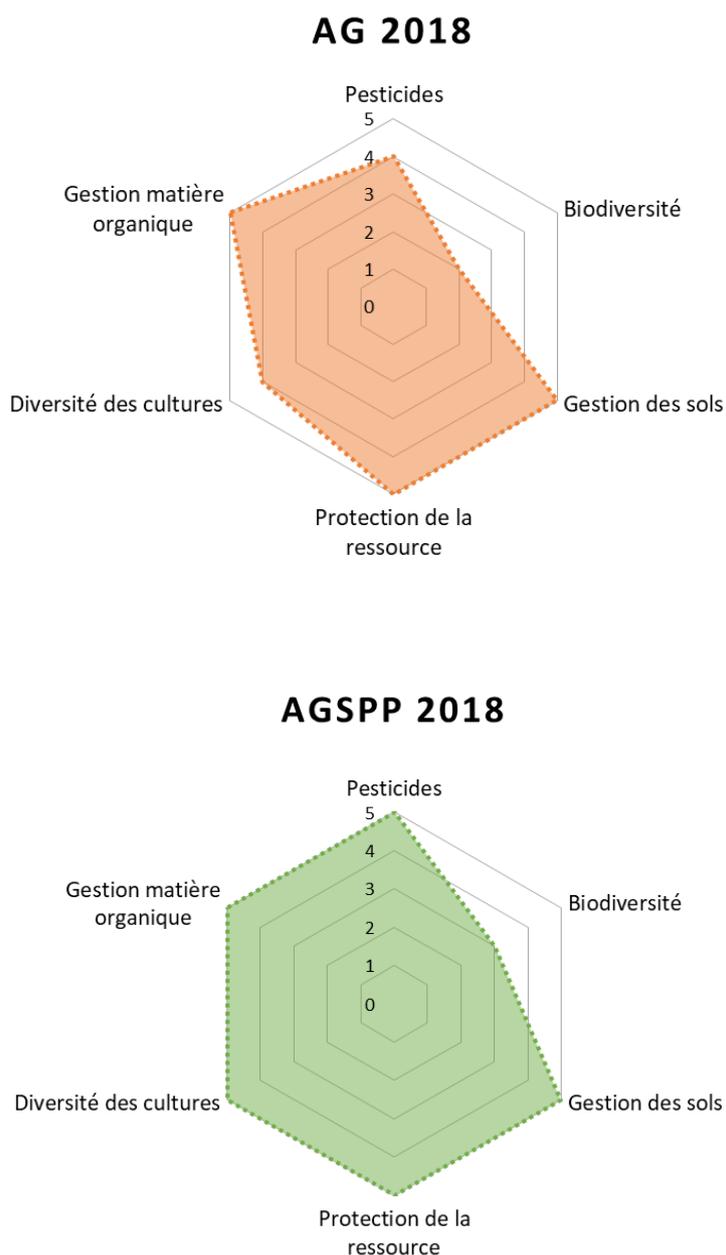


Figure 23 : Évaluation environnementale des systèmes AG et AGSPP en 2018

3.3.2. Évaluation économique

Dans cette évaluation, la culture de tomate a été considérée comme la production principale et la culture de laitue et les plantes de service comme des productions secondaires (Figures 24 et 25).

Pour les années 2017 et 2018, l'indicateur « taux de spécialisation » obtient une note élevée, 5/5 pour AG et AGSPP. Cet indicateur montre que les systèmes sont très diversifiés, ce qui permet de réduire les risques liés à la spécialisation, comme les imprévus économiques (variation du prix du marché), climatiques ou parasitaires. L'indicateur « rémunération du travail » est nul, 0/5 pour les parcelles. Il montre que les systèmes ne sont pas en mesure de permettre une rémunération salariale.

L'indicateur « efficience du processus » est plutôt élevé pour les systèmes et il augmente entre 2017 et 2018 (respectivement 4/5 et 5/5 pour AG ; 3/4 et 4/5 pour AGSPP). Cela s'explique par une augmentation du produit de l'activité en 2018. En effet, on passe de 2 520,50 € pour AG et 3 180,10 € pour AGSPP en 2017 à 5 304,29 € pour AG et 5 797,56 € pour AGSPP en 2018.

L'indicateur « efficacité économique » est nul à faible : note de 0/5 pour AG et 1/5 pour AGSPP en 2017 et 0/5 pour les parcelles en 2018. Cet indicateur montre que les consommations intermédiaires (intrants+services) des systèmes restent importantes sur les deux années.

L'indicateur « autonomie économique » obtient une note élevée 5/5 pour AG et AGSPP en 2017 et 0/5 pour les systèmes en 2018. Cet indicateur montre une autonomie en AG et AGSPP lié au fait que la production de tomate a été très faible en 2017 (176 kg/1000 m² pour AG et 330 kg/1000 m² pour AGSSP) et donc le produit du système ne dépend pas de la culture de tomate. En 2018, la production de tomate a été bien meilleure, 1 329 kg/1000 m² pour AG et 1 555 kg/1000 m² pour AGSPP. La production des systèmes dépend beaucoup plus de la culture de tomate ce qui engendre une autonomie économique faible.

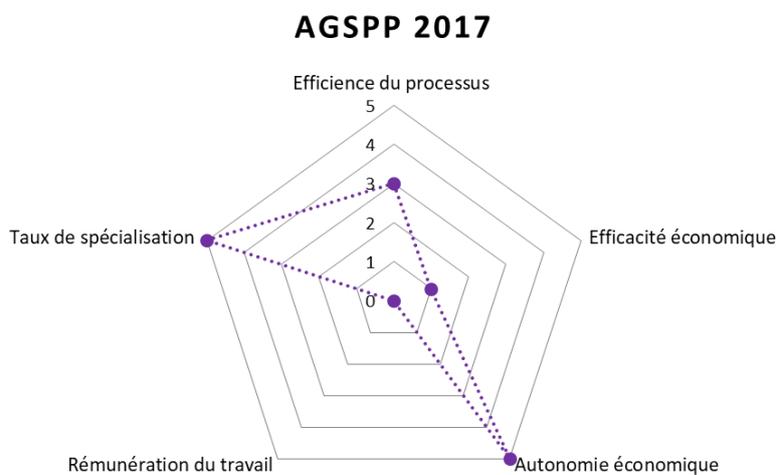
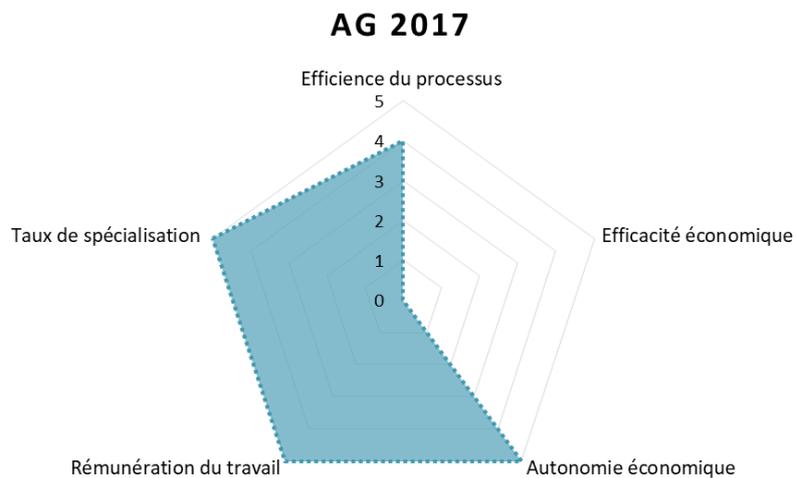
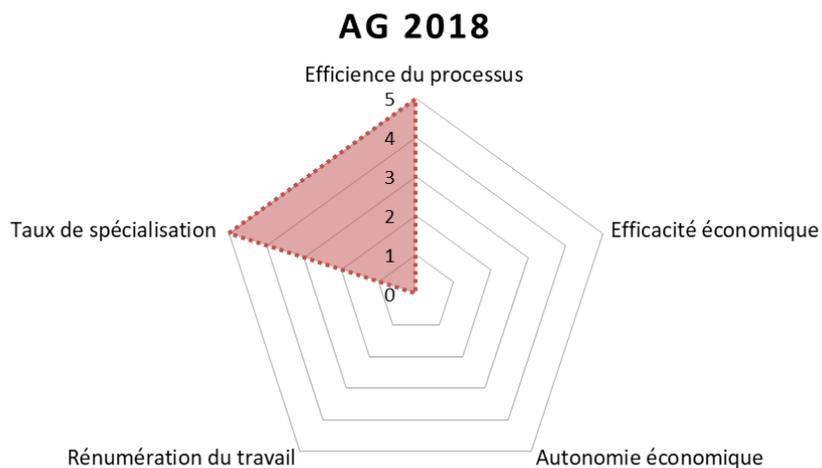


Figure 24 : Évaluation économique des systèmes agroécologique AG et AGSPP en 2017



AGSPP 2018

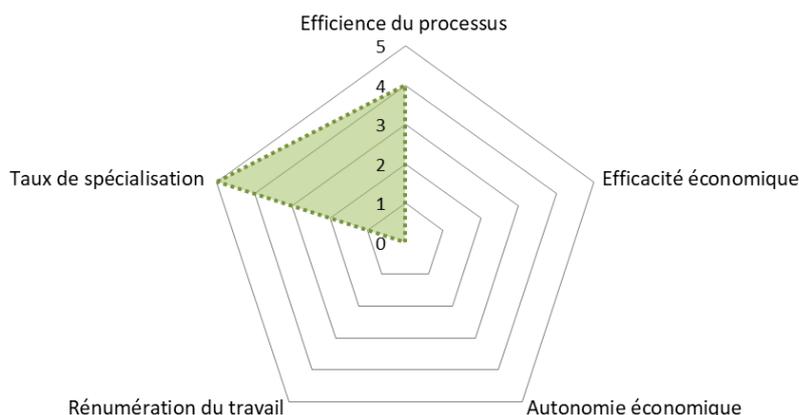


Figure 25 : Évaluation économique des systèmes agroécologique AG et AGSPP en 2018

4. Discussion

4.1. Co-construction des systèmes de culture

Lors de l'atelier participatif, les échanges avec les agriculteurs ont permis de partager des connaissances sur les organismes du sol. Une étude similaire menée au Honduras par Pauli et al. (2012), a montré que les connaissances sur les organismes du sol divergent d'un agriculteur à un autre. Dans cette étude, il a été demandé à 20 agriculteurs honduriens d'identifier un ensemble d'invertébrés de la macrofaune et de décrire leurs actions sur la vie du sol. L'un des organismes le plus reconnu a été le ver de terre. Les agriculteurs lui ont attribué un ensemble d'actions bénéfiques, comme la structuration des sols, l'aération des sols et l'apport de matière organique. L'autre organisme a été la larve de hanneton, connue par les agriculteurs pour son action délétère sur les racines des plants de maïs. Certains agriculteurs ont déclaré que la larve de hanneton participe à la décomposition de la matière organique et à l'amélioration de la qualité du sol (Pauli et al., 2012). Les agriculteurs acquièrent des connaissances via des observations individuelles et/ou collectives (Bentley & Rodríguez, 2001). Les agriculteurs ont des connaissances sur l'action de certains organismes du sol, comme les araignées (Arachnides) et les fourmis légionnaires (Formicidae Ecitoninae ou Aenictinae) qui sont des prédateurs pour les insectes (Bentley & Rodríguez, 2001). Cependant, leur expertise demeure limitée. Les connaissances individuelles des agriculteurs peuvent être complétées en échangeant avec un ensemble d'acteurs (scientifiques, techniciens...) (Bentley & Rodríguez, 2001). Ces échanges permettent d'approfondir leurs connaissances, en

particulier pour ce qui concerne les fourmis légionnaires qui sont également des prédateurs des lézards, des crapauds et des nids d'oiseaux (Breed & Moore, 2016).

Dans un second temps, les agriculteurs ont mis en commun leurs savoir faire et ont fait le lien entre leurs opérations culturales et les organismes du sol. Notre étude a mis en évidence que les agriculteurs sont sensibles aux effets des pratiques conventionnelles (labour profond, engrais de synthèse, pesticides et monoculture) et des pratiques alternatives (labour peu profond, fertilisation organique et cultures associées) sur l'activité des organismes du sol. Une étude menée aux Philippines par Luangduangsitthideth et al. (2019), a montré que les agriculteurs perçoivent l'agriculture de conservation comme un moyen d'améliorer la préservation de la biodiversité. Les pratiques alternatives peuvent aussi être utilisées pour réduire les attaques des nuisibles (Morales & Perfecto, 2000). Au Guatemala, les agriculteurs utilisent des plantes de services, comme *Chrysanthemum parthenium* (grande camomille, Astéracées) ou *Chenopodium ambrosioides* (épazote, Chenopodiacées) pour lutter contre des nuisibles (Morales & Perfecto, 2000). *C. parthenium* a un effet délétère sur les larves de *Phthorimaea operculella* (teigne de la pomme de terre, Lépidoptères Gelechiidae). *P. operculella* est un nuisible dévastateur des cultures de tubercules et également d'autres cultures, comme la tomate et l'aubergine (Erdoğan & Yilmaz, 2018). *C. ambrosioides* permet de lutter contre *Frankliniella occidentalis* (thrips, Thysanoptère Thripidae) et *Trialeurodes vaporariorum* (mouche blanche, Hémiptères Aleyrodidae) (Chiasson et al., 2004). Au Honduras, les agriculteurs ont recours à des méthodes, comme la rotation de cultures et l'application de cendres pour réduire les populations des larves de hannetons (Pauli et al., 2012).

La dernière étape de cet atelier participatif a débouché sur la construction collective d'un système maraîcher innovant. Lors des échanges, il a été proposé un travail du sol peu profond de la parcelle à l'aide d'un pulvérisateur à disque, qui sert généralement à l'ameublissement des sols et à la destruction des mauvaises herbes. Cet outil permet aussi de mélanger la terre et les débris végétaux en surface. La profondeur travaillée peut varier de 3 à 15 cm (Aboudrare, 2014). Les agriculteurs ont montré un intérêt tout particulier pour la protection phytosanitaire en raison des fortes pressions parasitaires auxquelles sont soumises les exploitations dans les zones tropicales (Lewis et al., 2016) ; ils ont proposé une combinaison de pratiques pour répondre à cette problématique. Dans un premier temps, l'application de paille de canne ou de bois raméal fragmenté (BRF) a été proposée pour gérer l'enherbement des parcelles. Au Brésil, la paille de canne est utilisée par les agriculteurs afin de réduire la germination et la

prolifération des plantes adventices dans les parcelles agricoles (Leal et al., 2013). Le BRF a été utilisé pour la première fois au Canada dans les années 1970. Le procédé consiste à broyer grossièrement des branches d'espèces arborescentes de diamètre inférieur à 7cm à l'aide d'un broyeur. Selon une étude, l'apport de BRF, sous forme de paillage, limite à 96% la prolifération des plantes adventices (Rowley et al., 2011). Dans un second temps, les agriculteurs ont proposé la mise en place de plantes répulsives et hôtes (technique du « push and pull ») pour gérer les attaques de nuisibles. En Afrique, la petite agriculture familiale a recours à cette technique pour lutter contre la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*). Les agriculteurs utilisent des plantes pièges comme l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*) et des plantes répulsives comme le trèfle d'Espagne (*Desmodium uncinatum*). Cette combinaison de plantes permet de réduire les attaques des bioagresseurs sur les cultures de maïs (Hainzelin, 2015). Dans un troisième temps, l'utilisation de produits phytosanitaires autorisés en agriculture biologique a été proposée par les agriculteurs. Ces produits sont exclusivement des produits d'origine naturelle (animale, végétale, minérale) (règlement CE 889/2008).

Le choix des cultures a été fait par les agriculteurs en cohérence avec la demande du marché : tomates, laitues, haricot, pastèques et piments végétariens (Agreste, 2018). La rotation de culture consiste à alterner les familles botaniques lors de la succession des cultures d'une parcelle. La même succession de cultures peut être reconduite plusieurs fois dans le temps (Chamberlain et al., 2020). Cette technique participe à la gestion des bioagresseurs et de l'enherbement (Wezel et al., 2014).

Lors des échanges, les agriculteurs ont proposé une fertilisation organique, sous forme de vermicompost, qui constitue un complément nutritionnel doté d'une capacité de régénération et d'aération du sol. Le vermicompost est un produit plus homogène, avec une structure plus fine et est plus riche en éléments nutritifs assimilables par les végétaux, comparé aux composts traditionnels (Edwards & Burrows, 1998 ; Ndegwa & Thompson, 2001). Les résultats obtenus lors de cet atelier participatif ont permis de co-concevoir un système maraîcher agroécologique innovant à tester en plein champ.

4.2. Evaluation agroenvironnementale et économique

Du point de vue de l'évaluation agroenvironnementale, les apports de vermicompost, la diversité des cultures, la protection de la ressource du sol (paillage, absence de désherbant chimique) ont permis de préserver la biodiversité et les ressources naturelles des agroécosystèmes. Les résultats de l'évaluation ont montré des différences entre 2017 et 2018.

Ceci s'explique par un travail du sol réalisé uniquement en 2017, avant la mise en place des parcelles. En 2018, deux applications de Dipel DF® ont été réalisées dans les parcelles AG, afin de combattre l'attaque de chenilles.

L'évaluation économique présente des résultats intéressants. L'indicateur « efficience du processus » a montré que pour une même année AG est plus efficient qu'AGSPP. Ceci pourrait s'expliquer par la diversité végétale qui est plus importante en AGSPP, ce qui augmente le coût de production. L'indicateur « efficacité économique » indique que les consommations intermédiaires sont trop importantes. Les plants ont été achetés en pépinière, ce qui génère un coût de production conséquent. Il semble important pour un système innovant que le producteur prenne en charge la fabrication des plants, afin de réduire son coût de production, d'augmenter sa valeur ajoutée et donc son chiffre d'affaire sur le produit. De plus, l'épandage manuel des copeaux de bois a été coûteux, et son efficacité est valable pour une période de 5 mois, en plein champ (Bruchon et al., 2015). Malgré l'obtention d'une meilleure production en AGSPP par rapport à AG, les consommations intermédiaires d'AGSPP restent trop onéreuses sur les deux années. Du point de vue économique, ces indicateurs montrent qu'il ne semble pas nécessaire d'intégrer d'autres plantes de service (cosmos, œillet d'inde et gros thym) parce que l'augmentation du produit n'est pas significativement différente au regard des consommations intermédiaires supplémentaires qu'ASPP occasionne. Le système AGSPP s'avère moins efficient qu'AG pour les deux années étudiées.

Les résultats de rendement ont indiqué une différence entre 2017 et 2018. La faible production de tomates en 2017, pourrait s'expliquer par la période de plantation tardive. En 2017, le cycle a débuté en mars alors qu'en 2018 il a débuté en janvier. Les plants de tomates réagissent aux variations de température durant leur cycle de croissance. Lorsqu'ils sont soumis à des températures supérieures à 30°C durant le jour et la nuit, cela entraîne une diminution du taux de floraison et de fructification (Faruq et al., 2012). Dans l'évaluation économique l'indicateur « autonomie économique » a montré d'énormes différences entre les systèmes d'une année à l'autre. Cela pourrait s'expliquer par la qualité de l'indicateur, qui a été conçu pour une culture de type monoculture ou pour une exploitation qui peut avoir plusieurs cultures conduites séparément. C'est un indicateur qui n'a pas été conçu pour des parcelles plurispécifiques et en considérant que la culture principale soit uniquement de la tomate. La notion d'autonomie économique se trouve alors biaisé, car la diversité des plantes confère une autonomie au système. De plus, dès lors qu'on améliore le volume de production de tomate cela génère une baisse de l'indicateur, qui est artificiel puisque les autres

productions n'ont pas baissé leur niveau de production. La forte « autonomie économique » observée en 2017, traduit les mauvaises performances de la production principale. En complément, l'indicateur « taux de spécialisation » reste élevé en AG et en AGSPP pour les deux années, ce qui démontre que les systèmes sont très diversifiés et robustes. Cet indicateur illustre bien que la diminution de l'indicateur « autonomie économique » est artificiel car la production de tomate est meilleure en 2018. Sachant que nous étions à l'échelle de la parcelle et non de l'exploitation, les postes tels que « subvention d'exploitation », « salaires et charges sociales du personnel » n'ont pas pu être chiffrés. De plus, le calcul du résultat social (ou valeur ajoutée nette) ne comporte aucune dotation aux amortissements ou provisions liées à l'usure des équipements d'exploitation, calculées en fonction de leurs coûts d'investissements rapportés à leur rythme d'utilisation et à la durée de vie. Cette évaluation a permis de mettre en évidence que certaines opérations culturales agroécologiques doivent être repensées et adaptées afin de rendre les parcelles les plus autonomes possible.

5. Conclusion

Notre étude a mis en avant que la co-conception des systèmes avec les agriculteurs permet d'avoir une vision plus réaliste des besoins de ces derniers en termes de pratiques innovantes et plus respectueuses de l'environnement. La co-conception a également contribué à la création de système innovant qui convient à la fois aux agriculteurs et participe à l'avancée des recherches.

L'évaluation multicrière des systèmes a montré que d'une année à l'autre, les résultats varient à cause de diverses raisons, comme les conditions climatiques. L'évaluation agroenvironnementale a montré que les opérations culturales innovantes contribuaient au développement durable, en respectant les ressources naturelles. L'évaluation économique a mis en évidence qu'AG est plus efficient qu'AGSPP car malgré un produit d'actif élevé, les coûts de production restent trop importants en AGSPP. Durant 2018, année de référence où toutes les conditions de culture étaient réunies (plantation du cycle tomate/laitue durant la période adéquate), les systèmes AG et AGSPP ont obtenu des rendements pouvant être considérés comme comparables aux rendements de l'agriculture conventionnelle. Cependant, l'indicateur « autonomie économique » n'était pas adapté aux systèmes car il n'a pas pu traduire correctement les performances de la production principale. L'indicateur « taux de spécialisation » a mis en évidence que les systèmes étaient robustes.

CHAPITRE 3 :

Impact de pratiques agroécologiques sur la biodiversité et les services écosystémiques en plein champ

1. Introduction

En agronomie, l'expérimentation factorielle vise à tester des techniques élémentaires (fertilisation, produits phytosanitaires...) afin de pouvoir analyser leurs effets et leurs interactions (Meynard & Dourmad, 2014 ; Deguine et al., 2016). Cette méthode permet de comparer plusieurs modalités d'une technique ou de techniques combinées, en fixant les autres à des valeurs constantes (Deytieux et al., 2012). Par exemple, elle permet de comparer l'impact d'un facteur (dose d'engrais) sur différents niveaux (F0 pas d'engrais, F1 100 kg/ha d'urée, F2 200 kg/ha d'urée). Elle permet également de tester une combinaison de facteurs (ex : variété végétale et dose d'engrais) en variant les niveaux (ex : effet de 3 doses d'engrais sur 4 variétés végétales) (Naudin, 2007). Dans ce type d'approche, le dispositif expérimental est mis en place sur des parcelles de petite surface. Ces parcelles représentent l'unité de base, et chaque unité représente une modalité de traitement spécifique (Havard et al., 2017). Cette méthode d'expérimentation permet de tester les innovations indépendamment. Cependant elle est limitée par le nombre d'innovations que l'on peut tester au sein d'une parcelle.

Contrairement à l'expérimentation factorielle, l'expérimentation système consiste « à tester la capacité d'un système de culture à satisfaire les objectifs assignés en termes agronomiques, technico-économiques et de contribution au développement durable » (Deytieux et al., 2012). La réussite d'une expérimentation système n'est pas mesurée par la compréhension d'un processus en isolant les effets d'un facteur ou des facteurs expérimentés mais par la capacité du système de culture innovant à atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu (Deytieux et al., 2012). Ce système de culture innovant doit pouvoir répondre aux objectifs du développement durable. Dans cette approche expérimentale, il s'agit de tester au champ la combinaison de différentes innovations, en tenant compte des interactions entre ces innovations et de leurs effets sur les différentes composantes du système de culture (Reau et al., 1996 ; Nolot & Debaeke, 2003). Le dispositif expérimental peut se faire en station ou chez l'agriculteur, à l'échelle d'une parcelle ou d'une exploitation agricole, sur une année ou plusieurs années (Deguine et al., 2016). Il est testé sur plusieurs cycles de culture (Debaeke et al., 1996, Deguine et al., 2016). L'expérimentation système fait l'objet d'un suivi régulier sous forme d'observations et de mesures. Ces dernières permettent de caractériser la progression du système en comparant l'état initial et l'état final de la parcelle (propriétés du sol, activité biologique, bilan hydrique, gestion des ravageurs...) (Deytieux et al., 2012) et de réaliser ainsi une évaluation du nouveau système de culture (Nolot & Debaeke, 2003). Des changements peuvent être opérés dans le système à l'issue des résultats observés, sous forme de « règle de

décision » (Reau et al., 1996). L'expérimentation système participe à l'amélioration de l'appropriation des systèmes de culture innovants auprès des différents acteurs (Deytieux et al., 2012).

En Janvier 2017, au cours d'ateliers participatifs, un ensemble d'acteurs (agriculteurs, scientifiques et techniciens) ont mis en commun leurs expertises afin d'établir des systèmes de culture maraîchers agroécologiques basés sur des opérations culturales innovantes en rupture avec l'existant. De ces ateliers sont nés deux prototypes basés sur la réflexion de l'ensemble des acteurs. Dans ce chapitre, nous nous appuyerons sur le concept de l'expérimentation système pour tester la cohérence des systèmes de culture maraîchers innovants proposés au cours des ateliers de co-conception. L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser l'impact d'un ensemble d'opérations culturales innovantes sur la biodiversité du sol et les services écosystémiques. Plusieurs hypothèses sont testées dans ce chapitre. Les systèmes innovants permettraient de i) stimuler la biodiversité édaphique, ii) régénérer la fertilité du sol, iii) restaurer la structure du sol, iv) rétablir la régulation naturelle des bioagresseurs et v) obtenir un rendement similaire à celui d'un système conventionnel. Afin de tester ces hypothèses, les opérations culturales utilisées dans une parcelle conventionnelle d'agriculteur et dans les systèmes innovants sont comparées sur la base de critères agronomiques et écologiques. Les résultats de ce chapitre font l'objet d'un article soumis à *Pedobiologia* (n° de référence : PEDOBI-D-20-00195).

2. Matériels et méthodes

2.1. Les systèmes de cultures étudiés

Des parcelles maraîchères agroécologiques innovantes ont été comparées à une parcelle conventionnelle (témoin). Ces trois systèmes de culture se situent en Grande-Terre sur vertisol. La parcelle conventionnelle est celle d'un agriculteur maraîcher, situé dans la commune du Moule (tableau 11). Les parcelles agroécologiques, AG et AGSPP ont été mises en place en station expérimentale sur le domaine de l'INRAE (Godet, Petit-Canal), voir chapitre 2, Figures 19, 20 et 21. Les opérations culturales des parcelles agroécologiques se basent sur l'agriculture de conservation : travail du sol réduit, couverture semi-permanente ou permanente du sol et rotation/cultures associées. La parcelle témoin se base sur une agriculture conventionnelle : travail profond du sol, application de produits phytosanitaires et de fertilisants de synthèse et monoculture. Des analyses comparatives ont été menées sur ces

trois systèmes : la diversité du sol (macrofaune, mésofaune, microorganismes), la fertilité du sol (analyses chimiques) et la structure du sol (morphologie des agrégats).

Tableau 11 : Caractérisation des opérations culturales des parcelles

Parcelle	Opérations culturales
AG	<p>Travail du sol : Labour superficiel (< 15 cm) ;</p> <p>Traitements phytosanitaires possibles (en cas de nécessité): Insecticides (Dipel DF®), Fongicides (Bouillie bordelaise), Insecticides/Fongicides (Savon noir ou Purin de Neem) ;</p> <p>Plantes répulsives et plantes hôtes (régulation bioagresseurs): <i>Thymus vulgaris</i> (thym), <i>Ocimum basilicum</i> (basilic), <i>Rosmarinus officinalis</i> (romarin), <i>Plectranthus neochilus</i> (doliprane), <i>Zea mays</i> (maïs) et <i>Hibiscus sabdariifa</i> (groseille) ;</p> <p>Fertilisation : 100g de vermicompost (2 fois par cycle)</p> <p>Gestion de l'enherbement : Paillage de canne à sucre (2017)/ Copeaux de bois (2018) ;</p> <p>Cycle de culture 1 : <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate var. Heatmaster) et <i>Lactuca sativa</i> (laitue, var. Batavia Blonde) ;</p> <p>Cycle de culture 2 : <i>Phaseolus vulgaris</i> (haricot, var. Haricot borlotti).</p>
AGSPP	<p>Travail du sol : Labour superficiel (< 15cm) ;</p> <p>Traitements phytosanitaires : Aucun traitement</p> <p>Double barrière de plantes répulsives et plantes hôtes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1^{ère} barrière végétale : <i>Thymus vulgaris</i> (thym), <i>Ocimum basilicum</i> (basilic), <i>Rosmarinus officinalis</i> (romarin), <i>Plectranthus neochilus</i> (doliprane), <i>Zea mays</i> (maïs), et <i>Hibiscus sabdariifa</i> (groseille) - 2^{ème} barrière végétale : <i>Plectranthus amboinicus</i> (gros thym), <i>Tagetes patula</i> (œillet de d'inde), et <i>Cosmos sulphureus</i> (cosmos) ; <p>Fertilisation : 100 g de vermicompost (2 fois par cycle)</p> <p>Gestion de l'enherbement : Paillage de canne à sucre (2017)/ Copeaux de bois (2018) ;</p>

	<p>Cycle de culture 1 : <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate var. Heatmaster) et <i>Lactuca sativa</i> (laitue, var. Batavia Blonde) ;</p> <p>Cycle de culture 2 : <i>Phaseolus vulgaris</i> (haricot, var. Haricot borlotti).</p>
Parcelle conventionnelle	<p>Travail du sol : Labour profond (>20cm) ;</p> <p>Traitements phytosanitaires : Insecticides (Decis Protech®, Karate Zéon®), Fongicides (Dithane Neotec®, Octiva®) ;</p> <p>Fertilisation : fertilisant de synthèse (3 passages : à la plantation, à la floraison et à la fructification) ;</p> <p>Gestion de l'enherbement : désherbage chimique (Roundup, 3 passages par cycle) ;</p> <p>Pas de paillage ;</p> <p>Monoculture de <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate var. Heatmaster).</p>

2.2. Échantillonnage du sol

Des prélèvements ont été effectués au début de l'expérimentation, en Mars 2017 (T0) et à la fin de l'expérimentation, en Septembre 2018 (T18) pour les parcelles agroécologiques et la parcelle conventionnelle. Des analyses biologiques (macrofaune, mésofaune et micro-organismes), chimiques et structurales du sol ont été réalisées sur ces échantillons.

2.2.1. Macrofaune

Au centre de chacune des 10 parcelles agroécologiques, un prélèvement de sol a été effectué en utilisant la méthode ISO 23611-S (ISO, 2011). Les invertébrés ont été identifiés à la morphospèce puis classés selon leurs groupes fonctionnels. Cinq prélèvements ont été effectués à l'intérieur de la parcelle conventionnelle à au moins 1 mètre de la bordure. Une distance de 20 mètres entre les 5 points de prélèvement a été respectée (§ chapitre 1).

2.2.2. Mésofaune

Un prélèvement de sol de 20 × 20 × 15 cm a été effectué au centre de chacune des 10 parcelles agroécologiques. Au laboratoire, la faune est extraite à l'aide de la méthode Berlèse pendant 15 jours (Figure 26). Cinq prélèvements ont été effectués à l'intérieur de la parcelle conventionnelle à au moins 1 mètre de la bordure. Une distance de 20 mètres entre les 5 points de prélèvement a été respectée (§ chapitre 1).



Figure 26 : Extraction de la mésofaune (méthode Berlèse)

2.2.3. Mesure de l'activité microbienne du sol

À chaque point de prélèvement de la macrofaune, le sol a été mélangé délicatement afin d'obtenir un échantillon composite homogène (100 g de sol). L'activité microbienne totale du sol a été mesurée à l'aide du dosage de la Fluorescéine diacétate hydrolase (Schnüner & Rosswall, 1982) dans les 3 systèmes de cultures (§ chapitre 1 pour méthodologie détaillée).

2.3. Propriétés chimiques du sol

Au début (T0) et à la fin (T18) de l'expérimentation, un prélèvement de sol de 9 cm de diamètre x 15 cm de profondeur a été effectué au centre de chaque parcelle agroécologique, soit 5 prélèvements par système de culture. Cinq prélèvements ont été effectués à l'intérieur de la parcelle conventionnelle, au moins à 1 mètre de la bordure. Une distance de 20 mètres entre les 5 points de prélèvement a été respectée. Les caractéristiques chimiques du sol suivantes ont été mesurées : $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} , N total, C total, C/N, P total, K total, CEC, P assimilable, cations (§ chapitre 1 pour le détail des méthodes).

2.4. État structural du sol

Au début et à la fin de l'expérimentation, au centre de chaque parcelle agroécologique, un prélèvement de sol a été fait à l'aide d'un cylindre de 8 cm de diamètre et 8,5 cm de hauteur. Cinq prélèvements ont été effectués à l'intérieur de la parcelle conventionnelle, au moins à 1 mètre de la bordure. Une distance de 20 mètres entre les 5 points de prélèvement a été

respectée. L'étude de l'état structural du sol a été réalisée à l'aide de la méthode élaborée par Velasquez et al. (2007), (§ chapitre 1 pour le détail de la méthode).

2.5. Activité alimentaire (test Bait Lamina)

L'activité alimentaire de la faune du sol a été mesurée par le test de Bait-Lamina dans les parcelles agroécologiques (Kratz, 1998). Cette méthode permet de mesurer la vitesse de la décomposition de la matière organique, en particulier l'activité alimentaire des invertébrés de la mésofaune et de la macrofaune du sol. Les sticks en PVC percés de 16 trous sont remplis d'un substrat organique qui sera consommé par les organismes du sol au cours du temps. Le substrat organique des sticks se compose principalement de cellulose, de son de blé et de charbon actif. Un nombre de 7 sticks ont été introduits dans le sol à environ 15 cm de profondeur pendant 14 jours sur chaque parcelle, soit 35 sticks par système de culture. À la fin du temps d'exposition de 14 jours, l'activité alimentaire est évaluée en quantifiant le substrat organique consommé par les organismes du sol. Le comptage se fait en évaluant le nombre de trous vides, semi-vides et pleins. L'activité alimentaire est de 100% si l'ensemble des substrats organiques présents sur un stick a été entièrement consommé. Le test de Bait-Lamina permet d'obtenir une indication de l'activité alimentaire globale du sol.

Les mesures de l'activité alimentaire sont difficilement réalisables chez les agriculteurs maraîchers, car une fois les sticks posés, ils doivent être en contact avec le sol pendant toute la durée du test. Il aurait fallu limiter les interventions sur la parcelle, ce qui aurait été une contrainte forte pour les agriculteurs. Par conséquent, le témoin choisi est un sol nu du domaine INRAE de Godet (Petit-Canal, Guadeloupe), qui représente l'état du sol des parcelles agroécologiques à T0.

2.6. Suivi des systèmes agroécologiques

2.6.1. Biomasse aérienne et racinaire

À chaque fin de cycle de culture, la biomasse fraîche et sèche des parties aériennes et racinaires et le pourcentage de nécroses racinaires ont été mesurés sur les plants sélectionnés dans les systèmes de culture (Figure 27). En 2017, 25 plants de tomates et 25 plants de laitues ont été sélectionnés aléatoirement dans les systèmes AG et dans AGSPP. Après le cycle tomate/laitue, le cycle haricot a été mis en place en août 2017, cependant les résultats n'ont pas pu être exploités en raison des fortes pluies dues à la saison cyclonique. Un second cycle

tomate/laitue a été mis en place en janvier 2018. Cinquante plants de tomates et 50 plants de laitues sélectionnés aléatoirement dans chaque système de culture agroécologique ont été suivis. Après le cycle de tomate/laitue, nous avons poursuivi avec la plantation d'haricots en juin 2018. Tout comme pour le cycle précédent, les prélèvements des 50 plants ont été effectués en fin de cycle.

Au laboratoire, pour chaque plante, la partie aérienne a été séparée de la partie racinaire au niveau du collet. Les biomasses fraîches ont été pesées dans des barquettes puis mises à l'étuve à 70°C, pendant 72 heures. Ensuite, les biomasses sèches aériennes et racinaires ont été mesurées. Au préalable, l'indice de nécrose racinaire (pourcentage de racines nécrosées sur racines totales) avait été mesuré sur les racines fraîches.



Prélèvement des plants

Pesée de la biomasse fraîche



Nettoyage de la partie racinaire avant séchage puis pesée

Figure 27 : Étapes de prélèvements et pesée de la biomasse (laitue)

2.6.2. Production culturale

En 2017, un suivi cultural hebdomadaire des parcelles a été effectué : suivi des plants sélectionnés (état de santé de la plante), fréquence d'entretien (taille et désherbage manuel), et observation de la biodiversité aérienne. En complément du suivi de l'année 2017, des suivis sur la croissance, la mesure du nombre de boutons floraux, de fleurs et de fleurs nouées, ainsi que le taux de mortalité ont été réalisés sur les plants de tomates de l'année 2018. À partir des données obtenues, nous avons calculé le taux de floraison (%) (nombre de fleurs/nombre de boutons floraux) et le taux de fructification (%) (nombre de fruits/ nombre de fleurs) pour les parcelles AG et AGSPP (Amar, 2017). Ce suivi n'a pas été effectué sur la parcelle conventionnelle.

De plus, en 2017 et en 2018, nous avons mesurés les rendements des cultures de laitues et de tomates (nombre de fruits commercialisables produits) obtenus dans AG et AGSPP. Les fruits des plants de tomates sélectionnés ont été pesés à chaque récolte. Pour la parcelle conventionnelle, nous avons utilisé les données de la Chambre d'agriculture de la Guadeloupe pour évaluer la production de tomates.

2.7. Atelier de restitution

En Juillet 2017, après le premier cycle de culture, un atelier a été réalisé avec les agriculteurs, les scientifiques et les techniciens présents lors de la co-conception des systèmes innovants en Janvier 2017. Cet atelier de restitution avait pour objectif de faire le point sur les performances des systèmes mis en place, de continuer le processus d'apprentissage et de faire évoluer le cas échéant les systèmes.

2.8. Analyses statistiques

Des tests non-paramétriques de Kruskal Wallis ont été effectués afin de comparer les caractéristiques biologique, chimique et morphologique des trois parcelles : conventionnelle, AG et AGSPP. La diversité des espèces a été calculée sur la base de l'indice de Shannon. Dans un second temps, les données collectées lors du suivi des parcelles AG et AGSPP (activité alimentaire, biomasse sèche aérienne et racinaire, nombres de boutons floraux et nombre de fruits) ont été analysées et comparées en utilisant des tests non paramétriques de Wilcoxon Mann-Whitney. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio.

3. Résultats

3.1. Diversité biologique

3.1.1. Macrofaune

À l'état initial (après labour des parcelles), aucune différence significative n'est observée entre les parcelles conventionnelle, AG et AGSPP pour la macrofaune du sol (Kruskal-Wallis ; $p > 0,05$, tableau 12).

Tableau 12 : Densité moyenne (\pm SE) des groupes fonctionnels de macrofaune à T0 dans les parcelles conventionnelle, AG et AGSPP localisée en Grande-Terre sur vertisol (Guadeloupe).

Densité moyenne (nombre d'individu m ²)	Conventionnelle	AG	AGSPP	p-value
Ingénieurs de l'écosystème	166 \pm 75	150 \pm 69	179 \pm 76	P=0,95
Transformateurs de litière	45 \pm 16	182 \pm 89	109 \pm 18	P=0,26
Prédateurs	42 \pm 14	134 \pm 75	138 \pm 79	P=0,44
Abondance totale	253 \pm 72	467 \pm 222	426 \pm 155	P=0,79

Dix-huit mois après la mise en place de l'expérimentation, l'abondance totale de la macrofaune n'est pas significativement différente entre le système conventionnel et les parcelles agroécologiques: 1529 \pm 368 individus.m⁻² pour la parcelle AGSPP, 586 \pm 353 individus.m⁻² pour la parcelle AG et 389 \pm 113 individus.m⁻² pour la parcelle conventionnelle (p=0,053). Cependant, il y a significativement plus d'ingénieurs de l'écosystème dans les parcelles agroécologiques comparé à la parcelle conventionnelle (p = 0,01, Figure 28). La forte abondance d'ingénieurs de l'écosystème dans les parcelles AG et AGSPP est due à l'abondance des fourmis et des vers de terre. De plus, il y a significativement plus de prédateurs dans les parcelles AGSPP comparé à AG et à parcelle conventionnelle (p = 0,01, Figure 28). La forte quantité des prédateurs est due à la présence d'Arachnida, de Chilopoda et de Formicidae dans la parcelle AGSPP comparée aux parcelles AG et au système conventionnel (Figure 28).

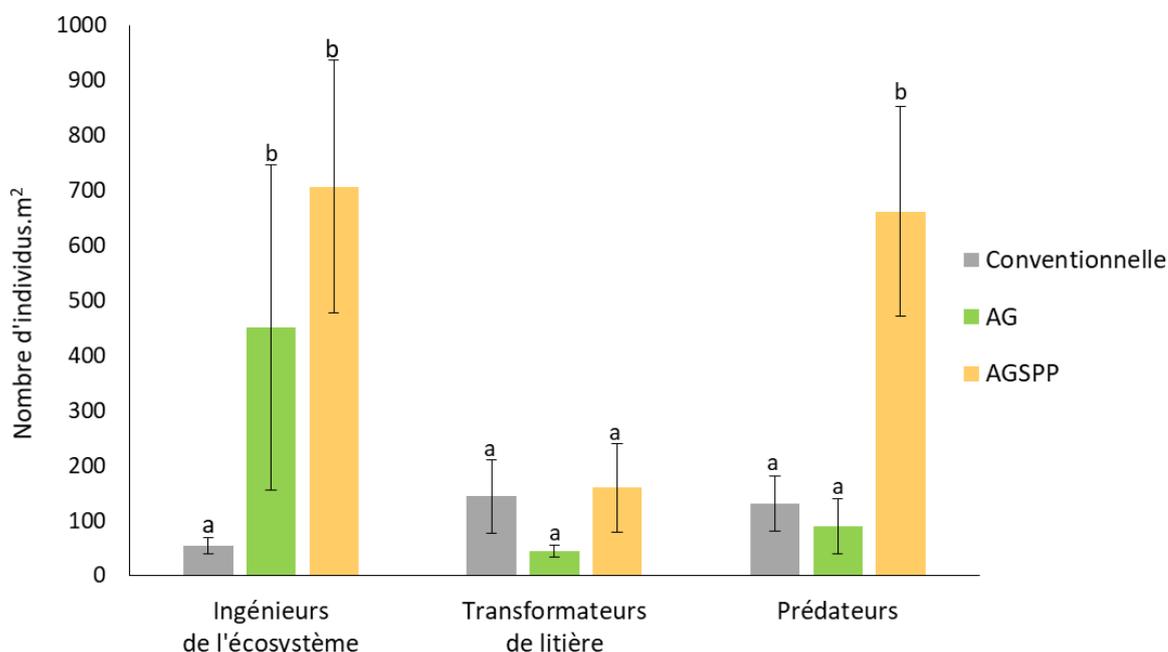


Figure 28 : Groupes fonctionnels de la macrofaune dans les parcelles maraîchères conventionnelle, AG et AGSPP, 18 mois après leur mise en place. Les lettres différentes représentent des valeurs significativement différentes (test de Kruskal-Wallis). Les barres représentent les erreurs standards.

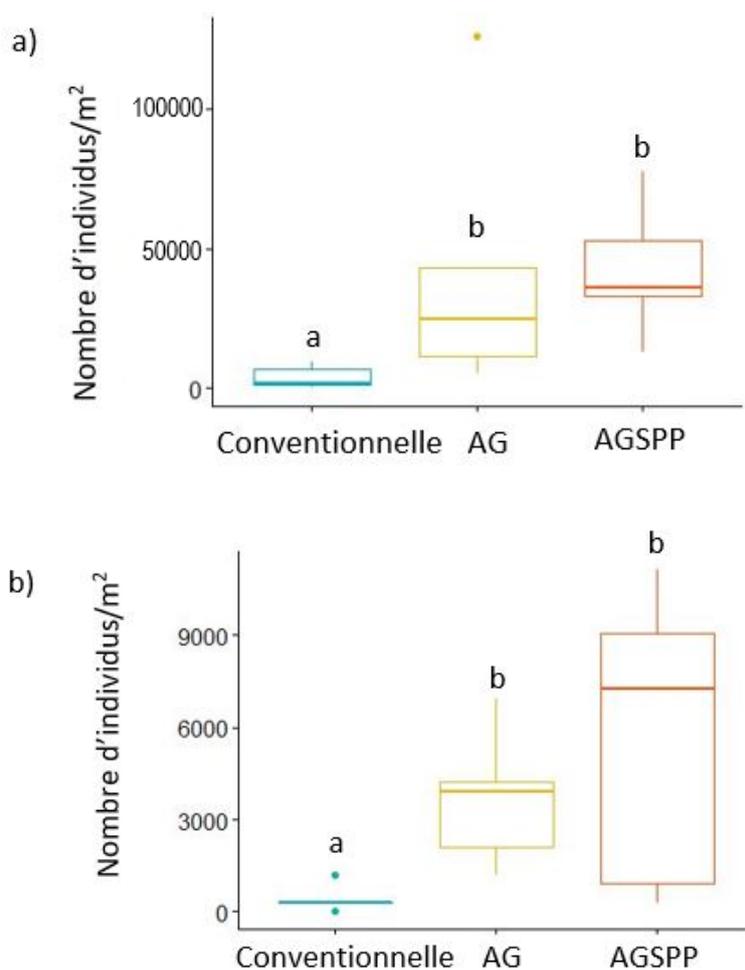
À T18, le nombre d'espèces est identique (20) pour les parcelles AG et AGSPP contre 13 espèces pour la parcelle conventionnelle. L'indice de diversité de Shannon-Weaver a été calculé pour comparer les parcelles agroécologiques et la parcelle conventionnelle de tomates. À dix-huit mois, l'indice de Shannon est de 2,1 pour la parcelle AGSPP, de 2,04 pour la parcelle AG et de 1,94 pour la parcelle conventionnelle. L'indice de Shannon est généralement compris entre 1 et 4,5. D'après cet indice la biodiversité est relativement moyenne pour les parcelles AG et AGSPP comparé à la parcelle conventionnelle, qui a une biodiversité plutôt faible.

L'identification taxonomique a été réalisée, jusqu'à la morphoespèce. Les résultats ont montré à dix-huit mois, la présence d'espèces communes dans les parcelles agroécologiques et la parcelle conventionnelle, telles que *Solenopsis invicta* Buren, *Camponotus sexgutattus* Cristobal et *Cardiocondyla ermeryi* Forel (Formicidae), Tetragnathidae sp.1 (Arachnida), Aphididae sp.1 (Hemiptera), Platyarthridae sp.1 et Philosciidae sp.1 (Isopoda) (Annexe 5). Nos résultats ont montré la présence d'espèces communes aux deux parcelles agroécologiques :

Polypheretima elongata Perrier (Annelida Oligochaeta), *Colopterus* sp.1 (Coleoptera), *Euborellia annulipes* Lucas (Dermaptera), Thomisidae sp.1 (Arachnida) et Geophilidae sp.1 (Myriapoda). D'autres espèces ont été trouvées uniquement dans les parcelles AGSPP comme *Pontoscolex corethrurus* Muller (Annelida Oligochaeta), *Cyphomyrmex minutus* Mayr (Formicidae) et *Cafius* sp.1 (Staphilinidae).

3.1.2 Mésofaune

À dix-mois, les densités de mésofaune du sol sont significativement différentes entre la parcelle conventionnelle et les parcelles agroécologiques. Une forte abondance d'acariens a été observée pour la parcelle AGSPP (42556 ± 10745 individus.m⁻²) et pour la parcelle AG (42134 ± 22018 individus.m⁻²) en comparaison avec la parcelle conventionnelle (3858 ± 1812 individus.m⁻²) ($p=0,015$). L'abondance des collemboles est également significativement différente entre les parcelles : 5726 ± 2184 individus.m⁻² pour la parcelle AGSPP, 3677 ± 988 individus.m⁻² pour la parcelle AG et 422 ± 204 individus.m⁻² pour la parcelle conventionnelle ($p=0,003$), (Figure 29).



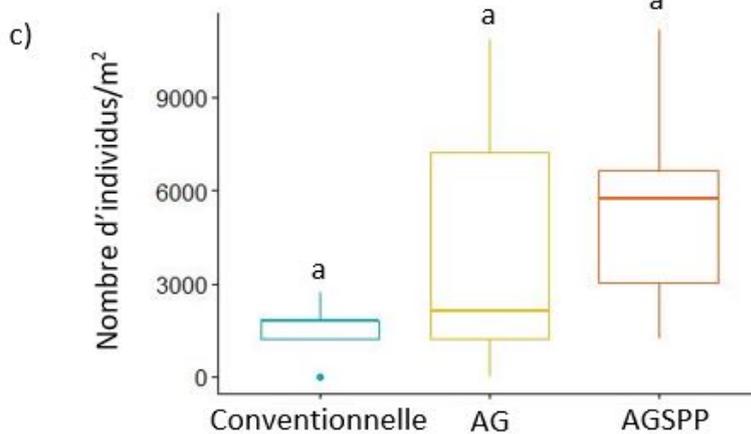


Figure 29 : Abondance de la mésofaune dans les parcelles maraîchères conventionnelle, AG et AGSPP, 18 mois après leur mise en place, a) abondance des acariens, b) abondance des collemboles et c) abondance des autres groupes de mésofaune. Les lettres différentes représentent des valeurs significativement différentes (test de Kruskal Wallis).

3.1.3. Activité microbienne

À T0, l'activité n'est pas significativement différente entre les parcelles agroécologiques et la parcelle conventionnelle ($p=0,07$). Elle est de $18,05 \pm 1,23 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle conventionnelle, de $17,01 \pm 2,24 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle AGSPP et de $12,56 \pm 1,52 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle AG. À dix-huit mois, la FDA n'est pas significativement différente entre les parcelles ($p=0,18$). Elle est de $17,49 \pm 1,80 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle conventionnelle $15,91 \pm 1,97 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle AGSPP et de $11,99 \pm 1,20 \mu\text{g}$ fluorescéine $\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ pour la parcelle AG.

3.2. Services agro-écosystémiques

3.2.1. État structural du sol

À T0, la morphologie du sol n'est pas significativement différente entre la parcelle conventionnelle et les parcelles agroécologiques (Figure 30).

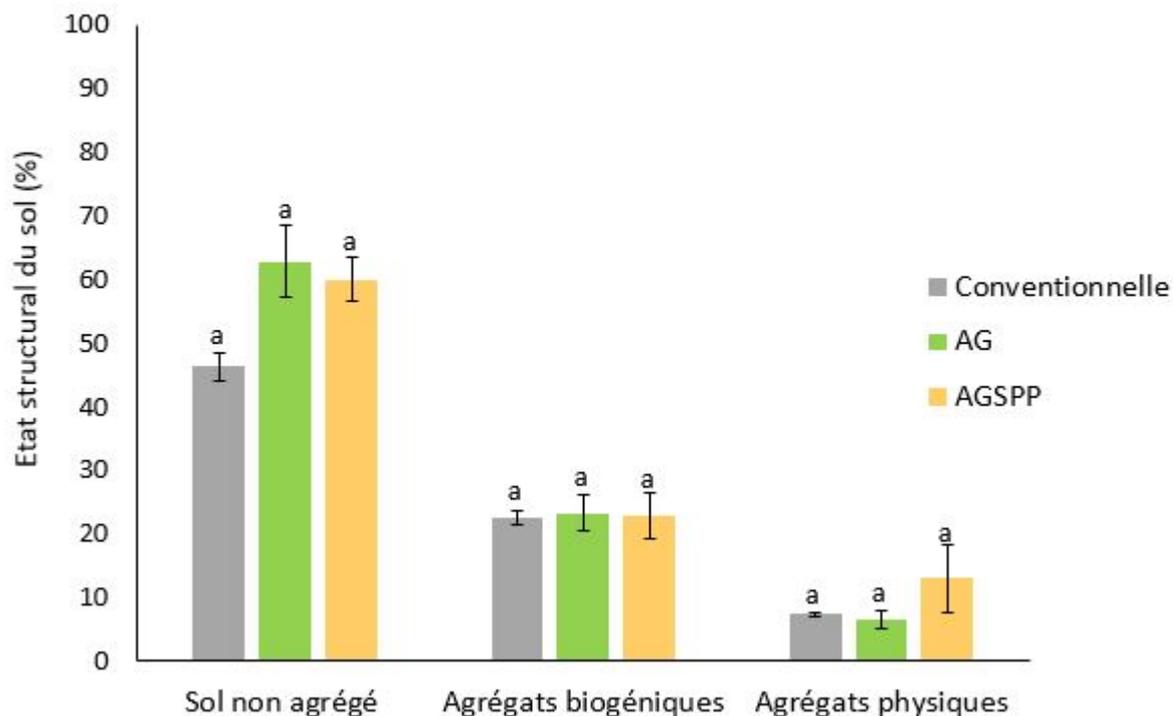


Figure 30 : État structural du sol des parcelles maraîchères conventionnelles, AG et AGSPP à l'état initial. Les lettres différentes représentent des valeurs significativement différentes (test de Kruskal –Wallis). Les barres représentent les erreurs standards.

Dix-huit mois après la mise en place des parcelles, la morphologie est significativement différente entre la parcelle conventionnelle et les parcelles agroécologiques (Figure 31). La parcelle conventionnelle présente 39% de sol non agrégé contre 30% pour la parcelle AGSPP et 4% pour la parcelle AG ($p=0,012$). La parcelle AGSPP présente 54% d'agrégats biogéniques et la parcelle AG 0,37% ($p=0,008$). La parcelle AG présente 86% d'agrégats physiques et la parcelle AGSPP, 4% ($p=0,008$).

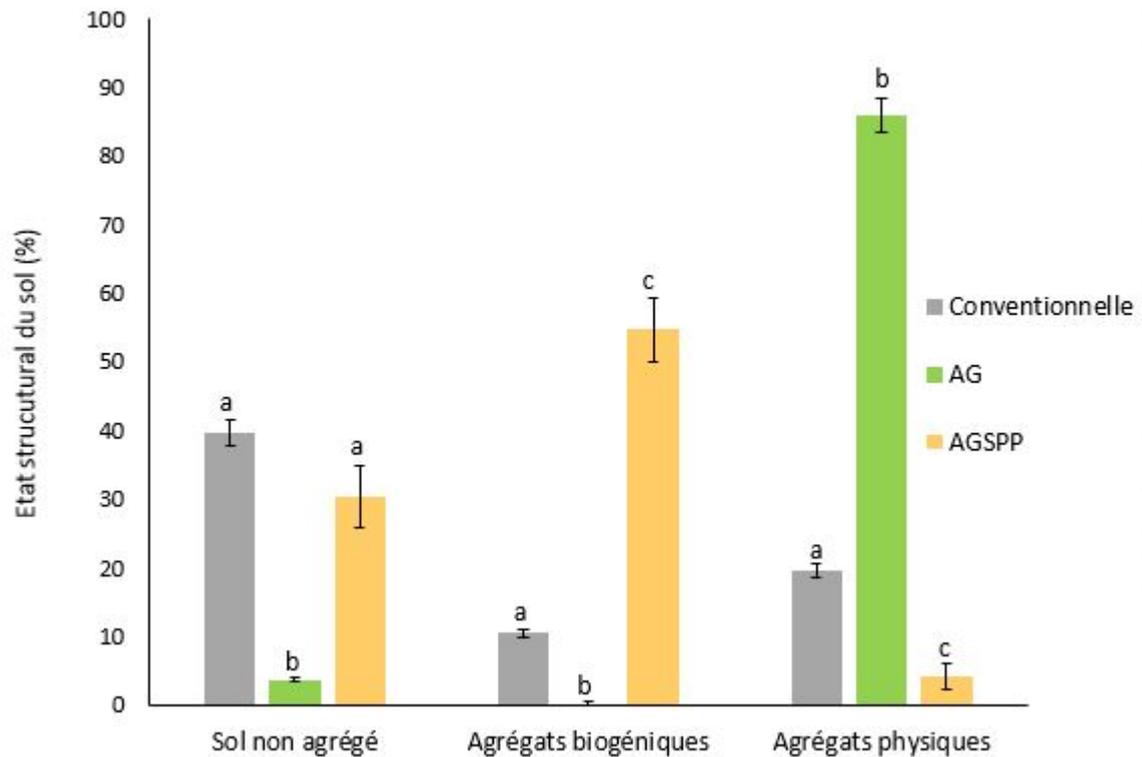


Figure 31 : État structural du sol des parcelles maraîchères conventionnelles, AG et AGSPP, 18 mois après la mise en place. Les lettres différentes représentent des valeurs significativement différentes (test de Kruskal-Wallis). Les barres représentent les erreurs standards

3.2.2. Fertilité du sol

Les caractéristiques chimiques du sol à l'état initial sont présentées dans le tableau 13. Les teneurs en C, N, P et K sont significativement différentes entre la parcelle conventionnelle et les parcelles agroécologiques ($p < 0,05$).

Tableau 13 : Caractéristiques chimiques du sol à l'état initial (moyennes \pm SE) des parcelles maraîchères agroécologiques et conventionnelle sur vertisol (Guadeloupe). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes selon le test de Kruskal-Wallis.

	Conventionnelle	AG	AGSPP	p-value
pH _{H2O}	7,80 \pm 0,01 (a)	7,81 \pm 0,08 (a)	7,95 \pm 0,02 (b)	0,036
pH _{KCl}	7,20 \pm 0,01 (a)	7,11 \pm 0,08 (a)	7,17 \pm 0,04 (a)	0,73
CEC	415 \pm 24,36 (a)	390 \pm 17,29 (a)	388 \pm 13,03 (a)	0,47
N _{total} (‰)	3,61 \pm 0,16 (a)	1,92 \pm 0,02 (b)	1,89 \pm 0,02 (b)	0,008
C/N	16,6 \pm 1,08 (a)	17,2 \pm 2,63(a)	17,6 \pm 2,32 (a)	0,96
C _{total} (‰)	59,56 \pm 3,39 (a)	33,16 \pm 5,21 (b)	33,45 \pm 4,71 (b)	0,009
K _{total} (‰)	2,72 \pm 0,17 (a)	1,90 \pm 0,09 (b)	1,80 \pm 0,08 (b)	0,008
P _{total} (‰)	0,76 \pm 0,02 (a)	0,51 \pm 0,02 (b)	0,51 \pm 0,01 (b)	0,008

Dix-huit mois après le début de l'expérimentation, le pH_{KCl} ainsi que les teneurs en C, N, P et K sont significativement différents entre la parcelle conventionnelle et les parcelles agroécologiques (tableau 14). De plus, les teneurs en N et K sont différentes entre les deux systèmes de culture agroécologiques.

Tableau 14 : Caractéristiques chimiques du sol à 18 mois (moyennes \pm SE) des parcelles maraîchères agroécologiques et conventionnelle sur vertisol (Guadeloupe). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes selon le test de Kruskal-Wallis.

	Conventionnelle	AG	AGSPP	p-value
pH _{H2O}	7,94 \pm 0,08 (a)	7,84 \pm 0,03 (a)	7,81 \pm 0,07 (a)	0,69
pH _{KCl}	7,29 \pm 0,05 (a)	7,84 \pm 0,03 (b)	7,81 \pm 0,07 (b)	0,008
CEC	464 \pm 31,92 (a)	435 \pm 21,87 (a)	438 \pm 15,61 (a)	0,82
N _{total} (‰)	2,91 \pm 0,15 (a)	2,99 \pm 0,19 (b)	2,39 \pm 0,06 (c)	0,01
C/N	11,06 \pm 0,23 (a)	9,1 \pm 0,78 (a)	11,64 \pm 0,67 (a)	0,058
C _{total} (‰)	32,21 \pm 1,84 (a)	26,72 \pm 0,95 (b)	27,67 \pm 0,97 (b)	0,042
K _{total} (‰)	2,67 \pm 0,20 (a)	1,77 \pm 0,04 (b)	1,68 \pm 0,07 (c)	0,006
P _{total} (‰)	1,15 \pm 0,10 (a)	0,55 \pm 0,02 (b)	0,61 \pm 0,01 (b)	0,003

3.2.3. Activité alimentaire

L'activité alimentaire est de 28% pour le témoin (sol nu), de 79% pour AG et 80% pour AGSPP. Il y a une différence significative entre le témoin et les parcelles agroécologiques ($p < 0,001$).

3.2.4. Biomasse aérienne et racinaire et production

En 2017, les biomasses sèches (aérienne, racinaire et totale) des plants de tomates et de laitues ne sont significativement différentes entre les parcelles AG et les parcelles AGSPP (tableau 15). Concernant la production de tomates 3,3 tonnes/ha ont été obtenus des parcelles AGSPP et 1,76 tonnes/ha dans les parcelles AG. La production de laitue obtenue est de 6,7 tonnes/ha pour les parcelles AGSPP et de 4,69 tonnes/ha pour les parcelles AG.

Tableau 15 : Biomasse sèches aérienne, racinaire et totale), en Kg/1000m², des plants de tomates et de laitues des parcelles AG et AGSPP sur vertisol (année 2017). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes selon le test de Wilcoxon et Mann Whitney.

Tomates			
(Kg/1000m ²)	AG	AGSPP	p-value
Biomasse aérienne	0,32 (a)	0,45 (a)	0,059
Biomasse racinaire	0,04 (a)	0,02 (a)	0,13
Biomasse totale	0,35 (a)	0,49 (a)	0,039
Laitues			
(Kg/1000m ²)	AG	AGSPP	p-value
Biomasse aérienne	0,08 (a)	0,08 (a)	0,85
Biomasse racinaire	0,002 (a)	0,002 (a)	0,7
Biomasse totale	0,09 (a)	0,08 (a)	0,89

En 2018, les biomasses sèches (aérienne, racinaire et totale) des plants de tomates, de laitues et d'haricots ne sont pas significativement différentes entre les parcelles AG et AGSPP (tableau 16). Quant à la production de tomates, elle est de 15,6 tonnes/ha pour les parcelles AGSPP et de 13,3 tonnes/ha dans les parcelles AG. La production de laitue obtenue est de 19,92 tonnes/ha pour les parcelles AGSPP et de 19,68 tonnes/ha pour les parcelles AG.

Tableau 16 : Biomasse sèches aérienne, racinaire et totale), en Kg/1000m², des plants de tomates, de laitues et de haricots des parcelles AG et AGSPP sur vertisol (année 2018). Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes selon le test de Wilcoxon et Mann Whitney.

Tomates			
(Kg/1000m ²)	AG	AGSPP	p-value
Biomasse aérienne	0,42 (a)	0,43 (a)	0,32
Biomasse racinaire	0,03 (a)	0,03 (a)	0,88
Biomasse totale	0,46 (a)	0,51 (a)	0,45
Laitues			
(Kg/1000m ²)	AG	AGSPP	p-value
Biomasse aérienne	0,04 (a)	0,05 (a)	0,76
Biomasse racinaire	0,002 (a)	0,002 (a)	0,62
Biomasse totale	0,04 (a)	0,05 (a)	0,71
Haricots			
(Kg/1000m ²)	AG	AGSPP	p-value
Biomasse aérienne	0,08	0,06	0,33
Biomasse racinaire	0,007	0,005	0,47
Biomasse totale	0,09	0,07	0,49

3.2.5. Nombre de boutons floraux, de fleurs et de fruits

Trois semaines après le début de la plantation (plants âgés de deux semaines), un suivi de l'apparition des boutons floraux et des premières fleurs a été effectué sur les 50 plants de tomates sélectionnés en 2018. Le nombre de boutons floraux n'est pas significativement différent entre AG (3183 ± 4) et AGSPP (2939 ± 3,04) (p=0,14). Par contre, nous avons dénombré 1615 ± 2,76 fleurs et 981 ± 1,15 fleurs, respectivement en AG et AGSPP (p=0,006) (Figure 32a).

Le nombre de fruits n'est pas significativement différent entre AGSPP (624 ± 0,80) et AG (543 ± 1,07) (p=0,26). Il y a une différence significative du taux de floraison entre les parcelles agroécologiques (p=0,001). Sur les parcelles AG, 51% des boutons floraux se développent en fleurs contre 33% pour les parcelles AGSPP. Le taux de fructification est également significativement différent entre les parcelles AGSPP, 64% des fleurs donnent des fruits dans

les parcelles AGSPP et dans les parcelles AG, 34% des fleurs produisent des fruits ($p < 0,0001$). On obtient un taux de fructification pratiquement deux fois supérieur sur les parcelles AGSPP alors que nombre de fleurs est initialement inférieur par rapport aux parcelles AG (Figure 32b).

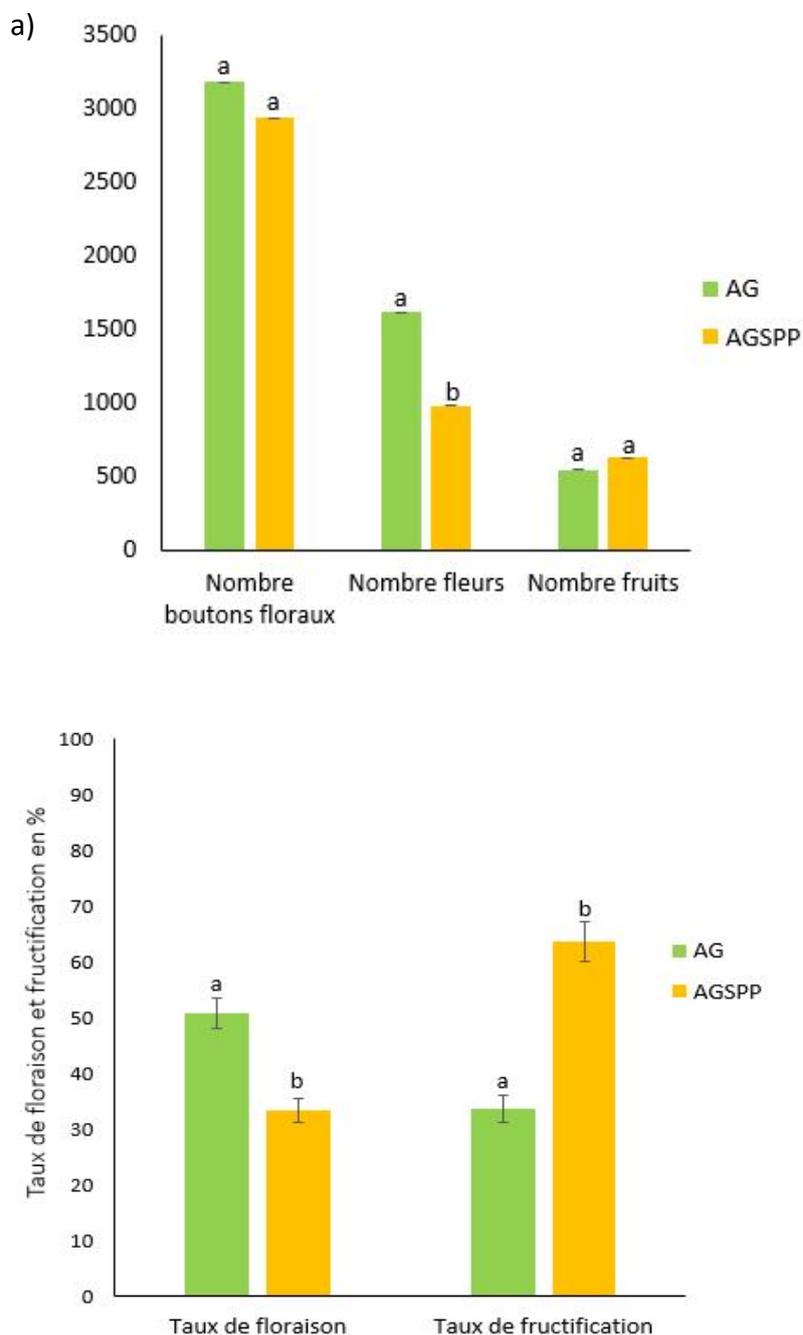


Figure 32: Suivi du cycle de tomates des parcelles AG et des parcelles AGSPP, en 2018 a) nombre de boutons floraux, de fleurs et de fruits et b) taux de floraison et de fructification. Les lettres différentes dans chaque colonne représentent des valeurs significativement différentes (test de Wilcoxon et Mann Whitney). Les barres d'erreurs représentent des erreurs standards.

3.2.6. Les observations de la biodiversité aérienne

Les différentes plantes de service utilisées ont apporté une biodiversité aérienne très variée. La présence de cette biodiversité a été observée dans les deux parcelles agroécologiques (Moulin, observation personnelle) :

- *Zea mays* est une plante attractive pour les cochenilles (Pseudococcidae) ;
- Des coccinelles (Coccinellidae) ont été observés sur diverses plantes : *Zea mays* (maïs), *Ocimum basilicum* (basilic), *Rosmarinus officinalis* (romarin), *Hibiscus sabdariffa* (groseille), *Tagetes patula* (œillet de d'inde), *Plectranthus neochilus* (doliprane) et *Cosmos sulphureus* (cosmos) ;
- Des chenilles de la famille des Noctuidae (*Agrotis* sp.: noctuelles terricoles) ont été observées sur *Zea mays* (maïs) et *Ocimum basilicum* (basilic) ;
- Des thrips (*Thrips tabaci*) ont été observés sur les plantes de *Tagetes patula* ;
- Des papillons (*Danaus plexippus*) de la famille des Nymphalidae ont été observées sur divers plantes : *Ocimum basilicum* (basilic), *Hibiscus sabdariffa* (groseille), *Tagetes patula* (œillet de d'inde), et *Cosmos sulphureus* (cosmos).

3.3. Atelier de restitution des parcelles agroécologiques

Un atelier de restitution a eu lieu en Juillet 2017 avec les agriculteurs présents à l'atelier de co-conception participatif (§ chapitre 2). Cet atelier a permis de montrer aux agriculteurs les premiers résultats obtenus avec le cycle de tomate/laitue en termes de production et d'observer la présence d'une faune aérienne très diversifiée. Les agriculteurs ont émis le souhait de vouloir appliquer un schéma type dans leurs parcelles maraîchères avec quelques modifications. L'introduction de plantes de services pour la lutte contre les nuisibles semble être une des pratiques qui a plus intéressé les agriculteurs au cours de cet atelier. Lors de cet atelier, les agriculteurs ont été de nouveau sensibilisés sur la réduction du travail du sol. Les agriculteurs ont pu observer la différence entre le sol nu déstructuré situé à côté des parcelles et le sol structuré à l'intérieur des parcelles (dû à la forte activité biologique du sol). Nous avons discuté des points à améliorer sur les prototypes pour ce qui concerne la paille de canne à sucre qui peut héberger des escargots et donc participer à l'invasion de ces ravageurs. Les agriculteurs ont proposé de la remplacer par les copeaux de bois pour le deuxième cycle. De plus, les agriculteurs ont émis le souhait de pouvoir observer ce type de prototype à plus grand échelle afin de confirmer les effets observés à l'issue de ce premier cycle.

4. Discussion

4.1. Biodiversité édaphique

Dix-huit mois après la mise en place des parcelles en unité expérimentale, un diagnostic agroécologique a été mené sur AG et AGSPP en Grande-Terre sur vertisol. Les deux systèmes expérimentaux sont comparés avec une parcelle conventionnelle de tomate.

L'augmentation significative des ingénieurs de l'écosystème dans les parcelles agroécologiques pourrait être due à l'application de matière organique. Les apports de matière organique sous forme de paillage organique et de vermicompost sont susceptibles d'avoir stimulé la biodiversité édaphique, notamment par la multiplication des vers de terre (Huerta et al., 2005 ; Birkhofer et al., 2008 ; Jouquet et al., 2010). Une étude a mis en évidence que la densité des vers de terre est plus importante sur un sol recouvert avec du paillage organique (d'herbe ou de paille) que sur un sol nu (Jodaugienė et al., 2009). D'après Jodaugienė et al (2009), le paillage organique diminue la température des sols de 0,7 à 1,6 °C et produit un climat humide favorable aux organismes du sol. Les populations d'acariens et de collemboles sont aussi plus importantes dans les parcelles agroécologiques que dans la parcelle conventionnelle. L'activité de la mésofaune a pu être également stimulée par la présence de paillage organique. Ce dernier crée des conditions environnementales favorables à la croissance des champignons qui sont une source alimentaire pour certains organismes de la mésofaune (Scheu & Simmerling, 2004 ; Zhao & Zhang, 2018). De plus, les microarthropodes ont une préférence pour les habitats qui procurent de la matière organique en continu (Kray et al., 2012). L'application de vermicompost à chaque cycle de culture et la diversité des cultures présentes sur les parcelles expérimentales auraient contribué à l'augmentation de la faune. En effet, les sols amendés en vermicompost favorisent le développement des populations de collemboles, d'acariens et de vers de terre (Bhadaurai et al., 2014; Chaudhuri et al., 2016).

La faible abondance des prédateurs dans les parcelles AG et conventionnelle peut s'expliquer par le recours à des produits phytosanitaires. Dans la parcelle AG, l'insecticide Dipel® a été appliqué durant le cycle de culture tomate/laitue pour lutter contre les insectes ravageurs. Les pesticides biologiques sont efficaces pour lutter contre les nuisibles et sont des pratiques alternatives qui permettent de réduire les risques encourus par l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse. Ils sont biodégradables et ne laissent aucun résidu dans l'environnement. La bactérie *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* présente dans le Dipel® est utilisée pour lutter contre certains Lépidoptères ravageurs de cultures. Cependant, cette

bactérie libère des toxines (Cry) qui sont néfastes à certains Coléoptères, Diptères, Oligochètes, Gastéropodes, Hyménoptères, Hémiptères et Nématodes (Bravo et al., 2011 ; Palma et al., 2014). L'effet de ces toxines peut durer de six mois à un an après leur application.

La forte abondance de prédateurs observés dans les parcelles AGSPP peut être due à la présence des plantes de services. *Cosmos sulphureus* (cosmos) est connue pour attirer un ensemble de prédateurs, comme les Coleoptera (Coccinellidae, Carabidae et Staphylinidae), les Hymenoptera (Formicidae, Sphecidae, Eumenidae et Vespidae) et les Arachnida (Tetragnathidae, Lycosidae, Linyphiidae, Araneidae) (Aldini et al., 2019). Il en est de même pour *Tagetes patula* (œillet d'inde) qui attire les Coleoptera (Coccinellidae et Staphylinidae) et les Araneidae (da Silva et al., 2016). Cette abondance de prédateurs permet probablement une meilleure régulation des ravageurs de cultures présents dans le sol (Griffiths & Caul, 1993). Plusieurs études ont montré que la diversité végétale a des effets sur la population et l'abondance des prédateurs, en favorisant la diversité des ressources nutritives (Tilman et al., 2006a; Haddad et al., 2009 ; Geiger et al., 2009; Rusch et al., 2016). La diversité végétale permet également la cohabitation de plusieurs espèces de prédateurs au sein d'un même habitat (Whelan 2001). Ces communautés de prédateurs peuvent intervenir à différentes étapes du cycle des proies et ainsi augmenter la régulation des bioagresseurs (Tylianakis & Romo 2010).

4.2. Services agro-écosystémiques des systèmes maraîchers

Dans les parcelles AGSPP, le fort pourcentage d'agrégats biogéniques est probablement lié à la forte abondance de vers de terre. Les agrégats biogéniques participent à la stabilité structurale du sol et permettent une meilleure séquestration du carbone que les agrégats physiques (Carvalho da Silva Neto et al., 2016). Grâce à l'amélioration de la stabilité structurale, les ingénieurs des écosystèmes peuvent également jouer un rôle dans l'infiltration et la distribution de l'eau dans le sol, ce qui peut avoir un impact sur la production primaire.

Les parcelles agroécologiques ont une production de tomates et de laitues similaire à celle des parcelles conventionnelles. L'apport de vermicompost peut avoir un effet positif sur la croissance végétative des plants de tomates (Edward et al., 2004). D'après Prabha et al. (2007), l'application de vermicompost accroît l'apport des éléments nutritifs sous forme de phosphore, potassium, fer et zinc dans les plants de tomates. Ces apports entraînent un meilleur développement des racines et augmentent la surface foliaire. Ravindran et al. (2019) a également montré que l'apport de vermicompost contribue à la croissance des tomates et

à la production de fruits. Le vermicompost peut stimuler la floraison des plantes, en augmentant le nombre et la biomasse de fleurs produites (Atiyeh et al., 2002; Arancon et al., 2003). D'après Manyuchi et al. (2013), le vermicompost augmenterait la teneur en phosphore, et en azote dans le sol ce qui a un effet bénéfique pour la croissance de la laitue. Hernandez et al. (2010), a montré que le vermicompost apporte des nutriments sous forme de magnésium, fer, cuivre et zinc, ce qui contribue à la croissance des feuilles de laitue.

Dans notre étude, nous avons observé que la présence de *Danaus plexippus* a été favorisée par les plantes à fleurs, *Tagetes patula* (œillets de d'inde) et *Cosmos sulphureus* (cosmos). *Danaus plexippus* communément appelé papillon monarque, est un insecte de l'ordre des Lépidoptères et fait partie de la famille des Nymphalidea. Son régime alimentaire ne se limite pas à un groupe spécifique de fleurs (Brindza et al., 2008). La diversité florale présente en AGSPP a pu attirer ces organismes et pourrait ainsi expliquer un taux de fructification plus élevé des plants de tomate. La tomate est une plante à fleurs hermaphrodites et de type autogame (autofécondation). Ces fleurs ont besoin d'être secouées ou de vibrer afin que le pollen soit libéré des anthères. Pour les tomates cultivées en plein champ, les fleurs sont naturellement secouées par le mouvement du vent (Morandin et al., 2001) et des insectes qui peuvent favoriser la rencontre des gamètes mâles et femelles, en butinant de fleurs en fleurs le pollen (Brosseau, 2013). Toni et al. (2018) au Bénin, a montré que la pollinisation par les abeilles sauvages contribue à l'augmentation du taux de fructification des tomates. Ces abeilles ont amélioré les rendements grâce à une réduction des avortements des fleurs. D'autres travaux corroborent les effets des pollinisateurs sur l'augmentation du taux de fructification des tomates (Bell et al., 2006 ; Bispo dos Santos et al., 2009).

La stratégie du « push and pull » a été utilisée dans les parcelles agroécologiques. Cette stratégie consiste à introduire des plantes ayant des propriétés répulsives (« push ») et des plantes pièges attractives (« pull ») au sein de la parcelle afin d'éloigner les ravageurs de la culture principale (Cook et al., 2007). Elle est basée sur un ensemble de stimuli qui modifie le comportement des bioagresseurs. Ces stimuli peuvent être visuels, olfactifs, tactiles ou gustatifs et peuvent intervenir à différentes étapes du cycle des plantes (Eigenbrode et al., 2016). Cette stratégie aurait contribué à la régulation des bioagresseurs des plants de tomate et de laitue. Les plantes attractives, comme *Zea mays* (maïs), ont permis de réduire les attaques des chenilles en devenant un site de ponte préférentiel pour les noctuelles de la tomate (*Helicoverpa zea*) (Jallow & Zalucki 2003 ; Ratnadass et al. 2013). *Zea mays* est par ailleurs une plante attractive pour les Pseudococcidae. Ces derniers sont des cochenilles

farineuses de l'ordre des Hemiptera, qui sont des ravageurs importants des cultures, notamment pour la tomate (Canário et al., 2017). Ils causent des dommages en réduisant la photosynthèse et la croissance des plantes en s'alimentant de la sève. Les Pseudococcidae sécrètent du miellat, qui favorise le développement de moisissures et la transmission de virus (Lacordaire et al., 2006 ; Canário et al., 2017). De plus, nous avons observé la présence de Coccinellidae (coccinelles) dans les parcelles agroécologiques. Ces coléoptères sont des prédateurs d'Hemiptera (Aphidoidea : pucerons), de Pseudococcidae (cochenilles), de Thysanoptera (thrips) et d'Acarina (acariens) dans toutes les régions du monde (Raimundo et al. 2006, 2008). Les plantes attractives, comme *Zea mays* (maïs) et *Ocimum basilicum* (basilic) sont probablement des sites préférentiels pour les chenilles de la famille des Noctuidae (Agrotis : noctuelles terricoles). Ces chenilles observées dans les parcelles AG et AGSPP, sont des ravageurs de la laitue ; elles peuvent couper plusieurs jeunes plants en une seule nuit (Boughton et al., 2001 ; Jeyasankar, 2012). Selon Szendrei & Rodriguez-Soana (2010), les plantes aromatiques, comme *Rosmarinus officinalis* (romarin), *Thymus vulgaris* (thym) et *Plectranthus amboinicus* (gros thym), produisent des arômes volatils, qui sont attractifs pour des insectes spécifiques (Arumugam et al., 2016 ; Dauqan et al., 2017). Au cours du cycle de culture, les plants de tomates n'ont pas été attaqués par les aleurodes (Aleyrodidae) dans les parcelles expérimentales. *Rosmarinus officinalis* (romarin) est une plante qui produit des molécules β -caryophyllène et limonène qui attirent les ravageurs *Bemisia tabaci* (Aleyrodidae) (Sadeh et al., 2017). *B. tabaci* est un insecte piqueur-suceur, qui est vecteur du virus du jaunissement des feuilles de la tomate ou Tomato Yellow Leaf Curl (TYLC). Il provoque le vieillissement et la nécrose prématurée des feuilles, en sécrétant du miellat, qui favorise le développement de la fumagine (champignon, *Catenuloxylum semiovatus*). Ce champignon provoque ainsi le noircissement des feuilles et la réduction de la photosynthèse (Schuster et al, 1996 ; Nunes et al., 2006). Cette maladie est l'une des plus dévastatrices dans les régions tropicales et subtropicales (Czosnek & Laterrot, 1997 ; Moriones & Navas-Castillo, 2000 ; Delatte et al., 2003). Yang et al. (2010) et Deletre et al. (2014) ont montré que l'utilisation de molécules issues d'extraits de *T. vulgaris* (thymol, p-cymène et carvacrol) et de *R. officinalis* (1,8-cineole, camphène et camphor), ont un effet délétère sur les œufs et les nymphes de *B. tabaci*.

Les observations des plants de tomates ont mis en évidence la présence de Thripidae (thrips) dans les parcelles expérimentales (Moulin, observation personnelle). Les thrips sont majoritairement polyphages et se nourrissent d'une grande diversité de plantes ornementales

et de cultures dont la tomate et la laitue (Lambert, 1999). Ces ravageurs se nourrissent principalement sur la face inférieure des jeunes feuilles, mais il n'est pas exclu de les retrouver sur l'ensemble de la partie aérienne de la plante, incluant les fleurs (RAP, 2018). La salive des thrips se diffuse dans les parois celluliques et détruit les cellules voisines. Les cellules se déshydratent et perdent leur coloration et deviennent argentées puis blanc nacré (Moreau et al., 1997). Ils sont vecteurs du virus TSWV (Tomato Spotted Wilt Virus ou Virus de la tache bronzée de la tomate) sur la tomate et du L-TSWV sur la laitue (Mound, 2004). D'après Koschier et al. (2003), les huiles essentielles issues de *R. officinalis* ont un effet répulsif sur *Thrips tabaci*. À l'opposé, *Tagetes patula* (œillet d'inde) est une plante très attractive pour les thrips qui sert de plante piège et détourne les insectes de la culture visée (INRA, 2019). Les effets des plantes de service pourraient expliquer que les attaques de Thripidae furent minimales dans les parcelles expérimentales.

Les principaux résultats obtenus ont permis de montrer que les plantes de service peuvent avoir des impacts sur le contrôle des bioagresseurs et la biodiversité aérienne. Ces impacts peuvent directement ou indirectement améliorer les rendements de la culture.

5. Conclusion

Notre étude a montré qu'il est possible de réduire l'utilisation des pesticides en combinant un ensemble d'opérations culturales agroécologiques adéquates et adaptées aux conditions du milieu. Les analyses approfondies réalisées sur les parcelles agroécologiques sur vertisol ont montré que la réduction du travail du sol, l'augmentation de la diversité végétale, l'application de paillage organique et de vermicompost participent à l'augmentation de la diversité fonctionnelle des organismes du sol ainsi qu'à la fourniture de services écosystémiques (structuration du sol, régulation des bioagresseurs, production de nourriture). Toutefois, les résultats ont montré que l'utilisation de biopesticides peut provoquer la mort d'organismes non ciblés, et ainsi affecter l'état structural du sol. La présence de plantes répulsives et hôtes montre que la réduction voire le non-recours aux pesticides peut être possible. De plus, les parcelles agroécologiques ont obtenu une production de culture similaire au système conventionnel. Ces premiers résultats pourraient être utilisés dans les systèmes agroécologiques tropicaux afin d'améliorer la biodiversité édaphique, les fonctions du sol et les services écosystémiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE
ET
PERSPECTIVES

Dans les chapitres précédents, nous avons mobilisé différents outils afin de caractériser et évaluer les impacts des opérations culturales sur l'activité du sol dans des parcelles maraîchères. Dans la partie conclusion générale et perspectives, nous discuterons des apports de la thèse, en termes de concepts théoriques et de résultats, puis nous donnerons des perspectives possibles à ce travail.

Ce travail de thèse s'inscrit dans un contexte agricole qui fait face à la problématique mondiale des effets néfastes des pratiques conventionnelles. En rupture avec ces pratiques, des systèmes de production alternatifs ont vu le jour. L'agriculture alternative correspond aux systèmes de production basés sur des pratiques agricoles qui contribuent au développement durable (Sanner et al., 2018). Mon travail de thèse se concentre sur une partie de ce champ d'étude en évaluant l'impact des opérations culturales agroécologiques en maraîchage sur la biodiversité et les propriétés du sol. Dans cette première section de la conclusion, nous rappellerons les hypothèses formulées dans les différents chapitres de ce manuscrit puis nous synthétiserons les résultats obtenus.

Dans le second paragraphe, nous discuterons des pratiques agricoles et des services agroécosystémiques puis pour finir, nous évoquerons la transition agroécologique à l'échelle de l'exploitation.

1. Synthèse des résultats

Dans le chapitre 1, nous avons pour objectif d'analyser la diversité des pratiques agricoles dans les systèmes de culture maraîchers existant en Guadeloupe, afin d'évaluer leur impact sur l'environnement et la performance des systèmes. Nous avons testé l'hypothèse que les pratiques agroécologiques utilisées par les agriculteurs maraîchers conservent ou renforcent la biodiversité édaphique et la qualité du sol. Dans un premier temps, l'enquête a dévoilé qu'il existe une diversité de culture en association, rotation et monoculture ainsi que de nombreuses pratiques agricoles. Notre étude a mis en avant que la majorité des agriculteurs maraîchers guadeloupéens enquêtés (65%) utilisent des pratiques conventionnelles (fertilisants de synthèse, produits phytosanitaires, labour profond). D'autres agriculteurs, moins nombreux (35%) utilisent des pratiques plus respectueuses de l'environnement (fertilisants organiques, utilisation limitée de produits phytosanitaires, travail du sol manuel).

De plus, l'analyse de l'enquête a mis en évidence l'utilisation de produits phytosanitaires nocifs pour les organismes du sol et l'environnement.

Dans un second temps, des analyses approfondies réalisées en Grande-Terre sur vertisol ont permis d'étudier l'impact des pratiques conventionnelles et agroécologiques des maraîchers sur la biodiversité édaphique et les propriétés physico-chimiques du sol. Nos résultats démontrent que les parcelles d'agriculteurs qualifiées d'agroécologiques n'ont pas d'effet positif sur la macrofaune et certaines propriétés physico-chimiques du sol. Plus précisément, les opérations culturales des agriculteurs sont encore trop influencées par l'agriculture conventionnelle, comme le labour profond. Les agriculteurs qui possèdent des parcelles qualifiées d'agroécologiques ont également recours à des pesticides biologiques et au paillage plastique. Ces pesticides biologiques peuvent avoir une action létale sur les organismes du sol à forte dose (Ardestani et al., 2013 ; Souza et al., 2015 ; Zanuncio et al., 2016). De plus, le paillage plastique engendre une diminution des organismes du sol, comme les ingénieurs de l'écosystème et les prédateurs (Schonbeck & Evanylo, 1998 ; Striling, 2008). Ainsi, il apparaît que les pratiques agroécologiques utilisées par les agriculteurs maraîchers ne puissent pas préserver la biodiversité du sol.

Dans le chapitre 2, les objectifs étaient de i) co-concevoir un prototype théorique de système de culture maraîcher et ii) de mettre en place et d'évaluer la contribution au développement durable de ce système innovant. Pour répondre à nos objectifs, deux ateliers de co-conception ont été réalisés en réunissant des scientifiques, des techniciens et des agriculteurs maraîchers. À l'issue de ces ateliers, deux systèmes agroécologiques ont été conçus : un système agroécologique (AG) (où l'utilisation de produits phytosanitaires utilisés en agriculture biologique est autorisée si nécessaire) et un système agroécologique à biodiversité renforcée (AGSPP) dans lequel la diversité des plantes répulsives et pollinisatrices a été renforcée et où l'application de produits phytosanitaires n'est pas autorisée. Nous présumons que la mise en œuvre de systèmes de culture innovants est plus efficace lorsqu'ils sont issus d'apprentissage collectif. Ces systèmes maraîchers ont été mis en place sur le domaine expérimental de l'INRAE de Godet à Petit-Canal. Une évaluation multicritère a été réalisée sur les deux systèmes sur deux années consécutives. L'évaluation agroenvironnementale d'AG et d'AGSPP indique que les opérations culturales contribuent au développement durable. Du point de vue de la dimension environnementale, les résultats montrent que les systèmes tendent à préserver l'espace exploité et les ressources, notamment pour la parcelle AGSPP. Pour la dimension économique, nos résultats montrent

qu'AG est plus efficient qu'AGSPP due à la diversité de plantes de services qui augmente le coût de production du système en AGSPP. De plus, l'indicateur « autonomie économique » n'a pas pu mettre en évidence si les systèmes peuvent s'autofinancer malgré une production principale importante en 2018. Toutefois, l'indicateur « taux de spécialisation » a montré que les systèmes sont très diversifiés et robustes.

Dans le chapitre 3, l'objectif principal était d'analyser l'impact des opérations culturales innovantes des systèmes AG et AGSPP sur la biodiversité et les services écosystémiques. Les opérations culturales agroécologiques innovantes permettraient de i) stimuler la biodiversité édaphique, ii) régénérer la fertilité du sol, iii) restaurer la structure du sol, iv) rétablir la régulation naturelle des bioagresseurs et v) obtenir un rendement similaire à celui d'un système conventionnel. Un diagnostic agroécologique a été mené sur les deux systèmes. Ces derniers ont été comparés à une parcelle conventionnelle de tomates provenant d'un agriculteur enquêté, situé en Grande-Terre sur vertisol. Nos résultats montrent que la réduction du travail du sol, l'application d'un couvert végétal permanent et l'association de cultures, entraînent une augmentation des ingénieurs de l'écosystème (vers de terre et fourmis), des collemboles et des acariens. Ces résultats sont identiques à ceux obtenus par d'autres auteurs (Dabney et al., 2001 ; Jouquet et al., 2010 ; Ratnadass et al., 2013 ; Bruchon et al., 2015 ; Marisol et al., 2016). De plus, dans les parcelles AGSPP, en absence d'application de traitements phytosanitaires et avec une diversité de plantes de service plus importante, la présence des prédateurs est également plus importante ; la régulation naturelle des bioagresseurs est possible. De plus, dans ces parcelles, les organismes du sol élaborent une structure construite, biomacroaggrégée.

Dans un second temps, des analyses de production ont été réalisées dans les parcelles AG et AGSPP. Les productions de tomates et de laitues sont comparables à celles du système conventionnel. Les opérations culturales, comme l'apport de vermicompost, le paillage végétal et les plantes de services, auraient contribué à la croissance des cultures ainsi qu'à la lutte contre les bioagresseurs. De plus, les plantes de services ont également participé à la présence d'une biodiversité aérienne importante.

2. Pratiques agricoles et services agro-écosystémiques

D'après Adhikari & Hartemink (2016), les sols fournissent un ensemble de services écosystémiques, qui sont des ressources essentielles pour les hommes. La fourniture de ces

services dépend des propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols (Cowie et al., 2011 ; Adhikari & Hartemink, 2016 ; Helming & Tabeau, 2018). Le concept de services agro-écosystémiques décrit les biens et services multiples fournis par la nature à l'humanité dans les systèmes agricoles (Tancoigne et al., 2014). La fourniture de ces services agro-écosystémiques dépend des propriétés des sols mais est également influencée par les cultures et les pratiques agricoles mises en place par les agriculteurs (Duval et al., 2016 ; Dietze et al., 2019). Ces services agro-écosystémiques sont intimement liés au développement d'une agriculture durable à l'opposé des systèmes conventionnels de production peu respectueux du sol et de l'environnement en général.

Nos résultats ont montré que les agriculteurs maraîchers guadeloupéens ont massivement recours aux fertilisants de synthèse qui participent à la dégradation de la biodiversité du sol. L'utilisation massive de fertilisants de synthèse entraîne, en particulier, une modification des services de soutien et de régulation (Duval et al., 2016). Bowman & Cleveland. (2008) montrent que l'ajout de fertilisants de synthèse entraîne une modification des caractéristiques chimiques du sol. Ces fertilisants de synthèse peuvent ainsi influencer le fonctionnement biotique du sol, et donc les services de soutien et de régulation associés comme la structuration du sol et la régulation du climat (régulation des émissions de N₂O) (Therond & Duru, 2019). A contrario, les apports de matière organique, tel que le compost et le fumier, peuvent limiter l'apparition de maladies causées par les bactéries, champignons ou certains nématodes et contribuer au service de régulation des bioagresseurs (Weller et al., 2002 ; Therond & Duru, 2019). L'application de vermicompost participe aux services d'approvisionnement par l'augmentation de la production. Le vermicompost favorise l'amélioration de la structure du sol (Pramanik, 2010 ; Goswami et al., 2017), la porosité du sol ainsi que la capacité de rétention d'eau (Ngo et al., 2011 ; Song et al., 2015).

Les traitements phytosanitaires de synthèse sont connus pour avoir des effets néfastes sur la biodiversité (Emmerson et al., 2016). Notre étude a confirmé ce résultat. Les traitements phytosanitaires peuvent moduler le niveau des services agro-écosystémiques de régulation, à cause de leurs effets sur la structure et l'abondance des communautés d'auxiliaires des cultures et sur les espèces végétales hôtes de ceux-ci, comme certains adventices (INRA, 2017). Ils peuvent également engendrer une fluctuation de nombreux autres services à cause de leur effet sur les communautés du sol et en l'occurrence les organismes non ciblés (INRA, 2017 ; Therond & Duru, 2019). Nos résultats ont montré que l'augmentation de la diversité épigée au sein des parcelles agricoles augmente l'abondance et la diversité des ennemis

naturels des bioagresseurs (Ratnadass et al., 2013). Les plantes ont un impact direct sur la biodiversité édaphique grâce aux ressources nutritives qu'elles fournissent. Les organismes mettent à disposition des éléments nutritifs, structurent le sol et favorisent la circulation de l'eau (El Mujtar et al., 2019). Des effets positifs sur la régulation biologique des maladies, des insectes ravageurs et des adventices sont alors observés. Ces effets sont basés sur des pratiques telles que, la couverture du sol ou encore la pratique « push and pull » (Ratnadass et al., 2011 ; Duru et al., 2015a). De plus, l'augmentation de la diversité végétale, sous forme de bandes enherbées/fleuries ou de haies, a un effet positif sur les services de pollinisation et de régulation des bioagresseurs (Kleijn et al., 2018 ; Bartual et al., 2019). Une méta-analyse a mise en évidence que la présence d'une bordure végétale au sein de parcelles agricoles favorise la présence des pollinisateurs et des insectes prédateurs des bioagresseurs (Martin et al., 2019). Cette diversité végétale fournit également une couverture qui permet de protéger les sols et de développer les services de protection, contrôle de l'érosion et de structuration du sol (Justes et al., 2012 ; Kleijn et al., 2018).

Le travail du sol agit sur l'activité biologique et les propriétés du sol (Bouthier et al., 2013). L'enfouissement de la matière organique, par un labour peu profond, permet de créer des conditions favorables à l'activité des organismes du sol, en stimulant les processus de minéralisation du C et N et la décomposition de la matière organique (Young & Ritz, 2000 ; Grigera et al., 2007). D'après Drijber et al. (2000) et Coleman et al., (2004), les populations de bactéries nitrifiantes et les transformateurs de litières sont plus abondantes dans les systèmes de culture ayant recours à un labour peu profond. Le travail du sol superficiel semble favoriser le développement de la macrofaune, en conservant les habitats (Kladivko, 2001 ; Bouthier et al., 2013). De plus, l'augmentation de la matière organique stimule l'activité des vers de terre, et donc le brassage de la matière et la structuration des sols (Kaneda et al., 2014). Une étude menée, par Kaneda et al. (2014), a montré qu'un travail superficiel du sol préserve l'activité des vers de terre, ce qui contribue au fort taux d'aggrégats biogéniques.

Dans notre étude, nous avons utilisé un ensemble de pratiques innovantes : apport de matière organique, paillage végétal, plantes de services adéquates et adaptées au milieu, et réduction du travail du sol. Ces pratiques ont des effets positifs sur les services agroécosystémiques sur la structuration du sol, le contrôle de l'érosion, la régulation des bioagresseurs et la circulation de l'eau. Pittelkow et al. (2014) a également mis en évidence que l'application simultanée des certaines pratiques (maintien d'une couverture végétale, réduction du travail du sol, mise en place d'un système de rotation avec une diversification

des cultures) permet d'atteindre des niveaux de rendements équivalents à ceux des systèmes conventionnels tout en améliorant les services agro-écosystémiques de régulation du cycle de l'eau, recyclage des nutriments, structuration du sol et contrôle de l'érosion. L'association de plusieurs opérations culturales agroécologiques a donc des effets positifs sur une multitude de services agro-écosystémiques et contribue ainsi à améliorer la durabilité des systèmes de culture. Au regard de nos résultats, AGSPP représente un système de culture agricole en accord avec la transition agroécologique et le développement durable, et singulièrement sur la préservation des organismes du sol (Figure 33).

Pratiques Agroécologiques (basées sur **Agriculture de conservation**)

Réduction du travail du sol



Rotation/Cultures associées



Couverture permanente du sol



Pas d'intrants de synthèse

→ Fertilisation organique (vermicompost)

→ Pas de pesticides

Propriétés physiques du sol

↗ Agrégats biogéniques

Propriétés biologiques

↗ Ingénieurs de l'écosystème
↗ Prédateurs
↗ Microarthropodes

Biodiversité aérienne



Services agro-écosystémiques

Améliore la **structuration du sol**
(Diminue les risques d'érosion et améliore la régulation de l'eau)
Améliore la **pollinisation**
Améliore la **régulation des bioagresseurs**
La **production de nourriture** est maintenue

Figure 33 : Bilan du système agroécologique à biodiversité renforcée (AGSSP)

3. Perspectives

Les réponses apportées dans le cadre de ce travail de thèse doivent être approfondies. Nous proposons ici quelques pistes de réflexion à partir des résultats obtenus.

3.1. Co-conception et évaluation multicritère

L'une des originalités de ce travail de thèse est la co-conception de systèmes agroécologiques innovants. Les systèmes AG et AGSPP ont servi de démonstration pour les agriculteurs et permettent de faire évoluer les pensées en échangeant sur les divers aspects des opérations culturales agroécologiques et de leurs impacts. Cette approche a permis de mettre en place des systèmes qui répondent aux attentes et aux besoins réels d'un ensemble d'acteurs. Au regard des résultats obtenus dans l'évaluation multicritère, tous les indicateurs n'ont pas pu être retenus en raison de l'étude à l'échelle parcellaire. Il faudrait passer à une plus grande échelle afin de pouvoir mesurer les différents indicateurs économiques, sociaux et environnementaux. Le projet AgroEcoTom (projet financé par le FAEDER) qui fait suite à notre étude a pour objectif de mettre en place des opérations culturales (travail du sol réduit, couvert végétal, rotation/association de cultures, inoculation de mycorhizes) à une plus grande échelle (1000 m²) dans des systèmes maraîchers en zone tropicale.

Par rapport aux résultats obtenus, il serait intéressant de modifier certaines techniques culturales pour réduire le temps d'entretien et la dépendance aux achats externes. Par exemple, remplacer le paillage de canne à sucre ou de copeaux de bois par un couvert végétal vivant. Il serait également intéressant de modifier la schématisation des plantes de services, afin de réduire sur le temps d'entretien de ces plantes. De plus, il serait bien de mettre en place un témoin conventionnel afin de pouvoir comparer l'évaluation multicritère des systèmes agroécologiques innovants à celle d'un système conventionnel.

3.2. Pratiques agroécologiques, biodiversité et services écosystémiques

L'un des résultats majeurs qui émerge de ce travail de thèse est l'effet d'un ensemble d'opérations innovantes (apport de matière organique, paillage végétal, plantes de services et réduction du travail du sol) sur la biodiversité édaphique, le fonctionnement du sol et les services écosystémiques. Afin d'approfondir les résultats obtenus, il serait intéressant

d'effectuer un suivi des performances pour l'ensemble des cycles de culture ; la rotation de culture contribuant au maintien de la fertilité des sols, à la lutte contre les bioagresseurs et à la préservation de la biodiversité (Thenail, 2009 ; Tiemann, 2015). De plus, un suivi plus poussé de la biodiversité aérienne permettrait de mettre en évidence les interactions plantes-insectes. Il serait également intéressant de faire une analyse sur les composés volatils des plantes de services mal connues, comme *Plectranthus neochilus* (doliprane) et *Hibiscus sabdariffa* (groseille), afin de connaître les substances chimiques impliquées dans les relations plantes-insectes (Jallow & Zalucki, 2003 ; Ratnadass et al., 2013).

Les recherches sur l'impact des pratiques agroécologiques sur le fonctionnement des agroécosystèmes doivent continuer afin d'améliorer les systèmes de culture en y intégrant les processus écologiques, afin de construire une agriculture qui contribue au développement durable, et plus particulièrement à la préservation de la biodiversité édaphique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aboudrare, A., 2014. Les Pulvérisateurs à Disques (Covercrop et Stubble plow). Retrieved from CECAMA, Fiche Technique (4): 1-6.

ADEME, 2020. Agence de la transition écologique. <https://www.ademe.fr/expertises/developpement-durable>

Agreste, 2011. <http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/Agreste-Guadeloupe-Filiere-Fruits>

Agreste, 2017. <http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/Bilan-marche-Gourdeliane-2017>

Agreste, 2019. <http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/Memento-2019-de-la-statistique>

Ajayi, A.A., Olasehinde, I.G., 2009. Studies on the pH and protein content of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) fruits deteriorated by *Aspergillus niger*. Scientific Research and Essay 4(3): 185-187.

Alaoui, S.B., 2015. Aspects agronomique de l'agriculture de conservation (ac), HTE (149/150) : 19-24.

Aldini, G. M., Martono, E., Trisyono, Y.A., 2019. Diversity of natural enemies associated with refuge flowering plants of *Zinnia elegans*, *Cosmos sulphureus*, and *Tagetes erecta* in rice ecosystem. Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia, 23(2) : 285p.

Alamri, R., 2014. Installation d'une unité de production de biofertilisants. Rapport de séminaire. Institut national agronomique de Tunisie. 29p.

Allegrini, M., Gómez, E., Zabaloy, M.C., 2017. Repeated glyphosate exposure induces shifts in nitrifying communities and metabolism of phenylpropanoids, Soil Biol. Biochem., 105: 206–215.

Almeida, P., Barbosa, R., Bensasson, D., Gonçalves, P., Sampaio, J.P. 2017. Adaptive divergence in wine yeasts and their wild relatives suggests a prominent role for introgressions and rapid evolution at noncoding sites. Mol. Ecol. 26(7):2167-218.

Altieri, M.A., 2012. Funes-Monzote FR, Peterson P. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. Agron Sustain Dev. 32 : 1-13

Altieri, M.A., 2013. L'agroécologie. Éditions Charles Corlet, 237p.

Amiot-Carlin, C., Caris-Veyrat, Phe Amiot, M-J., Tyssandier, V., Grassely, D., Buret, M., Mikolajczak, M., Guiland, J-C., Bouteloup-Demange, C., Borel, P., 2004. Influence of organic versus conventional agricultural practice on the antioxidant microconstituent

content of tomatoes and derived purees; consequences on antioxidant plasma status in humans J. Agric. Food Chem 52 : 6503–6509.

Angst, Š., Mueller, C.W., Cajthaml, T., Angst, G., Lhotáková, Z., Bartuška, M., Špaldoňová, A., Frouz, J., 2017. Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. *Geoderma*;289 : 29-35.

Anil, L., Park, J., Phipps, R. H., Miller, F. A. 1998. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK. *Grass Forage Sci.* 53:301-317.

ANSES, 2015. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail <https://www.anses.fr/fr/content/azoxystrobine-4>

ANSES, 2019. RAPPORT d'appui scientifique et technique : Étude des expositions des populations aux pyréthrinoïdes .

Arain, M.S., Hu, X.X., Li, G.Q., 2014. Assessment of toxicity and potential risk of butene-fipronil using *Drosophila melanogaster*, in comparison to nine conventional insecticides. *Bull Environ Contam Toxicol* 92:190–195.

Arancon, N., Edwards, C., Bierman, P., Metzger, J., Lee, S., Welch, C., 2003. Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries the 7th international symposium on earthworm ecology Cardiff Wales 2002. *Pedobiologia* 47, 731–735.

Arancon, N.Q., Edwards, C.A., 2011. The use of vermicomposts as soil amendments for production of field crops. Cité dans Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L., (eds.) *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management.* CRC Press, Boca Raton. 129–151.

Archana, B., Tabassum, P., Pranita, D., 2017. Review on Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) as a potential source of organic pesticide. *International Journal of Ayurveda and Pharma Research* 5(4) : 12-15.

Ardestani, M.M., Van Gestel, C.A.M., 2013. Dynamic bioavailability of copper in soil estimated by uptake and elimination kinetics in the springtail *Folsomia candida*. *Ecotoxicology* 22: 308-318.

Arumugam, G., Swamy, M.K., Sinniah, U.R., 2016. *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: Botanical, Phytochemical, Pharmacological and Nutritional Significance *Molecules* 21(4): 369.

Atiyeh, R.M., Edwards, C.A., Metzger, J.D., Lee, S., Arancon, N.Q., 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology* 84, 7–14.

Axelsen, J.A., Kristensen, K.T., 2000. Collembola and mites in plots fertilised with different types of green manure. *Pedo Biologia*, 44: 556–566.

Ayuke, F.O., Brussaard, L., Vanlauwe, B., Six, J., Lelei, D.K., Kibunja, C.N., Pulleman, M.M., 2011. Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Appl Soil Ecol.* 48 : 53-62.

Baize, D., Girard, M.C., 2009. Référentiel pédologique 2008. Versailles : Quae, 405 p.

Barbault, R., 2009. Pratiques agricoles favorables à la biodiversité : approche technico-économique Cité dans : Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Editions Quæ 184 p.

Barrios, E., Kwesiga, F., Buresh, R.J., Sprent, J.I., 1997. Light fraction soil organic matter and available nitrogen following trees and maize. *Soil Science Society of America Journal* 61 (3): 826–831.

Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management -a review. *Soil Use and Management.* 25(4): 335-345.

Bedoussac L.; Triboulet P., Magrini M-B., Rambault, Foissy D., Corre-Hellou, G., 2013. Conséquences de l'introduction des cultures associées céréale-légumineuse à graines dans les filières. Analyse du point de vue des agriculteurs et des coopératives. *Innovations Agronomiques* 32 : 99-212.

Bekunda, M., Sanginga, N., Woome, P. L., 2010. Restoring Soil Fertility in Sub-Sahara Africa. *Advances in Agronomy* 108:183-236.

Bell, M.C., Spooner-Hart, R.N., Haigh, A.M., 2006. Pollination of greenhouse tomatoes by the Australian blue banded bee *Amegilla (Zonamegilla) holmesi* (Hymenoptera: Apidae), *J. Econ. Entomol.*, 99:437- 442

Benbrook, C.M. 2016. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environ Sci Eur* 28, 3.

Benckiser, G., 2011. Ants and Sustainable Agriculture. 30(2): 15-26.

Bender, S.F., Wagg, C., vanderHeijden, M.G.A., 2016. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution.* 31(6) : 440-452.

Bentley, J. W., & Rodríguez, G. 2001. Honduran Folk Entomology. *Current Anthropology*, 42(2): 285–300.

Bertrand, M., Barot, S., Blouin, M., Whalen, J., Oliveira, T. de, Roger-Estrade, J., 2015. Earthworm services for cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 553–567.

Bhagirath S., Chauhan, Abugho S.B., 2013. Effect of Crop Residue on Seedling Emergence and Growth of Selected Weed Species in a Sprinkler-Irrigated Zero-Till Dry-Seeded Rice System. *Weed Science* 61(3): 403-409.

Bhattacharjee, G., Vivekananda, S., Mohanpur, M., Chaudhuri, P., 2002. Cocoon production, morphology, hatching pattern and fecundity in seven tropical earthworm species - A laboratory-based investigation Cocoon production, morphology, hatching pattern and fecundity in seven tropical earthworm species – a laboratory-based. *Journal of Bioscience*, 27(3): 283–294.

Birmingham, D.M., 2003. Local knowledge of soils : the case of contrast in Côte d'Ivoire. *Geoderma*, 111: 481–502.

Birkhofer, K., Bezemer, T.M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fließbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mäder, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van der Putten, W.H., Scheu, S., 2008. Longterm organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2297– 2308.

Bispo dos Santos, A., Roselino, A.C., Hrcir M., Bego, L.R., 2009. Pollination of tomatoes by the stingless bee *Melipona quadrifasciata* and the honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Genet. Mol. Res.*, 8: 751-757.

Blanchart, E., Achouak, W., Albrecht, A., Barakat, M., Bellier, G., Cabidoche, Y.M., Hartmann, C., Heulin, T., Larré-Larrouy, C., Laurent, J.-Y., Mahieu, M., Thomas, F., Vilemin, G., Watteau, F., 2000. Déterminants biologiques de l'agrégation dans les Vertisols des Petites Antilles. *Etude et gestion des sols* 7(4) : 309-328.

Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., Lavelle, P., Brussard, L., 1999. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*: 149-172.

Blanco, C.H., Gantzer, C.H., Anderson, S.H., Alberts, E.E., Ghidey, F., 2002. Saturated hydraulic conductivity and its impact on simulated runoff for claypan soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1596-1602. Cité dans [Massah, J., Azadegan, B., 2016.](#) Effect of Chemical Fertilizers on Soil Compaction and Degradation. *Agricultural mechanization in Asia, Africa, and Latin America* 47(1): 44-50.

Blouet, A., Pervanchon, F., 2002. Deux qualificatifs à concilier en agriculture : raisonné et intégré. *Cahiers Agricultures* 11(2) : 151-157.

Bockstaller, C., Galan, M.-B., Capitaine, M., Colomb, B., Mousset, J., Viaux, P., 2008. Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale ? In: Raymond Reau, Thierry Doré, *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Collection Transversales. Édition Educagri: 29-51.

Bonneville, R., Saint-Hilaire, K., Brustel, H., Bugnicourt, J., Cambecedes, J., Dejan, S., Sarthou, V., Soldati, F., 2015. Les jachères Environnement et faune sauvage (JEFS) : une opportunité pour la biodiversité de nos campagnes ?. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, Paris :

Institut national de la recherche agronomique Délégation permanente à l'environnement, 65 (65) : 95-110

Boughton, A.J., Lewis, L.C., Bonning, B.C., 2001. Potential of agrotis epsilon nucleopolyhedrovirus for suppression of the black cutworm (Lepidoptera: Noctuidae) and effect of an optical brightener on virus efficacy. *J Econ Entomol.* 94:1045–105.

Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J.F., Peigné, J., Cortet, J. et Piron, D., 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. Cité dans Labreuche, J., Laurent, F., Roger-Estrade, J. Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovation pour une agriculture durable. Quae éditions 192 p.

Bowman, W.D., Cleveland, C.C., 2008. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nat Geosci* 1(11):767–770.

Bravo, J. A., Forsythe, P., Chew, M.V., Escaravage, E., Savignac, H.M., Dinan, T., Bienenstock, J., Cryan, J.F., 2011. Ingestion of *Lactobacillus* strain regulates emotional behavior and central GABA receptor expression in a mouse via the vagus nerve. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108(38):16050–16055

Brindza, L.J., Brower P.L., Davis, A.K., Van Hook, T., 2008. Comparative success of monarch butterfly migration to overwintering sites in Mexico from inland and coastal sites in Virginia. *Journal of the Lepidopterists' Society* 62(4):189-20.

Briquel, V., Vilain, L., Bourdais, J.-L., Girardin, P., Mouchet, C., Viaux, P., 2001. La méthode IDEA (indicateurs de durabilité des exploitations agricoles) : une démarche pédagogique. *Ingénieries* 25 : 29- 39.

Brosseau, 2013. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Rapport 2016 de mise en œuvre de la SNTEDD, 52p.

Bruchon L., Le Bellec F., Vannièrre H., Ehret P., Vincenot D., De Bon H., Marion D., Deguine J.P., 2015. Guide Tropical – Guide pratique de conception de systèmes de culture tropicaux économes en produits phytosanitaires. Edition Le Bellec F, CIRAD, 210 p.

Cabidoche, Y.V., Blanchart, E., Arrouays, D., Grolleau, E., Lehmann S., Colmet-Daage, F., 2004. Les Petites Antilles : des climats variés, des sols de natures contrastées et de fertilités inégales sur des espaces restreints. Cité dans : Barreteau, D., (ed.), Goguey, T., (ed.), Saudubray, F., (ed.), Xandé, X., (ed.), Les stocks de carbone dans les sols des Antilles: importance agronomique et environnementale. *Cahiers du PRAM*, 4 : 21-25.

Cabot, V., Danflous, J.P., Le Bellec, F., Lesage, S., Lobiètti, M., Michel, T., Poletti, S., Thomas, P., Zham, F., 2018. La méthode IDEA RUN, guide d'utilisation.

Canário, D.V.P., Figueiredo, E., Franco, J.C., Guerra, R., 2017. Detecting early mealybug infestation stages on tomato plants using optical spectroscopy. *Eur. J. Hortic. Sci* 82(3), 141–148.

Carvalho da Silva Neto, E., Gervasio Pereira, M., sz, J.C.F., De Andrade Corrêa Neto, T., 2016. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in atlantic forest from southeastern brazil, *semina: Ciencias Agrarias* 37 (6): 3927-3940.

Caquet, T., Gascuel-Oudou, C., Tixier-Boichard, M., Dedieu, B., Detang-Dessendre, C., Dupraz, P., Faverdin, P., Hazard, L., Hinsinger, P., Litrico-Chiarelli, I., Medale, F., Monod, H., Petit-Michaud, S., Reboud, X., Thomas, A., Lescourret, F., Roques, L., de Vries, H., Soussana, J.-F., 2019. Réflexion prospective interdisciplinaire pour l'agroécologie. Rapport de synthèse. 108 p.

Caquet, T., Gascuel-Oudou, C., Tixier-Boichard, M., 2019. Agroécologie des recherches pour la transition des filières et des territoires. Éditions Quae, 1ère édition, 104p.

Celestina, C, Wood, J.L, Manson, J.B., Wang, X., Sale, P.W.G., Tang, C., Franks , A.E., 2019. Microbial communities in top- and subsoil of repacked soil columns respond differently to amendments but their diversity is negatively correlated with plant productivity. *Sci. Rep* 9 : 8890.

Chamberlain, L.A., Bolton, M.L., Cox, M.S., Suen, G., Conley, S.P., Ané, J., 2020. Crop rotation, but not cover crops, influenced soil bacterial community composition in a corn-soybean system in southern Wisconsin. *Applied Soil Ecology*, 154: 103603.

Chan, K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - Implications for functioning in soils. *Soil and Tillage Research* 57(4):179-191

Chan, K.Y., Heenan, D.P., 2006. Earthworm population dynamics under conservation tillage systems in south-eastern Australia. *Aust. J. Soil Res.* 44: 425–431.

Chantre, E., Cerf, M., Le Bail, M., 2014. Transitional pathways towards input reduction on French field crop farms. *Int J Agric Sustain* 13: 69–86.

Chessel, J, Ballet, J., Goux., JP., 2010. Methods and systems for controlling air conditioning systems having a cooling mode and a free-cooling mode

Chivenge, P., Vanlauwe, B., Six, J., 2010. Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant Soil* 342: 1–30.

CIVAM, 2016. Le diagnostic du Réseau Agriculteur Durable: Guide de l'utilisateur. <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2016/02/Guide-utilisateur-2016.pdf>

Coleman, D.C., Crossley, D.A., Hendrix, P.F., 2004. Fundamentals of Soil Ecology 2nd edition. Academic Press. USA: Elsevier Science & Technology Books, 408 p .

Cook, S.M., Khan, Z.R., Pickett, J.A., 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Ann Rev Entom* 52 : 375-400.

Coquil, X., Blouet, A., Fiorelli, J.L., Bazard, C., Trommenschlager, J.M., 2009. Conception de systèmes laitiers en agriculture biologique : une entrée agronomique. *Inra Prod Anim* 22: 221–234

Crawford, N.M., Forde, B.G., 2002. Molecular and Developmental Biology of Inorganic Nitrogen Nutrition. Cité dans *The Arabidopsis Book*. Edited by Meyerowitz E, Somerville C, American Society of Plant Biologists 1–25.

Czosnek, H., Laterrot, H., 1997. A worldwide survey of tomato yellow leaf curl viruses. *Arch. Virol.* 142: 1391-1406.

Da Silva, V.F., Silveira, L.C.P., Dos Santos, A., Dos Santos, A.J.N., Tomazella, V.B., 2016. Companion plants associated with kale increase the abundance and species richness of the natural-enemies of *Lipaphis erysimi* (Kaltenbach) (Hemiptera : Aphididae). *African Journal of Agricultural Research*, 11(29) : 2630–2639.

Dauqan, E.M.A., Thamer, F.M., Naji, K.M., Alshaibi, Y., 2017. Different extraction methods and antioxidant properties of thyme (*Thymus vulgaris* L.) herb *International Journal of Chemical Science* 1(2):110-116.

Debaeke, P., Doré, T., Viaux, P., 1996. Production de références sur les successions de cultures. In *Expérimenter sur les conduites des cultures. Un nouveau savoir-faire pour une agriculture en mutation*. Ministère de l’agriculture, Acta, Comité potentialités : 87-98.

Debos, F., Lacroix, C., Cyrulnik, N, Rasse, R, Trousse, B., 2017. Démarche de co-conception citoyenne dans les processus d’innovation par les usages : le cas du projet Ecofamilies. *Automatique Control*, ISTE.

Decaëns, T., Gavis, J.H., Amezquita, E., 2001. Propriétés des structures produites par les ingénieurs écologiques à la surface du sol d’une savane colombienne. *Life sciences* 324 : 465-478.

Decortis, F. (2015) L’ergonomie orientée enfants. Concevoir pour le développement. Paris, France : PUF.

Dedieu, B., Aubin, J., Guillaume, D., Alexandre, G., Vayssiere, J., Bommel, P., Faye, B., 2011. Conception et évaluation de systèmes d’élevage durables en régions chaudes, à l’échelle de l’exploitation. *INRAE Prod. Anim.*,24(1) :113-128.

Deguine, J.-P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., Aubertot, J.-N., 2016. Protection agroécologique des cultures. Édition Quae. 216 p.

Delatte, H., Dalmon A., Rist D., Soustrade, I., Wuster, G., Lett, J.M., Goldbach, W.R., Peterschmitt, M., Reynaud, B., 2003. Tomato yellow leaf curl virus can be acquired and transmitted by *Bemisia tabaci* (Gennadius) from tomato fruit Plant Dis 87 (1): 1297-1300.

Deravel,J., Krier,F, Jacques, P. 2014. Les biopesticides, compléments et alternatives aux produits phytosanitaires chimiques (synthèse bibliographique). Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 18(2) : 220-232.

Desanti, R., Cardon, P., 2007. L'enquête qualitative en sociologie. Ash Eds. 112p.

Deytieux, V., Vivier, C., Minette, S., Nolot, J-M., Piaud, S., Schaub, A., Lande, N., Petit, M-S., Reau, R., Fourrié, L., Fontaine L., 2012. Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. Innovations Agronomiques (20) : 49-78.

Doan, T.T., Henry-des-Tureaux, T., Rumpel, C., Janeau, J.L., Jouquet, P..2015. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment. Sci Total Environ. 514:147-154.

Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M., Lyon, D.J., 2000. Changes in soil micro-bial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. Soil Biology & Biochemistry 32

Dubuc, D. 2004. Dynamisme rural, l'effet des petites villes. Espace géographique(1): 69-85.

Duby, C., Robin, S., 2006. Analyse en Composantes Principales.

Dugué, P., Kettel, V., Michel, I., Simon, S. 2016. Diversité des processus d'innovation dans les systèmes maraîchers des Niayes (Sénégal) : entre intensification conventionnelle et transition agroécologique. OpenScience Published by ISTE Ltd. London, UK

Duke, S., Powless, S.B. 2008. Glyphosate: A once-in-a-century herbicide. Pest Management Science 64(4):319-25.

Duchesne, S., 2000. Pratique de l'entretien dit 'non-directif'. Bachir, Myriam. Les méthodes au concret. Démarches, formes de l'expérience et terrains d'investigation en science politique, Presses Universitaires de France : 9-30.

Duval, L., Binet, T., Dupraz, P., Leplay, S., Etrillard, C., Pech, M., Deniel, E., Laustriat, M., 2016. Paiements pour services environnementaux et méthodes d'évaluation économique. Enseignements pour les mesures agro-environnementales de la politique agricole commune. Etude réalisée pour le ministère en charge de l'agriculture. Rapport final. Oréade-Brèche : 135p.

Edwards, C.A., Burrows, I., 1998. The potential of earthworm composts as plant growth media. Cité dans: Edwards, C.A., Neuhauser, E. (Eds). Earthworms in waste and environmental management. SPB Academic Press. The Hage, The Netherlands, 21-32 p.

Edwards, C.A., Domínguez, J., Arancon, N.Q., 2004. The influence of vermicomposts on plant growth and pest incidence. In: S.H Shakir and W.Z.A. Mikhail, (Eds). Soil Zoology for Sustainable Development in the 21st century. Cairo: 397-420.

Eigenbrode, S.D., Birch, A., Lindzey, S., Meadow, R., Snyder, W.E., 2016. A mechanistic framework to improve understanding and applications of push-pull systems in pest management. J Appl Ecol 53:202-212.

El Mujtar, V., Muñoz, N., Mc Cormick, B.P., Pulleman, M., Tiftonell, P., 2019. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? Global Food Security, 20 : 132-144.

Elbert, A., Haas, M., Springer, B., Thielert, W., Nauen, R., 2008. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. Pest Management Science 64: 1099-1105.

Errouissi, F, Moussa-Machraoui S.B., Hammouda M.B. , Nouira S., 2011. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: A comparison between conventional and no-tillage management. Soil & Tillage Research 112:112-132.

FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. World soil resources reports 94, Rome: 307 pages.

FAO, 2005. <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0506sp1.htm>

FAO, 2005. [Agriculture de conservation. http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/](http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/)

FAO, 2012. Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/3/a-i7480e.pdf>

Feng, Y., Balkcom, K.S., 2017. Nutrient Cycling and Soil Biology in Row Crop Systems under Intensive Tillage. Soil health and intensification of agroecosystems. Academic Press Elsevier Inc.

Fenneteau, 2015. L'enquête : entretien et questionnaire. Site ecolobris UA. DUNOD 3edition,10p

Fernandes, M. do C.A.; Leite, E.C.B.; Moreira, V.E. 2006. Defensivos alternativos: ferramenta para uma agricultura ecológica, não poluente, produtora de alimentos saudáveis. Niterói: PESAGRO-RIO,. 22p.

Fraão, J., de Goede, R.G.M., Capowiez, Y, Pulleman., M.M., 2019. Soil structure formation and organic matter distribution as affected by earthworm species interactions and crop residue placement. *Geoderma*, 338 : 453-463.

Frouz, J., Jilokova, V., 2008. The effect of ants on soil properties and processes (Hymenoptera: Formicidae). *Myrecolegial news* 11: 191-199.

Frouz, J., holec, M. kalcik, J. 2003. The effect of *Lasius niger* (Hymenoptera, Formicidae) ant nests on selected soil chemical properties. *Pedobiologia* 47: 205-212.

Gajalakshmi, S., Ramasamy, E.V., Abbasi. S.A., 2001. Potential of two epigenic and two anecic earthworm species in vermicomposting of water hyacinth. *Bioresource Technology* 76:177-181.

Galdos, M.V., Cerri, C.C.; Cerri, C.E.P., 2009. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma* 153(3) : 347-352

Garratt, M.P.D., Wright, D.J., Leather, S.R., 2011. The effects of farming system and fertilisers on pests and natural enemies: A synthesis of current research. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141, 261-270.

Geiger, F., Wäckers, F.L., Bianchi, F.J.J.A., 2009. Hibernation of predatory arthropods in semi-natural habitats. *BioControl*, 54(4): 529–535.

Gliessman, Stephen, R., 2015. Agroecology. The Ecology of sustainable food systems Third edition. CRC Press Taylor & Francis Group, 365p.

Gonzalez-Martin C, Teigell-Perez N, Valladares B, Griffin DW., 2014. The global dispersion of pathogenic microorganisms by dust storms and its relevance to agriculture. *Adv. Agron.* 127 : 1-41.

Goswami, L., Nath, A., Sutradhar, S., Bhattacharya, S.S., Kalamdhad, A., Vellingiri, K., Kim, K.H., 2017. Application of drum compost and vermicompost to improve soil health, growth, and yield parameters for tomato and cabbage plants. *J Environ Manage.* 200: 243–252.

Grigera, M.S., Drijber, R.A., Wienhold, B.J., 2007. Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research* 94:550-554.

Haddad, N.M., Crutsinger, G.M., Gross, K., Haarstad, J., Knops, J.M.H., Tilman, D., 2009. Plant species loss decreases arthropod diversity and shifts trophic structure. *Ecol. Lett.*, 12, 1029–1039.

Hainzelin, E., 2015. Enhancing the function and provisioning of ecosystem services in agriculture: agroecological principles Cite dans Agroecology for Food Security and Nutrition Proceedings of the Fao International Symposium, 427p

Hammad, A.M.A.; Gurkan, M.O., 2012. Side effects of some crop protection products on non-tardet soil invertebrates. Turkish Journal of Entomology, 36(2) : 169-176.

Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity: a theoretical framework to evaluate KCP process. International conference on engineering design, ICED'09, Stanford University, Stanford, CA, USA: 277-288.

Hatchuel, A., Weil, B., 2009. C-K design theory: an advanced formulation. Res. Eng. Des., 19 : 181-192.

Havard, M., Alaphilippe, A., Deytieux, V., Estorgues, V., Labeyrie, B., Lafond, D., Meynard, J.M., Petit, M.S., Plenet, D., Picault, S., Faloya, V., 2017. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes, GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172 p.

Hazell, P., & Wood, S. (2008). Drivers of change in global agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1491): 495–515.

Hénault-Ethier, L, Gagné, G., 2016. Document d'information : les pyréthriinoïdes, utilisés à la maison, mais non sans dangers. Équiterre 13p.

Hendrickx, F, et al. 2007. How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes. J. Appl. Ecol. 44, 340–351

Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pelosi, C., Villenave, C., Chenu, C., Blanchart, E. 2014. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. Agronomy for Sustainable Development, 35(1): 169–181.

Henry, A., Toupet, A.L., Deytieux, V., Reau, R., 2012. Recueil et analyse critique des règles de décision pour la protection des cultures, Préfiguration du dispositif DECI Ecophyto, 490 p.

Hernández, A., Castillo, H., Ojeda, D., Arras, A., López, J., Sánchez, E., 2010. Effect of vermicompost and compost on lettuce production. Chilean journal of agricultural research 70(4):583-589.

Holland, J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe : reviewing the evidence. Agri Ecosyst Environ 103:1-25.

Hossain, M., Rahman, M.S., Islam, M.S., Sultana, P., Faruki, S.I. 2017. Prevalence of springtail (Collembola) in the cultivated maize fields at Puthia Prevalence of springtail

(Collembola) in the cultivated maize fields at Puthia Upazila, Rajshahi district, Bangladesh. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(1): 186–190.

Huerta, E., Fragoso, C., Barois, I., Lavelle, P., 2005. Enhancement of growth and reproduction of the tropical earthworm *Polypheretima elongata* (Megascolecidae) by addition of *Zea mays* and *Mucuna pruriens* var. *utilis* litter to the soil. *European Journal of Soil Biology* 41(1–2): 45-53.

Husson, O., Tran Quoc, H., Boulakia, S., Chabanne, A., Tivet, F., Bouzinac, S., Lienhard, P., Michellon, R., Chabierski, S., Boyer, J., Enjalric, F., Rakotondramanana, Moussa, N., Jullien, F., Balarabe, O., Rattanatray, B., Castella, J.-C., Charpentier, H., Séguy, L., 2015. Co-designing innovative cropping systems that match biophysical and socioeconomic diversity. The DATE approach to conservation agriculture in Madagascar, Lao PDR and Cambodia. *Renew Agric Food Syst* 31: 452–470.

INRA, 2017. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/efese-services-ecosystemiques-rendus-par-les-ecosystemes-agricoles-resume-francais-3.pdf>

INRA, 2019. <https://www7.inra.fr/hyppz/RAVAGEUR/3thrtab.htm>

INSEE, 2016. Institut national de la statistique et des études économiques. <https://www.insee.fr/fr/information/4172214>

Jeannequin, B., Dosba, F., Plénet, D., Pitrat, M., Chauvin, J.E., 2011. Vers des cultures fruitières et légumières à hautes performances environnementales. *Innovations Agronomiques* 12, 73-85.

Jeyasankar A., 2012. Antifeedant, insecticidal and growth inhibitory activities of selected plant oils on black cutworm, *Agrotis ipsilon* (Hufnagel) (Lepidoptera: Noctuidae). *Asian Pacific Journal of Tropical Disease* 2:S347–51.

Jodaugienė, D., Pupalienė, R., Sinkevičienė, A., Marcinkevičienė, A., Žebrauskaitė, K., Baltaduonytė, M., Čepulienė, R., 2009. The influence of organic mulches on soil biological properties. *Zemdirbyste* 97(2): 33-40.

Jouquet, P., Bottinelli, N., Podwojewski, P., Hallaire, V., Tran Duc, T., 2008a. Chemical and physical properties of earthworm casts compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*, 146: 231-238.

Jouquet, P., Podwojewski, P., Bottinelli, N., Mathieu J., Ricoy, M., Orange, D., Tran Duc, T., Valentin, C., 2008b. Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. *Cetene*, 74: 13-21.

Jouquet, P., Plumere, T., DoanThu, T., Rumpel, C., TranDuc, T., Orange D., 2010. The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms, *46(1)*: 125-133.

Justes, E., Richard, G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. Innovations Agronomiques, INRA, 62 :1-15.

Kaneda S., Nakajima, M., Urashima, Y., Murakami, T., 2014. Effectiveness of reduced tillage on the cast production of *pheretima (Amyntas) carnosa* and yields of chinese cabbage on volcanic-ash soil. JARQ 48 (2): 147-153

Kaptan, B., Sivri, G.T., 2018. Utilization Aromatic and Medicinal of Plants in Dairy Products. J. Adv. Plant. Sci 1: 205.

Kaur, Riat, A., Ohri, S., 2018. Effect of phytochemicals against different pest: a review. International Journal of Advanced Research 6(6):999-1003.

Keith, A., Robinson, D. 2012. Earthworms as natural capital: ecosystem service providers in agricultural soils. The Economic Journal 2

Keller, S., Schweizer, C., Keller, E., Brenner, H., 1997. Control of white grubs (*Melolontha melolontha*L.) by treating adults with the fungus *Beauveria brongniartii*. Biocontrol Science and Technology 7: 105–116.

Khan,A., Ali, N., Haider, S.I. 2018. Maize productivity and soil carbon storage as influenced by wheat residue management. J. Plant Nutr., 41: 1868-1878.

Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J. 2008. Soil health in agricultural systems. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 363(1492), 685–701.

Kladivko, E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. Soil & Tillage Research 61:61-76.

Kleijn, D., Bommarco, R., Fijen, T.P.M., Garibaldi, L.A., Potts, S.G., Van der Putten, W.H., 2018. Ecological Intensification: Bridging the Gap between Science and Practice. Trends Ecol Evol xx:1–13.

Köller, K., 2003. Techniques of soil tillage. In: El Titi, A. (Ed.), Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press, Boca Raton, 368p.

Kremer, R. J, Means, N.E, 2009. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. Europ. J. Agronomy 31: 153–161

Kungolos, s, A., Emmanouil, C., Tsiridis, V., Tsiropoulos, N., 2009. Evaluation of toxic and interactive toxic effects of three agrochemicals and copper using a battery of microbiotests. Science of the Total Environment, 407 : 4610-4615.

Lacordaire, I., Piron, M., Germain, J.F., 2006. Presentation des principales especes de cochenilles rencontrées dans les serres tropicales et espaces verts ainsi que les auxiliaires spécifiques et transposables aux plantes d'intérieur. Cité dans : AFPP (Association Française de Protection des Plantes) – 1ère Conférence internationale sur l'entretien des espaces

verts, jardins, gazons, forêts, zones aquatiques et autres zones non agricoles Avignon 11 et 12 octobre 2006

Lairez, J., Feschet, P., 2016. Agriculture et développement durable, Guide pour l'évaluation multicritère. Quae, 228p.

Lal, R., 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. Sustainability 7(5) : 5875-5895.

Lambert, L., 1999a. S.O.S. thrips : identification, dans Cultures en serre n°1, Réseau d'avertissements phytosanitaires.

http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/BP_CS01pdf

Langellotto, G.A., Denno, R.F., 2004. Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. Oecologia 139: 1-10.

Lapied, E., Lavelle, P., 2003. The peregrine earthworm *Pontoscolex corethrurus* in the East coast of Costa Rica. Pedobiologia, 47(5-6): 471-474.

Larson, W.E., Pierce, F. J., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management, in defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication 35, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 37-51.

Lavelle, P., Barois, I., Cruz, I., Fragoso, C., Hernandez, A., Pineda, A., Rangel, P., 1987. Adaptive strategies of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta), a peregrine geophagous earthworm of the humid tropics. Biology and Fertility of Soils, 5(3): 188-194.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. European Journal of Soil Science : 159-193.

Lauber, C.L., Strickland, M.S., Bradford, M.A., Fierer, N., 2008. The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types. Soil Biology and Biochemistry, [40\(9\)](#): 2407-2415.

Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes : adaptive strategies that determine ecosystem function. Advances in Ecological Research 27 : 93-132.

Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M. (Coord), 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France).

Leal, M.R.L.V., Galdos, M.V., Scarpere, F.V., Seabra, J.E.A., Walter, A., Oliveira, C.O.F., 2013. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. Biomass and Bioenergy, 53: 11-19.

Legout, A., Hansson, K., Van Der Heijden, G., Laclau, J.-P., Augusto, L., Ranger, J., 2014. Fertilité chimique des sols forestiers : concepts de base. Les sols forestiers, Ref (4) : 413-424.

Lemanceau, P., Maron, P.A., Mazurier, S., Mougé, C., Pivato, B., Plassart, P., Ranjard, L., Revellin, C., Tardy, V., Wipf, D., 2015. Understanding and managing soil biodiversity : a major challenge in agroecology *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 67 :81.

Lemieux, G., 2000. Tentative d'évaluation de la technologie BRF pour des fins maraîchères, Université Laval, Québec. Publication (120).

https://www.doc-developpement-durable.org/file/Fertilisation-des-Terres-et-des-Sols/BRF/EvaluationBRF_PourFinMaraicheres.pdf

Lewis, K.A., J. Tzilivakis, D. Warner, A. Green, 2016. An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment, An International Journal* 22: 1050-1064

Li, D., Li, L., Xu, M., Ali, M.E., Zhang, W., Duan, Y., 2018. Factors affecting soil microbial biomass and functional diversity with the application of organic amendments in three contrasting cropland soils during a field experiment. *PLoS ONE* 13(9): e0203812.

Liang, S., Li, X., Wang, J., 2012. *Advanced remote sensing*. Elsevier Inc.

Liebman, M., Staver, C.P., 2004. Crop diversification for weed management. In: M. Liebman, C.L Mohler, C.P Staver (Eds), *Ecological management of agricultural weeds*, Cambridge University Press, Cambridge, UK : 322-374

Lithourgidis A.S., Vasilakoglou I.B., Dhima K.V., Dordas C.A., Yiakoulaki M.D., 2006. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research* 99, 106-113.

Loranger, G., 2001. Formes d'humus originales dans une forêt tropicale semi-décidue de la Guadeloupe. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series III - Sciences de La Vie*, 324(8) : 725–732.

Loveland, P., Webb, J., 2003. Is There Critical Level of Organic Matter in the Agricultural Soils of Temperate Regions: Review. *Soil Tillage Research*, 70: 1-18.

Luangduangsitthideth, O., Limnirankul, B., Kramol, P., 2018. *Kasetsart Journal of Social Sciences* Farmers' knowledge and perceptions of sustainable soil conservation practices in Paklay district, Sayabouly province, Lao PDR. *Kasetsart Journal of Social Sciences*: 1–7.

Maharjan, G. R., Prescher, A. K., Nendel, C., Ewert, F., Mboh, C. M., Gaiser, T., & Seidel, S. J. 2018. Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil and Tillage Research*, 180: 210–221.

Manyuchi, M. M., Mudamburi, T., Phiri, A., Muredzi, P., 2013. Impact of Vermicompost on Lettuce Cultivated Soil. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences* 1(11):41-43.

Marche C., Noel B., 2006. Mise en oeuvre de la technique du Bois Raméal Fragmenté (BRF) en agriculture wallonne. Centre des Technologies Agronomiques Communauté Française, Strée, Belgique, 168 p.

Marshall, E.J.P., Moonen, A.C., 2002. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* 89 : 5–21.

Mathieu, J., Rossi, J.-P., Grimaldi, M., Mora, P., Lavelle, P., Rouland, C., 2004. A multi-scale study of soil macrofauna biodiversity in Amazonian pastures. *Biol Fertil Soils* 40: 300–305.

Mathieu, J., Rossi, J.P., Mora, P., Lavelle, P., daMartins, P.F.S., Rouland, C., Grimaldi, M., 2005. Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in Eastern Amazonia, Brazil. *Conserv. Biol.* 19 :1598–1605

Meynard, J.-M., 2008. Produire autrement: réinventer les systèmes de cultures. Cité dans :Reau, R., Doré, T. 2008 *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évalue ?* Editions Educagri, 176 p.

Meynard, J.-M., 2008. Système de culture innovante et durable. Cité dans :Reau, R., Doré, T. 2008 *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évalue ?* Editions Educagri, 176 p.

Meynard, J.M., 2012. La reconception est en marche ! Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former. *Innovations Agronomiques* 20 :143-153.

Meynard, J.-M., Dourmad, J.-Y., 2014. L'innovation en élevage: de nouvelles démarches pour de nouveaux enjeux. Cité dans Ingrand, S., Baumont, R., Numéro spécial : *Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ?* Institut de Recherche National Agronomique 27(2) : 76-86.

Meynard, J.M., Jeuffroy, M.H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.B., Michon, C., 2016. Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agric Syst.* 157:330-339.

Meynard, J.M., 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation *OCL* 24(3) : D303

Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.-P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., Boizard, H., Jean-Marc Meynard, J.-M., 2009.

En Picardie, 8 fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent fortement les pesticides sans baisse de marge. *Courr Environ* 57: 73–91.

Mishra, J. S., Singh, V.P. 2012. Effect of tillage sequence and weed management on weed dynamics and productivity of dry-seeded rice (*Oryza sativa*)-wheat (*Triticum aestivum*) system. *Indian Journal of Agronomy* 57(1):14-19

Morales, H., Perfecto, I., 2000. Traditional knowledge and pest management in the Guatemalan highlands. *Agriculture and Human Values*, 17: 49–63.

Morandin, L.A., Lavery, T.M., Kevan, P.G., 2001. Bumble bee (Hymenoptera: Apidae) activity and pollination levels in commercial tomato greenhouses, *Journal of Economic Entomology*, 94 : 462-467.

Moreau, B., Thicoipe, J.P, Paitier, G., 1997. Protection des légumes et petits fruits. Ed Centre technique inter professionnel des fruits et légumes, 157 p.

Moriones, E., Navas-Castillo, J., 2000. Tomato yellow leaf curl virus, an emerging virus complex causing epidemics worldwide. *Virus Res* 71: 123-134.

Mound, L.A., 2004. Fighting, flight and fecundity : behavioural determinants of Thysanoptera structural diversity Cité dans: Ananthakrishnan, T.N., Whitman, D., *Insects and Phenotypic Plasticity*. Science Publishers Inc. 105 p.

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

Naudin, K., 2007. Expérimentations agronomiques Conduites et plans des essais : Guide méthodologique pour les antennes TAFA. CIRAD Document de travail BV lac n°32.

https://agritrop.cirad.fr/559220/1/document_559220.pdf

Nault, B.A., Speese, J., 2002. Major insect pests and economics of fresh-market tomato in eastern Virginia. *Crop Protection* 21(5):359-366.

Ndegwa, P. M., Thompson, S. A., 2001. Integrating composting and vermicomposting in the treatment. *Bioresource Technology*, 76 : 107–112.

Ngo, P.T., Rumpel, C., Dignac, M-F., Billou, D., Tran Duc, T., Jouquet, P., 2011. Transformation of buffalo manure by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils *Ecol. Eng.*, 37 (2): 269-276.

Nguyen, N.K., Dörfler, U., Welzl, G., Munch, J.C., Schroll, R., Suhadolc, M., 2018. Large variation in glyphosate mineralization in 21 different agricultural soils explained by soil properties. *Sci. Total Environ.* 627, 544-552.

Nogales, R., Cifuentes, C., Benítez. E., 2005. Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 1234:659-573.

Nolot J.-M., Debaeke P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. Cahiers Agriculture 12 : 387-400.

Nuama, E., 2006. Mesure de l'efficacité technique des agricultrices de cultures vivrières en Côte-d'Ivoire. 39 :53.

Nunes, C., Lucas, E., Coderre, D., 2006. Parasitisme de *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) en cultures maraichères en tropique sec nicaraguayen in International Journal of Tropical Insect Science 26(01): 57 – 63.

Pareja-Sánchez, E., Plaza-Bonilla, D., Ramos, M.C., Lampurlanés, J., Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Mar-tínez, C., 2017. Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroeco-system transformed into irrigation. Soil and Tillage Research 174, 221-230

Pauli, N., Barrios, E., Conacher, A.J., Oberthür, T., 2012. Farmer knowledge of the relationships among soil macrofauna, soil quality and tree species in a smallholder agroforestry system of western Honduras. Geoderma, 189–190: 186–198.

Pincus, L., Margenot, A., Six, J., Scowd, K., 2016. On-farm trial assessing combined organic and mineral fertilizer amendments on vegetable yields in central Uganda. Agric Ecosyst Environ, 225: 62-71.

Pingali, P.L., 2012. Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(31): 12302–12308.

Pires, L.F., Borges, J.A.R, Rosa, J.A., Cooper, M., Heck, R.J., Passoni, S., Roque, W., 2017. Soil structure changes induced by tillage systems Soil structure changes induced by tillage systems. Soil Tillage Res., 165 :66-79.

Pisa, L.W., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L.P. Bonmatin, J.M., Downs, C A., Goulson, D., Kreutzweiser, D.P., Krupke, C., Liess, M., McField, M., Morrissey, C.A., Noome, D.A., Settele, J., Simon-Delso, N., Stark, J.D., Van der Sluijs, J.P., Van Dyck, H., Wiemers, M., 2015. Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates. Environ Sci Pollut Res 22: 68–102.

Plumecocq, G., Duru, M., Debril, T., Magrini, M.-B., Therond, O., Sarthou, J.-P., 2018. The plurality of values in sustainable agriculture models: diverse lock-in and co-evolution patterns. Ecol. Soc., 23, 21.

Ponge, J.F., 1999. Horizons and humus forms in beech forests of the Belgian Ardennes. Soil Science Society of America Journal 63 : 1888-1901.

Pons, C., 2016. Dossier technique spécial chou. Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes: 1-4.

Pozzebon, A., Borgo, M.; Duso, C., 2010. The effects of fungicides on non-target mites can be mediated by plant pathogens. Chemosphere, 9: 8-17.

Prabha, K.P., Loretta, Y.L., Usha, R.K., 2007. An experimental study on vermin-biowaste composting for agricultural soil improvement. *Bioresource Technology* 99: 1672-1681.

Prabhaker, N., Morse, J.G., Castle, S.J., Naranjo, S.E, Henneberry, T.J., Toscano, N.C., 2007. Toxicity of seven foliar insecticides to four insect parasitoids attacking citrus and cotton pests. *J Econ Entomol* 100:1053–1061.

Pramanik, P., 2010. Changes in microbial properties and nutrient dynamics in bagasse and coir during vermicomposting: Quantification of fungal biomass through ergosterol estimation in vermicompost. *Waste Manage.* 30: 787–791.

Prost, L., Berthet, E.T.A., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., Meynard, J.-M., 2017. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Res. Eng. Des.*, 28 : 119-129.

Prosser, R., Rodriguez-Gil, J. L., Solomon, K. R., Sibley, P. K., and Poirier, D. G., 2017. Effects of the herbicide surfactant MON 0818 on oviposition and viability of eggs of the ramshorn snail (*Planorbella pilsbryi*). *Environ. Toxicol. Chem.* 36, 522–531.

Puech, C., Baudry, J., Aviron, S., 2013. Effet des pratiques biologiques et conventionnelles sur les communautés d’insectes auxiliaires dans les paysages agricoles. *Innovations Agronomiques* 32 : 401-412.

Pulleman, M.M., Six, J., Uyl, A., Marinissen, J.C.Y., Jongmans, A.G., 2005. Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. *Applied Soil Ecology* 29 : 1–15.

Quintanilla-Tornel MA, Wang KH, Tavares J, Hooks CRR., 2016 . Effects of mulching on above and below ground pests and beneficials in a green onion agroecosystem. *Agric Ecosyst Environ.* 224: 75-85.

Rabhi K.K., Deisig N., Demondion E., Le Corre J., Robert G., Tricoire-Leignel H., Lucas P., Gadenne C., Anton S. 2016. Low doses of a neonicotinoid insecticide modify pheromone response thresholds of central but not peripheral olfactory neurons in a pest insect, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 283, 1824, 20152987.

Raharison T., Bélières J.F., Salgado,P, Autfray, P., Razafimahatratra, H.M., Rakotofiringa H.Z., 2017. Agro-biodiversité dans les exploitations agricoles familiales du moyen-ouest de Vakinankaratra : Des paysans en avance sur la recherche et le développement agricole durable ? *Fianarantsoa*, 14 : 29-30

Raimundo A.C., Fürsch H., Van Harten, A., 2006. Additional notes on the ladybird beetles (Coleoptera: Coccinellidae) of Yemen with descriptions of new species. *Fauna of Arabia* 21: 217-245.

Raimundo A.C., Fürsch H., Van Harten, A., 2008: Order Coleoptera, family Coccinellidae. Cité dans: van HARTEN, A., (ed.), Arthropod Fauna of the UAE. Dar Al Ummah Printing, Adu Dhabi, UAE 1: 217-239.

RAP, 2018. https://www.agrireseau.net/documents/Document_97052.pdf

Ravindran, B., Lee, S. R., Chang, S.W., Nguyen, D.D., Chung, W.J., Balasubramanian, B., Sekaran, G., 2019. Positive effects of compost and vermicompost produced from tannery waste-animal fleshing on the growth and yield of commercial crop-tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plant. Journal of Environmental Management, 234: 154–158.

Reau, R., Meynard, J.M., Robert, D., Gitton, C., 1996. Des essais factoriels aux essais “conduite de culture”. Cité dans : Expérimenter sur les conduites de cultures: un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation. Ministère de l'agriculture, Acta, Comité potentialités : 52-62.

Reau, R., Monnot L.A., Shaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de systèmes de conception de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. Innov. Agron., 20, 5-33.

Rey, F., Ballais, J-L., Marre, A., Rovéra, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface, C. R. Geoscience 336 : 991–99.

Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertand, M., Richard, G., 2010. Tillage and soil ecology : Partners for Sustainable agriculture. Soil Till Res 111: 33-40.

Romano-Armada, N., Amoroso, M.J., Rajal, V.B. 2017. Effect of glyphosate application on soil quality and health under natural and zero tillage field conditions. Soil Environment, 36(2): 141-154.

Roocks, F., Salva, H., Sarthou, J.-P., 2016. Agriculture de conservation des sols : Définition : [Dictionnaire d'Agroecologie](https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-de-conservation/) : <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-de-conservation/>

Rowley, M.A., Ransom, C.V., Reeve, J.R., Black, B.L., 2011. Mulch and organic herbicide combinations for in-row orchard weed suppression. International Journal of Fruit Science, 11(4): 316–331.

Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M.M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Bommarco, R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. Agriculture, Ecosystems and Environment, 221: 198–204.

Sadeh, D., Nitzan, N., Shachter, A., Chaimovitsh, D., Dudai, N., Ghanim, M., 2017. Whitefly attraction to rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) is associated with volatile composition and quantity. PLoS ONE, 12(5): 1–18.

SAFER-MICA, 2001. Le maraîchage dans le périmètre de la Réforme Foncière première caractérisation tirée de la base de données SAFER-MICA.

Sanchez, P.A., 1999. Improved fallows come of age in the tropics. *Agroforestry Systems* 47: 3–12.

Sanner, E.-A., Bouville, R., Sarthou, V., 2018. Agriculture biologique : Définition. Dictionnaire d'Agroécologie : <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-biologique/>

Saxton, K., D. Chandler, L. Stetler, B. Lamb, C. Claiborn, and B.-H. Lee. 2000. Wind erosion and fugitive dust fluxes on agricultural lands in the Pacific Northwest. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43:623-630.

Schaller, N., 2013. L'agroécologie: des définitions variées, des principes communs. *Centre d'études et de Prospective (Ministere)*, 59: 1-4.

Sharma, P., Singh, A., Kahlon, C.S., Brar, A.S., Grover, K.K., Dia, M., Steiner, R.L., 2018. The role of cover crops towards sustainable soil health and agriculture—A Review Paper. *American Journal of Plant Sciences* 9: 1935-1951.

Scheu, S., Simmerling, F., 2004. Growth and reproduction of fungal feeding Collembola unaffected by fungal species, melanin and mixed diets *Oecologia*, 139: 347–353.

Schonbeck, M. W., Evanylo, G., 1998. Effects of Mulches on Soil Properties and Tomato Production I. Soil Temperature, Soil Moisture and Marketable Yield. *Journal of Sustainable Agriculture* 13(1):55-81.

Schoning, C., Csuzdi, C., Kinuthia, W., Ogotu, J.O., 2010. Influence of driver ant swarm raids on earthworm prey densities in the Mount Kenya forest: implications for prey population dynamics and colony migrations. Cité dans [Insectes Sociaux](#) 57(1):73-82.

Schuster, D.J., Stansley, P.A., Polston, J.E., 1996. Expressions of plant damage from Bemisia. Cité dans : Bemisia 1995: Taxonomy, Biology, Damage Control and Management, ed. D Gerling, RT Mayer, Andover, Hants, UK: Intercept Ltd, 153–165 p

Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les Agronomes, Cité dans Combe L., Picard D. (Eds.). *Le point sur les systèmes de culture*, INRA Editions, Paris, : 165-196.

Sebillotte, M., 1993, L'agronome face à la notion de fertilité. *Natures Sciences Sociétés* 1 (2) : 128-141.

Sierra, J., Loranger-Merciris, G., Solvar, F., Badriet, N., Arquet, R., 2011. Le vermiconpostage en Guadeloupe. Institut National de la Recherche Agronomique.

Sierra, J., Causeret, F., Diman, J.L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., Chopin, P., 2015. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified

agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 213: 252- 264

Silva-Olaya, A.M., Cerri, C.E.P., Williams, S. et al. 2017. Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. *Plant Soil* 410, 483–498

Smith, **2003.**
https://www.dpi.nsw.gov.au/data/assets/pdf_file/0004/126292/Eggplant-Growing-Agfact-H8.1.29.pdf

Smith, L.E.D., Siciliano, G., 2015. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. *Agriculture. Ecosyst. Environ.* 209 : 15-25.

Snyder, W.E., Ives, A.R., 2003. Interactions between specialist and generalist natural enemies: parasitoids, predators and pea aphid biocontrol. *Ecology* 84, 91-107.

Solomon, C.B, Bradley.K.W, 2007. Influence of Application Timings and Sublethal Rates of Synthetic Auxin Herbicides on Soybean. *Weed Technology* 28(3):454-464

Song, X., Liu, M., Wu, D., Bryan, S., Griffiths., Jiao, J., Li, H., Hu, F., 2015. Interaction matters: synergy between vermicompost and PGPR agents improves soil quality, crop quality and crop yield in the field *Appl. Soil Ecol.*, 89: 25-34.

Souza, C.R., Sarmiento, R.A., Venzon, M., Santos, G.R., Silveira, M.C.A.C., 2015 Tschoeke, P.H. Lethal and sublethal effects of Neem on *Aphis gossypii* and *Cycloneda sanguinea* in watermelon. *Acta Scientiarum: Agronomy*, 37(2) : 233-239.

Stassart, P.M., Baret, Ph., Grégoire, J-Cl., Hance, Th., Mormont, M., Reheul, D., Stilmant, D., Vanloqueren, G., Visser, M., 2012. L'agroécologie : trajectoire et potentiel Pour une transition vers des systèmes alimentaires durables, 21p.

Steinmaus, S., Elmore, C.L., Smith, R.J., Donaldson, D., Weber, E.A., Roncoroni, J.A., Miller, P.R.M., 2008. Mulched cover crops as an alternative to conventional weed management systems in vineyards. *Weed Research* 48 (3) : 273-281.

Stirling, G.R., 2008. The impact of farming systems on soil biology and soil borne diseases: examples from the Australian sugar and vegetable industries — the case for better integration of sugarcane and vegetable production and implications for future research. *Australasian Plant Pathology* 37, 1–18

Styger, E.,Fernandes, C.M.E.2006. Contributions of managed fallows to soil fertility recovery. Cité dans U. Norman, S. A. Ball, C. M. E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, C. Palm, J. Pretty, N. Sanginga, J. E. Thies (eds), *Biological approaches to sustainable soil systems.* Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA. 425-437p.

Sylvia, D., Fuhrmann, J., Hertel, P., Zuberer, D., 2005. Principles and Applications of Soil Microbiology, 2nd edition. Pearson

Tancoigne E. et al. 2014. The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services. *Ecosystem services* 10: 35-48

Temple, L., 1997. La compétitivité de la diversification agricole en Guadeloupe

Testud, F, Grillet, J.P. 2006. Insecticides organophosphorés, carbamates, pyréthrinoïdes de synthèse et divers. *EMC - Pathologie professionnelle et de l'environnement* 2(2):1-24.

Theiling, K.M., Croft, B.A., 1988. Pesticide side-effects on arthropod natural enemies: A database summary. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 21, 191-218.

Thenail C, Joannon A, Capitaine M, Souchère V, Mignolet C, Schermann N, et al., 2009
The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131: 207-219

Therond, O., Duru, M., 2019. Agriculture et biodiversité : les services écosystémiques, une voie de réconciliation ? *Innovations Agronomiques* 75 : 29-47.

Tiemann, L.K, Grandy, A.S., Atkinson, E. E., Marin Spiotta, E., McDaniel M.D., 2015. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology letters*, 18: 761-771

Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W.H., Simberloff, D., Swackhamer, D., 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292 : 281-284.

Tilman, D., Hill, J., Lehman, C., 2006a. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, 314,:1598–1600.

Toni, H.C., Djossa, B.A., Teka, O.S., Yédomonhan, H., 2018. Les services de pollinisation des abeilles sauvages, la qualité et le rendement en fruits de la tomate (*Lycopersicon esculentum* mill.) dans la commune de Kétou au sud Bénin *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 32: 239 – 258.

Topoliantz, S., Ponge, J.F., Viaux, P., 2000. Earthworm and enchytreid activity under different arable farming systems, as exemplified by biogenic structures. *Plant and Soil* 225 : 39-51.

Torres-Vila L.M., Rodríguez-Molina M.C, Lacasa-Plasencia, A., 2003. Testing IPM protocols for *Helicoverpa armigera* in processing tomato: egg-count- vs. fruit-count-based damage thresholds using Bt or chemical insecticides. *Crop Protection* 22(8): 1045-1052

Tylianakis, J.M., Romo, C.M., 2010. Natural enemy diversity and biological control: Making sense of the context-dependency. *Basic and Applied Ecology*, 11(8): 657–668.

Vall E., Chia, E., Blanchard M., Koutou, M., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants Cah. Agric. 25 : 15001.

Vanlauwe, B., Descheemaeker, K., Giller, K.E., Huising, J., Merckx, R., Nziguheba, G., Wendt. J., Zingore, S., 2015. Integrated soil fertility management in sub Saharan Africa: unraveling local adaptation. Soil 1 (1): 491-508.

Verret, V., Pelzer, E., Bedoussac, L., Jeuffroy, M.H., 2019. Traque aux innovations d'agriculteurs pour la conception d'associations d'espèces incluant des légumineuses. Innovations Agronomiques, INRAE, 74 :143-154.

Vélasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ a multifunctional indicator of soil quality. Soil Biol. Biochem. 39 : 3066-3080.

Vélasquez, E., Pelosi, C., Brunet, D., Grimaldi, M., Rendeiro, A.C., Barrios, E., Lavelle, P., 2007. This ped is my ped : Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of the soil macroaggregates. Pedobiologia 51 : 75-87.

Viaux, P., 2013. Systèmes intégrés : une troisième voie en grande culture, 2e éd. Éditions La France Agricole, coll. Agri production, 329 p.

Vinck, D., 2009. De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. Revue d'anthropologie des connaissances, 1(1) : 51-72.

Wang, J., Lv, S., Zhang, M., Chen, G., Zhu, T., Zhang, S., Teng, Y, Christie, P., Luo, Y., 2016. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils. Chemosphere 151: 171-177.

Weingartner, M.A., Weingartner, M.A.; Aldrighi, C.F.S.; Pereira, A.F., 2006. Práticas Agroecológicas: caldas e biofertilizantes. Pelotas: FAPEG/INCRA/EMBRAPA Clima Temperado : 24p.

Weller, D.M., Raaijmakers, J.M., McSpadden Gardener, B.B., Thomashow, L.S., 2002. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. Annual Review of Phytopathology 40 : 309-48.

Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. Agronomy for Sustainable Development 34(1): 1-20.

Whelan, C.J., 2001. Foliage structure influences foraging of insectivorous forest birds: An experimental study. Ecology 82:219-231.

Wuest, S.B., Caesar-TonThat, T.C., Wright, S.F., Williams, J.D., 2005. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil. Soil Tillage Res. 84, 154-16.

Yang, N.W., Li, A.L., Wan, F.H., Liu, W.X., Johnson, D., 2010. Effects of plant essential oils on immature and adult sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* biotype B. *Crop Protection* 29(10): 1200–1207.

Yerima, B.P.K., Van Ranst, E. 2005. Introduction to Soil Science: Soils of the Tropics. Trafford Publishing, Bloomington.

Young, I.M., Ritz K., 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53:201-213.

Zahm, F., Viaux, P., Vilain, L., Girardin, P., Mouchet C., 2008. “Assessing farm sustainability with the IDEA method – from the concept of agriculture sustainability to case studies on farms”. *Sustainable Development* 16:271-281.

Zahm, F., Alonso Ugaglia, A., Barbier, J.M., Boureau, H., Del’homme, B., Gafsi, M., Gasselin, P., Girard, S., Guichard, L., Loyce, C., Manneville, V., Menet, A., Redlingshöfer, B., 2019. Évaluer la durabilité des exploitations agricoles. La méthode IDEAv4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cah. Agric.* 28(5) :1-10.

Zanuncio, J.C., Mourão, S.A., Martínez, L.C., Wilcken, C. F., Ramalho, F.S., Plata-Rueda, A., Soares, M.A., Serrão, J.E., 2016. Toxic effects of the Neem oil (*Azadirachta indica*) formulation on the stink bug predator, *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae). *Scientific Reports* 6 : 30261.

Zhao, S., Zhang, S., 2018. Linkages between straw decomposition rate and the change in microbial fractions and extracellular enzyme activities in soils under different long-term fertilization treatments *PLoS ONE* 13(9):e0202660

Zhu Q, Liu X, Hao T, Zeng M, Shen J, Zhang F, De Vries W., 2018. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems. *Sci Total Environ* 613-614 : 1339-1348.

ANNEXES

Annexe 1: Questionnaire d'enquête

QUESTIONNAIRE D'ENQUÊTE

Date:

1. Identification de l'exploitant

Nom		Fixe:
		Mobile :
Prénoms		Email:
Adresse Exploitant		
Adresse Exploitation		Coor.GPS Long.: Lat.:

2. Structure et description de l'exploitation

<u>Exploitation</u>	Affiliation (Org.Professionnelle)	Année d'installation	Surf. Agricole totale (ha)
	Historique		
	Différents types de cultures (animales/végétales)		Pourcentage

3. Structure et description des parcelles

PARCELLE 1	Ref. de la Parcelle			Superficie (m ²)	
	Type de sol:	Coordonnées GPS		Age de la culture	
		Long:			
		Lat:			
	CULTURES				
	Système de production (animal/végétal), Système de rotation, Association	Précédentes		Présentes	Suivantes
	Travail du sol effectué	Labour		Appareillage utilisé pour le labour	
		Oui / Non	Manuel	Mécanique	
	Produits phytosanitaires		Type d'irrigation / Provenance de l'eau :		
	Oui / Non				
			Type		Fréquence
	Traitements aérien: Insectes de surface, Champignons, bactéries ...				
	Traitements du sol: Herbicides, Desherbage manuel, nématodes du sol ...				
	Autres traitements				
APPORTS À LA CULTURE ACTUELLE					
		Type	Fréquence	Apport annuel	
Chaulage					
Matière Organique					
PARCELLE 1	Engrais				
	Autres apports				
	FLUX DE RESIDUS DE CULTURE				
	Devenir des résidus	Enfouissement		Laissé au sol	Autre
Paillage: Oui / Non	Type de Paillage		Quantité	Brûlis	

Observation de l'activité biologique à la surface :

Nombre de turricules de vers de terre (5 x 1 m²) :

Activité biologique :

Présence biologique	Oui/ Non	Observations
Nids de fourmis		
Carabes		
Blattes		
Milles-pattes		
Autres		

Parcelle enherbée: Oui / Non

Pourcentage d'enherbement:

Questions diverses

1. Dans le cadre de la réglementation "Ecophyto 2018" qui va se mettre en vigueur, on demande une réduction de l'emploi des engrais et des pesticides chimiques, Cela vous semble-t-il réalisable sur votre exploitation? Pour quelles cultures et quelles parcelles? Quelles contraintes cela vous impose-t-il?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

2. Par rapport à vos pratiques agricoles, définissez-vous votre exploitation comme conventionnelle (utilisation d'engrais et de pesticides chimiques), traditionnelle ou moderne?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

3. Quelles nouvelles méthodes avez-vous déjà testé ? Comment avez-vous eu l'idée?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

4. À votre avis, existe-t-il des contraintes à l'utilisation de ces méthodes innovantes?

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe 2: Atelier participatif

Fiche P : Proposition : Mise en place d'un modèle réel à INRA de Godet

Présentation :

Cet atelier a pour objectif de mettre en place des systèmes maraichers nouveaux qui conservent au mieux la biodiversité du sol. Le système proposé doit être réaliste et doit être le plus détaillé le plus précisément possible. La parcelle sur laquelle vous devez travailler à une taille de 500 m² et est disponible pour deux années.

Le champ des propositions est totalement ouvert sur les 4 thèmes suivants :

- Travail du sol
- Protection phytosanitaire
- Apport/Nutrition
- Choix des cultures

TRAVAIL DU SOL

Proposition dans sa globalité

Pourquoi ? Intérêt, utilité

Comment ?

PROTECTION PHYTOSANITAIRE

Proposition dans sa globalité

Type (s) de protection(s) et Pourquoi ?

Fréquence

APPORT / NUTRITION

Proposition dans sa globalité

Type(s) d'apport(s) et Pourquoi ?

Fréquence

CHOIX DES CULTURES

Proposition dans sa globalité

Type(s) de cultures(s) et Pourquoi ?

Expliquer le choix des successions

AUTRES SUGGESTIONS :

Annexe 3 : Méthodes IDEA et RAD

La méthode IDEA permet d’apprécier la durabilité à l’échelle agroécologique, sociale et économique (Biquel et al., 2001). Cet outil fait l’objet de constantes améliorations depuis sa publication en 2000. En 2003, la version 2 est rendu applicable pour des systèmes maraîchers et pour l’horticulture (Vilain et al., 2008). Depuis, les concepteurs de la méthode ont créé une nouvelle version IDEA v4, qui s’appuie sur 5 propriétés des systèmes agricoles durables (ancrage territorial, autonomie, capacité productive et reproductive de biens et de services, responsabilité globale et robustesse) et qui comprend 57 indicateurs (Zham et al., 2019). Ces indicateurs sont regroupés en composantes selon les trois échelles. Un score sur 100 est obtenu pour chaque échelle en faisant la somme des notes attribuées aux indicateurs (Biquel et al., 2001).

4 Composantes	Indicateurs de la dimension socio-territoriale	Score max	Plafond
Alimentation	Production alimentaire de l’exploitation	6	25
	Contribution à l’équilibre alimentaire mondial	6	
	Qualité de la production alimentaire	6	
	Pertes et gaspillages	6	
	Liens sociaux, hédoniques et culturels à l’alimentation	6	
Développement local et économique circulaire	Engagement dans des démarches environnementales contractualisées territoriales	5	25
	Services marchands au territoire	3	
	Valorisation des produits par filières courtes ou de proximité	5	
	Valorisation des ressources locales	5	
	Valorisation et qualité du patrimoine (bâti, paysage et savoirs locaux et ressources naturelles)	3	
	Accessibilité de l’espace	3	
	Gestion des déchets non organiques	3	
	Réseaux d’innovation et mutualisation du matériel	3	
Emploi et qualité du travail	Contribution à l’emploi et gestion du salariat	6	25
	Travail collectif	6	
	Intensité et qualité au travail	6	
	Accueil, hygiène et sécurité	5	
	Formation	6	
	Implication sociale territoriale et solidarités	6	25
	Démarche de transparence	6	

Ethique et développement humain	Qualité de vie	6	
	Isolement	6	
	Bien-être animal	6	
Total		118	100

5 Composantes	Indicateurs de la dimension agroécologique	Score max	Plafond
Diversité fonctionnelle	Diversité des espèces cultivées	5	20
	Diversité génétique	5	
	Diversité temporelle des cultures	5	
	Qualité de l'organisation spatiale	5	
	Gestion de la biodiversité	5	
Bouclage flux de matière et d'énergie par une recherche d'autonomie	Autonomie en énergie, matériaux, matériels, semences et plan	8	20
	Autonomie alimentaire de l'élevage	8	
	Autonomie en azote	8	
Sobriété dans l'utilisation des ressources	Sobriété dans l'usage l'eau et partage de la ressource	8	20
	Sobriété dans l'utilisation du phosphore	8	
	Sobriété dans la consommation en énergie	8	
Assurer des conditions favorables à la production à moyen et long terme	Raisonner l'utilisation de l'eau	8	20
	Favoriser la fertilité du sol	8	
	Maintenir l'efficacité de la protection sanitaire des cultures et des animaux	4	
	Sécuriser la disponibilité des moyens matériels de production	4	
Réduire les impacts sur la santé humaine et les écosystèmes	Réduire l'impact des pratiques sur la qualité de l'eau	6	20
	Réduire l'impact des pratiques sur la qualité de l'air	6	
	Réduire l'impact des pratiques sur le changement climatique	6	
	Réduire l'usage des produits phytosanitaires et vétérinaires	6	
Total		121	100

4 Composantes	Indicateurs de la dimension économique	Score max	Plafond
Viabilité économique et financière	Capacité économique	20	35
	Poids de la dette	12	
	Taux d'endettement structurel	6	
Indépendance	Diversification productive	10	25
	Diversification et relations contractuelles	10	
	Sensibilité aux aides	6	
	Contribution des revenus extérieurs à l'indépendance	4	
Transmissibilité	Transmissibilité économique	15	20
	Pérennité probable	8	
Efficiences globale	Efficiences brute du processus productif	12	20
	Sobriétés en intrants dans le processus productif	8	
Total		111	100

La méthode RAD est un outil intuitif, simple, rapide et il s'adapte à tous les systèmes de productions : végétale, élevage animal et polyculture-élevage (CIVAM, 2016). Elle évalue la durabilité d'une exploitation agricole à l'échelle de l'environnement, sociale et économique, en s'appuyant sur 18 indicateurs. Ces indicateurs sont notés de 0 à 5 selon un barème. La somme des notes obtenues pour chaque échelle montre la durabilité de l'exploitation (CIVAM, 2016).

Echelle de durabilité	Indicateurs
Environnementale	Bilan des minéraux ou bilan apparent Pesticides Linéaire de haies Biodiversité Gestion des sols Dépendance énergétique
Sociale	Qualité de vie Viabilité socio-économique Transmissibilité Multifonctionnalité Contribution à l'emploi
Economique	Efficacité économique Autonomie Sensibilité à la conjoncture Autonomie financière Efficacité du capital Rémunération du travail Vulnérabilité commerciale

Annexe 4 : Indicateurs retenus pour l'évaluation économique

1. L'EFFICIENCE DU PROCESSUS PRODUCTIF

Il caractérise l'autonomie et l'économie des ressources ; c'est l'efficacité technique qui repose sur la valorisation des ressources et des potentialités du milieu de production et non des intrants. Cela permet de savoir si le système est capable de valoriser ses propres ressources et garantit sur le long terme leur durabilité.

Indicateur	Barème	Points	
<u>PRODUIT-INTRANTS</u> PRODUIT	< 10 %	0	PRODUIT = chiffre d'affaire INTRANTS= Montant des consommables
	10 à 30 %	1	
	30 à 50 %	2	
	50 à 70 %	3	
	70 à 90 %	4	
	> 90%	5	

2. L'EFFICACITÉ ÉCONOMIQUE

Traduit l'efficacité économique du système de production et son autonomie.

Indicateur	Barème	Points	
<u>Valeur ajouté(VA)</u> PRODUIT	< 20%	0	VA = PRODUIT – CONSOMMATIONS INTERMÉDIAIRES CONSOMMATIONS INTERMÉDIAIRES = INTRANTS + SERVICES
	20 à 30%	1	
	30 à 40%	2	
	40 à 50%	3	
	50 à 60%	4	
	> 60%	5	

3. AUTONOMIE ÉCONOMIQUE :

Traduit la dépendance vis-à-vis des achats extérieurs (achat ou non de concentrés, autoconsommation...).

Indicateur	Barème	Points	
<u>Marge Brute globale</u> Produit de l'activité	< 55%	0	MARGE BRUTE GLOBALE= PRODUIT GLOBALVENDU (aux prix de vente) – CHARGES OPERATIONELLES
	55 à 60%	1	
	60 à 65%	2	
	65 à 70%	3	
	70 à 75%	4	
	> 75%	5	

4. RÉMUNÉRATION DU TRAVAIL :

Ce critère sert à voir la part de la richesse créée (VA) et des aides allouées au travail plutôt qu'à l'outil de production.

Indicateur	Barème	Points	
<u>Résultat social</u> VA + Aide	< 30%	0	RÉSULTAT SOCIAL = RÉSULTAT d'EXPLOITATION + CHARGES SOCIALES VA : valeur ajoutée (explicitée plus haut) Les Aides sont en fait les subventions à la production
	30 à 40%	1	
	40 à 50%	2	
	50 à 60%	3	
	60 à 70%	4	
	> 70%	5	

5. VULNÉRABILITE COMMERCIALE : LE TAUX DE SPÉCIALISATION :

C'est le degré de spécialisation de l'activité principale de la ferme et donc de sa sensibilité à la conjoncture car une exploitation agricole diversifiée est moins fragile face aux contraintes économiques, aux aléas climatiques et aux aléas parasitaires.

Indicateur	Barème	Points	
<u>Produit Brut de la</u> <u>production principale</u> Produit de l'activité	>80%	0	
	80 à 75%	1	
	75 à 70%	2	
	70 à 65%	3	
	65 à 60%	4	
	> 60%	5	

Annexe 5: Tableaux de production AG 2017

AG 1000m² 2017

Produits	1kg	kg/1000m ²	Prix unitaire vente	TOTAL
Tomate	en kilos	176	1,76 €	309,76 €
Laitue	2 sachets de salade	469,2	1,82 €	853,94 €
thym	10 bottes de thym	15,68	10,00 €	156,80 €
Basilic	10 bottes de basilic	240	5,00 €	1 200,00 €
			total	2 520,50 €

Service	prestation
Préparation du sol	175,68 €
Ependage	156,16 €
Irrigation	75,26 €
Traitement	88,92 €
Total	496,02 €

PLANTATION				
OPERATION	Qté en plant pour 1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> variété heatmaster)	1080	0,12 €	1	129,60 €
Laitue (<i>Lactuca sativa</i> variété batavia blonde)	2000	0,08 €	2	320,00 €
Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	320	0,12 €	1	38,40 €
Basilic (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	640	0,09 €	1	57,60 €
Doliprane (<i>Colquhoulia coccinea</i>)	160	- €	1	- €
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	160	0,90 €	1	144,00 €
Groseille (<i>Hibiscus sabda riffa</i>)	160	0,23 €	1	36,80 €
Mais (<i>Zea mays</i> variété 'locale')	320	0,59 €	1	188,80 €
			Total	915,20 €

ENTRETIEN					
OPERATIONS	Unité	Qté/1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Fertilisation:					
Vermicompost	tonne	2	15,00 €	2	60,00 €
Terreau semi-bio	L	16	14,80 €	1	236,80 €
Désherbage et traitement :					
Dipel	g	960	13,79 €	1	69,60 €
Paillage de canne	motte	4	50,00 €	1	200,00 €
Tuteurage					210,48 €
				Total	776,88 €

Annexe 6 : Tableau de production AGSPP 2017

AGSPP 1000m² 2017

Produits	1kg	kg/1000m ²	Prix unitaire vente	TOTAL
Tomate	en kilos	330,4	1,76 €	581,50 €
Laitue	2 sachets de salade	670	1,82 €	1 219,40 €
thym	10 bottes de thym	17,92	10,00 €	179,20 €
Basilic	10 bottes de basilic	240	5,00 €	1 200,00 €
			total	3 180,10 €

Service	Prestation
Préparation du sol	175,68 €
Ependage	156,16 €
Irrigation	75,26 €
Total	407,10 €

PLANTATION				
OPERATION	Qté en plant pour 1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervent	TOTAL
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> variété heatma)	1080	0,12 €	1	129,60 €
Laitue (<i>Lactuca sativa</i> variété batavia blonde)	2000	0,08 €	2	320,00 €
Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	320	0,12 €	1	38,40 €
Basilic (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	640	0,09 €	1	57,60 €
Doliprane (<i>Colquhoulia coccinea</i>)	160	- €	1	- €
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	160	0,90 €	1	144,00 €
Groseille (<i>Hibiscus sabda riffa</i>)	160	0,23 €	1	36,80 €
Mais (<i>Zea mays</i> variété 'locale')	320	0,59 €	1	188,80 €
Cosmos (<i>Cosmos sulfureus</i>)	160	0,85 €	1	136,00 €
Œillets d'inde (<i>Tagetesdouble nain varié bonita</i>)	960	0,10 €	2	192,00 €
Gros thym (<i>Plectranthus amboinicus</i>)	160	- €	1	- €
			Total	1 243,20 €

ENTRETIEN					
OPERATIONS	Unité	Qté/1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Fertilisation:					
Vermicompost	tonne	2	15,00 €	2	60,00 €
Terreau semi-bio	L	16	14,80 €	1	236,80 €
Désherbage et traitement :					
Paillage de canne	motte	4	50,00 €	1	200,00 €
Tuteurage					210,48 €
				Total	707,28 €

Annexe 7 : Tableaux de suivi AG et AGSPP 2017

Suivi parcelle AG 2017

	125m2	1000m2
Préparation du sol	2,25h	18h
Pose systèmes irrigation	2,4375h	19,5h
Plantation	15,1875h	121,5h
Entretien (taille, tuteurage, égourmandage, désherbage...)	43,5h	348h
Récolte	8,625h	69h
Total :	72h	576h

Suivi parcelle AGSPP 2017

	125m2	1000m2
Préparation du sol	2,25h	18h
Pose systèmes irrigation et paillage de canne	2,4375h	19,5h
Plantation	15,1875h	121,5h
Entretien (taille, tuteurage, égourmandage, désherbage...)	43,6875h	349,5h
Traitement	1,125h	9h
Récolte	8,625h	69h
Total :	73,3125h	586,5h

Annexe 8 : Tableau de production AG 2018

AG 1000m² 2018

Produits	1kg	kg/1000m ²	Prix unitaire vente	TOTAL
Tomate	en kilos	1329,28	2,10 €	2 791,49 €
Laitue	2 sachets de salade	590,4	2,50 €	1 476,00 €
thym	10 bottes de thym	12	10,00 €	120,00 €
Basilic	10 bottes de basilic	80	5,00 €	400,00 €
Romarin	20 bottes de romarin	41,6	10,00 €	416,00 €
Groseille	en kilos	20,16	5,00 €	100,80 €
total				5 304,29 €

Tarif	Prestation
Epannage manuel	1 185,60 €
Irrigation	75,26 €
Traitement	29,64 €
Total	1 290,50 €

PLANTATION				
OPERATION	Qté en plant pour 1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Tomate (<i>Lycopersion esculentum</i> variété heatmas)	1080	0,12 €	1	129,60 €
Laitue (<i>Lactuca sativa</i> variété batavia blonde)	2000	0,08 €	2	320,00 €
Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	320	0,12 €	1	38,40 €
Basilic (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	640	0,09 €	1	57,60 €
Doliprane (<i>Colquhoulia coccinea</i>)	160	- €	1	- €
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	160	0,90 €	1	144,00 €
Groseille (<i>Hibiscus sabda riffa</i>)	160	0,23 €	1	36,80 €
Mais (<i>Zea mays</i> variété 'locale')	320	0,59 €	1	188,80 €
Total				915,20 €

ENTRETIEN					
OPERATIONS	Unité	Qté/1000m ²	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Fertilisation:					
Vermicompost	tonne	2	15,00 €	2	60,00 €
oligo-éléments	L	6	18,00 €	1	108,00 €
Terreau semi-bio	L	16	14,80 €	1	236,80 €
Désherbage et traitement :					
Dipel	g	960	13,79 €	1	69,60 €
Traitement contre les escargots (graines)	Kg	2	6,00 €	1	12,00 €
Paillage : Copeaux de bois	tonne	112	10,00 €	1	1 120,00 €
Tuteurage					688,00 €
Total					2 294,40 €

Annexe 9 : Tableau de production AGSPP 2018

AGSPP 1000m² 2018

Produits	1kg	kg/1000m2	Prix unitaire vente	
Tomate	en kilos	1555,6	2,10 €	3 266,76 €
Laitue	2 sachets de salade	597,6	2,50 €	1 494,00 €
thym	10 bottes de thym	12	10,00 €	120,00 €
Basilic	10 bottes de basilic	80	5,00 €	400,00 €
Romarin	20 bottes de romarin	41,6	10,00 €	416,00 €
Groseille	en kilos	20,16	5,00 €	100,80 €
			total	5 797,56 €

Tarif	Prestation
Epannage manuel	1 185,60 €
Irrigation	75,26 €
Total	1 260,86 €

PLANTATION				
OPERATION	Qté en plant pour 1000m2	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> variété heatmast)	1080	0,12 €	1	129,60 €
Laitue (<i>Lactuca sativa</i> variété batavia blonde)	2000	0,08 €	2	320,00 €
Thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	320	0,12 €	1	38,40 €
Basilic (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	640	0,09 €	1	57,60 €
Doliprane (<i>Colquhoulia coccinea</i>)	160	- €	1	- €
Romarin (<i>Rosmarinus officinalis</i>)	160	0,90 €	1	144,00 €
Groseille (<i>Hibiscus sabda riffa</i>)	160	0,23 €	1	36,80 €
Mais (<i>Zea mays</i> variété 'locale')	320	0,59 €	1	188,80 €
Cosmos (<i>Cosmos sulfureus</i>)	160	0,85 €	1	136,00 €
Œillets d'inde (<i>Tagetesdouble nain varié bonita</i>)	960	0,10 €	2	192,00 €
Gros thym (<i>Plectranthus amboinicus</i>)	160	- €	1	- €
			Total	1 243,20 €

ENTRETIEN					
OPERATIONS	Unité	Qté/1000m2	Prix Unitaire	Nb d'intervention	TOTAL
Fertilisation:					
Vermicompost	tonne	2	15,00 €	2	60,00 €
oligo-éléments	L	6	18,00 €	1	108,00 €
Terreau semi-bio	L	16	14,80 €	1	236,80 €
Désherbage et traitement :					
Paillage : Copeaux de bois	tonne	112	10,00 €	1	1 120,00 €
Tuteurage					688,00 €
				Total	2 212,80 €

Annexe 10 : Suivi AG et AGSPP 2018

Interventions sur les parcelles	Techniques	Résultats	temps de travail total du cycle rapporté sur	
I) Préparation de la parcelle				
			AG	AGSPP
Gestion des adventices	Fauche mécanique (debrousailleuse)	Réduit les habitats de ravageurs et pathogènes sur la parcelle	8 h	8 h
	Paillage avec copeaux de bois	Limite la compétition des cultures principales avec les adventices, protège le sol et maintient l'humidité et la biodiversité du sol.	80 h	80 h
Irrigation	Mise en place du système d'irrigation goutte à goutte	Limite les dépenses et l'érosion du sol	98 h 40	98 h 40
synthèse			266 h 40	266 h 40
II) Mise en place du système maraîcher				
plantation cultures principales	Densité tomates : 27 plants par microparcelle laitue : 50 plants par microparcelle	Les risques de propagation de pathogène entre les plants ont été diminués. Nous avons pu observer trois cas de flétrissement bactérien qui ne se sont pas propagés.	64 h	64 h
	Variétés tomate Heat master laitue Batavia blonde	Pas de perte de laitue ou de tomate attribuable à la chaleur, bon rendement des laitues et des plants de tomates facilement vendus avec de bon retour sur la qualité des produits en terme de texture et de saveur	33 h 20	33 h 20
Fertilisation: apport de vermicompost	Apport de 100g de vermicompost par plant lors de la plantation des cultures principales	Bonne croissance et bonne production des plants		
Lutte préventive contre maladies et ravageurs	Plantation des cultures de bordure	Permet d'avoir une utilisation réduite de produit phytosanitaire en assurant un bon rendement des cultures principales	160 h	200 h
synthèse			257 h 20	297 h 20

III) Entretien de la parcelle au cours du cycle de culture				
Traitement cultures principales	Egourmandages des feuilles basses de tomate un mois après la plantation et en début de floraison des plants de tomate. Tuteurage des plants de tomate	Pas de signe de propagation de maladie et rendement important	42 h 40	48 h
Gestion des ravageurs et maladies	Apport de grains contre les escargots autour des micro-parcelles	Réduction drastique de la population d'escargot	40 min	40 min
	Passage dipel sur AG	Diminution des attaques de chenilles sur AG	2 h	0 h
Gestion des mauvaises herbes	Désherbage manuel à l'intérieur des microparcelle deux fois au cours du cycle	Bon contrôle des adventices	32 h	41 h 20
Fertilisation	Apport de 100g de vermicompost au pied des tomate avant le début de fructification. Pulvérisation aérienne d'oligo-éléments une fois par semaine pendant trois semaines pour les tomates et les laitues	Les symptômes du cul noir à apparus très peu fréquemment (on compte trois fruits au total) et les laitues présentent des feuilles en bon état avec une croissance satisfaisante.	42 h	42 h
Récolte	Récolte échelonnée des laitues et des fruits de tomate	Récolte des laitues cinq, six et huit semaines après la plantation. Récolte des tomates deux mois après la plantation durant quatre à cinq semaines.	106 h 40	106 h 40
Synthèse			226h	238 h 40
Total			750 h	802 h

Annexe 11 : Identification de la macrofaune (morphoespèce) à dix-huit mois

Ordre / Sous-ordre	Famille/Sous-famille	Espèce	AG	AGSPP	Conventionnel de tomates
Spirobolida	Trigonulidae	<i>Trigoniulus corallinus</i>	1	1	0
Hymenoptera	Formicidae	<i>Technomyrmex difficilis</i>	1	0	1
		<i>Ectatomma ruidum</i>	1	1	0
		<i>Cyphomyrmex minutus</i>	0	1	0
		<i>Solenopsis invicta Buren</i>	1	1	1
		<i>Solenopsis geminata</i>	0	1	0
		<i>Camponotus sexguttatus</i>	1	1	1
		<i>Cardiocondyla ermeryi</i>	1	1	1
Crassiclitellata	Megascolecidae	<i>Polypheretima elongata</i>	1	1	0
	Glossoscolecidae	<i>Pontoscolex corethrurus</i>	0	1	0
Coleoptera	Staphylinidae	<i>Cafius</i> sp.1	0	1	0
	Nitidulidae	<i>Colopterus</i> sp.1	1	1	0
	Trechinae	<i>Tachys</i> sp.1	1	0	0
Isopoda	Platyarthridae	Platyarthridae sp.1	1	1	1
	Philosciidae	Philosciidae sp.1	1	1	1
Dermoptera	Carcinophoridae	<i>Euborellia annulipes</i>	1	1	0
Araneae	Tetragnathidae	Tetragnathidae sp.1	1	1	1
	Theridiidae	Theridiidae sp.1	1	0	0
	Thomisidae	Thomisidae sp.1	1	1	0
	Araneidae	Araneidae sp.1	1	0	0
	Alpaida	Alpaida sp.1	0	1	0
Stylommatophora	Bulimulidae	Bulimulidae sp.1	1	0	0
Turbellaria	-	Terrestrial Turbellaria	1	0	1
Hemiptera	Aphididae	Aphididae sp.1	1	1	1
Hymenoptera	Vespidae	<i>Polistes tricolor</i>	0	1	0
Geophilomorpha	Geophilidae	Geophilidae sp.1	1	1	0
Scolopendromorpha	Cryptopidae	<i>Cryptops</i> sp.1	0	0	1
Polyxenida	Polyxenidae	<i>Polyxenus</i> sp.1	0	0	1
Blattodea	Blaberidae	<i>Pycnoscelus surinamensis</i>	0	0	1

Annexe 12 : Articles



Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology

34(1): 1-12, 2019; Article no.AJAEES.50152
ISSN: 2320-7027

The Impact of Agricultural Practices on Soil Organisms: Lessons Learnt from Market-gardens

**Coraline Moulin^{1,2}, Victor Vaillant¹, Jean-Louis Diman³, Valérie Angeon⁴,
Fred Burner¹ and Gladys Loranger-Merciris²**

¹AgroSystèmes Tropicaux (ASTRO), INRA, 97170, Petit-Bourg (Guadeloupe), France.

²Equipe Biologie de la Mangrove, UMR ISYEB-MNHN-CNRS-Sorbonne Université-EPHE, Université des Antilles, UFR Sciences Exactes et Naturelles, Campus de Fouillole, 97157 Pointe-à-Pitre Cedex (Guadeloupe), France.

³INRA centre des Antilles-Guyane domaine de Godet Plateforme Expérimentale sur le Végétal et les Agrosystèmes Innovants en Milieu Tropical (UE PEYI), INRA, 97170, Petit-Bourg (Guadeloupe), France.

⁴UR Ecodéveloppement, INRA, 84914, Avignon, France.

Authors' contributions

This work was carried out in collaboration among all authors. Author GLM designed the study and wrote the protocol. Author CM performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript. Authors CM, VV, JLD, VA and FB managed the analyses of the study. Author CM managed the literature searches. All authors read and approved the final manuscript.

Article Information

DOI: 10.9734/AJAEES/2019/v34i130188

Editor(s):

(1) Dr. Kwong Fai Andrew Lo, Agronomy and Soil Science, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan.

Reviewers:

(1) R. Shenbagavalli, India.

(2) John Walsh, RMIT University, Vietnam.

(3) B. Sannappa, University of Mysore, India.

Complete Peer review History: <http://www.sdiarticle3.com/review-history/50152>

Original Research Article

Received 05 May 2019

Accepted 15 July 2019

Published 20 July 2019

ABSTRACT

Intensive agriculture practices have an important impact on soil biota, which can affect dramatically soil quality. In order to limit this impact, alternative agricultural practices are more and more applied. However, these practices are still in progress and thus, it is necessary to investigate their impact on soil activity. In this context, we studied the impact of agricultural practices (intensive and agroecological) in vegetable cropping systems in Guadeloupe. The first aim of this study was to

*Corresponding author: E-mail: Gladys.Loranger@univ-antilles.fr;

identify practices developed in vegetable cropping systems and explain their level of eco-agriculture. We conducted a survey on the whole territory which gave us a better understanding of vegetable cropping systems in Guadeloupe. We selected a representative subset of 18 farms located on vertisols. The second aim of the study was to establish a typology of cropping practices in these vegetable cropping systems in vertisol. We performed a PCA and a HCA on the 18 farms. These methods allowed us to build a typology in which farms were distributed between two types. In type A, farmers are using intensive agricultural practices while in type B, farmers are using alternative agroecological farming practices. Then, we collected soil fauna, during the rainy season in type A and type B farms in order to demonstrate the relationship between cropping systems and the quality of soils proxied by biological indicators. We hypothesized that the use of synthetic fertilizers and herbicides in intensive agriculture affected soil fauna activity. The results showed no significant difference between soil fauna abundance in both types. However, the taxonomic richness and the abundance of litter transformers were higher in type B. Taxonomic richness and soil fauna functional diversity thus strongly depend on agricultural practices in vegetables cropping systems in Guadeloupe.

Keywords: Vegetable cropping systems; agroecology; survey; soil fauna; functional diversity.

1. INTRODUCTION

Intensive agriculture relied heavily on the use of synthetic inputs and low genetic diversity [1,2,3]. It is well known that conventional intensive agriculture had negative impacts on natural resources such as soil (soil pollution, erosion), water quality (pollution of rivers, lakes and streams), biodiversity loss and human health (inadequate use of pesticides) [4,5,6,7,8,9]. Therefore, such unsustainable models need to be modified to agroecosystems that can optimize ecological functions while maintaining high productivity [9]. Since the 1990s, there has been a growing interest in developing alternative sustainable farming strategies. All of these strategies share the same objective in terms of minimizing the use of synthetic inputs (or even promoting non-use at all), enhancing organic matter recycling and improving the health of agroecosystems while maintaining a high production level [10,11,12]. These strategies belong to the field of agroecology as they promote the development of practices based on the mobilization of natural regulations. According to Pretty [13], sustainable agriculture jointly produces food and goods for farmers and the environment.

In 2017, worldwide agricultural production of vegetables reached 182 million metric of tomatoes, 97 million metric of onions, 83 million metric of cucumbers and gherkins, 71 million metric of cabbages and other brassicas and 52 million metric of eggplants [14]. China, India and the United States of America were the main producers in 2017 [14]. Market-gardening has a major place in agriculture production and in

human health as it provides elements such as vitamin A and C, minerals, folic acid and fibres [15,16].

In Guadeloupe, agriculture is one of the most important economic sectors. It is a major source of exported goods, mostly based on the agroindustrial models developed with banana and sugarcane. The agricultural land area has been declining mainly due to urbanization (e.g. from 57 385 ha in 1981 to 30 965 ha in 2013 [17]). However, it still covers one-third of the archipelago. In 2016, the island's main crops were sugarcane (590 299 tones) and banana (66 208 tones). The other crops were vegetables (28 841 tones) and tubers (4 370 tones) [18]. Sugarcane and banana were the most studied cropping systems in Guadeloupe [19,20] as they represent dominant agricultural systems, because of the engagement of farmers in market channels and professional and public organizations. Sugarcane and banana also benefit from major public subsidies, which helped farmers invest and maximize their production. In contrast, we have little knowledge of vegetable cropping practices though they are models of alternative diversified systems, assumed to be less dependent on chemical inputs. Therefore, the study focused on identifying agricultural practices in vegetable farming systems in Guadeloupe. As we know agricultural practices impacted soil fauna activity; however, we wanted to know what kind of alternative practices are used in vegetable cropping systems and to what extent such practices affect soil biota. Considering the lack of scientific knowledge regarding the influence of vegetable cropping systems on soil organisms, this article intends to

fill this gap by providing consistent information on the functioning of such agroecosystems. Thus, this paper aims at (i) identifying the practices developed in vegetable cropping systems and explaining their degree of eco-agriculture. (ii) On this basis, a typology of cropping practices in these agrosystems in Guadeloupe was established. (iii) Using this typology, we demonstrate the relationship between cropping systems and the quality of soils proxied by biological indicators. We hypothesized that there was a positive correlation between the quality of practices developed in vegetable cropping systems and soil organism abundance and diversity. Soil is then considered as an indicator of the quality of the practices. Based on the identification of cropping systems in Guadeloupe, we selected farmers from vertisols to demonstrate the relationship between cropping systems and the quality of soils proxied by biological indicators (abundance and diversity of soil fauna).

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Research Area

The study was carried out in Guadeloupe (French West Indies), which is a part of the Windward Islands, in the eastern Caribbean Sea. This archipelago includes two main islands with distinct environments. Basse-Terre (848 km²) is dominated by a mountain chain oriented North-West to South-East. The annual temperature ranges from 20.1 and 31.9°C (France Meteorological Service, <http://www.meteo.gp>). This island is characterized by a humid tropical climate and a variety of soil types: ferralsols, nitisols, andosols and vertisols [20]. The mean annual rainfall in Basse-Terre is comprised between 1400 mm and 3500 mm (France Meteorological Service, <http://www.meteo.gp>). On the contrary, Grande-Terre (586 km²) is characterized by a slightly undulating surface, and the relief rarely exceeds 40 m [20]. The climate is tropical, with a mean annual rainfall between 1300 mm and 1600 mm, and soils are mostly vertisols.

2.2 Farm Surveys and Typology

To collect data on the practices set up in vegetables cropping systems, a survey was carried out between September and November 2016. 49 farms were randomly sampled: 21 in Grande-Terre and 28 in Basse-Terre. We only targeted farms, which have all or a part of their

productions devoted to vegetable cropping systems. We visited and interviewed those farmers to describe their practices. In the survey, we used variables that best described and discriminated farms. Some variables are intangible (i.e. soil type) while others depend on farmers' strategies: crops rotation, soil tillage, irrigation, use of pesticides, weed control, use of synthetic fertilizer or organic amendment, mulch and management of crop residues. Based on cropping systems of the initial set of 49 farms on the whole territory, we selected a representative subset of 18 farms developed on vertisols in Grande-Terre. This selection was due to the fact that in Guadeloupe, vegetable cropping systems are mostly concentrated on vertisol [21]. Indeed, these soils are rich in calcium, magnesium, potassium and they maintain a pH neutral to slightly basic [22]. In addition, the large diversity of soils in Basse-Terre makes it difficult to build a typology.

On the 18 farms, we performed a PCA and a HCA. These methods allowed us to build a typology, by gathering farms based on their characteristics and practices. This analysis was realized by using the following variables: (i) soil tillage separated farms into 3 classes: deep, superficial and manual tillage; (ii) the type of pesticides used divided farms in 3 classes: chemical pesticides, pesticides used in biological agriculture or no pesticides; (iii) use of synthetic herbicides distributed farms in 3 classes: intensive, intermediate and occasional; (iv) weed control separated farms in two classes: mechanical or manual; (v) amendment divided farms in 4 classes: application of synthetic fertilizer, application of organic matter, application of both, and no fertilization; (vi) use of mulch separated farms in 2 classes: presence or absence; (vii) management of crop residues divided farms in three classes: removed from the field, incorporated into the soil, and left in the plot; (viii) application of slash-and-burn practices distributed farms in two classes: with or without slash-and-burn practices; (ix) finally, the observation of soil biodiversity on the surface separated farms in four classes: high, medium, low and no activity.

2.3 Soil Fauna

From December 2016 to January 2017, in each selected farms on Vertisol, five soil samples of 25 cm (length) × 25 cm (width) × 20 cm (deep) were taken for soil macrofauna extraction using TSBF method [23]. Each sample was separated

at least 200 m from the others and was collected 1 km far away from any road and walking path. Animals were collected in alcohol, counted and identified at the taxonomic level under a dissecting microscope. The following taxonomic groups of soil fauna were identified: Oligochaeta, Formicidae, Isoptera, Isopoda, Diplopoda, Dictyoptera, Coleoptera, Diptera, Lepidoptera, Gasteropoda, Homoptera, Orthoptera, Heteroptera, Arenidae, Chilopoda, Dermaptera, Turbellaria, Insect larvae, and Other Insects. They were gathered in different functional groups: litter transformers, predators and ecosystem engineers, and we calculated taxonomic richness. This functional approach can provide information on soil framework and vegetation quality [24,25].

2.4 Data Analysis Methods

To establish a typology of farming practices in vegetable cropping systems, a principal component analysis (PCA) was performed. PCA is a multivariate data analysis based on projection methods. It is a useful technique for reducing the dimensionality of such datasets, increasing interpretability but at the same time minimizing information loss [26]. Based on the PCA, a hierarchical cluster analysis (HCA) was performed. HCA builds a tree diagram, which groups similar observations into a dataset. These analyses were performed through R statistical software (<http://www.r-project.org/>) using the R Commander package (Rcmdr). With regards to the relation between the two types of farming practices and soil fauna, we used Welch's t-test. That test was carried out using R software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Description of 49 Farms Based on Surveys

The first aim of this study was to identify practices developed in vegetable cropping systems and explain their level of eco-agriculture. We conducted a survey that showed the diversity of agricultural practices in vegetable cropping systems in Guadeloupe. In Basse-Terre and in Grande-Terre, we saw similar crops such as lettuce, zucchini, tomatoes, melon, chilli pepper, and eggplant. In addition, in Basse-Terre, we also observed cucumber, pumpkin, cabbage, okra and chives. We also observed various types of cropping systems, from monoculture to polyculture, and a wide range of practices, from conventional to agroecological.

Farming practices are mainly territorially anchored. Tillage is used to enhance soil conditions in relation to the water balance and crop growth, to loose upper soil layers to prevent soil compaction, to diminish weed growth and to prepare the seedbed [27,28,29,30]. Our results showed that in Grande-Terre, most farmers used deep tillage (76%) compared to superficial tillage (24%). In this region, vertisols – rich clay soils which are extremely hard when they dry, including cracks and polygonal structures [31] – are predominant. Deep tillage is therefore used to prepare the field for the next culture, by moving and mixing the topsoil with crop residues, which are incorporated into the soil [28]. On the contrary, farmers from Basse-Terre used superficial tillage (71%) rather than deep tillage (29%), due to the type of soils found in that region. Ferralsols have loose and friable fragments [22]. Nitisols are very similar to ferralsols but at an earlier stage. Finally, andosols are slightly sticky and friable to very friable [32]. Tillage reduced soil organic matter availability by accelerating decomposition and by increasing soil erosion and soil degradation [33]. Moreover, it has a detrimental effect on environmental quality because of its impact on greenhouse gas emissions [34,35]. Soil disturbance such as tillage has a strong influence on soil fertility and water availability [36]. In contrast, by minimizing mechanical disturbance of soil and macro-aggregate destruction, reduced tillage strongly decreases soil erosion [37,38] and improves water use efficiency [39]. Reduced tillage thus has positive effects on nutrient cycling and soil biodiversity [40,41].

Throughout the survey, we observed that the use of synthetic pesticides was widely spread among the different farms. In Guadeloupe, crop yield was affected by pest damage and diseases, mainly during the rainy season. Farmers usually prevent economic loss due to pest by spreading heavy pesticides treatments [42]. Additionally, the application rate of herbicides depended on the area. Farmers from Grande-Terre combined herbicides and deep tillage. The mixture of those two methods regulated the abundance of weed species in the field [43]. In fact, Chauhan and Johnson [44] showed that when seeds were deeply buried, the emergence rate was very low.

33% of farmers in Grande-Terre and 11% of farmers in Basse-Terre applied mineral fertilizers. Agricultural production has increased, since the 1950s, due to the large input of mineral fertilizers

[45]. However, the intensive use of mineral fertilizers has a negative impact on soil fertility (soil acidification) and yield production [46]. 25% of farmers applied organic matter in Basse-Terre and 24% in Grande-Terre. Organic fertilizers are used as an alternative to synthetic ones, in order to restore or enhance soil physical, chemical and biological properties [47]. Organic matter is not only a source of plant nutrients in soils but also plays an important part in preserving soil fertility, reducing soil erosion, nutrient cycling, water retention and disease suppression [48,49]. During the study, we noticed that in most cases, farmers mixed organic matter and mineral fertilizer together, 54% in Basse-Terre compared to 33% in Grande-Terre. A meta-analysis, across sub-Saharan Africa, demonstrated that the use of both input types leads to greater crops production [50]. Other studies have reported that organic input prevents the rapid leaching of nitrogen fertilizer by immobilizing the nitrogen temporarily [51,52,53].

As for the management of crops residues, most farmers left crops residues in the plot (68% and 52% for Basse-Terre and Grande-Terre respectively). Some farmers removed crop residues from the field – 29% in Grande-Terre and 18% in Basse-Terre – or incorporated them into the soil (19% and 14% for Grande-Terre and Basse-Terre respectively). Crop residues can serve as a nutrient source for soil organisms [54]. Moreover, crop residues can improve soil structure, increase organic matter in soil and reduce evaporation [55]. At the same time, we examined soil biodiversity activity on the soil surface (observation of ant nests and earthworm casts), and most farms had an activity between high and medium. The presence of ant nests and earthworm casts may be an indicator of soil health. Our primary results gave us a better understanding of vegetable cropping systems in Guadeloupe and the impact of each practice on soil health.

3.2 Typology of Farms Located on Vertisols

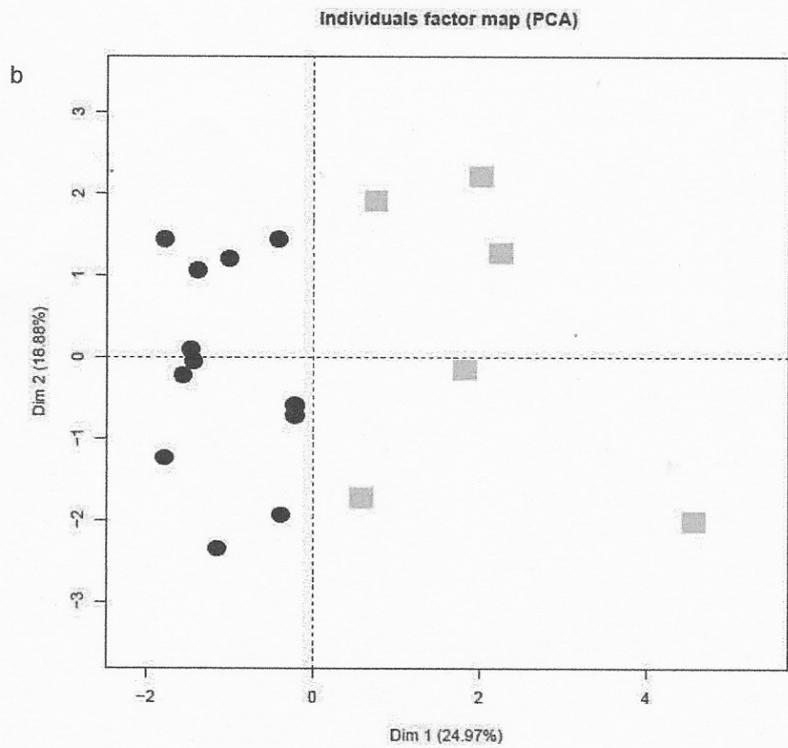
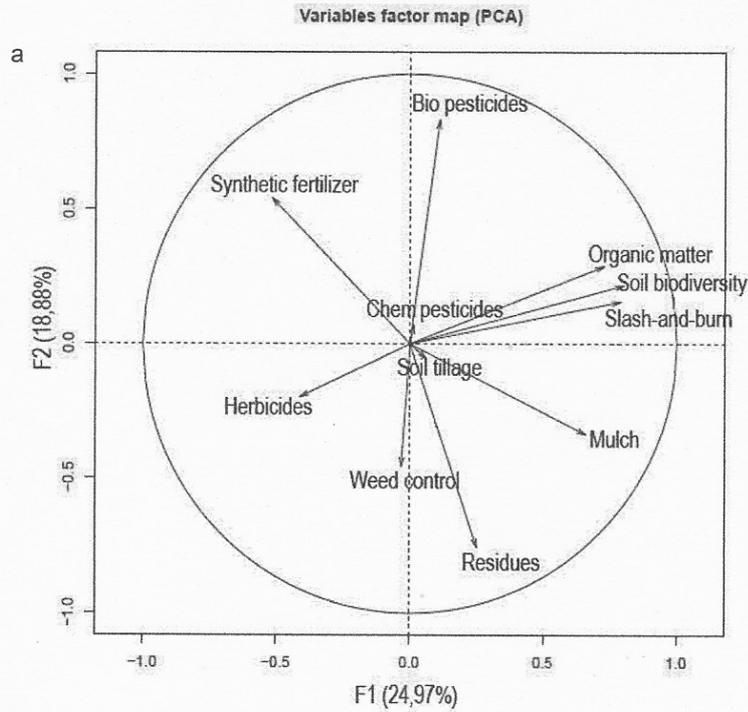
Based on the identification of cropping systems in Guadeloupe, we selected farmers from vertisols to demonstrate the relationship between cropping systems and the quality of soils proxied by biological indicators (abundance and diversity of soil fauna). We realized a typology on 18 farms located on vertisol in Grande-Terre based on PCA and AHC. The first two components of PCA explained nearly 43.85% of the total

variation (Fig. 1 a). Axis F1 has a positive correlation with organic matter, soil biodiversity and slash-and-burn. At the opposite, axis F1 has a negative correlation with herbicides and synthetic fertilizer. Axis F2 opposed plots with biological pesticides to plots using weed control.

Our results showed that farmers from type A are using conventional intensive agricultural practices. These farms are the most numerous in Grande-Terre (Fig. 1c) and are characterized by an intensive to the medium application of synthetic fertilizers and herbicides. In this type, farmers do not use mulch and slash-and-burn methods. The observation on the soil activity showed low biodiversity (Fig. 1a, 1b, 1c). At the opposite, farmers from type B are using alternative agroecological farming practices. In particular, these farms are characterized by the application of organic matter, the use of biological pesticides or no pesticides, slash and burn and mulch. The residues are usually left on the field. Observation of soil activity showed rich biodiversity (Fig. 1a, 1b, 1c).

In our study, farmers from type A applied mineral fertilizer, which globally, improve crop yields and food security [56,57]. Nevertheless, the overdose of mineral fertilizer contributed to soil deterioration, water pollution, and soil biodiversity through soil acidification [58,59,60]. Farmers from type A also applied a high amount of herbicides which also had a negative effect on fauna, by reducing soil fauna abundance or fitness, due to the destruction of habitat and food resources [61]. On the contrary, in type B, the application of organic matter had a beneficial effect on diverse biological processes by being a food resource for various ecological groups in the community [62,63]. In addition, farmers of type B applied slash-and-burn, an alternative agroecological method. By using this method, farmers can actually maintain carbon stock and increase biodiversity [64,65,66,67]. Mulching also had a major impact on soil fauna abundance and diversity. Mulching is a form of cover crops that remains on the surface of the soil. It can be inorganic or organic material (plastic, straw, cover crop residues or live plant) and it is used to prevent soil erosion, increase water retention, pest control and weed control [10,68,69,70]. However, few of the surveyed farmers are using this method. Farmers using the cover crop method had positive feedback based on their crop production. Though, farmers, who used plastic had trouble recycling the plastic and plan on shifting to an ecological method.

Our results showed the impact of farming practices on soil biodiversity. In order to confirm this observation with quantitative data, we performed a soil macrofauna extraction on farms.



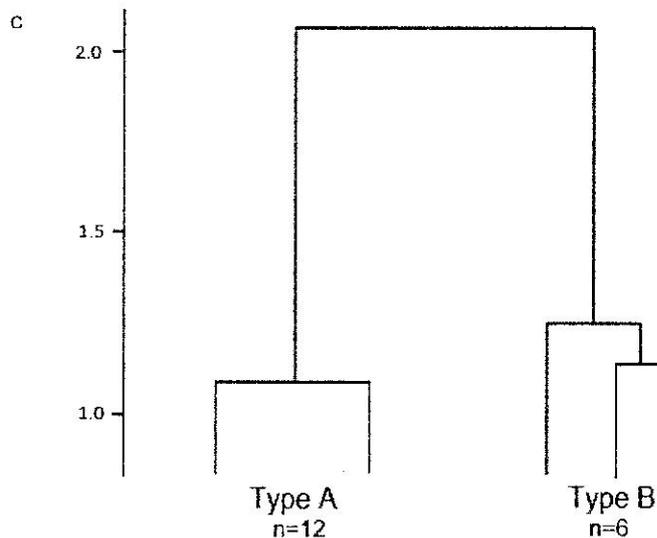


Fig. 1 (a) Projection of the variables used to elaborate the farm typology with Principal Component Analysis (PCA), (b) Representation of farms classified by type based on PCA components (● Type A and □ Type B), and (c) Dendrogram chart obtained for the Agglomerative Hierarchical Clustering analysis (AHC) performed on components of the PCA; n represents the number of farms for each type. These analyses were carried out using R software

3.3 Soil Macrofauna on Farms Located on Vertisols

Soil macrofauna was collected on selected farms. We found 171 ± 52 (mean \pm SE) individuals. m^{-2} in type A, and 554 ± 239 individuals. m^{-2} in type B. The abundance of soil fauna was slightly higher in type B (Fig. 2b). However, there was no significant difference in soil fauna abundance between both types (t-test Welch; $P = .13$). In general, ecosystem engineers were more abundant than litter transformers and predators (Fig. 2a). In type B, the number of ecosystem engineers (432 ± 229 individuals. m^{-2}) and predators (48.8 ± 16.88 individuals. m^{-2}) was slightly higher than in type A (ecosystem engineers: 116 ± 41 individuals. m^{-2} , biological regulators: 24 ± 6 individuals. m^{-2}). However, there was no significant difference between the number of ecosystem engineers and predators between type A and type B (t-test Welch; $P = .21$ and $P = 0.15$). On the other hand, the number of litter transformers was significantly different between the two types (t-test Welch; $P = .02$) (Fig. 2a). The number of litter transformers was higher in type B (72 ± 18 individuals. m^{-2}) than in type A (30 ± 10 individuals. m^{-2}). Also, in

Fig. 2c, the taxonomic richness was significantly higher in type B (11 ± 0.4 taxonomic richness) compared to type A (6.5 ± 0.61 taxonomic richness) (t-test Welch; $P < .001$).

Soil macrofauna may be used as bioindicators of soil health and contribute to ecosystems services [25]. Soil macrofauna plays an important role in soil organic matter decomposition (litter transformers), regulation of pests (predators), the formation of stable aggregates, water regulation and erosion control (ecosystems engineers) [71]. Our results showed that soil macrofauna may be directly or indirectly impacted by agricultural practices. In type A, we observed a number of intensive agricultural practices (deep tillage, application of high amounts of chemical pesticides, synthetic fertilizer, and herbicides), which are well known to have a negative impact on soil biodiversity [59]. Our study showed that litter transformers are strongly impacted by these intensive practices. They had an essential role in soil carbon sequestration [72]. As a consequence, by decreasing the number of litter transformers, intensive agriculture may have profound effects on climate change. On the contrary, by decreasing the input of synthetic

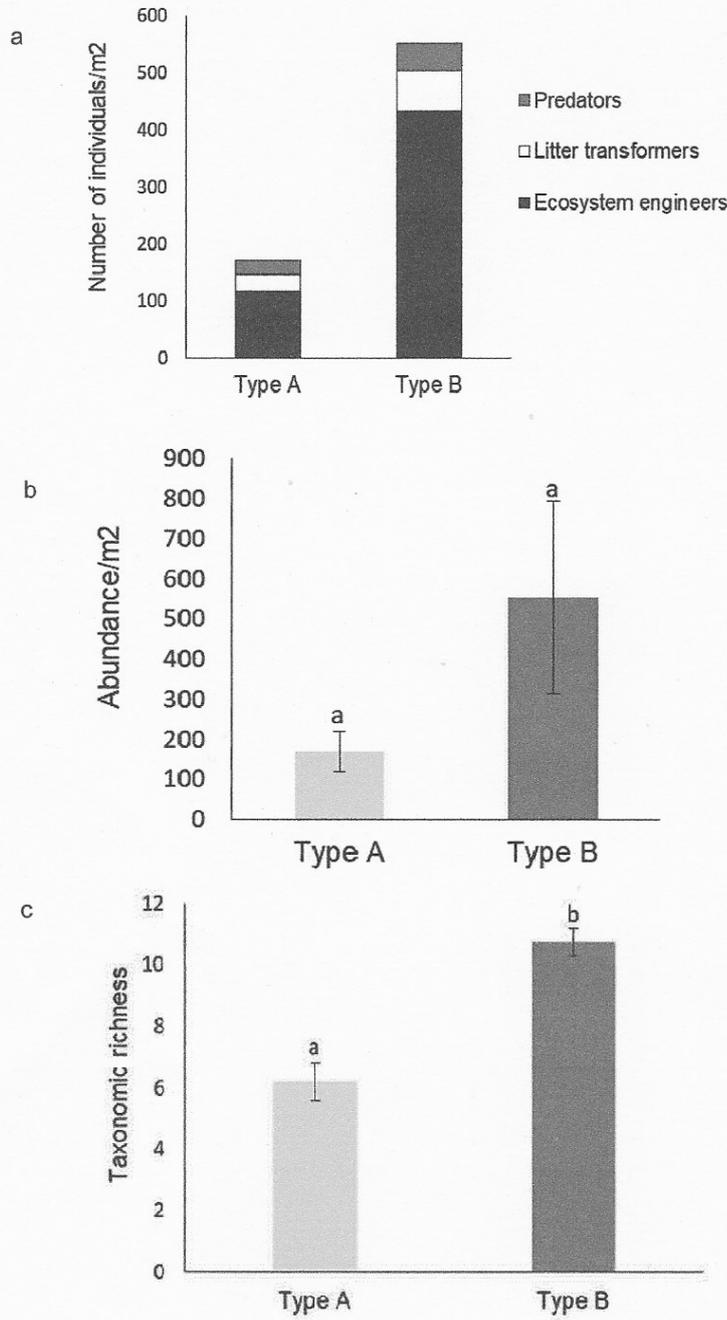


Fig. 2 (a) Soil fauna functional diversity in 9 farms (type A and type B) in Guadeloupe (Grande-Terre). (b) Soil fauna abundance in type A and B in Guadeloupe. (c) Taxonomic richness abundance in type A and type B in Guadeloupe. Values with similar letters are not significantly different (Welch t-test). These analyses were carried out using R software

fertilizers and herbicides, by reducing the rate of tillage and by increasing the application of organic matter, farmers in type B are stabilizing

their soil. Moreover, type B applied mulching, which can have a positive effect on soil habitat. Mulching helps to preserve the ecosystem by

reducing the rate of tillage. Sustainable agriculture also had a beneficial impact on soil physical and chemical properties, such as, aggregation and nitrogen content [73,74], which indirectly impacted soil fauna abundance and diversity. In order to overcome the impacts of intensive agriculture, sustainable agricultural methods have been developed to minimize environmental footprints and preserve natural environments and resources [75,30]. Our study showed that in Guadeloupe, farmers are looking for alternative agriculture practices in vegetable cropping systems. At the beginning of the study, we hypothesized that there was a positive correlation between the quality of practices developed in vegetable cropping systems and soil organisms. Those primary results tend to confirm this hypothesis, and in order to better understand the impact of those new agroecological practices, further physical, chemical and soil fauna analyses should be carried out.

4. CONCLUSION

Agricultural systems are continually re-designed based on a variety of parameters: climate changes, consumers demand, land reform as well as technological and scientific advances [76]. In our study, we wanted to know what kind of alternative agroecological practices are used in vegetable cropping systems in Guadeloupe, and whether such methods had positive impacts on soil biota. Thus, the survey gave us a better understanding of vegetable cropping systems and the level of eco-agriculture that actually occurs in Guadeloupe. For greater representativity, another survey should be conducted on a longer period of time. Secondly, we observed the effect of practices on soil biota in vertisol. As expected, intensive practices have a negative impact on soil biodiversity. On the other hand, alternative agroecological practices are in constant development, as a goal of improving agroecosystem health. Our study showed that in Guadeloupe, sustainable agriculture is present in vegetable cropping systems and is still in progress. Hence, further analyses should be conducted (physical, chemical and soil fauna) to assess the impact of alternative practices on soils in short and long time periods.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported financially by the Fondation de France (Ecosystems, Agriculture,

and Alimentation program) and the PO-FEDER (AgroEcoDiv project). The authors thank all the farmers who were interviewed. We also thank Professor Jean Vaillant (University of Antilles) for his advices on statistical analyses.

COMPETING INTERESTS

Authors have declared that no competing interests exist.

REFERENCES

1. Trewanas Antony. Malthus foiled again and again. *Nature*. 2002;418:668-670.
2. Gliessman Stephen R. *Agroecology. The ecology of sustainable food systems*. Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, Florida; 2007.
3. Nair PKR. Grand challenges in agroecology and land use systems. *Front Environ Sci*. 2014;2:1-3.
4. Pimentel D. Environmental and economic costs of the application of pesticides, primarily in the United States. *Environ Dev Sustain*. 2005;7:229-252.
5. Halweil B, Mastny L, Assadourian E, Flavin C, French H, Gardner G, Nierenberg D, Postel S, Renner M, Sarin R, Sawin J, Vickers A. *State of the World*. W.W. Norton & Company; 2004.
6. Castillo LE, Martinez E, Ruepert C, Savage C, Gilek M, Pinnock M, Solis E. Water quality and macro invertebrate community response following pesticide applications in a banana plantation, Limon, Costa Rica. *Sci. Total Environ*. 2006;367: 418-432.
7. Kendall P, Petracco M. The current state and future of Caribbean agriculture. *J. Sustain. Agric*. 2009;33:780-797.
8. Chappell M, LaValle LA. Food security and biodiversity: Can we have both? An agroecological analysis. *Agric Human Values*. 2011;28:3-26.
9. Bommarco R, Kleijn D, Potts SG. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol Evol*. 2013;28:230-238.
10. Altieri MA. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric Ecosyst Environ*. 1999;74:19-31.
11. Andres C, Bhullar G. Sustainable intensification of tropical agro-ecosystems: Need and potentials. *Front Environ Sci*. 2016;4:1-10.

12. Meynard JM. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation. *Tropical Issue*. 2017;24.
13. Pretty JN. Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2008;363:447-465.
14. The Statistics Portal; 2019. (Accessed 10 March 2019) Available:<https://www.statista.com/statistics/264065/global-production-of-vegetables-by-type/>
15. Lester GE. Environmental regulation of human health nutrients (ascorbic acid, carotene, and folic acid) in fruits and vegetables. *HortSciences*. 2006;41:59-64.
16. Slavin JL, Llyord B. Health benefits of fruits and vegetables. *Advances in Nutrition*. 2012;3(4):506-516.
17. AGRESTE. Enquête sur les pratiques phytosanitaires sur les légumes en 2013; 2013. (Accessed 23 March 2019) Available:http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/breve_1_-_pklegumes_2013_cle81ed6e-1.pdf
18. AGRESTE. Mémento de la statistique agricole; 2017. (Accessed 25 March 2019) Available:<http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/Memento-Agricole-Guadeloupe-2017>
19. Clermont-Dauphin C, Cabidoche YM, Meynard JM. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies. *Soil Use Manage*. 2004;20:105-113.
20. Sierra J, Causeret F, Diman JL, Publicol M, Desfontaines L, Cavalier A, Chopin P. Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agric. Ecosyst. Environ*. 2015;213:252-264.
21. Bulletin de santé du végétale (BSV). Retrouver les bilans par filière de l'année; 2016. (Accessed 12 March 2019) Available:http://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/BSV971_ToutesFilières_Bilan2016_cle492392.pdf
22. Sierra J, Desfontaines L. Rapport: Les sols de la Guadeloupe. Genèse, distribution et propriétés; 2018. (Accessed 26 February 2019) Available:<https://www6.antilles.inra.fr/astro/Ce-que-nous-savons-sur/No-6-Les-sols-de-la-Guadeloupe>
23. Anderson JM, Ingram JSI. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. CAB International, Wallingford; 1993.
24. Brussaard L. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. *Appl Soil Ecol*. 1998;9:123-135.
25. Turbé A, Toni DA, Benito P, Lavelle P, Lavelle P, Ruiz N, Wim HVdP, Labouze E, Mudgal S. *Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers*. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment); 2010.
26. Jolliffe IT, Cadima J. Principal component analysis: A review and recent developments. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2016;374(2065).
27. Wall HD, Bardgett RD, Behan-Pelletier V, Herrick JE, Jones H, Ritz K, Six J, Strong DR, Van der Putten WH. *Soil ecology and ecosystem services*. Oxford University Press, New York; 2012.
28. Welbaum GE. *Vegetable production and practices*. Virginia Tech University, USA; 2015.
29. Gómez JA, Orgaz F, Gómez-Macpherson H, Villalobos FJ, Fereres E. Tillage. In: Villalobos FJ, Fereres E, Editors. *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*, Cham: Springer International Publishing; 2016.
30. Stavi I, Bel G, Zaady E. Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. *Agron Sustain Dev*. 2016;36:32.
31. Baize D, Girard MC. *Référentiel pédologique*. Quæ Editions; 2008.
32. Baize D, Girard MC. A sound reference base for soils: The "Référentiel Pédologique". Quæ Editions; 1998.
33. Gliessman Stephen R. *Agroecology. The ecology of sustainable food systems*. Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, Florida; 2015.
34. Schneider UA, Smith P. Energy intensities and greenhouse gas emission mitigation in global agriculture. *Energy Effic*. 2009;2:195-206.
35. Ji Q, Wang Y, Chen XN, Wang XD. Tillage effects on soil aggregation, organic carbon fractions and grain yield in Eum-Orthic Anthrosol of a winter wheat-maize double-

- cropping system, Northwest China. *Soil Use Manag.* 2015;31:504-514.
36. Adimassu Z, Alemu G, Tamene L. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the humid highlands of Ethiopia. *Agric Syst.* 2019;168:11-18.
 37. Six J, Bossuyt H, Degryze S, Deneff K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 2004;79:7-31.
 38. Liu E, Teclamarium SG, Yan C, Yu J, Gu R., Liu S, He W, Liu Q. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the Northern China. *Geoderma.* 2014;213:379-384.
 39. Li L, Huang G, Zhang R, Bill B, Guangdi L, Kwong YC. Benefits of conservation agriculture on soil and water conservation and its progress in China. *Agric. Sci. China.* 2011;10:850-859.
 40. Lal R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability.* 2015;7:5875-5895.
 41. Pareja-Sánchez E, Plaza-Bonilla D, Ramos MC, Lampurlanés J, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agroecosystem transformed into irrigation. *Soil Till Res.* 2017;174:221-230.
 42. National Research Council. Sustainable agriculture and the environment in the humid tropics. National Academy Press. Washington; 1993.
 43. Mishra JS, Singh VP. Tillage and weed control effects on productivity of a dry seeded rice-wheat system on a vertisol in Central India. *Soil Till Res.* 2012;123:11-20.
 44. Chauhan BS, Johnson DE. Germination ecology of Southern Crabgrass (*Digitaria ciliaris*) and India Crabgrass (*Digitaria longiflora*): Two important weeds of rice in tropics. *Weed Sci.* 2008;56:722-728.
 45. Cai A, Xu M, Wang B, Zhang W, Liang G, Hou E, Luo Y. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility. *Soil Till Res.* 2019;189:168-175.
 46. Zhu Q, Liu X, Hao T, Zeng M, Shen J, Zhang F, De Vries W. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems. *Sci Total Environ.* 2018;613-614: 1339-1348.
 47. Celestina C, Hunt JR, Sale PWG, Franks AE. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil Till Res.* 2019;186:135-145.
 48. Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review. *Soil Till Res.* 2003;70:1-18.
 49. Murphy BW. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Res.* 2015;53:605-635.
 50. Chivenge P, Vanlauwe B, Six J. Does the combined application of organic and mineral nutrient sources influence maize productivity? A meta-analysis. *Plant Soil.* 2010;342:1-30.
 51. Vanlauwe B, Diels J, Aihou K, Iwuafor ENO, Lyasse O, Sanginga N, Merckx R. Direct interactions between N fertilizer and organic matter: Evidence from trials with 15N-labelled fertilizer. In: Vanlauwe B, Diels J, Sanginga N, Merckx R, Editors. *Integrated Plant Nutrient Management in Sub-Saharan Africa: From Concept to Practice.* CAB International; 2002.
 52. Bekunda MA, Nteranya S, Woomer PL. Restoring soil fertility in Sub-Sahara Africa. *Adv Agron.* 2010;108:183-236.
 53. Pincus L, Margenot A, Six J, Scowd K. On-farm trial assessing combined organic and mineral fertilizer amendments on vegetable yields in central Uganda. *Agric Ecosyst Environ.* 2016;225:62-71.
 54. Feng Y, Balkcom KS. Nutrient cycling and soil biology in row crop systems under intensive tillage. In: Al-Kaisi MM, Lowery B, Editors. *Soil Health and Intensification of Agroecosystems.* Academic Press Elsevier Inc.; 2017.
 55. Liang S, Li X, Wang J. Advanced remote sensing. Elsevier Inc ; 2012.
 56. Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature.* 2002;418:671-677.
 57. Boli N, Mingzhu L, Shaoyu L, Lihua X, Yanfang W. Environmentally friendly slow-release nitrogen fertilizer. *J Agric Food Chem.* 2011;59:10169-10175.
 58. Tilman D, Fargione J, Wolff B, D'Antonio C, Dobson A, Howarth R, Schindler D, Schlesinger WH, Simberloff D, Swackhamer D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science.* 2001;292:281-284.

59. Clermont-Dauphin C, Blanchart E, Loranger-Merciris G, Meynard JM. Cropping systems for soil biodiversity and ecosystem services: Prospects and research needs. *Sustainable Agriculture Reviews*. 2014;14:117-158.
60. Smith LED, Siciliano G. A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. *Agriculture, Ecosyst. Environ*. 2015;209:15-25.
61. Prosser RS, Anderson JC, Hanson ML, Solomon KR, Sibley PK. Indirect effects of herbicides on biota in terrestrial edge-of-field habitats: A critical review of the literature. *Agric Ecosyst Environ*. 2016;232:59-72.
62. Roger-Estrade J, Anger C, Bertrand M, Richard G. Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil Till Res*. 2010;111:33-40.
63. Ayuke FO, Brussaard L, Vanlauwe B, Six J, Lelei DK, Kibunja CN, Pulleman MM. Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Appl Soil Ecol*. 2011;48:53-62.
64. Bruun TB, Neergaard A, Lawrence D, Ziegler AD. Environmental consequences of the demise in Swidden cultivation in Southeast Asia: Carbon storage and soil quality. *Hum Ecol*. 2009;37:375-388.
65. Padoch C, Pinedo-Vasquez M. Saving slash-and-burn to save biodiversity. *Biotropica*. 2010;42:550-552.
66. Ziegler AD, Fox JM, Webb EL, Padoch C, Leisz SJ, Cramb R, Mertz O, Bruun TB, Vien TD. Recognizing contemporary roles of Swidden agriculture in transforming landscapes of Southeast Asia. *Conserv. Biol*. 2011;25:846-848.
67. Lopes Thomaz E. Dynamics of aggregate stability in slash-and-burn system relaxation time, decay, and resilience. *Soil Till Res*. 2018;178:50-54.
68. Saxton K, Chandler D, Stetler L, Lamb B, Clairborn C, Lee BH. Wind erosion and fugitive dust fluxes on agricultural lands in the Pacific Northwest. *Trans. ASAE*. 2000;43:623-630.
69. Gonzalez-Martin C, Teigell-Perez N, Valladares B, Griffin DW. The global dispersion of pathogenic microorganisms by dust storms and its relevance to agriculture. *Adv. Agron*. 2014;127:1-41.
70. Quintanilla-Tornel MA, Wang KH, Tavares J, Hooks CRR. Effects of mulching on above and below ground pests and beneficials in a green onion agro-ecosystem. *Agric Ecosyst Environ*. 2016;224:75-85.
71. Lavelle P, Decaëns T, Aubert M, Barot S, Blouin M, Bureau F, Margerie P, Mora P, Rossi JP. Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur. J. Soil Biol*. 2006;42:3-15.
72. Angst Š, Mueller CW, Cajthaml T, Angst G, Lhotáková Z, Bartuška M, Špaldonová A, Frouz J. Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. *Geoderma*. 2017;289:29-35.
73. Caviglia OP, Andrade FH. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol*. 2010;3:1-8.
74. Lal R, Reicosky DC, Hanson JD. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res*. 2007;93:1-12.
75. Liu GB. Soil conservation and sustainable agriculture on the Loess Plateau: Challenges and prospects. *Ambio*. 1999;28:663-668.
76. Altieri MA, Funes-Monzote FR, Peterson P. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: Contributions to food sovereignty. *Agron Sustain Dev*. 2012;32:1-13.

© 2019 Moulin et al.; This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Peer-review history:

The peer review history for this paper can be accessed here:
<http://www.sdiarticle3.com/review-history/50152>

Article soumis à Pedobiologia (PEDOBI-D-20-00195)

Coraline Moulin^{a,b}, Victor Vaillant^a, Jean-Louis Diman^c, Valérie Angeon^d, Gladys Loranger-Merciris^{b*}

Short-term effects of agroecological practices on soil biodiversity and agroecosystem services in experimental open-field market-gardens.

^a ASTRO AgroSystèmes TROPicaux, INRAE, 97170, Petit-Bourg (Guadeloupe), France

^b UMR ISYEB-MNHN-CNRS-Sorbonne Université-EPHE, Université des Antilles, Equipe Biologie de la Mangrove, UFR Sciences Exactes et Naturelles, Campus de Fouillole, 97157 Pointe-à-Pitre Cedex (Guadeloupe), France

^c UE PEYI, INRAE, 97170, Petit-Bourg (Guadeloupe), France

^d UR Ecodéveloppement, INRAE, 84914, Avignon, France

* Corresponding author (G. Loranger-Merciris)

E-mail address: Gladys.Loranger@univ-antilles.fr

Telephone: +590 (0) 590 483328

Fax: +590 (0) 590 941663

Abstract

Alternative agroecological practices are prone to optimize ecological functions and improve health of agroecosystems. However, these practices are still in progress and thus, it is necessary to investigate their impact on soil biodiversity, soil functions and agroecosystem services. We tested the hypotheses that agroecological practices should be able to i) increase soil fauna abundance and diversity, ii) enhance soil fertility, iii) improve soil physical structure, iv) reduce pest proliferation, and v) achieve similar yield than conventional systems. For this purpose, we studied the impact of agroecological practices compared to conventional ones in vegetable cropping systems of Guadeloupe. Newly designed market-gardening cropping systems based on agroecological practices were set up, in open field. The first cropping system (AG) consisted in a combination of five innovations: i) use of a shallow ploughing, ii) inputs of vermicompost as organic fertilizer, iii) use of mulch to control weeds, iv) use of a barrier of repellent and host plants, and v) application of phytosanitary products certified in organic farming only. The second cropping system (AGSPP) was similar to the first one except for i) the plantation of other repellent and host plants inside the plots and ii) the non-use of phytosanitary products. We employed a system experimentation approach to assess the functioning of the overall new cropping systems, in terms of agronomic and environmental performances. Eighteen months after the set-up of the experiment, abundance of soil ecosystem engineers increase by 400% in AG and by 700% in AGSPP compared to conventional system. Soil predator abundance increase by 450% in AGSPP compared to conventional system. Macrofauna species richness increase by 150% in AG and AGSPP compared to conventional system. In addition, soil structure was improved in AGSPP (54% of biogenic aggregates in AGSPP vs. 11% in conventional system). The agroecological systems improved soil quality and achieved similar crop yield level than conventional systems, only 18 months after the plantation.

Keywords: Pest control; Soil aggregates; Soil fauna; Sustainable agriculture; Tropical agroecosystems.

1. Introduction

The concept of ecosystem services did spread worldwide since the Millennium Ecosystem Assessment report in 2005. Biodiversity is seen as the trigger for the provision of ecosystem services. These ecosystem services are occurring in all ecosystems whether natural or anthropogenic. Recently, the notion of agroecosystem services was introduced to describe services provided by cropping systems (Tancoigne et al., 2014). These agroecosystem services have been defined as “manifold goods and services provided by nature to humankind in agricultural systems”. These services are also inextricably linked to the development of sustainable agriculture and rely on growing societal expectations to provide more and more beneficial services.

At the interface between atmosphere, lithosphere, hydrosphere and biosphere, soils are fundamental for the provision and regulation of ecosystem and agroecosystem services. Soils are the most species-rich habitats of terrestrial ecosystems. They host a tremendous diversity, in terms of abundance, number of species and functions of microorganisms, mesofauna and macrofauna. Soil organisms provide essential ecological functions such as nutrient cycling, organic matter decomposition, maintenance of soil structure or control of pests and diseases in agricultural and natural ecosystems. These functions are the base of ecosystem services supply (Turbé et al., 2010). Moreover, soil organisms may be used as bioindicators of the effect of human activity on soil (Wanjiku et al., 2019).

Agriculture is a vital activity for human societies that is expected to feed some 9 billion people by 2050. Its fulfilment will require wide-ranging solutions, including increased crop yields, increased N, P and water use efficiency, ecologically sustainable management practices, and optimal use of agricultural inputs without increasing negative environmental impacts associated with agriculture (Pretty et al., 2010). For many years, the main agroecosystem service expected by farmers (and society) was crop production. Numerous studies demonstrated a significant negative impact of intensive agriculture on soil pollution, soil erosion, biodiversity loss and human health (Nkonya et al., 2016). According to Meynard (2017) the concept of agroecology challenges agronomists on the interest of relying on natural regulations rather than on external inputs to ensure agricultural production without wasting resources, in particular those that are not renewable. The concept of agroecology is based on the following ecological principles: i) reduce the environmental impacts by

significantly decreasing chemical inputs; ii) strengthen agroecosystems health by promoting techniques that increase natural pests control; iii) optimize agroecosystems metabolism by enforcing recycling of nutrients; and iv) improve soil preservation, water resources and biodiversity (Altieri, 1995). Therefore, agroecological practices are crucial to optimize ecological functions and improve agroecosystems while maintaining a high production level (Meynard, 2017).

In Guadeloupe, agriculture represent an important economic sector, and it is a source of exported goods, mostly based on agroindustrial models developed with banana and sugarcane. Those two cropping systems are well studied in Guadeloupe compared to vegetables cropping systems. In order to have a better understanding of vegetables cropping systems in Guadeloupe, a previous study was conducted on the whole territory (Moulin et al., 2019). This study showed that the practices used by the Guadeloupian market-gardeners did not foster soil biodiversity and optimize soil functions. Thus, agroecological practices in vegetables cropping systems should be implemented in order to contribute to the ecological transition of agriculture in this territory. In this present study, we focus on the impact of new innovative agroecological practices on soil biodiversity and agroecosystem services on vegetable cropping systems in open field. We hypothesize that the application of agroecological innovations in cropping systems (i.e. reduced tillage, organic fertilizer, mulch, increase in plant diversity) will i) enhance soil fauna abundance and diversity, ii) increase soil fertility, iii) improve soil physical structure, iv) reduce pest proliferation, and v) achieve similar yield as in conventional systems. In order to test these hypotheses, practices used in a conventional intensive farm and in two newly designed vegetable cropping systems were compared on the basis of agronomic and ecological criteria.

2. Materials and Methods

2.1. Research site

The study was carried out in the island of Grande-Terre (Guadeloupe, French West Indies) which is characterized by a slightly undulating surface and a relief that rarely exceed 40 m (Sierra et al., 2015). The climate is tropical, with a mean annual rainfall of 1500 mm. The studied vegetable cropping

systems were located on vertisol, at the experimental station of INRAE Godet near the city of Petit-Canal (16°40'N latitude - 61°48' W longitude). A conventional cropping system located on vertisol in Grande-Terre near the city of Le Moule (16°31'N latitude -61°33' W longitude) was also studied.

2.2. Market-gardening cropping systems

2.2.1. Co-design of innovative cropping systems

In January 2017, we organized a participatory workshop with different actors (farmers, scientists and technicians). The aim of this workshop was to co-design market-gardening cropping systems that valorize soil biodiversity. The design was conceived as an interaction between biotechnology sciences (ecology, agronomy) and social science to favor exchanges, individuals and collective appropriation of agroecological practices that favor soil biodiversity. At first, we shared knowledge on soil organisms (identification and function). Then, the impact of agricultural practices (tillage, inputs of pesticides, herbicides or fertilizers) on soil organisms was discussed. Finally, farmers proposed a cropping system prototype that combine their knowledge on soil organisms and agricultural practices: i) soil tillage must be shallow (use of a disc harrow or a bush hog); ii) only phytosanitary products certified in organic farming have to be applied, when necessary; iii) crop cover: application of sweet sugar cane or wood mulch as weed control; iv) repellent and host plants have to be introduced (*Thymus vulgaris*, *Ocimum basilicum*, *Plectranthus neochilus*, *Zea mays*, *Rosmarinus officinalis* and *Hibiscus sabdariffa*); v) vermicompost is used as organic fertilizer. The chosen crops are tomato (*Solanum lycopersicum*, Heat Master variety) and lettuce (*Lactuca sativa*).

2.2.2. Agroecological and conventional cropping systems

Two cropping systems based on agroecological practices were set up, in an experimental station (INRAE Godet). The first cropping system was entirely based on farmer's proposal and called AG (phytosanitary products certified in organic farming were used when necessary). The second cropping system (AGSPP), was partly based on farmer's proposition (Figure 1). In AGSPP system, we enhanced plant diversity by introducing additional repellent and host plants inside the plots

(*Plectranthus amboinicus*, *Cosmos sulfureus*, and *Tagetes patula*). Moreover, the use of pesticides was prohibited in this cropping system. We set up a total of 10 experimental plots (5 repetitions for each cropping system). Each plot had a surface of 25m² (Figure 2). The tomato and lettuce plantation was conducted in 2017 and in 2018. Before the first plantation, the soil was disked and beds were prepared, in March 2017. We planted the repellent and host plants, in March 2017. After one month, 27 plants of tomato and 50 plants of lettuce were planted in each plot. Moreover, we incorporated 100 g of vermicompost at the bottom of each plant. The second year, we planted the tomato and lettuce crops in January 2018. The tomato and lettuce plants were drip-irrigated.

A conventional vegetable cropping system located in a farm close to the experimental station was also studied. This conventional plot was characterized by the following agricultural practices: i) deep soil tillage (> 20 cm); ii) intensive use of insecticides and fungicides; iii) intensive application of herbicides (> 3 inputs by cycle); iv) use of synthetic fertilizers (3 inputs by cycle); v) exportation of organic residues (bare soil); vi) monoculture of tomato (*Solanum lycopersicum*, Heat Master variety).

2.3. Soil biodiversity

Soil sampling was achieved at the beginning of the experiment, in March 2017 (T0) and at the end of the experiment, in September 2018 (T18) in the experimental and conventional plots. Soil samples were taken in plots for analyses of soil macrofauna, mesofauna and microorganisms.

2.3.1. Soil macrofauna

In each experimental plot, one soil sample of 25 cm (length) × 25 cm (width) × 20 cm (deep) was taken for soil macrofauna extraction following the ISO 23611-S methodology. Each sample was collected in the middle of the plot. Animals were collected in alcohol, counted and identified at the morphospecies level under a dissecting microscope. Species richness and Shannon index were calculated. The animals were also gathered in functional groups: litter transformers, predators and ecosystem engineers (Turbé et al., 2010). In the conventional plot, 5 samples were taken for soil

macrofauna analyses. Each sample was separated at least 200 m from the others, and was collected 1 km far away from any road and walking path.

2.3.2. Soil mesofauna

One soil sample, 20 cm (length) × 20 cm (width) × 15 cm (depth), was taken in each experimental plot for soil mesofauna extraction. Each sample was collected in the middle of the plot. Animals were collected in alcohol using the Berlese extraction method, counted and identified at the taxonomic level under a dissecting microscope. The organisms were classified in taxonomic groups: Acarida, Collembola, and Other invertebrates. In the conventional plot, 5 samples were taken for soil mesofauna analyses. Each sample was separated at least 200 m from the others, and was collected 1 km far away from any road and walking path.

2.3.3. Soil microorganisms

The activity of soil microorganisms (essentially bacteria and fungi) was estimated using the FDA hydrolysis assay (Schnürer and Rosswall, 1982). In each experimental plot, a mixed soil sample was taken. The sample (1 g of soil in 10 ml buffer) was incubated for 1h at 24°C on a gyrotory shaker (Brunswick scientific G-33, 100 rev min⁻¹). After stopping the reaction by addition of an equal volume of acetone, the amount of produced fluorescein was measured by absorbance at 490 nm. In the conventional plot, 5 mixed samples were taken for microbial analyses. Each sample was separated at least 200 m from the others, and was collected 1 km far away from any road and walking path.

2.4. Agroecosystem services

2.4.1. Soil fertility

At the beginning (T0) and at the end of experiment (T18), one soil sample of 9 cm (diameter) × 15 cm (depth) was taken for soil chemical analyses in the middle of each experimental plot. These soil samples were analyzed for total N using Dumas method. Organic C and total C were measured using NF ISO 10694 and C/N ratio was measured using NF ISO 13878. Total P and total K were measured

using ICP-MS (NF EN ISO 17294 and NFX 31-147). Cation-exchange capacity (CEC) was measured with IF07-10D (NFX 31-130) method and pH-H₂O and pH-KCl with NF ISO 1770, 3696 and 11464. Soil chemical characteristics were analyzed at the SADEF soil testing laboratory in France. In the conventional plot, 5 samples were taken to measure soil fertility. Each sample was separated at least 200 m from the others, and was collected 1 km far away from any road and walking path.

2.4.2. Soil structure

At the beginning and at the end of experiment, an undisturbed soil sample taken with an 8 cm diameter × 8.5 cm height cylinder was collected in the middle of each experimental plot. In the laboratory, blocks were gently separated and the samples were air-dried then sieved at 4 mm. The soil retained by the sieve was placed on a filter paper and the various elements were separated, delicately breaking the soil along the lines of natural fractures. The various elements were sorted according to categories: i) biogenic aggregates of rounded forms, created by macroinvertebrates, mainly earthworms, ii) physical aggregates of angular forms, produced by the physical processes of the environment (especially alternating dry and wet periods), iii) plant debris including roots, leaves, fragments of stems, seeds and pieces of wood, v) stones and vi) diverse. The separated samples were put in an oven at 60 °C for 15 days and weighed. In the conventional plot, 5 samples were taken to measure soil structure. Each sample was separated at least 200 m from the others, and was collected 1 km far away from any road and walking path.

2.4.3. Crop production

At the end of each crop cycle, we selected 50 tomato and 50 lettuce plants in AG and in AGSPP plots. In the laboratory, we separated the aerial part from the root part of each plant. After 72 hours in an oven at 70°C, we measured shoot and root dry biomass of the selected plants. Furthermore, we weighted tomato fruits that were collected in both treatments. For the conventional plot, we used the data of the Agriculture Chamber of Guadeloupe to evaluate tomato production.

At the beginning of the plantation, 50 tomato plants and 50 lettuce plants were randomly selected, in each cropping agroecological systems (10 plant per plot). We monitored plant growth weekly and we observed aerial biodiversity during 4 months for both years. We also monitored the number of flower buds, flowers and fruits present on the 50 selected plants. Furthermore, we calculated the flowering rate (%) and the fruit set rate (%). This monitoring was not effected in the conventional plot.

2.4.4. Pests control

In AG plots, phytosanitary products certified in organic farming were applied when necessary. The following substance can be used: i) the organic insecticide Dipel®, ii) the insecticide/acaricide Oviphyt® and iii) Bordeaux mixture as fungicide. In AGSPP, we enhance plant diversity inside the plots in order to better regulate pests; thus we did not use phytosanitary products. In the conventional plot, synthetic insecticides (Decis Protech®, Vermitec®) and fungicide (Dithane Neotec®) were used by the farmer.

2.5. Statistical analyses

Kruskal-Wallis tests were used to compare cropping system's fauna, physical and chemical soil characteristics. The threshold for the significance level was set at 0.05. Wilcoxon Mann Whitney tests were used to compare dry biomass, FDA and number of flower buds, flowers and fruits. All statistical analyses were carried out using R software.

3. Results

3.1. Soil macrofauna

At T0, soil macrofauna was not significantly different between the cropping systems (Kruskal-Wallis; $p= 0.05$). At T18, we found 586 ± 353 (mean \pm SE) individuals.m⁻² in AG, 1530 ± 368 individuals.m⁻² in AGSPP and 389 ± 353 individuals.m⁻² in conventional plot. The abundance of soil macrofauna was slightly higher in AGSPP. However, there was no significant difference in soil macrofauna abundance between cropping systems (Kruskal-Wallis; $p= 0.053$).

Ecosystems engineers were more abundant than litter transformers and predators (Figure 3). The abundance of ecosystem engineers was significantly higher in both agroecological systems than in conventional cropping system (Kruskal-Wallis; $p= 0.01$). The high amount of ecosystem engineers in AG (451 ± 295 individuals.m⁻²) and AGSPP (707 ± 229 individuals.m⁻²) was mainly due to the high abundance of ants and earthworms in these cropping systems. There was no significant difference between the abundance of litter transformers between AGSPP, AG and conventional plot (Kruskal-Wallis; $p \geq 0.05$). The abundance of predators was significantly higher in AGSPP compared to AG and conventional system (Kruskal-Wallis; $p= 0.01$). This difference was mainly due to the high abundance of Arachnida, Chilopoda, and Formicidae predators in AGSPP compared to AG and conventional system.

We collected at T18, the same number of species (20) in AG and in AGSPP against 13 species in the conventional system. Shannon index ranged between 1 and 4,5. Mean Shannon index was 2.10 in AGSPP, 2.04 in AG, and 1.94 in conventional system at T18. Based on Shannon index, biodiversity was average in AGSPP and AG compared to conventional system, which exhibited the lower biodiversity.

Some species are present in all cropping systems, such as *Solenopsis invicta* Buren, *Camponotus sexguttatus* Cristobal, *Cardiocondyla ermeryi* Forel (Formicidae), *Tetragnathidae* sp.1 (Arachnida), *Aphididae* sp.1 (Hemiptera), *Platyarthridae* sp.1 and *Philosciidae* sp.1 (Isopoda). Other species were only present in AGSPP and AG, such as the earthworm *Polypheretima elongata* Perrier, the Coleoptera *Colopterus* sp., the Dermaptera *Euborellia annulipes* Lucas, the Arachnida *Thomisidae* sp.1 and the Myriapoda *Geophilidae* sp.1. Some other species were only found in AGSPP as the Formicidae *Cyphomyrmex minutus*, the Staphilinidae *Cafius* sp.1 and the earthworm *Pontoscolex corethrurus* Müller.

3.2. Soil mesofauna

Soil mesofauna was significantly different between the cropping systems at T18. The abundance of Acarida was higher in AGSPP (42556 ± 1074 individuals.m⁻²) and AG (42134 ± 22018 individuals.m⁻²)

²) compared to conventional plot (3858 ± 1812 individuals.m⁻²) (Kruskal-Wallis; $p= 0.015$). Likewise, the abundance of Collembola was significantly higher in AGSPP (5726 ± 2184 individuals.m⁻²) and in AG (3677 ± 988 individuals.m⁻²) compared to conventional plot (422 ± 204 individuals.m⁻²) (Kruskal-Wallis; $p= 0.003$).

3.3. Soil microorganisms

At T0, there was no significant difference between the cropping systems regarding soil microorganisms (Wilcoxon- Mann Whitney; $p= 0.07$). At T18, AGSPP, AG and conventional cropping systems were not significantly different regarding soil microorganisms (Wilcoxon- Mann Whitney; $p= 0.18$). However, the activity of soil microorganisms in AGSPP was slightly higher (15.91 ± 1.97 $\mu\text{g fluorescein.g}^{-1}\text{h}^{-1}$) than in AG (11.99 ± 1.20 $\mu\text{g fluorescein.g}^{-1}\text{h}^{-1}$). The activity of soil microorganisms in conventional system was slightly higher than in agroecological ones (17.49 ± 1.80 $\mu\text{g fluorescein.g}^{-1}\text{h}^{-1}$).

3.4. Soil fertility

At T0, total C, total N, total K and total P were significantly higher in the conventional plot compared to AG and AGSPP (table 1).

At T18, total P, total C and total N were also significantly higher in the conventional plot than in AG and AGSPP (table 2). Moreover, total N was higher in AG (2.99 ± 0.19) than in AGSPP (2.39 ± 0.06) (Kruskal-Wallis; $p=0.0024$). Total K total was also higher in AG (1.77 ± 0.04) compared to AGSPP (1.68 ± 0.07) (Kruskal-Wallis; $p=0.038$).

3.5. Soil structure

The percentage of biogenic aggregates, physical aggregates and non-aggregated soil were not significantly different at T0 between the cropping systems (Kruskal-Wallis; $p\geq 0.05$). However, at T18, there were a significant difference in soil structure between cropping systems (Figure 4). In AGSPP, biogenic aggregates amount was higher than in AG and in conventional system (Kruskal-

Wallis; $p=0.008$). Percentage of non-aggregated soil was higher in AGSPP and conventional system compared to AG (Kruskal-Wallis; $p=0.012$). Physical aggregates amount was higher in AG than in AGSPP and in conventional system (Kruskal-Wallis; $p=0.008$).

3.6. Crops production and pest regulation

The first year, tomatoes harvest lasted three weeks. We obtained 3.3 tons/ha in AGSPP and 1.76 tons/ha in AG. The plant total dry biomass was not significantly different between AGSPP and AG (Wilcoxon-Mann Whitney; $p=0.25$). For the lettuce crop, we obtained 6.7 tons /ha in AGSPP and 4.69 tons/ha in AG. There was not significant difference between AG and AGSPP for the plant total dry biomass (Wilcoxon-Mann Whitney; $p=0.89$).

The second year, tomatoes harvest lasted five weeks. We obtained a total of 15.6 tons/ha in AGSPP and 13.3 tones/ha in AG. The plant total dry biomass was not significantly different between both treatments (Wilcoxon-Mann Whitney; $p=0.45$). For the lettuce crop, we obtained a total of 19.92 tons/ha in AGSPP and 19.68 tons/ha for AG. The plant total dry biomass was not significantly different between both treatments (Wilcoxon-Mann Whitney; $p=0.71$).

Base on Agriculture Chamber of Guadeloupe data, conventional vegetable cropping systems produce 15 tons/ha of tomato each year.

3.7. Monitoring of tomato plants

The number of flower buds was not significantly different between the AG (3183 ± 4) and AGSPP (2939 ± 3.04), (Wilcoxon-Mann Whitney; $p = 0.14$). The number of flowers was significantly higher in AG (1615 ± 2.76) than in AGSPP (981 ± 1.15), (Wilcoxon- Mann Whitney; $p = 0.006$). The flowering rate was significantly higher in AG compared to AGSPP: 51% of flower buds develop into flowers in AG against 33% in AGSPP (Wilcoxon- Mann Whitney; $p = 0.001$). However, there was no significant difference between AG (543 ± 1.07) and AGSPP (624 ± 0.80) regarding to the number of tomato fruits (Wilcoxon- Mann Whitney; $p = 0.26$). Thus, the fruit set rate was significantly higher in AGSPP (64%) compared to AG (34%), (Wilcoxon- Mann Whitney; $p < 0.0001$).

4. Discussion

The major finding of this study was that agroecological practices in vegetable cropping systems significantly affected soil fauna abundance and diversity and agroecosystems services, in only 18 months. As expected, the agroecological systems were characterized by a higher soil fauna richness, a better soil structure (higher proportions of biogenic aggregates), and a better pest regulation. However, the agroecological systems did not affect significantly soil chemical parameters.

4.1. Soil biodiversity

The significant increase of ecosystem engineers (due to the high abundance of earthworms and ants) within the agroecological systems may be firstly due to the application of organic matter. Organic mulch can stimulate edaphic biodiversity, especially earthworms. A previous study has shown that the density of earthworm was greater on soil covered with organic mulch (grass or straw) than on bare soil (Jodaugiene et al., 2009). Acarida and Collembola populations were also higher in agroecological systems compared to the conventional one. Soil mesofauna activity can also be stimulated by the presence of organic mulch. Organic mulching creates favorable environmental conditions for the growth of fungi, which are a food source for mesofauna organisms (Scheu and Simmerling, 2004). Furthermore, the application of vermicompost can increase the abundance of Collembola, Acarida and earthworms (Bhadaurai et al., 2014; Chauhuri et al., 2016).

The lower abundance of predators in AG and conventional cropping systems could be explained by the use of pesticides. In AG, the insecticide Dipel® was used during the crop cycle as an alternative practice to reduce synthetic pesticides risks and resistance development. Biological pesticides are efficient against pests, and they are biodegradable with no residuals in the environment. However, the use of biological pesticides can potentially affect soil organisms. The bacteria (*Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki*) present in the Dipel® is used to fight against certain Lepidoptera pests in agricultural crops. However, these bacteria release toxins (Cry), which have a negative impact on Coleoptera, Diptera, Oligochaeta, Gastropods, Hymenoptera, Heminoptera and Nematodes. The effects of these

toxins can last for a period of time ranging from six months to a year after application (Palma et al., 2014). The increase of predators in AGSPP plots could also be due to the increase of plants diversity. *Cosmos sulphureus* is known to attract a range of predators, such as Coleoptera (Coccinellidae, Carabidae and Staphylinidae), Hymenoptera (Formicidae, Sphecidae, Eumenidae and Vespidae) and Arachnida (Tetragnathidae, Lycosidae and Linyphiidae and Araneidae) (Aldini et al., 2019). *Tagetes patula* is also known to attract Coleoptera (Coccinellidae and Staphylinidae) and Arachnida (da Silva et al., 2016).

4.2. Agroecosystem services

In AGSPP, the higher percentage of biogenic aggregates was probably linked to the higher earthworm diversity. Earthworm are known to use the energy contained inside the organic matter to build stable organo-mineral aggregates (Hindell, 1997). A previous study has shown that biogenic aggregates participate in the soil structural stability and allow better carbon sequestration than physical aggregates (Carvalho da Silva Neto et al., 2016). Through improvement of soil structural stability, soil ecosystem engineers can also play a role in infiltration and distribution of water in the soil, which can impact primary production.

The agroecological cropping systems exhibited a production of tomato close to the conventional one. This production can be explained by the sustainable practices used. Vermicompost can have a positive effect on plant growth. According to Prabha et al. (2007), the application of vermicompost may increase the quantity of phosphorus, potassium, iron and zinc in tomato plants. Those nutrients can lead to a better development of tomato roots and can increase leaf area. Ravindran et al. (2019) also showed that vermicompost can contribute to tomato growth and fruit production. It can stimulate plants flowering by increasing the number and biomass of flowers produced.

In our study, we observed the presence of *Danaus plexippus* (Lepidoptera Nymphalidae) in AGSPP plots. These butterflies were probably attracted by *Tagetes patula* and *Cosmos sulphureus*. *D. plexippus* diets is not limited to a specific group of flowers (Brindza et al., 2008). The frequent passage of these butterflies in AGSPP plots could explain the higher percentage of fruit set in tomato

crops. Tomato is a plant with hermaphroditic flowers and a self-pollination type. However, according to Bispo dos Santos et al. (2009), pollination by wild bees contributed to increase the percentage of fruit set of tomato plants. Bees improved yields by reducing flower abortions. *D. plexippus* may have the same impact in our study.

A “push-pull” strategy was used in both agroecological cropping systems in order to repel undesirable invertebrates and to attract beneficial ones. This strategy may have contributed to pest regulation of tomato and lettuce crops. *Zea mays* attract Pseudococcidae which are extremely damaging pests especially for tomato (Canário et al., 2017). These insects can cause damage by reducing photosynthesis and plant growth, which allows mold growth and virus transmission (Canário et al., 2017). Furthermore, we observed the presence of Coccinellidae on *Zea mays*, *Ocimum basilicum*, *Rosmarinus officinalis*, *Hibiscus sabdaria*, *Tagetes patula*, *Plectranthus neochilus* and *Cosmos sulphureus*. These Coccinellidae are predators of a wide range of pests such as Hemiptera, Pseudococcidae, Thysanoptera and Acarina in all regions of the world (Raimundo et al., 2008). In our study, we observed that tomato plants were not attacked by whiteflies (Aleyrodoidea) in agroecological cropping systems. According to Szendrei and Rodriguez-Soana (2010), aromatic plants, such as *Rosmarinus officinalis*, *Thymus vulgaris* and *Plectranthus amboinicus*, produce volatile aromas, which are attractive to specific insects. *Rosmarinus officinalis* produces β -caryophyllene and limonene molecules, which attract *Bemisia tabaci* (Aleyrodidae) (Sadeh et al., 2017). *B. tabaci* can be a vector of the tomato leaf yellowing virus or Tomato Yellow Leaf Curl (TYLC). This disease is one of the most devastating in the tropics and subtropics. The use of extract molecules from *T. vulgaris* (thymol, p-cymene and carvacrol) and *R. officinalis* (1,8-cineole, camphene and camphor) can have a deleterious effect on the eggs and nymphs of *B. tabaci* (Yang et al., 2010). Our observations also revealed the presence of Thripidae on tomato plants in both agroecological systems. These insects are vectors of Tomato Spotted Wilt Virus (TSWV) on tomatoes and L-TSWV on lettuce (Mound, 2004). According to Koschier and Sedy (2003), *R. officinalis* essential oils have a repellent effect against *Thrips tabaci*. In contrast, *Thrips* sp. are attracted to *Tagetes patula* plants. *Tagetes patula* serve as trap

plants and distract insects from cropping field. The effects of host and repellent plants can explain why attacks by Thripidae were minimal in our experimental cropping systems.

Conclusion

In our study, we showed that agroecological practices in market-gardening cropping systems can increase soil fauna abundance and diversity and soil agroecosystem services compared to conventional practices. As expected, the application of vermicompost combined with organic mulching and high plant diversity increased soil biodiversity in agroecological cropping systems. In terms of agroecosystem services, tomato and lettuce pests can be regulated in agroecological cropping systems, probably due to host and repellent plants and by the increase in soil predator abundance. Soil structure was also improved in agroecological cropping systems. Moreover, the agroecological systems achieved similar crop yield level than conventional systems. Agroecological practices in tropical vegetable cropping systems could thus be used to improve soil biodiversity, soil functions and agroecosystem services.

Acknowledgments

This study was supported financially by the Fondation de France (Ecosystems, Agriculture, and Alimentation program, Impactbio project) and the PO-FEDER (AgroEcoDiv project). The authors thank Jean-Luc Daupin, Christophe Latchman, Chantal Fléreau, Fred Burner and Philippe Julianus for their technical help.

Declaration on conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

Aldini, G.M., Martono, E., Trisyono, Y.A., 2019. Diversity of natural enemies associated with refuge flowering plants of *Zinnia elegans*, *Cosmos sulphureus*, and *Tagetes erecta* in rice ecosystem. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia* 23(2), 285-291. doi: 10.22146/jpti.33947.

Altieri M.A., 1995. *Agroecology. The Science of Sustainable Agriculture*. Westview Press, Boulder, CO.

Chaudhuri, P.S., Paul, T.K., Dey A., Datta, M., Dey, S.K., 2016. Effects of rubber leaf litter vermicompost on earthworm population and yield of pineapple (*Ananas comosus*) in West Tripura, India. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 5, 93-103.

Da Silva, V.F., Silveira, L.C.P., Dos Santos, A., Dos Santos, A.J.N., Tomazella, V.B., 2016. Companion plants associated with kale increase the abundance and species richness of the natural-enemies of *Lipaphis erysimi* (Kaltenbach) (Hemiptera : Aphididae). *Afr. J. Agric. Res.* 11(29), 2630-2639. doi:10.5897/AJAR2016.10941.

Bhadoria, T., Kumar, P., Maikhuri, R., Saxena, K.G., 2014. Effect of application of vermicompost and conventional compost derived from different residues on pea crop production and soil faunal diversity in agricultural system in Garhwal Himalayas India. *Natural Science* 6, 433-446. doi:10.4236/ns.2014.66042

Bispo dos Santos, A., Roselino, A.C, Hrnir, M., Bego, L.R., 2009. Pollination of tomatoes by the stingless bee *Melipona quadrifasciata* and the honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Genet. Mol. Res.* 8, 751-757. doi: 10.4238/vol8-2kerr015

Brindza, L.J., Brower, P.L., Davis, A.K., Van Hook, T., 2008. Comparative success of monarch butterfly migration to overwintering sites in Mexico from inland and coastal sites in Virginia. *Journal of the Lepidopterists' Society* 62(4), 189-20.

Canário, D.V.P., Figueiredo, E., Franco, J.C., Guerra, R., 2017. Detecting early mealybug infestation stages on tomato plants using optical spectroscopy. *Eur. J. Hortic. Sci* 82(3), 141-148. doi: 10.17660/eJHS.2017/82.3.4

Carvalho da Silva Neto, E., Gervasio Pereira, M., Fernandes, J.C.F., De Andrade Corrêa Neto, T., 2016. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in atlantic forest from southeastern brazil. *Semina: Ciências Agrárias* 37 (6), 3927-3940. doi: 10.5433/1679-0359.2016v37n6p3927

Hindell, R.P., McKenzie, B.M., Tisdall, J.M., 1997. Destabilization of soil during the production of earthworm (*Lumbricidae*) and artificial casts. *Biol. Fertil. Soils* 24,153-163. doi: 10.1007/s003740050224

Jodaugienė, D., Pupalienė, R., Sinkevičienė, A., Marcinkevičienė, A., Žebrauskaitė, K., Baltaduonytė, M., Čepulienė, R. 2009. The influence of organic mulches on soil biological properties. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2), 33-40.

Koschier, E.H., Sedy, K.A., 2003. Labiate essential oils affecting host selection and acceptance of *Thrips tabaci* Lindeman. *Crop. Prot.*, 22, 929-34.

Meynard, J.M., 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation OCL 24(3), D303. doi: 10.1051/ocl/2017021

Moulin, C., Vaillant, V., Diman, J.L., Angeon, V., Burner, F., Loranger-Merciris, G., 2019. The impact of agricultural practices on soil organisms: lessons learnt from market-gardens. *AJAEES* 34(1), 1-12. doi: 10.9734/AJAEES/2019/v34i130188

Mound, L.A., 2004. Fighting, flight and fecundity: behavioural determinants of Thysanoptera structural diversity In: Ananthakrishnan, T.N., Whitman, D. (Eds.), *Insects and Phenotypic Plasticity*. Science Publishers Inc.

Nkonya, E., Mirzabaev, A., von Braun, J. 2016. *Economics of land degradation and improvement - A global assessment for sustainable development*. Springer International Publishing, Cham.

Palma, L., Muñoz, D., Berry, C., Murillo, J., Caballero, P., 2014. *Bacillus thuringiensis* toxins: an overview of their biocidal activity. *Toxins* 6(12), 3296-3325. doi:10.3390/toxins6123296

Prabha, K.P., Loretta, Y.L., Usha, R.K., 2007. An experimental study on vermin-biowaste composting for agricultural soil improvement. *Bioresour. Technol.* 99, 1672-1681. doi: 10.1016/j.biortech.2007.04.028

Pretty, J., Sutherland, W.J., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M. et al., 2010. The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *Int. J. Agric. Sustain.* 8, 219-236. doi: 10.3763/ijas.2010.053

Raimundo, A.C., Fürsch, H., Van Harten, A., 2008. Order Coleoptera, family Coccinellidae. In: van Harten, A., (Ed.), *Arthropod Fauna of the UAE*. Dar Al Ummah Printing, Adu Dhabi, UAE 1, 217-239

Ravindran, B., Lee, S.R., Chang, S.W., Nguyen, D.D., Chung, W.J., Balasubramanian, B., Sekaran, G., 2019. Positive effects of compost and vermicompost produced from tannery waste-animal fleshing

on the growth and yield of commercial crop-tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plant. *J. Environ. Manage.* 234, 154-158. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.100

Sadeh, D., Nitzan, N., Shachter, A., Chaimovitsh, D., Duda, N., Ghanim, M., 2017. Whitefly attraction to rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) is associated with volatile composition and quantity. *PLoS ONE*, 12(5), 1-18. doi:10.1371/journal.pone.0177483

Scheu, S., Simmerling, F., 2004. Growth and reproduction of fungal feeding Collembola as affected by fungal species, melanin and mixed diets. *Oecologia*, 139, 347-353. doi: 10.1007/s00442-004-15

Szendrei, Z., Rodriguez-Saona, C., 2010. A meta-analysis of insect pest behavioral manipulation with plant volatiles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 134(3), 201-210. doi: 10.1111/j.1570-7458.2009.00954.x.

Schnürer J., Rosswall, T., 1982. Fluorescein Diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Environ. Microbiol.* 43, 1256-1261.

Tancoigne, E., Barbier, M., Cointet, J.P., Richard, G., 2014. The place of agricultural sciences in the literature on ecosystem services. *Ecosyst. Serv.* 10, 35-48. doi:10.1016/j.ecoser.2014.07.004.

Turbé, A., Toni, D.A., Benito, P., Lavelle, P., Lavelle, P., Ruiz, N., Van der Putten, W.H., Mudgal, S., 2010. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment).

Wanjiku, K., Biber-freudenberger, L., Lamers, J.P.A., Stellmacher, T., Borgemeister, C., 2019. Soil fertility and biodiversity on organic and conventional smallholder farms in Kenya. *Appl. Soil Ecol.* 134, 85-97. doi:10.1016/j.apsoil.2018.10.020.

Yang, N.W., Li, A.L., Wan, F.H., Liu, W.X., Johnson, D., 2010. Effects of plant essential oils on immature and adult sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* biotype B. *Crop. Prot.* 29(10), 1200-1207. doi:10.1016/j.cropro.2010.05.006.

Figure captions

Figure 1: Pictures of agroecological market-gardening cropping systems (INRAE experimental station, Godet Petit-Canal, Guadeloupe).

Figure 2: Design of agroecological market-gardening cropping systems (AG and AGSPP) in open field (INRAE experimental station, Godet Petit-Canal, Guadeloupe).

Figure 3: Soil macrofauna functional diversity in agroecological market-gardening cropping systems (AG (□) and AGSPP (■)) and conventional cropping system (■) in Guadeloupe (Grande-Terre), 18 months after the experiment set-up. Values with similar letters are not significantly different according to Kruskal-Wallis test.

Figure 4: Soil structure in agroecological market-gardening cropping systems (AG (□) and AGSPP (■)) and conventional cropping system (■) in Guadeloupe (Grande-Terre), 18 months after the experiment set-up. Values with similar letters are not significantly different according to Kruskal-Wallis test.

Figure 1



Figure 2

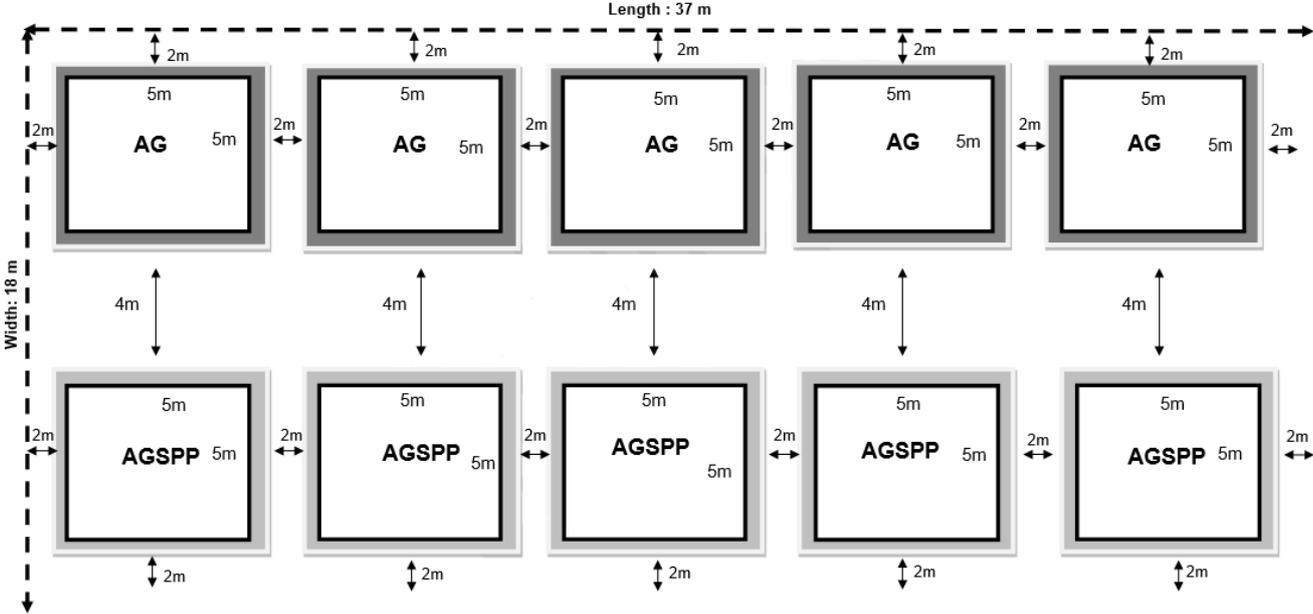


Figure 3

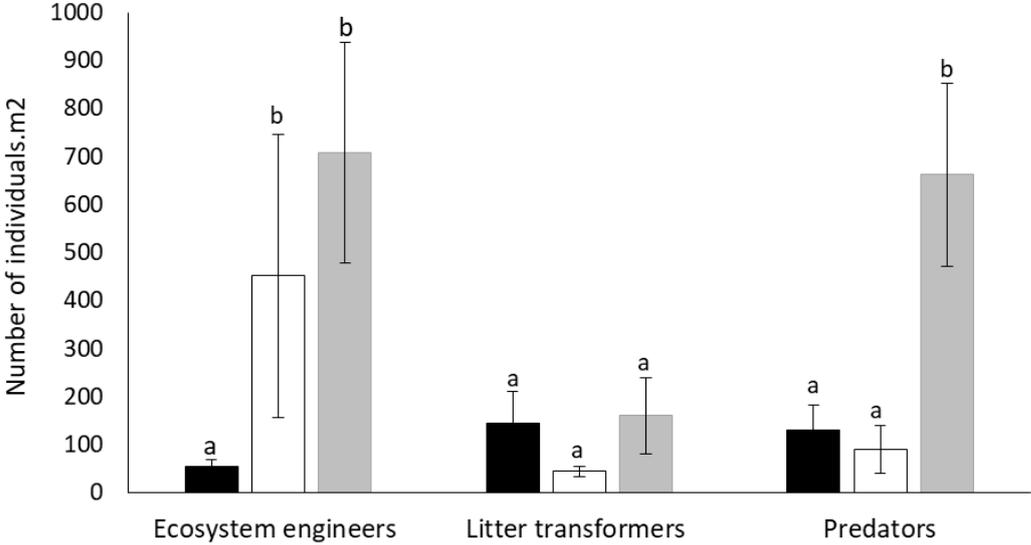


Figure 4

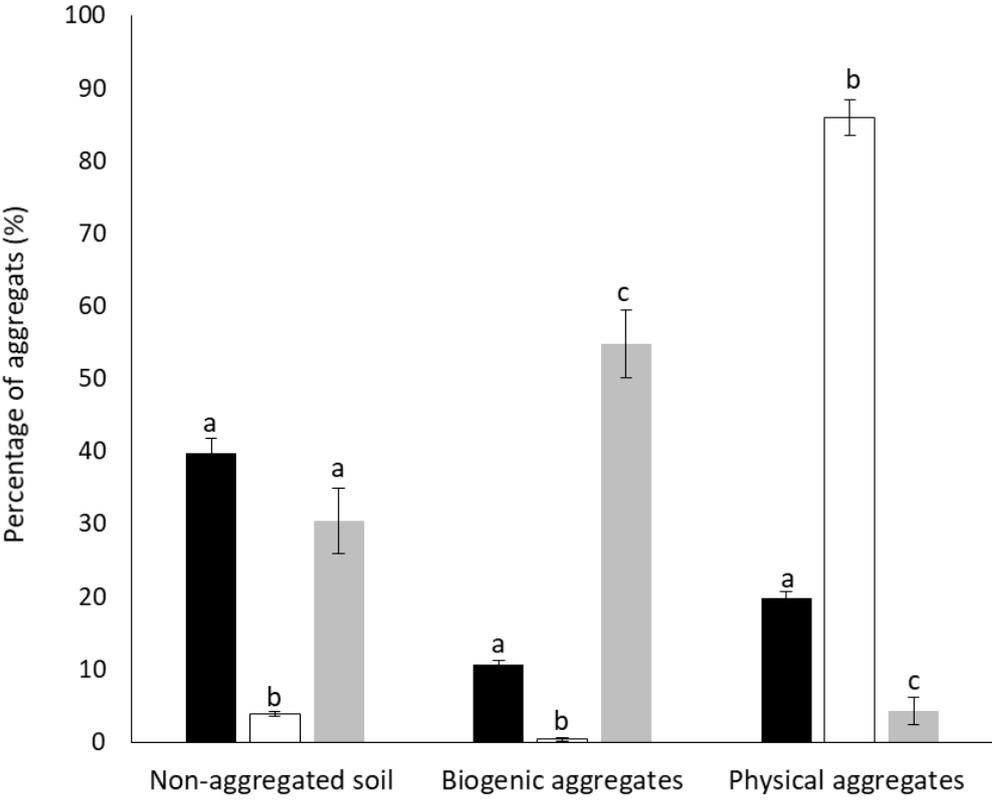


Table 1: Soil chemical characteristics of i) two alternative market-gardening cropping systems (AG and AGSPP) on vertisol (Godet, Petit-Canal), at the beginning of the experiment and ii) a conventional market-gardening cropping system on vertisol (Le Moule). Means with the same letter are not significantly different according to Kruskal Wallis test.

	Conventional plot	AG	AGSPP	p-value
pH _{H2O}	7,80±0,01 (a)	7,81±0,08 (a)	7,95±0,02 (b)	0,036
pH _{KCl}	7,20±0,01	7,11±0,08	7,17± 0,04	0,73
CEC	415±24,36	390±17,29	388±13,03	0,47
N _{total} (‰)	3,61±0,16 (a)	1,92±0,02 (b)	1,89±0,02 (b)	0,008
C/N	16,6±1,08	17,2±2,63	17,6±2,32	0,96
C _{total} (‰)	59,56±3,39 (a)	33,16±5,21 (b)	33,45±4,71 (b)	0,009
K _{total} (‰)	2,72±0,17 (a)	1,90±0,09 (b)	1,80±0,08 (b)	0,008
P _{total} (‰)	0,76±0,02 (a)	0,51±0,02 (b)	0,51±0,01 (b)	0,008

Table 2: Soil chemical characteristics of i) two alternative market-gardening cropping systems (AG and AGSPP) on vertisol (Godet, Petit-Canal), 18 months after the setting up of the experiment and ii) a conventional market-gardening cropping system on vertisol (Le Moule). Means with the same letter are not significantly different according to Kruskal Wallis test.

	Conventional plot	AG	AGSPP	p-value
pH _{H2O}	7,94 ±0,08	7,84±0,03	7,81±0,07	0,69
pH _{KCl}	7,29±0,05 (a)	7,84±0,03 (b)	7,81±0,07 (b)	0,008
CEC	464±31,92	435±21,87	438±15,61	0,82
N _{total} (‰)	2,91±0,15 (a)	2,99±0,19 (b)	2,39±0,06 (c)	0,01
C/N	11,06±0,23	9,1±0,78	11,64±0,67	0,058
C _{total} (‰)	32,21±1,84 (a)	26,72±0,95 (b)	27,67±0,97 (b)	0,042
K _{total} (‰)	2,67±0,20 (a)	1,77±0,04 (b)	1,68±0,07 (c)	0,006
P _{total} (‰)	1,15±0,10 (a)	0,55±0,02 (b)	0,61±0,01 (b)	0,003

