



HAL
open science

**Effets de la Litière Forestière Fermentée sur la
croissance végétative, la santé et le rendement de
Lactuca sativa (laitue) et Solanum lycopersicum
(tomate) en conditions expérimentales**

Clémentine Denis

► **To cite this version:**

Clémentine Denis. Effets de la Litière Forestière Fermentée sur la croissance végétative, la santé et le rendement de *Lactuca sativa* (laitue) et *Solanum lycopersicum* (tomate) en conditions expérimentales. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03563225

HAL Id: dumas-03563225

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03563225v1>

Submitted on 9 Feb 2022

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

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

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes

Année universitaire : 2020 – 2021

Spécialité :

Ingénieure Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Agroecology

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master d'AGROCAMPUS OUEST (École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage), école interne de L'institut Agro (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de Montpellier SupAgro (étudiant arrivé en M2)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Effets de la Litière Forestière Fermentée sur la croissance végétative, la santé et le rendement de *Lactuca sativa* (laitue) et *Solanum lycopersicum* (tomate) en conditions expérimentales

Par : Clémentine DENIS



Soutenu à Rennes le 16/09/2021

Devant le jury composé de :

Présidente : Safya Menasseri

Maître de stage : Pascal Dantinne

Enseignante référente : Anne Jaffrezic

Autre membre du jury :
Laurent Leport (examineur)

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon maître de stage Pascal Dantinne, mystérieusement surnommé Valo, grâce à qui j'ai découvert les préparations fermentées et bien d'autres facettes de l'agroécologie. Merci pour la transmission de tes connaissances, tes bons plans et astuces de grand jardinier.

Merci également à Elodie Legal qui a été comme une seconde tutrice de stage, me guidant dans ce projet qu'est la Litière Forestière Fermentée, me motivant et m'appuyant lorsque j'en avais besoin. Merci pour ton écoute et ta disponibilité, malgré une charge de travail toujours plus importante.

Un immense merci également à Paula Fernandes, chercheuse au CIRAD, qui m'a aiguillée et conseillée jusqu'au dernier moment sur le chemin de ce mémoire. Merci pour ta disponibilité malgré ton éloignement, nos échanges très fructueux m'ont permis d'avancer toujours plus loin.

Toute l'équipe de Terre & Humanisme a aussi su me soutenir, m'aider et se tenir à l'écoute lorsque j'en avais besoin, tout au long de ce stage. Un grand merci à vous tous pour votre bienveillance et cette belle expérience humaine que vous avez su m'offrir.

Merci également à Milène Souvignet et Miguel Neau, deux experts dans leurs domaines grâce à qui j'ai découvert de nouveaux concepts scientifiques. Merci pour les échanges enrichissants que nous avons eus, sur les plans scientifiques théoriques comme agronomiques.

Je tiens également à remercier tous.tes les ami.es qui m'ont soutenu et aidé au cours des expérimentations, pour aller arroser des laitues qui n'en finissaient pas de pousser, pour avoir supporté et s'être intéressés.es aux discussions sur les racines, les feuilles, etc. Merci à Amandine, Lucille, Nelly, Clémence, Pierre et Léa.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Liste des abréviations	v
Liste des Annexes.....	vii
Liste des illustrations.....	ix
Liste des tableaux	xi
Avant-propos	xiii
Introduction	1
1 Etat de l'art : Généralités sur les microorganismes, leurs effets sur les sols et les plantes et leur utilisation en agriculture	3
1.1 Importance et complexité des microorganismes dans leur interactions avec le sol et les plantes 5	
1.1.1 Les principaux microorganismes acteurs des interactions plante-sol-microorganisme... 5	
1.2 Les différentes formes d'utilisation des microorganismes en agriculture	9
1.2.1 Concepts scientifiques et préparations existantes dans le commerce	9
1.2.2 Les alternatives : préparations agricoles artisanales à base de microorganismes.....	11
1.2.3 Une alternative aux préparations commerciales : la Litière Forestière Fermentée.....	11
2 Matériels et méthodes.....	15
2.1 Objectifs des expérimentations.....	15
2.2 Expérimentation n°1 : Effet de l'utilisation de la LiFoFer sur une culture de laitues de plein champ (Lactuca sativa).....	17
2.2.1 Localisation et historique du site de l'étude	17
2.2.2 Caractéristiques pédoclimatiques	17
2.2.3 Matériel et dispositif expérimental.....	17
2.2.4 Paramètres évalués	23
2.3 Expérimentation n°2 : comparaison de l'application de différents extraits fermentés sur tomates en pot.....	29
2.3.1 Matériel et dispositif expérimental	29
2.3.2 Paramètres évalués	29
2.4 Traitement statistique des données	31
3 Résultats	31
3.1 Expérimentation n°1, cycle 1 : Résultats.....	31
3.1.1 Suivi de la qualité du sol de la culture : diagnostique des plantes bio indicatrices	31
3.1.2 Indicateurs de la croissance végétative des laitues	33
3.1.3 Indicateurs de la santé des plantes.....	35
3.1.4 Indicateurs du rendement	35
3.2 Expérimentation n°1, cycle 2 : Résultats.....	37
3.2.1 Indicateurs de la croissance végétative.....	37

3.2.2	Indicateurs de la santé des plantes.....	37
3.2.3	Indicateurs du rendement	39
3.3	Expérimentation n°2 : Résultats.....	39
3.3.1	Indicateurs de la croissance végétative.....	39
3.3.2	Indicateurs de la santé des plantes.....	41
3.3.3	Indicateurs du rendement	43
4	Analyses et discussion des résultats	43
4.1	Expérimentation n°1, cycle 1	43
4.2	Expérimentation n°1, cycle 2	45
4.3	Expérimentation n°1 : Analyse croisée des cycles 1 et 2	45
4.3.1	Comparaison du cycle 1 et 2	45
4.3.2	Critique du dispositif expérimental	47
4.4	Expérimentation n°2.....	47
4.5	Discussion autour des conditions d'expérimentation	49
4.5.1	Hétérogénéité du terrain	49
4.5.2	Les contraintes expérimentales : constats et perspectives	49
5	Conclusions et perspectives.....	51
	Références bibliographiques	53
	Annexe I : Résumé du mémoire en anglais – Report summary	1
	Annexe II : Analyses laboratoire de la méthode BRDA-Hérody	7
	Annexe III : Liste des paramètres évalués.....	8
	Annexe IV : Résultats des analyses NOVACROP Laitues cycle 2.....	9

LISTE DES ABREVIATIONS

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ACEPT-MAB : Adaptation, Caractérisation, Evaluation Paysanne et Transfert de la technologie des Microorganismes Autochtones Bénéfiques pour l'autonomisation et l'écologisation des exploitations familiales

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

EM : Efficient Microorganisms

Traduit de l'anglais : Microorganismes Efficaces

EMRO : EM Research Organization

EF : Extrait Fermenté

FiBL : Forschungsinstitut für Biologischen Landbau

Traduit de l'Allemand : Institut de Recherche en Agriculture Biologique

GAB : Groupement des Agriculteurs Biologiques

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

JICA : Japan International Cooperation Agency

Traduit de l'anglais : Agence Japonaise de Coopération Internationale

LiFoFer : Litière Forestière Fermentée

MAB : Microorganismes Autochtones Bénéfiques

MM : Microorganismos de Montañas

Traduit de l'espagnol : Microorganismes de Montagne

NF : Norme Française

PBI : Plantes Bio-Indicatrices

PNPP : Préparation Naturelle Peu Préoccupante

FG : Facteur de Germination

RFCP : Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes,

En anglais PGPR : Plant Growth Promotion Rhizobacteria

SB : Substance de Base

SNUB : Substance Naturelle à Usage Biostimulant

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Résumé du mémoire en anglais – Report summary.....	1
Annexe II : Analyses laboratoire de la méthode BRDA-Hérody.....	7
Annexe III : Liste des paramètres évalués.....	8
Annexe IV : Résultats des analyses NOVACROP Laitues cycle 2.....	9

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Schématisation des relations entre les différents acteurs du projet LiFoFer initié par Terre & Humanisme.....	2
Figure 2: Exemple de composition pondérale d'un horizon organique de sol de prairie tempérée (Bachelier, 1978).....	4
Figure 3: Frise chronologique de l'histoire du développement des produits artisanaux à base de microorganismes depuis le Costa Rica jusqu'à Terre & Humanisme	12
Figure 4: Localisation et vue satellite de la parcelle d'essai pour l'expérimentation n°1	16
Figure 5: Géologie simplifiée du bassin versant du Chassezac (Syndicat du Chassezac, 2015).....	16
Figure 6: Processus de fabrication de la LiFoFer solide (photographies : C.Denis)	18
Figure 7: Matériel utilisé pour la fabrication de la LiFoFer liquide (photographies : C.Denis).....	18
Figure 8: Interventions culturelles au cours du cycle 1 de l'expérimentation n°1	20
Figure 9: Interventions culturelles au cours du cycle 2 de l'expérimentation n°1	20
Figure 10: Design expérimental de l'expérimentation n°1	20
Figure 11: Interventions culturelles au cours de l'expérimentation n°2	28
Figure 12: Tableau de l'inventaire des plantes bio-indicatrices réalisé à T0 sur la parcelle d'expérimentation n°1.....	30
Figure 13: Schéma des placettes ayant des caractéristiques de sol positives (en vert) et négatives (en rouge)	32
Figure 14: Moyennes de la biomasse racinaire des laitues du cycle 1 en fonction des modalités	32
Figure 15: Moyennes de la longueur racinaire des laitues du cycle 1 en fonction des modalités	32
Figure 16: Diamètre moyen (cm) des laitues en fonction des modalités et des dates de mesure, cycle 1	32
Figure 17: Diamètre au collet moyen (cm) par modalité et par date de mesure.....	34
Figure 18: Taux de Brix moyen (°B) par modalité.....	34
Figure 19: Nombre de laitue cumulé par modalité et par niveau d'attaque de limace sur la période du 28/04 au 21/05	34
Figure 21: Biomasse fraîche moyenne (g) en fonction des modalités.....	34
Figure 20: Biomasse sèche moyenne (g) en fonction des modalités	34
Figure 22: Diamètre moyen des laitues à la récolte (cm) par modalité et valeur moyenne (droite orange).....	36
Figure 23: Taux de Brix moyen (°B) par modalité et moyenne globale (droite orange).....	36
Figure 24: Analyse des nutriments contenus dans la sève des laitues (cycle 2), principaux résultats ..	36
Figure 25: Biomasse fraîche moyenne (g) par modalité des laitues cycle 2 à la récolte	38
Figure 26: Perte de biomasse fraîche à la récolte (% de la biomasse initiale) par modalité.....	38
Figure 27: Biomasse racinaire sèche moyenne (g) des tomates par modalité après récoltes	38
Figure 28: Suivi de la hauteur de plant des pieds de tomate (cm) en fonction du temps	40
Figure 29: Facteur de croissance des pieds de tomate calculé par modalité	40
Figure 30: Croissance (cm) des pieds de tomates entre deux périodes de mesure	40
Figure 31: Photographie d'un puceron aptère sur pied de tomate (photographie : C.Denis).....	40
Figure 32: Nombre moyen de pied de tomate attaqué par les pucerons par modalité.....	40
Figure 33: Nombre de pucerons moyen par pied de tomate par modalité.....	40
Figure 34: Taux de Brix moyen des tomates (°B) par modalité et par récolte	42
Figure 35: Poids moyen (g) récolté par pied de tomate par modalité pour les différentes récoltes	42
Figure 36 : Photographies des laitues du cycle 2 de la modalité EF, répétition 1, illustrant les disparités de stade de développement au sein d'une même placette expérimentale	44
Figure 37: Relevés des températures minimales et maximales au cours de l'expérimentation sur tomate	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Types de cultures, microorganismes et marchés agricoles des produits à base de microorganismes	10
Tableau 2: Tableau récapitulatif des recherches menées et résultats obtenus sur les LiFoFers par les partenaires du projet	14
Tableau 3: Proportions des éléments nécessaires à la fabrication de la LiFoFer	18
Tableau 4: Présentation des modalités et de leurs différents modes d'application, expérimentation n°1 sur laitues, cycle 1 et 2	22
Tableau 5: Coefficient associé au pourcentage de couverture de la surface du sol d'une plante bio-indicatrice	22
Tableau 6: Facteurs de levée de dormance et manifestation du caractère indicateur	24
Tableau 7: Echelle d'attaque des limaces en fonction du pourcentage de surface foliaire détruit par le ravageur	26
Tableau 8: Présentation des modalités et de leurs différents modes d'application, expérimentation n°2 sur tomates.....	28
Tableau 9: Récapitulatif des données de rendement sur tomates	42

AVANT-PROPOS

Ce stage a été réalisé au sein de l'association Terre & Humanisme, ci-après « T&H », une association loi 1901 créée en 1994. Son objectif depuis 25 ans est l'accompagnement et le soutien de la transition agroécologique via la sensibilisation du grand public et des acteurs de l'agriculture paysanne. Le siège de l'association ainsi que le jardin pédagogique sont localisés en région Auvergne-Rhône-Alpes, en Ardèche (07) sur la commune de Lablachère.

L'association regroupe au total 20 salariés. Depuis 2014, la gouvernance de l'association est horizontale, aussi appelée « gouvernance partagée », avec la mise en place de différents organes de gouvernance se substituant à une direction classique. L'équipe salariée et le conseil d'administration sont fortement responsabilisés et impliqués dans ce mode de gouvernance. L'association est structurée en 3 pôles principaux :

- (i) Le pôle Conseil et Formation traite les expertises réalisées par l'association, les stages (courts et longs) et la boutique de l'association.
- (ii) Le pôle Supports est chargé de la communication, la recherche de fonds ainsi que la gestion des activités administratives financières, juridiques et les ressources humaines.
- (iii) Le pôle projet développe les actions de sensibilisation, de transmission, de solidarité, en France et à l'internationale, et les expérimentations dans lesquelles s'inscrivent ce mémoire.



INTRODUCTION

Pour répondre à l'augmentation de la demande en denrées alimentaires, liée à la croissance de la population mondiale, il est nécessaire d'améliorer l'impact environnemental de la production agricole. Pour cela, l'un des défis majeurs actuels est de mettre en œuvre une agriculture durable et saine pour l'environnement tout en maintenant les volumes produits. Les méthodes actuelles de production agricole, tels que l'utilisation inappropriée de pesticides et d'engrais chimiques, créent des problèmes environnementaux et sanitaires (Gunnell et al. 2007 ; Leach, Mumford 2008). Le développement de nouveaux cultivars a permis une résistance accrue aux maladies, une plus grande tolérance à la sécheresse et au sel, et une meilleure valeur nutritionnelle. Malheureusement, l'interaction bénéfique entre les plantes et les microorganismes a souvent été ignorée dans les stratégies de sélection. Aujourd'hui, certaines souches de microorganismes sont utilisées et reconnues pour lutter contre les pathogènes, stimuler la croissance des plantes, comme les bactéries du genre *Azospirillum* ou *Rhizobium* (Berg 2009). Il est primordial de considérer les échanges continuels de ces organismes avec d'autres, parmi lesquels : bactéries, champignons, virus, protozoaires, etc. La complexité des phénomènes ayant lieu dans le sol et dans/avec les plantes, conduit la recherche à prendre en considération le réseau d'interactions (communications, antagonismes, interactions trophiques de type symbiose, commensalisme, parasitisme...) dont les microorganismes font partie ; on parle alors d'holobionte, dans lequel le « microbiote » (ensemble des microorganismes) est un élément essentiel (Vandenkoornhuyse et al. 2015 ; Bordenstein, Theis 2015). Ces considérations sont de première importance pour l'agriculture, dans la mesure où les microbes présents dans la phyllo- et la rhizosphère remplissent des fonctions cruciales pour la nutrition des plantes et leur protection contre les pathogènes (Raaijmakers et al. 2009). Certains agriculteurs mettent à profit depuis longtemps ces microorganismes *via* l'utilisation de préparations fermentées, et plus récemment de préparations commerciales spécialisées, parmi lesquelles les « Microorganismes Efficaces » du Pr. Teruo Higa (Higa, Parr 1994 ; Faessel 2014 ; Parnell et al. 2016). Ces Microorganismes Efficaces (EM) font l'objet d'une littérature abondante, mais souvent partielle et de qualité insuffisante – si bien que la question de leur utilité réelle reste un sujet de controverses (Golec et al. 2013 ; Olle, Williams 2013). Cette préparation a ensuite été adaptée au Costa Rica grâce à une étroite collaboration entre paysans et chercheurs et est appelée « microorganismes de montagnes » (Felix 2015 ; Tencio 2014). Héritière de cette adaptation, la Litière Forestière Fermentée, ci-après « LiFoFer », est une préparation à base de litière forestière, fermentée en conditions micro-aérobie en présence de mélasse, de son de céréales, et de petit-lait (Felix 2015). La LiFoFer présenterait deux principales spécificités : sa provenance locale et la grande diversité des souches microbiennes présentes, lesquelles permettent potentiellement de respecter, rétablir et soutenir l'équilibre naturel des agrosystèmes ciblés tout en augmentant l'accessibilité technique et financière de sa confection. Des préparations de LiFoFer sont à l'étude en conditions sahéliennes (projet « ACEPT-MAB » mené par le CIRAD) et en France visant sa caractérisation physico-chimique et microbiologique (P. Christen, IRD) et l'évaluation de ses impacts sur les cultures maraîchères (GABs).

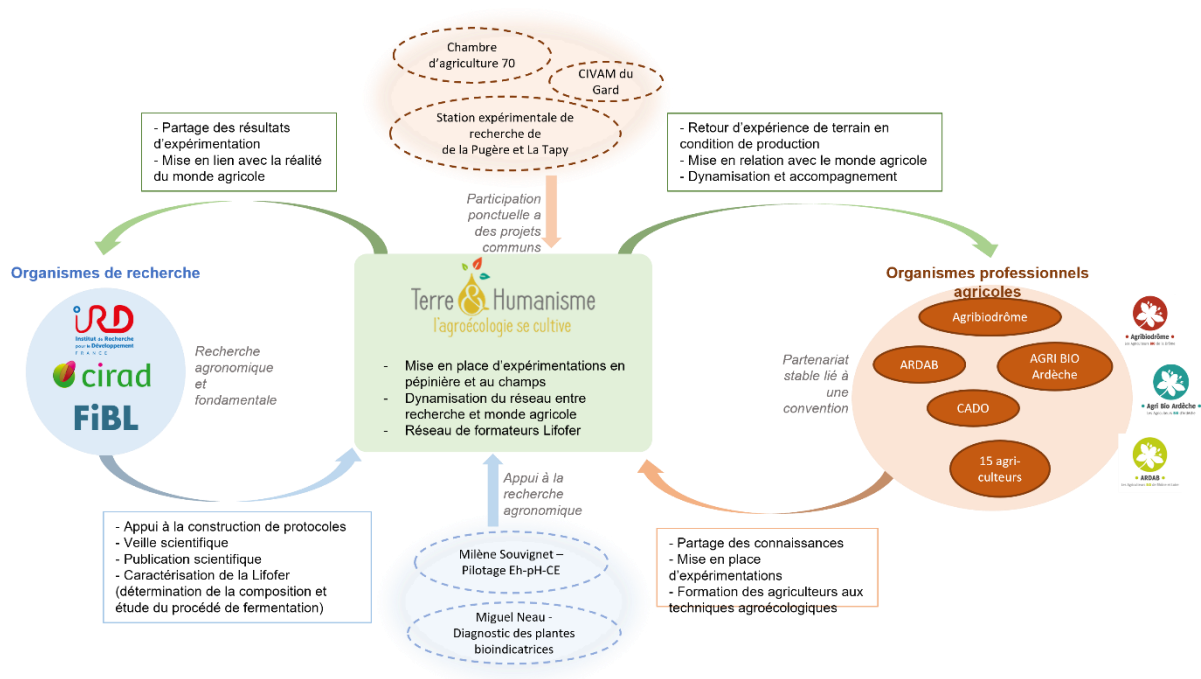


Figure 1: Schématisation des relations entre les différents acteurs du projet LiFoFer initié par Terre & Humanisme

Figure 1: Diagram of the relations between the different actors of the LiFoFer project initiated by Terre & Humanisme

De ce contexte a émergé la nécessité d'une évaluation scientifique de l'efficacité de la LiFoFer en conditions tempérées, sur les productions maraichères, viticoles et fruitières, avec un focus spécifique sur ses impacts sur la fertilité des sols et sur la santé des cultures. Dans une démarche de recherche-action participative, et tel que présenté sur la Figure 1, Terre & Humanisme, le FiBL France, le CIRAD, l'IRD et les groupements d'agriculteurs biologiques de quatre départements collaborent pour mieux comprendre son action et, le cas échéant, optimiser son efficacité, crédibiliser, capitaliser et diffuser de nouveaux savoir-faire au service d'une agriculture agroécologique. Des observations préliminaires tendent à corroborer l'hypothèse d'une action bénéfique de la LiFoFer sur la biodisponibilité des nutriments, le recyclage de la matière organique, et la résistance des plantes vis-à-vis d'agents pathogènes.

Ainsi, ces résultats et la concertation des acteurs de ce projet de recherche participative sont à l'origine du choix de la problématique de ce mémoire : **Compte-tenu de sa complexité et du peu de connaissances acquises, comment évaluer les différents effets de la LiFoFer dans une démarche expérimentale au plus proche des conditions de production maraichères biologiques ?**

Pour cela, deux expérimentations sont mises en place :

- Expérimentation n°1 : Effet de l'utilisation de la LiFoFer comparée à d'autres bioproducts sur une culture de laitue de plein champ (*Lactuca sativa*)
- Expérimentation n°2 : Effet de l'utilisation de la LiFoFer comparée à d'autres bioproducts sur une culture de tomates en pots (*Solanum lycopersicum*)

Le présent rapport présente un état des lieux des connaissances acquises sur les microorganismes en agriculture, ainsi que le contexte dans lequel est née cette étude. Une synthèse des résultats est ensuite présentée puis discutée. Enfin, des propositions d'amélioration et des perspectives sont proposées pour la continuité de ce projet.

1 ETAT DE L'ART : GENERALITES SUR LES MICROORGANISMES, LEURS EFFETS SUR LES SOLS ET LES PLANTES ET LEUR UTILISATION EN AGRICULTURE

Le sol est un écosystème complexe généralement décrit par 3 composantes principales : la composante physique, la composante chimique et la composante biologique. Depuis les années 60 il est acquis qu'il est nécessaire de comprendre ces trois composantes et leurs synergies ou antagonismes pour en étudier l'une d'elles (Burgess, Raw 1967). La composante biologique a été négligée alors qu'il est essentiel de la prendre en compte. En effet, les organismes biologiques tels que les microorganismes interviennent dans de nombreux processus essentiels de la pédosphère (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. 2008).

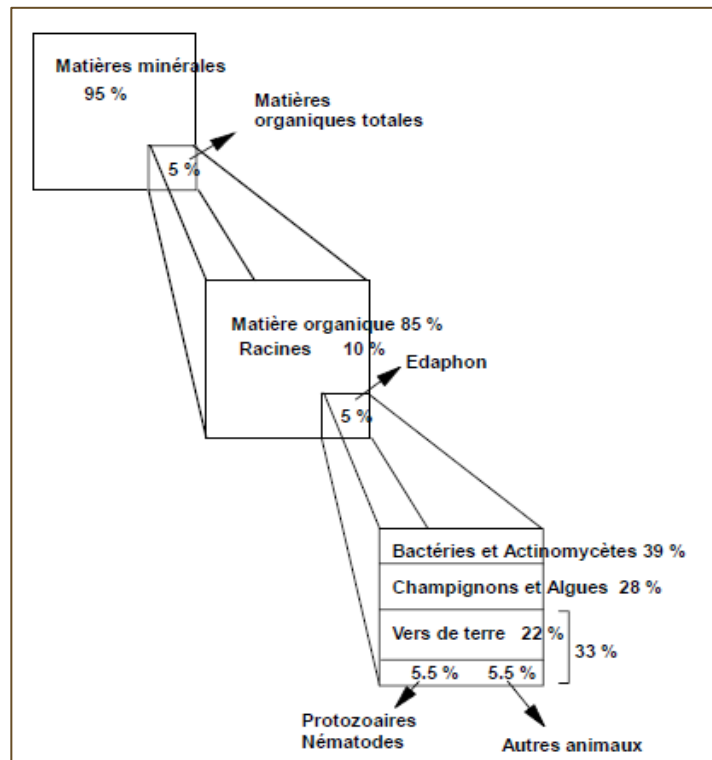


Figure 2: Exemple de composition pondérale d'un horizon organique de sol de prairie tempérée (Bachelier, 1978)

Figure 2: Example of the weight composition of an organic horizon of a temperate grassland soil (Bachelier, 1978)

1.1 IMPORTANCE ET COMPLEXITE DES MICROORGANISMES DANS LEURS INTERACTIONS AVEC LE SOL ET LES PLANTES

En moyenne, en prairie permanente, 1m² de sol compte 260 millions d'êtres vivants, soit une biomasse de 1,5 t.ha⁻¹ (Gobat et al. 2003). La biologie du sol comprend, outre les racines des plantes et l'édaphon, les interactions et processus qui ont lieu dans le sol. Sur la Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont représentés les principaux groupes d'êtres vivants présents dans le premier horizon du sol : les bactéries, les champignons, les actinomycètes, les algues, les protozoaires, les nématodes, les enchytraéidés, les lombricidés, les arthropodes, les acariens, les collemboles et les mollusques (Bachelier 1978). En agriculture, la fertilité du sol est un élément clé pour garantir la production alimentaire. C'est l'élément microbiologique, la riche diversité d'organismes tels que les bactéries, les virus, les champignons et les algues qui forment les communautés microbiennes interactives, qui est le plus complexe et, paradoxalement, le moins bien compris (Johns 2015). Outre leur importance quantitative notable : près de 10¹¹ individus/m² (Pérès 2003), ce sont les principaux moteurs de processus écologiques essentiels (Johns 2015).

Quels sont les lieux privilégiés des interactions incluant les microorganismes ?

Les échanges entre plantes et microorganismes se produisent majoritairement dans la rhizosphère. Ce terme introduit par Hiltner (1904) désigne « le sol qui est influencé par les racines (vivantes) ». Le carbone (C) est très important pour son fonctionnement (Jeffery et al. 2010) et 5 à 21% du carbone fixé par la photosynthèse est transporté à la rhizosphère via les exsudats racinaires (Marschner 2011).

La partie aérienne des plantes terrestres, aussi appelée phyllosphère, est également l'hôte de vastes communautés microbiennes très complexes, mais reste peu étudiée (Vorholt 2012). La phyllosphère comprend les feuilles, les fleurs, les fruits, les bourgeons et les tiges. Les microorganismes qui colonisent ces surfaces, à l'extérieur ou à l'intérieur, forment collectivement le microbiome de la phyllosphère et sont appelés épiphytes (Shakir et al. 2021). Plusieurs résultats de recherches indiquent que le microbiome de la phyllosphère a joué un rôle important dans la croissance et la santé des cultures en régulant les processus physiologiques des plantes dans des conditions environnementales en constante évolution (Pandiyani et al. 2021). Elles peuvent y modifier leur environnement mais peuvent aussi interagir entre elles sur la surface de la feuille (Lindow, Brandl 2003).

Ainsi, le sol et les plantes regorgent d'une multitude de microorganismes. Les principaux acteurs sont décrits dans les parties suivantes.

1.1.1 Les principaux microorganismes acteurs des interactions plante-sol-microorganisme

1.1.1.1 Les bactéries photosynthétiques

Les bactéries photosynthétiques sont des organismes que l'on peut retrouver dans les sols humides et boueux mais aussi dans des mares, fossés, lacs, etc (Pfennig 1967). Ces bactéries métabolisent certaines molécules toxiques dans le sol telles que le sulfure d'hydrogène et sont ainsi étudiées pour leurs propriétés détoxifiantes. Elles sont aussi capables de fixer l'azote (N) sous différentes conditions. Les bactéries photosynthétiques contribuent ainsi de manières diverses à la fertilité du sol et à l'amélioration des conditions de croissance des plantes (Kobayashi, Haque 1971 ; Wang et al. 2021).

1.1.1.2 Les bactéries fixatrices d'azote

Les bactéries fixatrices d'azote sont des bactéries qui convertissent l'azote atmosphérique N₂ en azote assimilable par les plantes. Elles sont regroupées en plusieurs groupes : les bactéries libres (*Azotobacter* et *Azospirillum*), les cyanobactéries et les symbiotes comme *Rhizobium* (Bhat et al. 2015). Ces bactéries fixatrices d'azote de nature symbiotique peuvent fixer une dose d'azote entre 50 et 100 kg/ ha. Elles colonisent les racines de fabacées spécifiques pour former des nodules racinaires, qui agissent en symbiose en produisant de l'ammoniac en échange des exsudats racinaires produits par la plante (Bhat et al. 2015 ; Peix et al. 2015).

1.1.1.3 Les bactéries lactiques

Les *Lactobacillus* sont depuis longtemps connus comme des bactéries centrales pour une agriculture holistique et écologique : non seulement ce genre de bactéries se trouvent partout et sont faciles à cultiver avec peu de moyens, mais aussi, elles présentent la capacité de préserver et même d'améliorer la qualité nutritionnelle des produits cultivés. Elles jouent également un rôle de biocontrôle, d'amélioration des conditions du sol et de stimulation de la croissance des plantes (Lamont et al. 2017).

1.1.1.4 Les actinomycètes

Les actinomycètes sont des organismes ayant à la fois des caractéristiques typiques des bactéries et des champignons, mais sont néanmoins classés dans le règne des bactéries (Das et al. 2008). Ce sont des bactéries filamenteuses à Gram positif, anaérobies facultatifs, possédant un hyphes aérien. Elles sont présentes dans de nombreux milieux, notamment le sol, particulièrement dans les sols alcalins secs. Les actinomycètes, de par leur cycle de vie unique parmi les procaryotes, semblent jouer un rôle vital dans le cycle de la matière organique dans l'écosystème du sol (Bhatti et al. 2017). Ces organismes sont connus surtout pour leur production de métabolites secondaires ayant des propriétés antibiotiques et antivirales. Outre ces usages pharmaceutiques, ils ont la capacité d'inhiber le développement de certains phytopathogènes (Jeffrey et al. 2007).

1.1.1.5 Les champignons

Les champignons ont des rôles essentiels dans le fonctionnement biologique et physique du sol (Ritz, Young 2004). Ils jouent un rôle important dans la structure du sol via des mécanismes de charge et d'adhésion. Ils peuvent modifier la structure du sol via la décomposition de la matière organique, et comptent parmi les seuls décomposeurs du bois par exemple, grâce à la sécrétion d'enzymes extérieures (Jeffery et al. 2010). Les champignons comprennent aussi les mycorhizes qui sont primordiales dans les cycles du carbone, de l'azote et du phosphore (P). Elles se divisent en 2 groupes : le groupe le plus abondant, les mycorhizes à arbuscules, est efficace pour l'absorption du phosphore inorganique. Les champignons ecto-mycorhiziens, moins courants, sont capables d'absorber des composés azotés organiques qui peuvent être assimilés par la plante hôte (Aerts 2003).

1.1.1.6 Des champignons particuliers : les levures

Les champignons unicellulaires sont appelés « levures ». Distribués dans les dix premiers centimètres du sol, ils participent à de nombreux processus du sol et interagissant avec les plantes. Ils prennent part à la minéralisation grâce à leur capacité à dégrader les matériaux ligneux (Botha 2011).

Les levures permettent de structurer le sol, en particulier les genres *Cryptococcus* et *Lipomyces*, qui sont capables de produire des composés extracellulaires qui lient les particules du sol entre elles (Lynch, Bragg 1985). D'après la littérature, elles pourraient être utilisées comme agents de biocontrôle des champignons phytopathogènes du sol et comme facteurs de croissance des plantes (El-Tarabily, Sivasithamparam 2006 ; Arras et al. 1998 ; Mukherjee et al. 2020).

Aujourd'hui, de plus en plus de travaux sont menés afin de mobiliser la diversité des microorganismes au service d'une agriculture exempte de produits chimiques. Certains microorganismes sont déjà reconnus et utilisés pour promouvoir la croissance des plantes et leur développement en condition de stress (Ahemad, Kibret 2014). Beaucoup d'industries agrochimiques produisent désormais des biopesticides ou biofertilisants, notamment pour les agriculteurs en conduite biologiques (Garmendia et al. 2018).

1.2 LES DIFFERENTES FORMES D'UTILISATION DES MICROORGANISMES EN AGRICULTURE

1.2.1 Concepts scientifiques et préparations existantes dans le commerce

Des engrais organiques constitués d'un consortium de microorganismes sont déjà disponibles dans le commerce. Il est difficile de trouver des informations sur l'usage de ces produits car ils sont désignés par des terminologies différentes selon la région du monde (Rani, Kumar 2019).

Dans la littérature scientifique, les microorganismes les plus étudiés sont ceux faisant partie des Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes (RFCP, ou PGPR en anglais). Les RFCP comprennent les genres *Azotobacter*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* et *Rhizobia*. L'utilisation de mycorhizes arbusculaires en tant que biofertilisant est également répandue et concerne 80% des plantes pouvant s'associer avec elles (Islam 2018). Certaines sont ainsi largement utilisées, mais les RFCP sont spécifiques de l'hôte et ne prennent pas en compte toute la diversité des microorganismes ayant un effet bénéfique sur la qualité du sol et indirectement sur les plantes (Rani, Kumar 2019).

1.2.1.1 Un exemple de préparation commerciale, les Microorganismes efficaces

Ce concept a été développé tout d'abord au Japon par le Dr Teruo Higa, professeur d'horticulture à l'université des Ryukyus, à Okinawa. Les EM sont d'abord à usage agricole et se composent de plusieurs microorganismes, supposés bénéfiques et présents naturellement dans le sol. Ils sont utilisés comme inoculant pour leur propriétés de fixateur d'azote, accélérateur de croissance, équilibrant et améliorant de la structure des sols (Higa, Wididana 1991 ; Higa, Parr 1994). Les EM sont majoritairement constitués de bactéries lactiques et de levures, et en moindre quantité de bactéries photosynthétiques, d'actinomycètes et d'autres types de microorganismes (Higa, Parr 1994). Cette solution est vendue sous la marque « EM® » et la technologie appartient à la société EMRO (EM Research Organisation).

1.2.1.2 Utilisation de microorganismes en agricultures : les controverses

De nombreux articles présentent leurs résultats quant à l'application, au sol ou foliaire, de préparations à base de microorganismes.

Tableau 1: Types de cultures, microorganismes et marchés agricoles des produits à base de microorganismes

Table 1: Crop types, microbes and agricultural market for bioinoculants

Type de Marché	Mode d'application	Type microbien	Type de culture	Zone géographique concernée
Agent de biocontrôle	Inoculation des graines	Bactéries : Rhizobia Fixatrices de N ₂ Solubilisation du P Cyanobactéries Autres	Céréales et grains	Amérique du Nord : Etats-Unis, Canada, Mexique et autres pays du Nord
Stimulation de la défense des plantes	Inoculation du sol	Champignons : <i>Trichoderma sp.</i> , Mycorhize arbusculaire, <i>Aspergillus</i>	Oléagineux et Fabacées	Europe : Allemagne, France, Espagne, Italie, Danemark, et autres pays européens
Stimulation de la croissance des plantes	Application foliaire	Autres : Azolla-Anabaena	Fruits et légumes	Asie pacifique : Australie, Chine, Inde, Japon, et autres
Gestion du stress des plantes	Autre		Autre types de cultures	Amérique du Sud : Brésil, Chili, Argentine, et autres pays d'Amérique Latine, pays de Moyen-Orient et pays d'Afrique

Toutefois, l'utilisation de microorganismes en agriculture reçoit un accueil mitigé de la part de la communauté scientifique, des agriculteurs et des fabricants de solutions de biocontrôle. En effet, si les technologies microbiennes ont été appliquées à divers problèmes agricoles et environnementaux avec un succès apparent ces dernières années et sont généralement bien acceptées par les agriculteurs, elles n'ont pas été largement acceptées par la communauté scientifique car il est souvent difficile de reproduire de manière cohérente leurs effets bénéfiques (Singh et al. 2011). D'après la revue de Golec (2013) de la méthode d'inoculation des microorganismes bénéfiques, ce n'est pas une technique scientifiquement valide. L'article avance que la majorité des articles sont publiés dans des journaux bas impacts et que les designs expérimentaux ne sont pas assez bien réalisés. Il ajoute que certains arguments écologiques sont en opposition avec le concept des microorganismes bénéfiques : les quantités apportées sont trop faibles pour modifier le microbiote du sol (Golec et al. 2013).

1.2.2 Les alternatives : préparations agricoles artisanales à base de microorganismes

1.2.2.1 Le marché des produits à base de microorganismes

Le marché le plus avancé pour ces préparations est le marché européen des biofertilisants à un taux de croissance annuel de 12,3% de 2012 à 2017 (Rani, Kumar 2019). Le Tableau 1 illustre les types de microbes, les principales cultures et les régions du monde utilisant des produits à base de microorganismes. Les produits phytosanitaires biologiques se caractérisent par des taux de rentabilité élevés, environ 6 fois plus que les produits chimiques (Nazranov et al. 2021). Bien que certains agriculteurs travaillent avec les microorganismes depuis longtemps, avec des préparations artisanales comme le Bokashi¹ ou le thé de compost², les grandes industries se saisissent du concept des produits à base de microorganismes (Parnell et al. 2016). Ce coût important pousse certains acteurs du monde agricole à développer des alternatives à ces produits onéreux.

1.2.2.2 Les préparations à base de plantes : exemple du purin d'ortie

En France, certaines préparations sont bien connues des agriculteurs biologiques. De nombreuses études de botanique mettent en avant l'utilisation de purin d'ortie (*Urtica dioica*) en tant que fertilisant (Garmendia et al. 2018). Les agriculteurs peuvent le produire ou désormais l'acheter. En France, l'arrêté du 18 avril 2011 autorise la mise sur le marché du purin d'ortie en tant que Préparation Naturelle Peu Préoccupante (PNPP) et publie en même temps le protocole de sa préparation (Legifrance). Au niveau européen, les entreprises doivent suivre le règlement No. 1107/2009. Ainsi, le purin d'ortie est couramment utilisé en agriculture biologique et a un impact économique croissant. Les effets généraux sont les suivants : engrais foliaire, stimulateur de croissance, lutte contre la chlorose ferrique, prévention des parasites et des maladies, et répulsifs pour les insectes (Garmendia et al. 2018 ; Bozsik 1996).

1.2.3 Une alternative aux préparations commerciales : la Litière Forestière Fermentée

La Litière forestière fermentée est une alternative artisanale aux microorganismes efficaces du

¹ Le Bokashi est un matériau organique similaire à un compost inoculé avec des microorganismes. Il est utilisé en agriculture car il apporte matière organique et microorganismes aux plantes et au sol (Quiroz, Céspedes 2019).

² Le thé de compost est une méthode de fermentation aérobie de compost dans l'eau, afin d'en multiplier les microorganismes. Il est utilisé pour des propriétés de biocontrôle et de fertilisation (Scheuerell, Mahaffee 2002).



Figure 3: Frise chronologique de l'histoire du développement des produits artisanaux à base de microorganismes depuis le Costa Rica jusqu'à Terre & Humanisme

Figure 3: Timeline of the development of microorganism-based artisanal products from Costa Rica to Terre et Humanisme

Commerce et est utilisée pour les mêmes raisons. Sa préparation consiste mettre en fermentation de la litière forestière avec du lactosérum et des sources de sucres (mélasse de canne à sucre par exemple).

1.2.3.1 Historique : une préparation paysanne héritière d'une technologie de laboratoire

La Figure 3 ci-contre reprend les éléments principaux constituant l'historique de l'apparition de la LiFoFer en France. Les EM tels que développés par Higa dans les années 1980 deviennent monnaie courante d'abord en Asie. En 1988, la technique est transmise au Costa-Rica à l'aide d'un agronome japonais travaillant pour la Japan International Cooperation Agency (JICA). Avec les agriculteurs du groupement biologique « Asociación de Productores Orgánicos de Alfaro Ruiz » (APODAR), il développe une méthode artisanale de fabrication d'un produit similaire aux EM. Cette préparation est alors appelée « Microorganismos de montañas » (MM, traduit de l'espagnol : Microorganismes de Montagne) (Tencio 2014). Au milieu des années 2000, grâce au mouvement d'agriculture biologique costaricien, la technologie est introduite à Cuba. La station d'expérimentation India Hatuey se saisit de la méthode et continue à la développer sous le nom IHPLUS®. Cette méthode est aujourd'hui largement utilisée par les agriculteurs cubains. En 2015, Dorian Felix, ingénieur agronome, après 1 an passé à Cuba pour le compte de l'association T&H, rapporte cette méthode de préparation. La recette est depuis modifiée pour qu'elle soit adaptée aux conditions tempérées (Felix 2015).

1.2.3.2 Cadre législatif actuel et perspectives réglementaires

En agriculture, la législation française distingue les produits fertilisants, biostimulants, les produits de protection des cultures (pharmaceutiques ou de biocontrôle) et les produits à usage vétérinaire. Classiquement, les produits commercialisés doivent bénéficier d'une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) qui garantit la composition du produit (non variable), sa non-toxicité et ses effets. Mais certains produits sont autorisés grâce à d'autres dispositifs réglementaires tels que les Normes Françaises (NF) ou les normes européennes avec le marquage « CE ». Le processus d'AMM, long et coûteux ne convient à priori pas à la LiFoFer qui est un produit artisanal, différent entre chaque lot, ce qui en fait son intérêt (adaptation ciblée au pédoclimat). La commercialisation de LiFoFer n'est donc pas autorisée à ce jour et ne fait pas non plus partie des substances utilisables en agriculture biologique. Dans le cadre législatif, la LiFoFer pourrait rentrer dans la définition de différentes préparations artisanales, par ses potentiels fertilisants, biostimulants, phytopharmaceutiques ou ses effets de biocontrôle, sans correspondre pleinement à l'une des définitions en vigueur.

Elle pourrait s'apparenter aux engrais organiques sous la norme NF U42-001 qui ne nécessitent pas d'AMM. Stimulant la vie du sol, la LiFoFer est proche des biostimulants, toutefois ceux-ci sont strictement encadrés par des AMM. La régulation de certaines maladies par la LiFoFer pourrait lui faire intégrer la liste des produits de biocontrôle mise à jour par le ministère de l'agriculture. Elle pourrait faire partie des Substances de Base (SB) mais les feuilles, utilisées dans le procédé de fabrication de la LiFoFer, ne font pas explicitement partie de cette catégorie pour le moment. Elle pourrait faire partie de la catégorie des Substances Naturelles à Usage Biotimulant (SNUB) sur la base de ses composants initiaux. Enfin, la LiFoFer pourrait être reconnue comme Préparation Naturelle Peu Préoccupante (PNPP) à condition que l'ensemble de ses ingrédients soit reconnu comme SNUB ou SB.

Tableau 2: Tableau récapitulatif des recherches menées et résultats obtenus sur les LiFoFers par les partenaires du projet

Table 2: Summary table of research conducted and results obtained on LiFoFers by the project partners

Intitulé du projet	Résultats et conclusions	Date	Organi- sme(s) d'accueil
Analyses microbiologiques de la litière fermentée par séquençage	<ul style="list-style-type: none"> - 91% de la communauté bactérienne est constituée de <i>Lactobacillus</i> - 7,8% de proteobacteria dont en majorité des rhizobiales (symbiontes et fixatrices d'azote) - 2,8% de gamma-protéobactéries 		Universit é de Rennes 1
Compostage de fumier avec Litière Forestière Fermentée	Pas de différence significative observée	2020	Agribio- drôme
Influence de l'O ₂ sur la fermentation de litière forestière, en vue de la production d'un biofertilisant. Caractérisation biochimique et microbiologique du produit	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation de la matière organique inversement proportionnelle à la quantité d'O₂ présente dans la LiFoFer liquide - Intérêt de travailler en micro-aérophile (2% d'O₂) pour favoriser la dégradation de MO tout en inhibant la croissance de microorganismes pathogènes 	2019	IMBE
Etude physico-chimique et biologique d'un biofertilisant à base de litière forestière fermentée	<ul style="list-style-type: none"> - 10⁷ UFC/ml de bactéries lactiques - 10⁶ UFC/ml de bactéries anaérobies - présence de bactéries mésophiles, champignons et levures - Pas de microorganismes pathogènes détectés - Diminution du pH au cours du temps - La LiFoFer favorise la biomasse microbienne active du sol en conditions contrôlées 	2019	IMBE et IRD
Validation scientifique des effets de la Litière Forestière Fermentée sur des élevages agro-écologiques au centre Ouest du Burkina Faso. Cas des poules locales et des moutons dans la ferme agro-écologique de Réo	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisation de LiFoFer améliore la santé et la résistance des animaux face aux maladies - Ponte d'œufs plus gros 	2019	CIRAD, T&H, EEPFIH
Effets de la litière forestière fermentée (lff) sur les paramètres végétatifs et les rendements de <i>sorghum bicolor</i> (sorgho blanc) et de <i>vigna unguiculata</i> (niébé) dans le plateau central du burkina faso	<ul style="list-style-type: none"> - Effet positif de la LiFoFer en début de cycle de culture sur le développement du sorgho - Augmentation des rendements en grain du niébé et du sorgho en association de culture - Réduction de l'influence des thrips sur niébé 	2019	CIRAD, T&H, Univ Ki Zerbo

Depuis 6 ans, l'association T&H, en relation avec de nombreux partenaires du monde agricole et scientifique, mène des essais sur la LiFoFer afin d'explorer ses effets et ses potentiels usages. Un récapitulatif de ces résultats est présenté dans le Tableau 2.

Aux vues de (i) la grande diversité de microorganismes essentiels au fonctionnement du sol, (ii) de la complexité de leurs interactions, (iii) compte tenu du manque de connaissance (iv) et de la non-unanimité de la communauté scientifique au sujet des microorganismes bénéfiques et enfin (v) constatant la variabilité des produits obtenus par le processus de fermentation de litière forestière, l'association T&H met en place ses propres expérimentations pour tester les effets de la LiFoFer. Ce travail bibliographique permet d'émettre des hypothèses de travail qui seront confirmées ou infirmées grâce aux expérimentations mises en place et présentées dans la suite de ce mémoire. Du fait de la nature et de la diversité des microorganismes qu'elle contient :

- La LiFoFer aurait des effets positifs sur le rendement et la croissance des plantes
- Elle posséderait un effet de biocontrôle sur certains pathogènes et ravageurs des cultures
- Du fait de son procédé de fabrication, ses effets seraient comparables aux produits du commerce élaborés à base de microorganismes
- Elle aurait un effet stimulant sur la vie du sol
- La LiFoFer est compatible avec l'utilisation d'autres préparations naturelles utilisées par les agriculteurs telles que le purin d'ortie

2 MATRIELS ET METHODES

2.1 OBJECTIFS DES EXPERIMENTATIONS

Deux expérimentations sont menées en parallèle afin de caractériser les effets de la LiFoFer sur des cultures maraîchères, une au champ et l'autre en pot. Pour répondre aux hypothèses de travail, les objectifs des expérimentations sont les suivants : évaluer l'effet de l'utilisation de la LiFoFer sur le rendement, la croissance et la santé de *Lactuca sativa* (laitue) et *Solanum lycopersicum* (tomate), en comparaison avec un produit à base de microorganisme issu du commerce, avec une préparation de purin d'ortie, et avec une utilisation simultanée de ce même purin d'ortie et de LiFoFer.

L'Expérimentation n°1 sur la laitue est réalisée au champ et se découpe en 2 cycles de culture, appelés respectivement cycle 1 et cycle 2. Ces essais au champ permettent d'évaluer les effets de la LiFoFer en prenant en compte les interactions avec l'environnement, en particulier le sol. La LiFoFer étant à destination des acteurs du monde agricole, il est judicieux de réaliser cette expérimentation dans des conditions au plus proche des leurs.

L'Expérimentation n°2 est réalisée sur une culture de tomates en pots afin de garantir un support de culture homogène et se concentrer sur les effets de la LiFoFer sur la culture.

Ces deux cultures, la laitue et la tomate, sont choisies car elles représentent une part importante du marché en France et en Europe. La tomate est le légume le plus consommé en France. La laitue, en plus d'être un légume du quotidien, possède un cycle de culture relativement court (2 à 4 mois selon la saison) ce qui en fait une culture de choix pour les expérimentations.



Figure 4: Localisation et vue satellite de la parcelle d'essai pour l'expérimentation n°1

Figure 4: Location and satellite view of the test plot for experiment 1

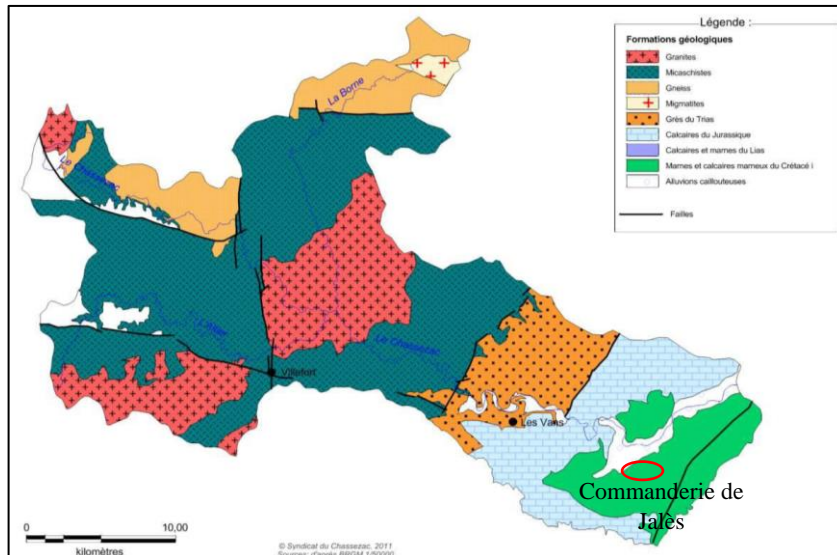


Figure 5: Géologie simplifiée du bassin versant du Chassezac (Syndicat du Chassezac, 2015)

Figure 5 : Simplified geology of the Chassezac catchment area (Syndicat du Chassezac, 2015)

2.2 EXPERIMENTATION N°1 : EFFET DE L'UTILISATION DE LA LiFoFer SUR UNE CULTURE DE LAITUES DE PLEIN CHAMP (LACTUCA SATIVA)

2.2.1 Localisation et historique du site de l'étude

Les expérimentations de plein champ sont localisées en Ardèche (07) à la Commanderie de Jalès située sur la commune de Berrias-et-Casteljau, visible sur la Figure 4. La parcelle utilisée est le site d'anciens potagers datant du XV^{ème} siècle. C'est une parcelle cultivée en une prairie permanente depuis 1978 et amendée en nitrates 1 fois par an en avril, sauf l'année de l'expérimentation. Il n'a pas été possible de connaître précisément la dose à l'hectare apportée sur la parcelle les années précédant l'expérimentation. Elle est fauchée une fois par an avec exportation de la fauche.

2.2.2 Caractéristiques pédoclimatiques

2.2.2.1 Contexte pédologique

L'Ardèche est connue pour abriter une grande diversité de sols. La commune de Berrias-et-Casteljau se situe dans le bassin versant du Chassezac. Comme on peut le voir sur la Figure 5, la géologie du site oscille entre terrain marneux et calcaires gris (Syndicat du Chassezac 2015 ; Préfecture de l'Ardèche 2005). Un diagnostic de sol selon la méthode BRDA-Hérody est réalisé le 22 avril 2021 par Julia Wright, animatrice chez AgribioDrôme, spécialisée dans la fertilisation des sols et chargée du suivi des expérimentations chez les producteurs. Pour réaliser ce diagnostic, un profil de sol est réalisé. En plus des observations de terrain, un ensemble de mesures est réalisé en laboratoire (les analyses de laboratoire sont disponibles en Annexe II). Les observations de terrain permettent de constater que le sol est assez battant et ressuie lentement, dû à la présence de veines marneuses imperméables en profondeur. Les eaux de ruissèlement convergent vers la parcelle, mais la présence de drains datant du XVIII^{ème} siècle permet d'évacuer l'eau à l'extérieur. Le profil de sol présente un sous horizon organique très foncé sur une épaisseur comprise entre 0 et 5cm. La texture du sol est argilo-sableuse. A partir de 30 cm de profondeur, le sol est plus clair avec des rainures de marne grise. La texture y est en effet plus argileuse et plus humide. Globalement, la pierrosité est faible et le sol apparaît dense et compacté avec un faible développement racinaire.

2.2.2.2 Contexte climatique

Le climat du bassin du Chassezac s'apparente au type subméditerranéen. Les températures maximales sont atteintes en juillet et août, les minimales en décembre et janvier (Martin et al. 2003). La pluviométrie annuelle moyenne est comprise entre 1100 et 2100 mm par an avec de fortes pluies au cours des mois d'avril/mai et en automne. La région est également touchée par le phénomène des crues cévenoles ou épisodes cévenols. Leur intensité peut dépasser la moyenne mensuelle en l'espace de 24h (Préfecture de l'Ardèche 2005 ; Martin et al. 2003).

2.2.3 Matériel et dispositif expérimental

2.2.3.1 Matériel

2.2.3.1.1 Fabrication de la LiFoFer

La LiFoFer est fabriquée selon le protocole établi par Terre & Humanisme.



Figure 6: Processus de fabrication de la LiFoFer solide (photographies : C.Denis)

Figure 6: Solid LiFoFer manufacturing process (photographs: C.Denis)

Tableau 3: Proportions des éléments nécessaires à la fabrication de la LiFoFer

Table 3 : Proportions of the elements necessary for the manufacture of LiFoFer

Ingrédients	LiFoFer Solide	Mélasse (sucre)	Eau de source ou de pluie
Quantité pour 60L de préparation	3kg	3kg (1,2kg)	55 à 58L
Quantité pour 10L de préparation	500g	500g (200g)	9 à 9,5L



Cuve en inox pour fermentation de la LiFoFer liquide

Système de régulation de la

Figure 7: Matériel utilisé pour la fabrication de la LiFoFer liquide (photographies : C.Denis)

Figure 7: Materials used for the manufacture of liquid LiFoFer (photographs: C.Denis)

Cela consiste en une première fermentation grâce à laquelle on obtient de la LiFoFer solide puis une deuxième fermentation permettant d'obtenir une solution à diluer avant utilisation sur les cultures.

- Première fermentation : Obtention de la phase solide

Le procédé pour réaliser la première fermentation est illustré Figure 6 et consiste à (1) récolter de la litière forestière géographiquement proche de la parcelle à traiter (mêmes conditions pédoclimatiques). Puis (2) elle est disposée au sol et triée pour enlever les organismes vivants. (3) Le son de blé est ajouté et le tout est mélangé en un tas. (4) Du petit lait de chèvre, source de bactéries lactiques et de la mélasse de canne à sucre biologique, source de carbone facilement assimilable, sont dissouts dans l'eau tiède, puis mélangés au tas de matériaux. Une fois le mélange réalisé, (5) la teneur en eau est ajustée à 35-40%, et le tas est transféré dans un contenant hermétique (6) où il est tassé afin de chasser le maximum d'air. La fermentation dure en tout 1 mois, à une température comprise entre 25°C et 30°C, au cours de laquelle le bidon est régulièrement ouvert pour évacuer le gaz produit.

- Deuxième fermentation : Obtention de la phase liquide

La LiFoFer solide précédemment préparée est mélangée avec de la mélasse de canne à sucre biologique et de l'eau selon les proportions indiquée dans le Tableau 3. La solution est versée dans un contenant hermétique, ici une cuve en inox, avec une bonde pour permettre au gaz produit de s'échapper sans que l'air extérieur ne rentre. La fermentation dure une semaine à une température comprise entre 25°C et 30°C. Pour cela, la cuve est maintenue dans une étuve ce qui permet de maintenir de la température à 25°C minimum (voir Figure 7). Le pH final doit être compris entre 3,5 et 4. C'est cette préparation qui est diluée pour être utilisée sur les cultures. Elle est classiquement diluée à 5% pour être appliquée au sol afin de stimuler la dynamique du sol et appliquée en spray foliaire pour une utilisation en tant que biopesticide. L'apport au sol est effectué une fois par semaine et l'application foliaire une semaine sur trois.

2.2.3.1.2 Fabrication de l'extrait fermenté d'ortie

Pour fabriquer le purin, 3 kg d'orties fraîches sont ramassées puis mises à fermenter avec de l'eau dans un récipient hermétique, d'une contenance de 30 L, muni d'une bonde qui permet au gaz de s'échapper sans que l'air extérieur ne rentre. Le produit est dilué à 5% avant d'être utilisé sur les cultures, en apport au sol.

2.2.3.1.3 Matériels et conduite de culture - Expérimentation 1 - Cycle 1

Les semences de laitue utilisées sont non-traitées et issues de l'agriculture biologique. Elles sont de la variété « laitue grenobloise » (Agrosems), une batavia rouge de plein champ. Les laitues sont semées le 19 mars en pépinière et récoltées le 16 juin (14 semaines). Le terreau utilisé en pépinière suit la norme NF U 44-551 et est utilisable en agriculture biologique. Les traitements liés aux différentes modalités commencent dès le semis. Après 3 semaines de culture en godet en pépinière, les jeunes laitues sont transférées au champ. Le sol de la prairie est préparé en amont en coupant les plantes au collet. Du compost est apporté à raison de 50t/ha, suivi d'un paillage à la paille de blé. Le compost utilisé est acheté à la commune voisine. La parcelle ne dispose pas de système d'arrosage automatique.

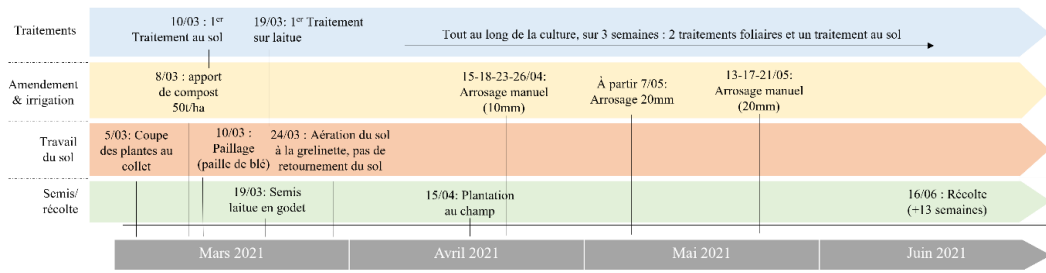


Figure 8: Interventions culturales au cours du cycle 1 de l'expérimentation n°1

Figure 8: Cultural interventions during cycle 1 of experiment 1

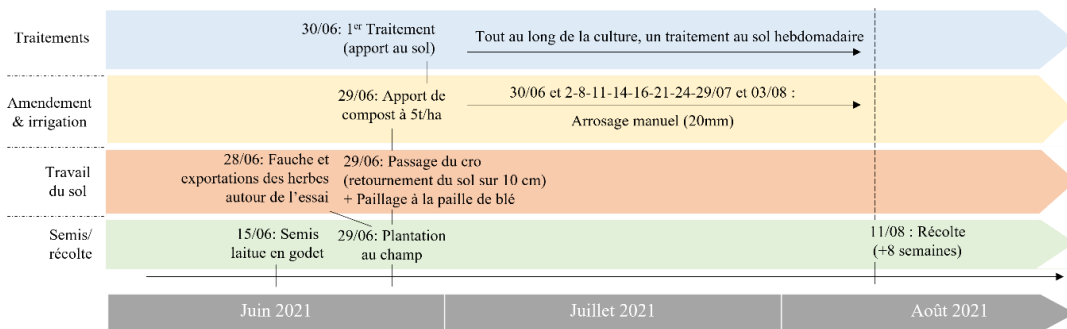


Figure 9: Interventions culturales au cours du cycle 2 de l'expérimentation n°1

Figure 9: Cultural interventions during cycle 2 of experiment 1

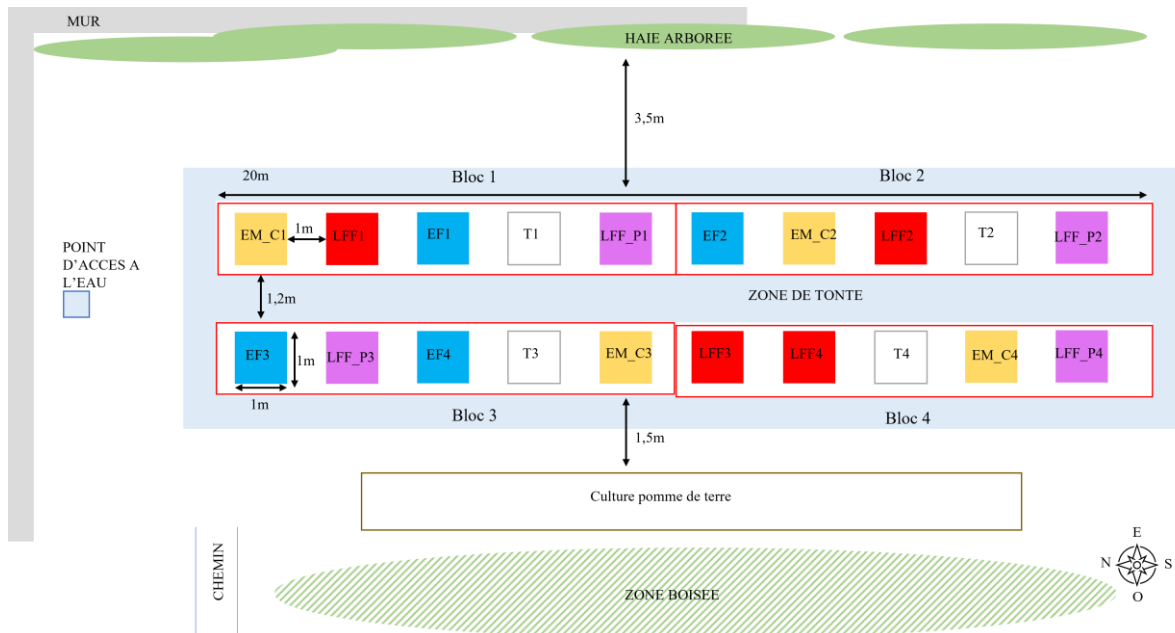


Figure 10: Design expérimental de l'expérimentation n°1

Figure 10: Experimental design of experiment 1

Un arrosage manuel est effectué ponctuellement en fonction des conditions météorologiques. En début de saison, 10mm d'eau sont apportés puis 20mm à partir du 7 mai, lorsque les températures sont plus élevées. La Figure 9 reprend les différentes interventions qui ont lieu au cours de l'essai.

2.2.3.1.4 Matériels et conduite de culture - Expérimentation 1 – Cycle 2

Étant cultivées sur la période estivale, les laitues du second cycle sont de la variété « Reine des Glaces », choisie pour leur résistance à la chaleur. Les plants sont achetés à un producteur de plants biologiques qui les a semées le 15/06. Après l'achat, elles sont plantées en terre le 29/06/2021 puis récoltées le 11/08/2021. Le terreau utilisé en pépinière suit la norme NF U 44-551 et est utilisable en agriculture biologique. La Figure 8 reprend les différentes étapes ayant lieu au cours de l'essai. A la différence des laitues du cycle 1, le premier traitement n'a pas lieu lors du semis mais lors du repiquage des laitues au champ. À la suite de la récolte des laitues du cycle 1, le sol est retourné sur les 10 premiers centimètres, du compost (identique au cycle 1) est apporté à raison de 5t/ha puis le sol est légèrement paillé avec de la paille de blé. Un arrosage manuel est effectué ponctuellement à hauteur de 20mm par passage.

2.2.3.2 Dispositif expérimental (laitues cycle 1 et cycle 2)

L'essai comporte 5 modalités et 4 répétitions par modalité, soit 20 placettes en tout. Les contraintes du terrain ne permettent pas de réaliser un plan d'expérimentation sous forme de carré latin. Quatre blocs de Fischer sont alors délimités afin de s'affranchir autant que possible de la variabilité du terrain (voir Figure 10). Les 4 répétitions par modalité sont distribuées aléatoirement. Les 5 modalités testées sont les suivantes :

- Modalité T, Témoin :

Les laitues de la modalité témoin sont traitées uniquement à l'eau. Si de l'eau est utilisée pour réaliser le traitement des autres modalités, la même quantité est ajoutée ici.

- Modalité EF, Extrait Fermenté :

Afin de dissocier les potentiels effets de l'extrait fermenté et de la LiFoFer, et comparer la LiFoFer à un autre stimulateur de croissance, cette modalité est traitée à l'extrait fermenté d'ortie (*Urtica dioica*) seul, préparé à T&H comme décrit dans la partie 2.2.3.1.2.

- Modalité EM_C, Microorganisme Efficace du Commerce :

Afin de comparer l'efficacité de la LiFoFer à un produit du commerce, une modalité Microorganisme Efficace du Commerce (EM_C) est mise en place. C'est la préparation à base de microorganismes de la marque Suisse Synbiovie qui est utilisée car elle est facilement accessible et fabriquée avec de la mélasse de canne à sucre, tout comme la LiFoFer.

- Modalité LFF, LiFoFer :

Les traitements à la LiFoFer sont réalisés avec de la LiFoFer préparée à T&H selon la méthode décrite dans la partie 2.2.3.1.1 de ce rapport.

- Modalité LFF+EF :

La modalité LiFoFer et Extrait Fermenté (LFF+EF) est une combinaison des deux précédentes modalités. Les EF étant couramment utilisés en agriculture biologique, il est souhaitable de constater ou non s'ils sont compatibles avec l'utilisation de LiFoFer.

Tableau 4: Présentation des modalités et de leurs différents modes d'application, expérimentation n°1 sur laitues, cycle 1 et 2

Table 4: Presentation of the modalities and their different modes of application, experiment n°1 on lettuce, cycle 1 and 2

Modalité	Composition	Fréquence	Dose pure	Dilution	Volume total	Période d'application
Témoin	Eau	Hebdomadaire	0,5L	5%	10L	Semis - récolte
LFF	LiFoFer liquide (1 semaine de fermentation)	Hebdomadaire	0,5L	5%	10L	Semis - récolte
EF	Extraits fermentés d'ortie et de consoude	1 semaine sur 3	0,5L	5%	10L	Semis - récolte
LFF+EF	LiFoFer liquide + Extrait fermenté (idem ci-dessus)	LFF : hebdomadaire EF : 1 semaine sur 3	0,5L	5%	10L	Semis - récolte
EM_C	Microorganismes bénéfiques du commerce liquide (Synbiovie)	Hebdomadaire	0,5L	5%	10L	Semis - récolte

Tableau 5: Coefficient associé au pourcentage de couverture de la surface du sol d'une plante bio-indicatrice

Table 5: Coefficient associated with the percentage of soil surface cover of a bio-indicator plant

Pourcentage de couverture de la surface du sol	Coefficient
100%	5
75%	4
50%	3
25%	2
5%	1
1%	0 (simple présence)

Les traitements sont appliqués selon les préconisations d'usage décrit dans le Tableau 4. La LiFoFer, les extraits fermentés et les microorganismes bénéfiques sont dilués à 5%. Les essais sont menés en micro-parcelles de 1m², contenant 4*4 laitues chacune. Les mesures sont effectuées sur les 4 laitues centrales de chaque placette afin d'éviter les effets de bordure. La conduite de culture est au plus proche des conditions de production d'un agriculteur maraîcher en agriculture biologique. Évidemment, la diversité de pratique étant très importante, nous nous basons sur les pratiques des agriculteurs biologiques faisant partie du réseau d'expérimentation de T&H.

2.2.4 Paramètres évalués

Un tableau récapitulatif de tous les paramètres évalués selon l'expérimentation est disponible en Annexe III : Liste des paramètres évalués. Les paramètres évalués sont choisis selon plusieurs critères : la simplicité d'exécution, la pertinence de la mesure pour répondre aux objectifs de recherche et leur bas coût. Ainsi, ils sont classés par groupe, selon si ce sont des indicateurs de la santé de la plante, de la croissance végétative ou du rendement. Pour chaque paramètre il sera précisé dans le titre s'ils sont évalués pour les laitues du cycle 1, du cycle 2 ou les 2.

2.2.4.1 Évaluation des caractéristiques du sol (laitues cycle 1 uniquement)

L'objectif de ce suivi des caractéristiques du sol est d'évaluer si les traitements appliqués aux laitues entraînent des divergences de dynamique du sol. La méthode de diagnostic du sol par les Plantes Bio-Indicatrices (PBI) développée par Gérard Ducerf n'est pas normée et fournit des informations qualitatives mais ne permet pas par la suite une analyse statistique des données. Elle est basée sur le principe que les adventices poussent naturellement dans un biotope sauvage appelé biotope primaire. La parcelle cultivée, où apparaît l'adventice à la suite de l'intervention de l'homme, constitue le biotope secondaire. La connaissance du biotope primaire permet de comprendre la transformation du milieu secondaire qu'elle colonise et de dresser la liste des critères ayant conduit à la germination de la graine.

Le diagnostic se réalise en 3 étapes :

Étape 1 - Inventaire des espèces présentes :

Toutes les adventices présentes dans la zone considérée sont inventoriées jusqu'à l'espèce si possible.

Étape 2 - Evaluation de la densité de chaque espèce par les taux de recouvrement :

La densité de végétation de chaque espèce est évaluée selon un indice de recouvrement. Il correspond à la proportion de surface de sol tenu à l'ombre par l'espèce considérée. Selon cet indice, un coefficient est attribué selon le Tableau 5.

Étape 3 - Analyse des caractéristiques de la parcelle :

A chaque espèce identifiée correspond une ou plusieurs caractéristiques associées au sol. Ces caractéristiques sont décrites dans le fascicule des conditions de levée de dormance des plantes bio-indicatrices, dont un extrait est présenté à la page suivante (*Tableau 6*). Ce fascicule détail pour chaque espèce les critères de levée de dormance. Les coefficients des espèces ayant les mêmes caractéristiques de sol sont ensuite additionnés. Cela permet de dégager les caractéristiques majeures du sol.

Tableau 6: Facteurs de levée de dormance et manifestation du caractère indicateur

Table 6: Dormancy-breaking factors and manifestation of indicator character

Facteur	Dénomination	Manifestation du caractère indicateur à travers ce facteur
Bases		Richesse du sol en bases actives, peu ou non actives (K, Mg, Ca).
Ca +		Présence de calcium ou de calcaire actif.
Ca -		Sol décarbonaté, décalcifié ou carencé en calcium. Plantes calcifuges, qui fuient le calcium.
Air		Asphyxie du sol par battance, tassement par les machines et/ou le piétinement des animaux. Compactage.
Eau +		Engorgement du sol en eau par excès d'irrigation, inondation, remontée de nappes battantes, engorgements naturels des sols marécageux, para-tourbeux ou des prairies humides, provoquant des hydromorphismes avec dans certains cas formation de gley ou pseudo-gley. Travail du sol ou pâturage par temps humide.
Eau -		Sol à très faible pouvoir de rétention en eau, très sec en été, dits « brulants ».
MO(C) +		Sol riche en matière organique avec un C/N équilibré. Sol riche en humus stable.
MO (C) -		Sol pauvre en matière organique avec un C/N équilibré. Sol pauvre en humus.
MO(N) +		Sol riche à excédentaire en MO animale et/ou en nitrates.
MO(N) -		Carence en matière organique animale riche en azote. Carence en azote et en potasse. Faible minéralisation.
Nitrites +		Nitrites produits par les pratiques agricoles ou l'activité humaine, anaérobioses totales pouvant provoquer des dissociations du complexe argilo-humique avec libération d'aluminium, de fer ferrique et de nitrites.
Nitrites -		Nitrites d'origine géologique, prairies humides, marécageuses, tourbeuses ou para-tourbeuses, assainies par la flore spontanée.
Foss		Sol engorgé en matière organique d'origine végétale en cours de fossilisation. Matière organique archaïque.
Less	Lessivage	Perte, par lessivage, des éléments fertilisants et de particules fines du sol, en raison des faibles pouvoirs de rétention de ce sol par carence en argile et en humus.
Min	Minéralité du sol	Composition du sol à forte proportion minérale, fonctionnant majoritairement sur la dégradation des parties minérales, argiles et limons et non sur la minéralisation de la MO. Sol non complexé, peu ou pas structuré ou souvent en cours de déstructuration.
Ero	Erosion	Perte des sols morts, par entrainement mécanique lors des pluies. Sols perdus définitivement pour l'agriculture. Erosion physique.
Sali	Salinisation	Augmentation du degré de salinité des sols, naturelle ou provoquée par les excès d'engrais minéraux solubles, par les excès d'irrigation ou de potasse (+K).
BP	Blocage P	Blocage du phosphore.
BK	Blocage K	Blocage de la potasse.
AB	Activité biologique. Minéralisation de la MO	AB+ : Sol à bonne activité microbienne aérobie. Bonne minéralisation des matières organiques (recherchée en agriculture). AB- : Activité biologique bloquée, faible ou minéralisation difficile ou de courte durée.
Poll	Pollution	Sol pollué par des molécules chimiques de synthèse, des métaux lourds, des rejets industriels, des boues de station d'épuration, ou parfois par différents sels (phosphate, potasse, etc.).

Un seul opérateur réalise le diagnostic afin d'éviter les biais d'expérimentation, notamment lors de l'évaluation de l'indice de recouvrement (Ducerf 2018). C'est Miguel Neau, prestataire pour l'association T&H, qui réalise les diagnostics de PBI. Le premier relevé est effectué le 18/05/2021, sur les zones non cultivées et non travaillées. Il permet de prendre en compte l'état initial T0 de la prairie. Le second relevé est effectué environ 1 mois après, le 16/06/2021, sur chaque placette, au centre afin d'éviter les effets de bordure. Il permet d'évaluer de manière qualitative la dynamique du sol. Ensuite, le rapport est remis par l'expert permet de mettre en avant les caractéristiques de chaque placette et de chaque modalité.

2.2.4.2 Indicateurs de la croissance végétative

2.2.4.2.1 Longueur et biomasse racinaire (laitues cycle 1 uniquement)

Pour évaluer la croissance des racines, on pèse la biomasse fraîche (g) et on mesure la longueur du système racinaire (mm). Les racines sont déterrées délicatement avec une fourche bêche. Après 12h de trempage dans l'eau, la terre est rincée et le surplus est éliminé avec du papier absorbant. La pesée est suivie de la mesure de longueur des racines. Pour se faire, les racines sont coupées en deux le long de la racine principale puis scannées sur fond noir. La mesure de la longueur racinaire (mm) est évaluée à la récolte et à la sortie de pépinière grâce au logiciel Analyr C2.0 développé par le CIRAD. Le logiciel calcul, grâce aux pixels de l'image et à une échelle de mesure, la surface de l'image qui n'est pas noire et estime ainsi la longueur des racines (R.Olivier, J.J Chopard, 2020).

2.2.4.2.2 Suivi de la croissance aérienne (laitues cycle 1 et cycle 2)

Ces indicateurs permettent d'évaluer la croissance végétative de la plante et d'estimer s'il y a des différences de développement entre les différentes modalités. Pour le cycle 1, les mesures de suivi de croissance végétative sont le diamètre au collet (cm) et la hauteur de plant (cm) traduit par la mesure de la plus grande feuille pour les laitues, associées aux comptages du nombre de feuilles, réalisés au cours des 6 premières semaines après la plantation au champ. A la place de la mesure de la hauteur, c'est ensuite le diamètre global de la laitue qui est mesuré une fois que le développement de la laitue est plus avancé (8 semaines après le repiquage au champ) et qui résulte de la moyenne entre le diamètre le plus étroit et le plus grand (cm). Pour les laitues du cycle 2, le diamètre de la laitue (cm) et le diamètre des plantes au collet (cm) est mesuré selon la même procédure, 3 fois au cours de la culture.

2.2.4.3 Indicateurs de la santé des plantes

2.2.4.3.1 Taux de Brix (laitues cycle 1 et cycle 2)

Les mesures de Brix traduisent le taux de solides solubles dans une solution. Dans la sève ou les jus des fruits, les sucres sont les plus abondants. Le taux de Brix de la sève d'un fruit est corrélé à la saveur sucrée de la production et à la qualité nutritionnelle. Ainsi, plus le taux de Brix est élevé, meilleure serait la santé et la qualité de la récolte. Ce critère ne peut suffire à déterminer la santé globale de la laitue mais en donne une indication (Kleinhenz 2012). C'est un outil simple d'utilisation, c'est pourquoi il est choisi dans cette étude. Le taux de Brix est mesuré à la récolte grâce à un réfractomètre RHB-32SG possédant une échelle de 0 à 30°B.

Tableau 7: Echelle d'attaque des limaces en fonction du pourcentage de surface foliaire détruit par le ravageur

Table 7: Slug attack scale according to the percentage of leaf area destroyed by the pest

Niveau	Description	Pourcentage de surface foliaire détruite
Niveau 0	Aucun dégât	0%
Niveau 1	Attaque légère sur vieille feuille, petits trous	0% - 10%
Niveau 2	Attaque légère sur jeune feuille, feuille extérieure pâle, petits trous, feuilles extérieures avec petits à moyen trous	10% - 20%
Niveau 3	Attaque importante, apparence flétrie, beaucoup de surface manquante	20% - 50%
Niveau 4	Attaque très importante, danger de mort	50% et plus
Niveau 5	Mort de la plante, complètement consommée	100%

La mesure est réalisée sur les feuilles adultes, ni en sénescence, ni en croissance, lors de la récolte. Les feuilles sont d'abord écrasées dans un mortier puis à l'aide d'une pipette, le liquide issu du broyage est déposé sur la vitre du réfractomètre pour lire la mesure. Pour le cycle 1 la mesure est effectuée sur une laitue provenant de chaque placette, soit 4 laitues par modalité. Pour les laitues du cycle 2 la mesure est effectuée sur toutes les laitues récoltées, soit 16 laitues par modalité.

2.2.4.3.2 Incidences des ravageurs et phytopathogènes (laitues cycle 1 et cycle 2)

Des observations effectuées une semaine sur deux permettent, s'il est possible et si des dégâts sont constatés, d'identifier les ravageurs et de les dénombrer. De même, si des symptômes d'une maladie sont observés, une identification du phytopathogène est fournie. Lorsque des symptômes de ravageurs ou de pathogènes sont identifiés, un indice de recouvrement ou de destruction de la surface foliaire est établi en fonction de la sévérité des symptômes. Pour les limaces par exemple, les dégâts sont évalués en fonction du pourcentage de surface foliaire détruite. Une échelle à 5 niveaux est établie et présentée sur le Tableau 7 ci-contre.

2.2.4.3.3 Analyse des minéraux de la sève (laitues cycle 2 uniquement)

Afin de compléter l'analyse de la santé des plantes, des feuilles de laitue sont envoyées dans le laboratoire NovaCropControl, un centre d'études et de tests spécialisé dans les analyses de sève, basés aux Pays-Bas. L'analyse de sève permet de déterminer l'absorption réelle des nutriments par la plante. Pour cette analyse destructive, ce sont les feuilles des laitues de la bordure qui sont prélevées. Les analyses présentées dans ce rapport sont basées sur 30 jeunes feuilles et 30 feuilles plus matures, prélevées à la récolte pour chaque modalité. Ainsi pour chaque modalité, deux valeurs sont obtenues, une teneur en nutriment pour les feuilles matures et une teneur pour ce même nutriment pour les jeunes feuilles. Les informations données par cette analyse sont qualitatives et permettent d'émettre des pistes quant à un déséquilibre lié à certains nutriments pour ensuite réaliser des analyses plus poussées au cours des prochaines expérimentations. Les valeurs sont données pour 23 nutriments, mais les résultats présentés seront ceux des nutriments essentiels à la plante, indicateurs d'une carence éventuelle : le taux des sucres totaux (%), d'azote total (ppm), de potassium (ppm), de calcium (ppm). Pour les nutriments, si une valeur anormale est observée elle sera présentée dans les résultats.

2.2.4.4 *Indicateurs du rendement*

Différentes composantes du rendement sont évaluées. A la récolte, les laitues sont pesées pour obtenir un poids frais (g). Ensuite elles sont parées, c'est-à-dire que l'on retire les feuilles fanées ou malades à la base de la laitue. Cette étape consiste à imiter le travail de préparation des laitues pour la commercialisation. À la suite de ce tri, elles sont pesées à nouveau pour estimer le rendement commercialisable (g) et évaluer si certains traitements provoquent plus de perte à la récolte que d'autres. Les laitues du cycle 1 uniquement, à la suite de la récolte, sont séchées à l'air libre dans une pièce pendant 2 semaines. La température élevée (entre 25°C et 30°C) sèche les laitues sans nécessiter l'utilisation d'une étuve. Cette étape permet de déterminer le rendement en matière sèche et ainsi de calculer les taux de matière sèche (% de matière fraîche) des laitues des différentes modalités.

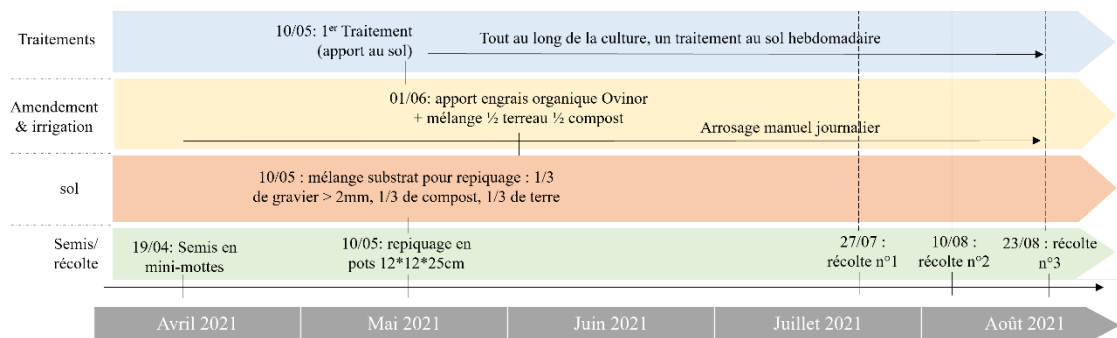


Figure 11: Interventions culturales au cours de l'expérimentation n°2

Figure 11: Cultural interventions during experiment 2

Tableau 8: Présentation des modalités et de leurs différents modes d'application, expérimentation n°2 sur tomates

Table 8: Presentation of the modalities and their different modes of application, experiment n°2 on tomatoes

Modalité	Composition	Fréquence	Dose pure	Dilution	Volume total	Période d'application
Témoin	Eau	Hebdomadaire	0,01L	5%	0,2L	Mise en pot - récolte
LFF	LiFoFer liquide (1 semaine de fermentation)	Hebdomadaire	0,01L	5%	0,2L	Mise en pot - récolte
EF	Extraits fermentés d'ortie et de consoude	1 semaine sur 3	0,01L	5%	0,2L	<u>Ortie</u> : de la mise en pot à la floraison <u>Consoude</u> : de la floraison à la récolte
LFF+EF	LiFoFer liquide + Extrait fermenté (idem ci-dessus)	LFF : hebdomadaire EF : 1 semaine sur 3	LFF : 0,01L EF : 0,01L	5%	0,2L	<u>LiFoFer</u> : Mise en pot – récolte <u>Extraits fermentés</u> : <i>idem ci-dessus</i>
EM_C	Microorganismes bénéfiques du commerce liquide (Synbiovie)	Hebdomadaire	0,01L	5%	0,2L	Mise en pot - récolte

2.3 EXPERIMENTATION N°2 : COMPARAISON DE L'APPLICATION DE DIFFERENTS EXTRAITS FERMENTES SUR TOMATES EN POT

2.3.1 Matériel et dispositif expérimental

Cet essai est réalisé en pots afin de garantir l'homogénéité du support de culture et de pouvoir réaliser un plus grand nombre de répétitions tout en répondant à une contrainte de surface disponible.

2.3.1.1 Matériel et Conduite de culture

La variété choisie est la tomate cocktail « Whipersnapper premium » adaptée à la culture en pot (Agrosemens). C'est une variété à port déterminé mesurant 30 à 50 cm de hauteur et produisant des tomates cerises allongées de 15 à 30 g, de couleur roses à rouge sombre. Les grappes comportent de 5 à 18 fruits. Les graines sont semées en mini-mottes (1 graine par motte) dans du terreau et au bout de 3 semaines les jeunes plants sont repiqués en pots 12*12*25 cm dans un mélange composé de 1/3 de terre, 1/3 de compost, 1/3 de sable tamisé au-dessus de 2 mm. Les plants sont disposés dans la pépinière et changés de place chaque semaine afin de garantir des conditions de croissance homogènes. Lorsque la température devient trop élevée dans la serre (supérieure à 30°C), les plants sont placés à l'extérieur et donc soumis aux températures et intempéries de la saison. Le 1^{er} juin un amendement organique est ajouté. Il est composé d'une base organique de fumier de mouton composté 12 mois dosant 4 % d'azote (N) organique total, 2 % de phosphore (P₂O₅) total, 7 % de sulfate de potassium total (K₂O) et 4 % d'oxyde de magnésium total (MgO). Un récapitulatif des interventions est schématisé sur la Figure 11.

2.3.1.2 Dispositif expérimental

L'essai comporte 5 modalités avec 10 répétitions chacune, avec une plante par pot soit 10 plants par modalité. Les traitements et modalités d'application sont détaillées dans le Tableau 8. Les traitements sont apportés au sol tout au long de la culture et constituent des modalités identiques à celles de l'expérimentation n°1. Ils sont appliqués selon les préconisations d'usage et dilués à 5% pour la LiFoFer, les extraits fermentés et les microorganismes bénéfiques Synbiovie.

2.3.2 Paramètres évalués

Les paramètres évalués sont similaires à ceux utilisés pour l'expérimentation n°1 et répondent aux mêmes objectifs.

2.3.2.1 Indicateurs de la croissance végétative

Afin d'assurer le suivi de la croissance végétative des tomates, des mesures sont effectuées 1 semaine sur 2 à partir du premier traitement. La première mesure est effectuée avant le premier traitement et sert de mesure T₀. La hauteur de plant (H, en cm) est mesurée du collet jusqu'au gourmand poussé le plus récemment. Un facteur de croissance (FC) est calculé à partir de la mesure de la hauteur initiale T₀ (H_{initialeT0}) et de la dernière mesure prise en compte pour le suivi de la croissance végétative (H_{finale}) :

$$FC = \frac{(H_{finale} - H_{initialeT0})}{H_{initialeT0}}$$

Le diamètre au collet (D_c, en cm) est également mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. On dénombre le nombre de gourmands par pied, le nombre de grappes par gourmand et le nombre de fruit par grappe.

Nom Kerguelen	Nom français	Coef	Bases	Ca +	Ca -	Air	Eau +	Eau -	MO (C)+	MO (C)-	MO (N)+	MO (N)-	Nit	Foss	Less	Min	éro	Sali	BP	BK	AB +	AB -	Poll	
			332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332	332
Festuca pratensis	Fétuque des prés	3	3						3		3											3		
Poa pratensis	Pâturin des prés	3	3	3					3		3											3		
Trifolium pratense	Trèfle violet	3	3				3		3		3		3											
Achillea millefolium	Achillée millefeuille	2								2		2				2		2						
Carex muricata	Laîche muriquée	2	2			2					2				2	2								
Galium mollugo	Gaïlet blanc	2	2	2					2		2											2		
Plantago lanceolata	Plantain lancéolé	2				2			2		2				2	2						2		
Ranunculus bulbosus	Renoncule bulbeuse	2	2			2			2		2				2							2		
Taraxacum officinale s.l.	Pissenlit dent de lion	2	2			2			2		2													
Ajuga reptans	Bugle rampant	1				1	1			1		1	1	1										
Bromus hordeaceus	Brome mou	1	1			1			1		1		1											
Convolvulus arvensis	Liseron des champs	1	1			1					1		1		1									
Dactylis glomerata	Dactyle aggloméré	1	1	1					1		1													
Medicago arabica	Luzerne maculée	1	1			1			1		1				1							1		
Vicia sativa	Vesce commune	1	1			1			1		1			1						1		1		
Lotus corniculatus	Lotier corniculé	0,5	0,5	0,5					0,5		0,5											0,5		
Arrhenatherum elatius	Fromental	0	0	0					0		0			0								0		
Centaurea jacea	Centaurée jacée	0	0						0		0		0											
Lathyrus pratensis	Gesse des prés	0	0	0		0	0		0		0											0		
Leucanthemum vulgare	Marguerite	0			0								0		0	0								
Medicago lupulina	Minette	0	0	0		0			0		0									0				
Potentilla reptans	Potentille rampante	0				0	0							0									0	
Rumex crispus	Rumex crépu, patience crépue	0	0			0	0				0		0						0				0	
Salvia pratensis	Sauge des prés	0	0		0	0		0	0		0			0	0									
Tragopogon pratensis	Salsifis des prés	0	0						0		0			0								0		
Trisetum flavescens	Trisetite dorée	0	0						0		0			0								0		
Calcul total coef		28	22,5	6,5	0	13	4	0	22	2	26	2	6	11	7	0	2	0	1	0	15	0	0	

Figure 12: Tableau de l'inventaire des plantes bio-indicatrices réalisé à T0 sur la parcelle d'expérimentation n°1

Figure 12: Table of the inventory of bio-indicator plants carried out at T0 on the experimental plot n°1

2.3.2.2 Indicateurs de la santé des plantes

2.3.2.2.1 Taux de Brix

L'objectif de cette mesure est identique à celui présenté dans la partie 2.1.4.3.1. Le taux de Brix est mesuré à la récolte grâce à un RHB-32SG avec une échelle de 0 à 30°B sur les fruits récoltés.

2.3.2.2.2 Ravageurs et phytopathogènes

La méthode est identique à celle décrite pour l'expérimentation 1 (voir partie 2.2.4.3.2). Par exemple, si des pucerons sont identifiés, le nombre d'individus par plant est compté.

2.3.2.3 Indicateurs du rendement

Les indicateurs du rendement sont le nombre de fruits par pied et le poids moyen des fruits (g), qui sont calculés par modalité après la pesée et le comptage. L'essai étant fait en pot, les résultats sont exprimés par pied. Les fruits considérés comme non commercialisables (fendus, symptôme apparent, maturité non atteinte) sont comptabilisés et écartés.

2.4 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Les données récoltées sont retranscrites sur le logiciel Microsoft Excel 2019 puis le traitement statistique est réalisé grâce au logiciel RStudio 1.4.1717. Des analyses de variance (ANOVA) sont utilisées pour comparer les valeurs moyennes entre les différents traitements. Le test de Shapiro-Wilk est effectué pour vérifier les conditions de normalité préalables. Lorsque des différences significatives sont trouvées (p -value < 0,05), la différence significative honnête (HSD) de Tukey est choisie comme test post hoc. Si les données ne suivent pas la loi normale (p -value < 0,05) des tests non paramétriques, statistiquement moins puissants, sont effectués. La démarche est alors de réaliser le test de Kruskal-Wallis suivi de comparaisons multiples par paires via le test de Dunn avec la correction de Bonferroni pour identifier les différences significatives (p < 0,05) entre les modalités.

3 RESULTATS

3.1 EXPERIMENTATION N°1, CYCLE 1 : RESULTATS

3.1.1 Suivi de la qualité du sol de la culture : diagnostic des plantes bio indicatrices

3.1.1.1 Mesure réalisée à T0, le 18/05/2021 - Etat initial du sol

L'inventaire réalisé à T0 dont le tableau compte-rendu est présenté Figure 12, avant la culture de laitue, révèle un sol avec un très bon potentiel agronomique global. Ce sol de prairie posséderait un bon état minéral et organique et une activité biologique équilibrée. Le point faible traduit une structure assez fragile, avec une tendance à l'asphyxie (AIR=13). Cela laisse entrevoir des problèmes de porosité en cas de travail du sol excessif. Cette hypothèse est appuyée par la présence de lessivages conséquents (Less:7), ce qui est étonnant compte tenu que la parcelle est une prairie permanente. Ces informations corroborent bien le diagnostic des sols selon la méthode BRDA-Hérody.

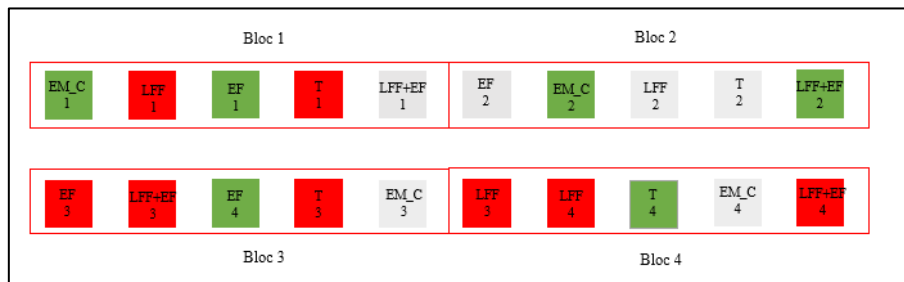


Figure 13: Schéma des placettes ayant des caractéristiques de sol positives (en vert) et négatives (en rouge)

Figure 13: Diagram of plots with positive (green) and negative (red) soil characteristics

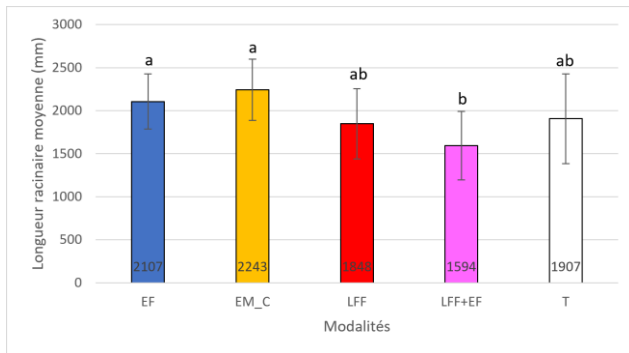


Figure 15: Moyennes de la longueur racinaire des laitues du cycle 1 en fonction des modalités

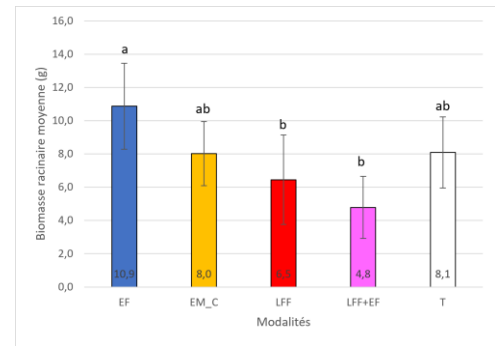


Figure 14: Moyennes de la biomasse racinaire des laitues du cycle 1 en fonction des modalités

Figure 14: Root length averages of cycle 1 lettuce according to modalities

Figure 15: Average root biomass of cycle 1 lettuce according to modalities

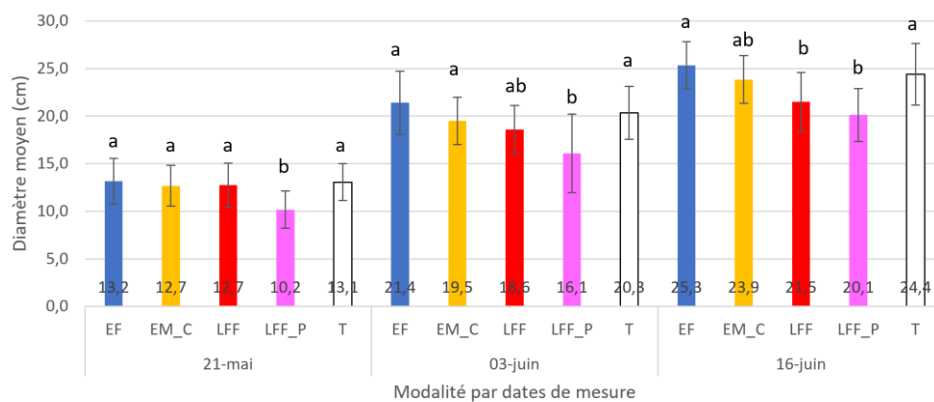


Figure 16: Diamètre moyen (cm) des laitues en fonction des modalités et des dates de mesure, cycle 1

Figure 16: Average diameter (cm) of lettuce according to modalities and measurement dates, cycle 1

3.1.1.2 Mesure réalisée le 16/06/2021 – Mesure de suivi

La seconde série d'inventaire réalisée environ 1 mois plus tard met en évidence les tendances de certaines parcelles avec un bon potentiel agronomique ou non. Les résultats sont étudiés par placette et par modalité. Ceux présentés ici sont le fruit du rapport de l'expert et des discussions qui s'en sont suivies avec lui, permettant d'affiner la lecture des résultats et de se concentrer sur les placettes ayant les critères les plus marquants. Au regard du diagnostic initial (T0), les critères pris en compte en priorité sont les critères AIR (Asphyxie ou compactage du sol), EAU (engorgement du sol), MO(C) et MO(N) (sols riches en matière organique équilibrée), LESS (lessivage), ERO (érosion) et AB (activité biologique). D'après le classement de l'expert, les placettes ayant les critères les plus favorables à une culture sont réparties dans chaque modalité. Les placettes sont représentées sur la Figure 13, la couleur rouge signifie que les parcelles présentent des coefficients majoritairement à caractère négatif et la couleur verte, des coefficients à caractères positifs. Les placettes EF.1, EF.4, EM_C.1, EM_C.2, T.4, LFF+EF.2 possèdent notamment une bonne activité biologique et un sol ni engorgé ni séchant, et une matière organique équilibrée en carbone et en azote. Au contraire, les placettes LFF.1, LFF.3, LFF.4, T.1, T.3, LFF+EF.3, LFF+EF.4 et EF.3 présentent des adventices caractéristiques des sols compactés et ayant une activité biologique faible. Sur les 4 répétitions, la modalité LFF en possède 3 dont les adventices sont indicatrices d'un sol compacté et d'une activité biologique faible. Pour les autres modalités, aucune tendance globale ne se dégage clairement.

3.1.2 Indicateurs de la croissance végétative des laitues

3.1.2.1 Longueur et biomasse racinaire

Les modalités EM_C et EF possèdent les racines les plus longues en moyenne (2243mm et 2106mm) (voir Figure 15). La longueur racinaire de la modalité LFF+EF est significativement moins élevée (p -value < 0,05) que ces deux modalités. On observe 649mm de différence avec la modalité EM_C. Aucune modalité n'est différente du témoin. Les biomasses racinaires moyennes (voir Figure 14) des modalités LiFoFer et Extrait Fermenté (LFF+EF) sont significativement moins élevées (p -value < 0,05) que la modalité EF. Elles présentent une biomasse plus faible de 1,7g à 6,1g comparé aux autres modalités (p -value < 0,05). Globalement, le développement des racines n'est pas significativement différent de la modalité témoin mais les racines des laitues LFF+EF et LFF tendent à être moins développées que les autres modalités.

3.1.2.2 Hauteur et diamètre des laitues

Le suivi des mesures de hauteur de feuille au cours des 6 premières semaines après la plantation au champ (entre le 23/04/21 et le 14/05/21), ne révèle aucune différence significative (p -value > 0,05) et aucune tendance ne se dégage. Les 6 semaines suivantes, on observe sur la Figure 16 des différences de diamètre des laitues. Les mesures du 21/05/21 montrent que la modalité LFF+EF diffère des autres modalités par un diamètre en moyenne moins large que les autres modalités (p -value < 0,05). Cette différence est maintenue jusqu'à la récolte. La modalité LFF quant à elle diffère progressivement des autres modalités. Au 03/06/21 le traitement à la LiFoFer n'est plus différent significativement de la modalité LFF+EF. C'est à la récolte (le 16/06/21) que le diamètre moyen est significativement plus petit (p -value < 0,05) que les modalités EF, EM_C et T.

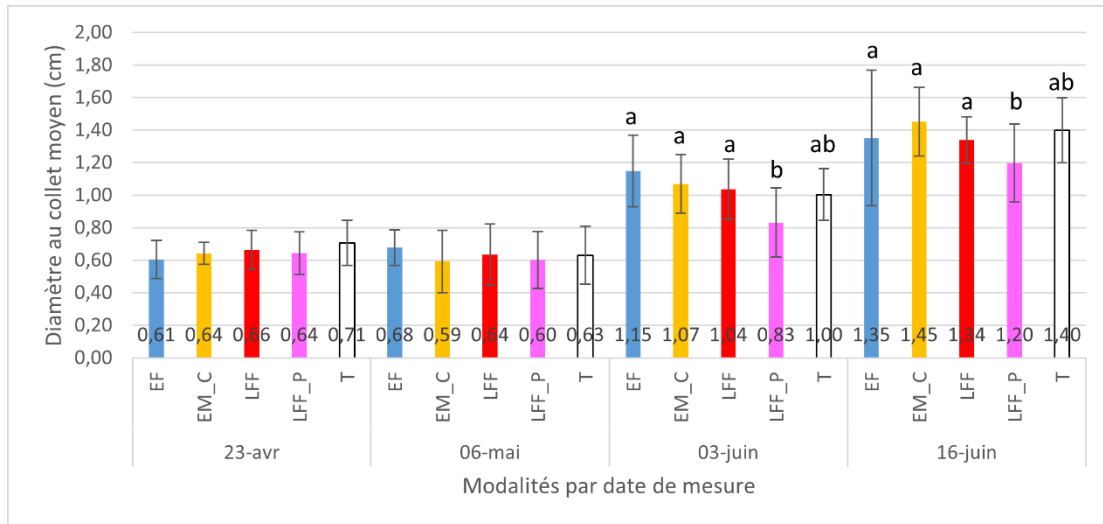


Figure 17: Diamètre au collet moyen (cm) par modalité et par date de mesure

Figure 17: Average crown diameter (cm) by modality and measurement date

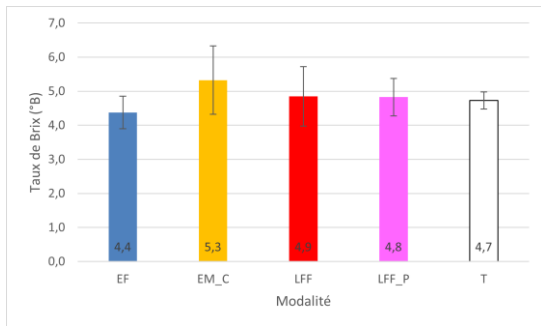


Figure 18: Taux de Brix moyen (°B) par modalité

Figure 18: Average Brix level (°B) by modality

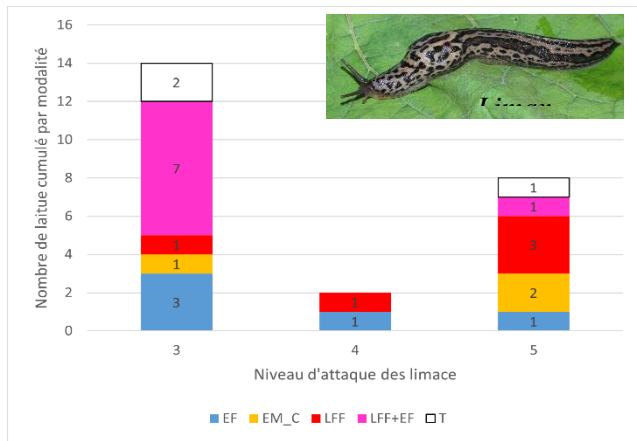


Figure 19: Nombre de laitue cumulé par modalité et par niveau d'attaque de limace sur la période du 28/04 au 21/05

Figure 19: Cumulative number of lettuce plants per modality and per level of slug attack over the period 28/04 to 21/05

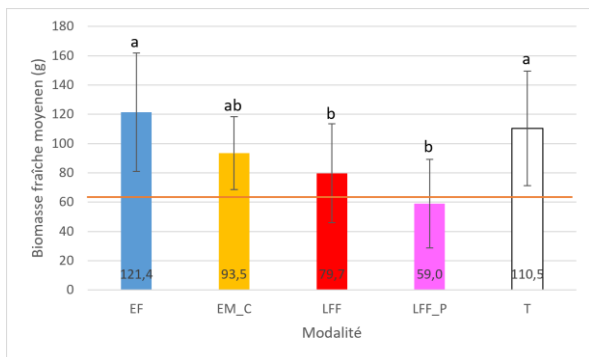


Figure 20: Biomasse fraîche moyenne (g) en fonction des modalités

Figure 20: Average fresh biomass (g) according to modalities

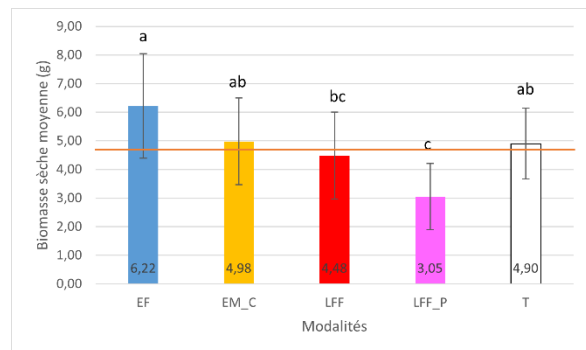


Figure 21: Biomasse sèche moyenne (g) en fonction des modalités

Figure 21: Average dry biomass (g) according to modalities

Les mesures de diamètre au collet permettent également d'évaluer la croissance végétative des laitues et montrent des différences significatives lors des dernières semaines de croissance. A partir du 03/06/21, la modalité traitée à la LiFoFer et aux EF possède un diamètre au collet significativement moins élevé (p -value < 0,05) que les modalités EF, EM_C et LiFoFer seule (LFF). Les différences sont comprises en 0,14mm et 0,25mm de diamètre en moins. Toutefois, la modalité Témoin (T) ne présente de différence avec aucune autre modalité. Les mesures de diamètre au collet et de diamètre de la laitue présentent des similarités. Dans les deux cas la modalité LFF+EF est moins développée que les autres modalités. Encore une fois, les différences sont visibles en fin de culture (2 dernières semaines) et sont plus marquées sur les mesures de diamètre global de la laitue

3.1.3 Indicateurs de la santé des plantes

3.1.3.1 Taux de Brix

Les mesures de taux de Brix présentées sur la Figure 18 sont comprises entre 4,4°B (EF) et 5,3°B (EM_C). La tendance laisse suggérer que les EF et Témoin contiennent moins de sucres solubles que les autres modalités, toutefois les données ne présentent pas de différences significatives. Ces taux de Brix sont comparables aux valeurs trouvées dans la littérature et ne témoignent pas d'une mauvaise qualité ou santé des laitues (Meagy et al. 2013).

3.1.3.2 Phytopathogènes et Ravageurs

Aucun phytopathogène n'a été identifié au cours de la culture des laitues. Concernant les ravageurs, des dégâts de limaces sont identifiés en début de culture, du 28/04 (6^{ème} semaine de croissance) au 21/05 (9^{ème} semaine de croissance). Après la 9^{ème} semaine, les éventuelles attaques de limaces n'avaient plus d'incidence sur le développement des laitues. La seule espèce de limace identifiée est *Limax maximus*, appelée aussi limace léopard (voir Figure 19), qui vit plutôt dans les sous-bois et est omnivore (Charrier 2016). Il n'est pas étonnant de la retrouver sur la parcelle bordée par un bosquet lui servant probablement d'habitat. Si d'autres limaces se sont présentées sur la parcelle, elles n'ont pas été identifiées. La Figure 19 représente les 3 niveaux d'attaque les plus élevés (4, 5 et 6) et le nombre cumulé de laitues dans ces catégories au cours des semaines d'attaque. Les laitues les plus touchées sont les laitues LFF et LFF+EF, avec finalement, 3 laitues mortes pour la modalité LFF et 1 pour la modalité LFF+EF. Les laitues des modalités LFF et EF sont autant touchées l'une que l'autre.

3.1.4 Indicateurs du rendement

3.1.4.1 Biomasse aérienne fraîche, biomasse aérienne sèche et taux de matière sèche

Les mesures de biomasse fraîche (Figure 20) et la biomasse sèche ($B_{m_{sec}}$) des laitues (Figure 21) présentent des tendances similaires entre elles et aux précédentes mesures de croissance végétative. Pour la biomasse fraîche, les laitues des modalités LFF+EF et LFF pèsent moins lourd que les laitues des modalités EF et Témoin. On retrouve jusqu'à 63 g de différence entre LFF+EF et EF. Pour la $B_{m_{sec}}$, les différences sont plus prononcées. La biomasse de la modalité LFF+EF est plus faible que toutes les autres laitues, en moyenne entre 1,4 g de différence avec LFF et 3,2 g de différence avec EF. Les taux de matière sèche sont autour de 5%, ce qui est la valeur attendue (Mou 2009).

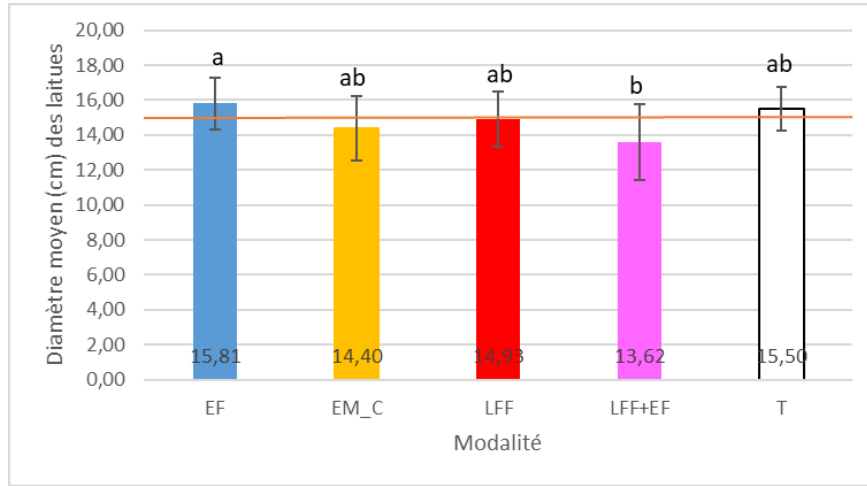


Figure 22: Diamètre moyen des laitues à la récolte (cm) par modalité et valeur moyenne (droite orange)

Figure 22: Average diameter of lettuce at harvest (cm) by treatment and overall average (orange line)

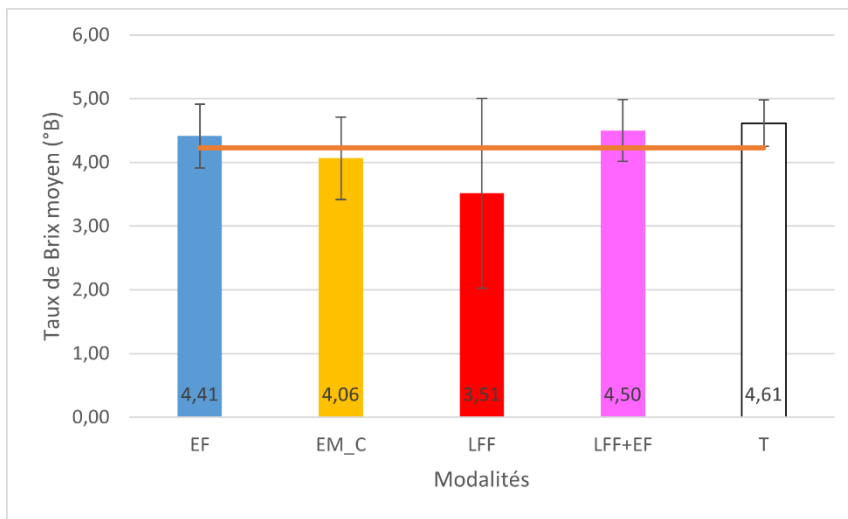


Figure 23: Taux de Brix moyen (°B) par modalité et moyenne globale (droite orange)

Figure 23: Average Brix level (°B) per modality and overall average (orange line)

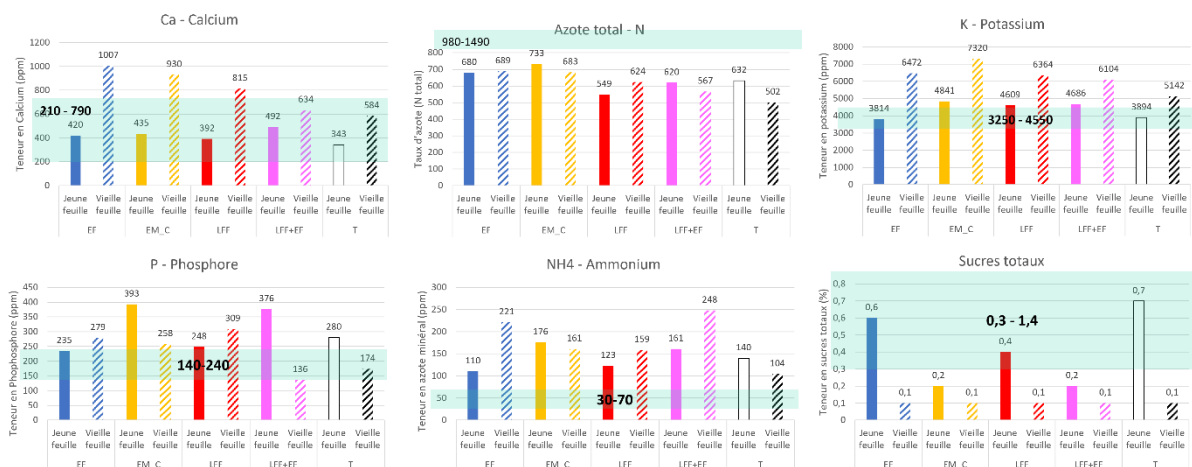


Figure 24: Analyse des nutriments contenus dans la sève des laitues (cycle 2), principaux résultats

Figure 24: Nutrient analysis of lettuce sap (cycle 2), main results

Bien qu'il soit légèrement plus élevé pour la LFF (5,98%) et plus faible pour le témoin (4,87%), aucune différence significative n'est observée entre les taux de matière sèche (%MS) des différentes modalités ni concernant les pourcentages de perte à la récolte. Les rendements des laitues traitées à la LiFoFer et LFF+EF sont globalement moins élevés.

3.2 EXPERIMENTATION N°1, CYCLE 2 : RESULTATS

3.2.1 Indicateurs de la croissance végétative

Le suivi de la croissance végétative est basé sur 3 mesures. La première mesure réalisée le 07/07 permet de mesurer le diamètre des laitues, mais les laitues étant encore petites, le diamètre au collet n'a pas été mesuré. Il n'y a pas de différence de développement entre les laitues et aucune tendance ne se dégage à la première mesure de diamètre global. Trois semaines plus tard, le 29/07, il n'y a toujours pas de différence significative (p -value $> 0,05$) mais une tendance se dégage sur les mesures de diamètre moyen et de diamètre au collet en faveur de la modalité EF, plus larges. Les laitues LFF+EF sont celles ayant les diamètres les plus petits. A la récolte, le 11/08 (voir Figure 22), les laitues EF sont plus larges de 2,2cm que les laitues LFF+EF (p -value $< 0,05$). Pour les mesures de diamètre au collet on observe exactement les mêmes résultats, avec une différence significative à la récolte entre les modalités LFF+EF et EF (p -value $< 0,05$). Les laitues traitées aux EF et à la LiFoFer ont une moins bonne croissance végétative que la modalité EF mais reste similaires à la modalité témoin.

3.2.2 Indicateurs de la santé des plantes

3.2.2.1 Taux de Brix

Les mesures de taux de Brix effectuées sur les laitues du cycle 2 et présentées sur la Figure 23 varient en moyenne entre 3,51°B (LFF) et 4,61°B (T). Les mesures ne présentent pas de différences significatives entre les modalités et donc globalement pas de différences du niveau de la santé des laitues. Les valeurs des laitues du traitement LFF sont plus variables (écart-type = 1,49) que pour les autres modalités (écart-type compris entre 0,36 et 0,65), suggérant que l'état de santé de ces laitues est plus variable que les autres modalités.

3.2.2.2 Incidence des ravageurs et des phytopathogènes

Aucuns ravageurs ni pathogènes n'ont été identifiés au cours de la culture. Ainsi, il n'est pas possible de mettre en évidence des différences d'attaques entre les différentes modalités.

3.2.2.3 Analyse des nutriments contenus dans la sève

Les résultats du laboratoire d'analyse de sève sont fournis avec des optimums pour chaque nutriment. Des tests statistiques ne peuvent être appliqués à ces données car une seule valeur est obtenue pour chaque modalité. Ce sont donc des observations permettant d'émettre des pistes d'approfondissement. Parmi tous les éléments analysés, il est choisi de présenter ceux qui présentent des tendances différentes entre les différents traitements. L'ensemble des données est présenté en Annexe IV : Résultats des analyses NOVACROP Laitues cycle 2. La Figure 24 présente les taux nutriments principaux par modalité, l'intervalle bleu correspond à l'optimum fournit par le laboratoire. Le taux de calcium (Ca) contenu dans les jeunes feuilles varie peu.

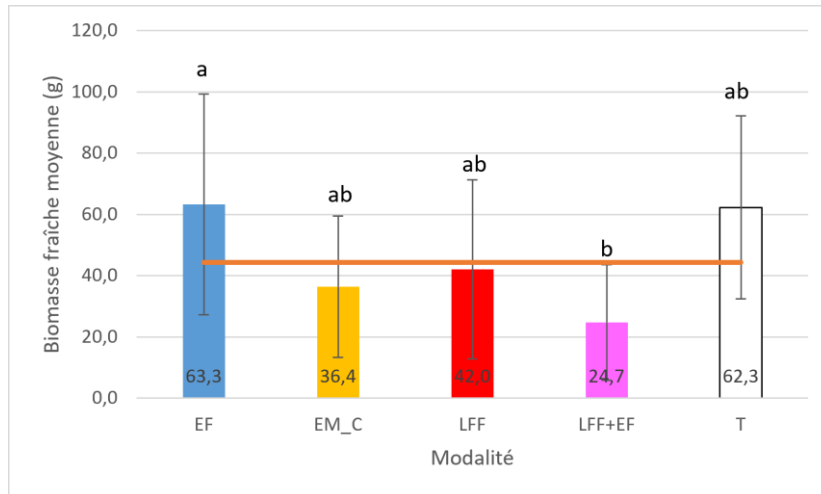


Figure 25: Biomasse fraîche moyenne (g) par modalité des laitues cycle 2 à la récolte

Figure 25: Average fresh biomass (g) per modality of cycle 2 lettuce at harvest

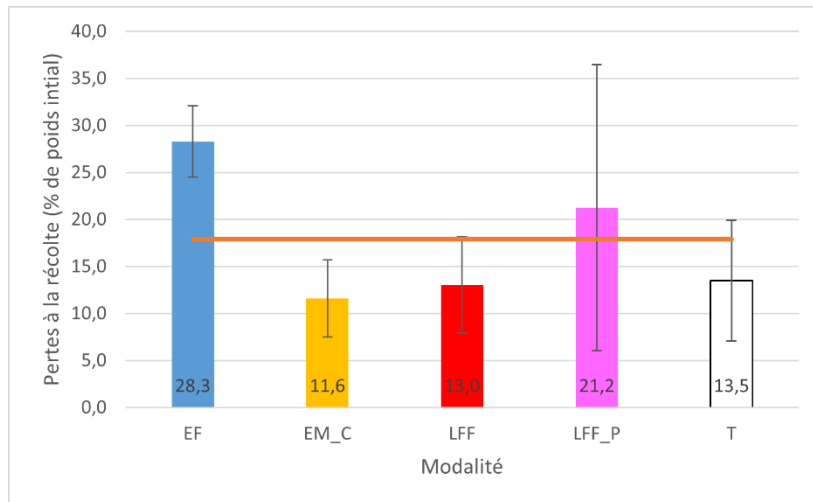


Figure 26: Perte de biomasse fraîche à la récolte (% de la biomasse initiale) par modalité

Figure 26: Loss of fresh biomass at harvest (% of initial biomass) by modality

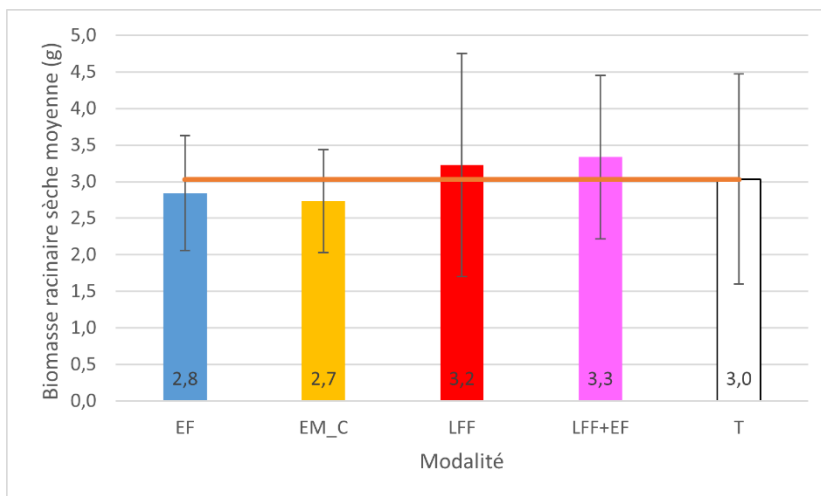


Figure 27: Biomasse racinaire sèche moyenne (g) des tomates par modalité après récoltes

Figure 27: Average dry root biomass (g) of tomatoes per modality after harvesting

Les taux des vieilles feuilles sont décroissants en partant de la modalité EF (1007ppm), EM (930ppm) puis on arrive autour de l'optimum avec la modalité LFF (815ppm), LFF+EF (634ppm) et la modalité témoin (584ppm). Les valeurs sont globalement un peu élevées au regard de l'optimum fournit et de la littérature (entre 180 et 360ppm). Les valeurs de phosphore (P) sont cohérentes avec l'optimum et la littérature (entre 200 et 330 ppm) et sont plus élevées pour les jeunes feuilles des modalités EM (393ppm) et LFF (376ppm). Les taux de sucre contenus de la sève diffèrent de manière importante. La sève contenue dans les jeunes feuilles des laitues des modalités Témoin (0,7%), EF (0,6%) et LFF (0,4%) présentent des taux de sucre compris dans l'optimum, entre 0,3% et 1,4% de la sève, et plus élevés que les autres modalités. Les modalités EF et T se démarquent particulièrement. Aucune particularité n'est notée pour les valeurs de potassium (K) qui sont globalement un peu élevées par rapport aux références. Les taux d'azote minéral (NH₄) sont plus élevés pour les modalités LFF+EF (248ppm) et EF (221ppm). Pour le taux d'azote (N) total les valeurs sont proches mais toutes en dessous de l'optimum fournit par le laboratoire. Globalement, il n'y a pas de signe de carences particulières. Les taux de sucres élevés pour les modalités EF et Témoins témoigneraient d'une meilleure santé des laitues de ces modalités.

3.2.3 Indicateurs du rendement

A la récolte, le développement des laitues est très disparate. On dénombre au total 6 laitues qui n'ont pas survécu à la transplantation au champ. A la récolte, certaines laitues sont montées en graines (notées M), d'autres sont commercialisables (notées C) et d'autres ont un diamètre légèrement petit mais commercialisables (notées PC). Ainsi, seules les laitues C et PC sont pesées. Ce tri réduit le nombre de mesures à 45 en tout (au lieu de 80). Finalement, 23 laitues sont commercialisables et 22 laitues sont petites mais commercialisables. Les poids frais moyens sont présentés Figure 25.

Le nombre de répétitions ayant ainsi été réduit, les écarts-type sur les moyennes de poids frais par modalité sont grands. Malgré cela, les analyses statistiques révèlent que les laitues de la modalité EF (63,3g) possède un poids frais significativement plus élevé que celles de la modalité LFF+EF (24,7). On n'observe pas de différences pour les pertes à la récolte liées au nettoyage des laitues (Figure 26).

3.3 EXPERIMENTATION N°2 : RESULTATS

3.3.1 Indicateurs de la croissance végétative

3.3.1.1 Biomasse racinaire

Les mesures de biomasse racinaires sont présentées sur la Figure 27, et montrent une légère tendance des tomates traitées à la LiFoFer et aux extraits fermentés et traitées à la LiFoFer seule à avoir une biomasse racinaire plus élevée que les autres modalités. Ces différences ne sont pas significatives (p-value > 0,05), les écarts-types des données étant très grands. De plus les valeurs de LFF et LFF+EF sont proches du témoin.

3.3.1.2 Suivi de la croissance aérienne

Les mesures de hauteur sont arrêtées au 12/07 car il est considéré que la croissance végétative est terminée. Ainsi, pour les mesures utilisées sont comprises entre le 10/05 (jour du premier traitement et des premières mesures) et le 12/07.

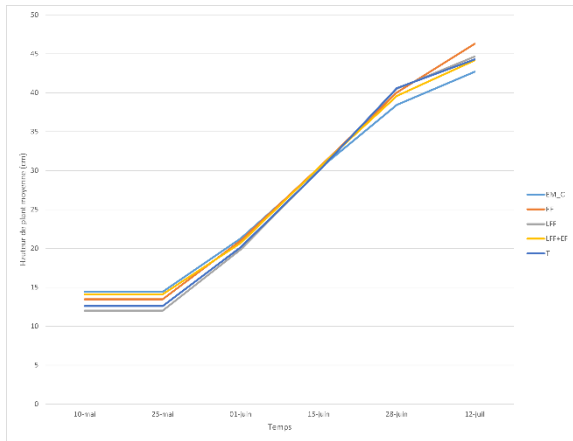


Figure 28: Suivi de la hauteur de plant des pieds de tomate (cm) en fonction du temps

Figure 28: Monitoring of plant height of tomato plants (cm) as a function of time

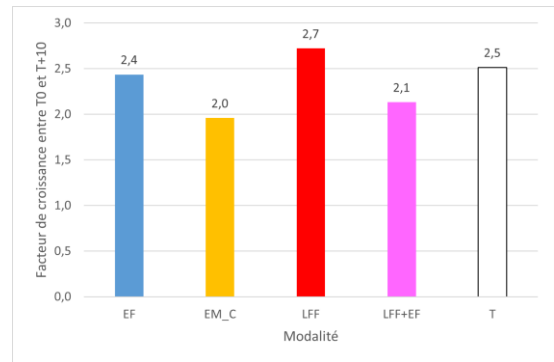


Figure 29: Facteur de croissance des pieds de tomate calculé par modalité

Figure 29: Growth factor of tomato plants calculated by modality

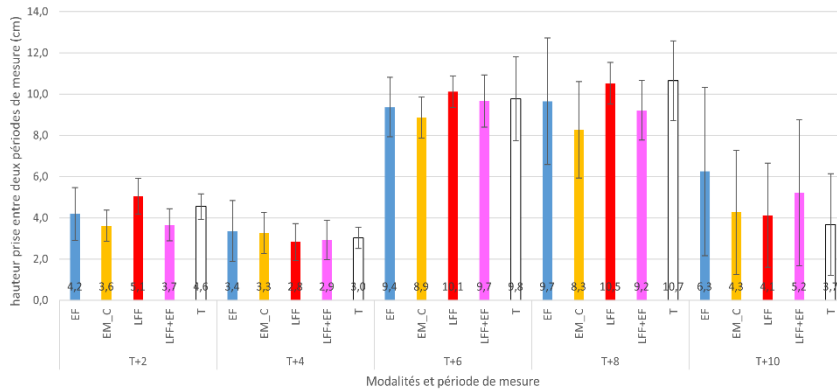


Figure 30: Croissance (cm) des pieds de tomates entre deux périodes de mesure

Figure 30: Growth (cm) of tomato plants between two measurement periods



Figure 31: Photographie d'un puceron aptère sur pied de tomate (photographie : C.Denis)

Figure 31: Photograph of an aphid on a tomato plant (photograph: C.Denis)

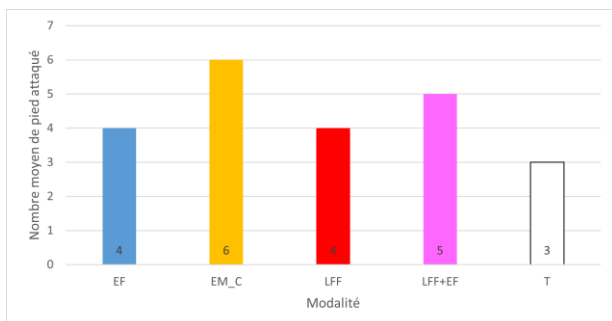


Figure 32: Nombre moyen de pied de tomate attaqué par les pucerons par modalité

Figure 32: Average number of tomato plants attacked by aphids per modality

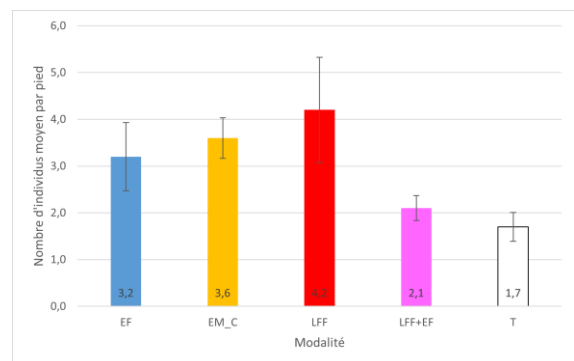


Figure 33: Nombre de pucerons moyen par pied de tomate par modalité

Figure 33: Average number of aphids per tomato plant per modality

Globalement, les différences de hauteur entre les modalités sont faibles (voir Figure 28). Mais le facteur de croissance (Figure 29) calculé entre la mesure à T0 (10/05) et la dernière mesure de hauteur (12/07) est plus élevé pour les plants traités à la LFF (2,7) suivie par les modalités Témoin (2,5), EF (2,4) puis LFF+EF (2,13) et enfin la modalité EM_C (2,0). Le suivi de la hauteur prise entre chaque mesure (Figure 30) permet une analyse plus détaillée. Entre la 3^{ème} (T0) et la 5^{ème} semaine de croissance (T+2), les tomates traitées à la LiFoFer poussent significativement plus rapidement que les modalités EM_C et LFF+EF, avec un gain moyen respectif de 5,1cm. Elles sont suivies des pieds de tomates traitées à l'eau (Témoin : + 4,6cm) et celles traitées aux extraits fermentés d'ortie (+ 4,2cm). Les modalités traitées à la LFF+EF et aux EM_C ont une croissance plus lente (3,7 et 3,6 cm). Entre le 01/06 (T+4) et le 15/06 (T+6) la modalité LFF a poussé autant que la modalité témoin (+ 10,1 et + 9,8) et ce sont les pieds de tomates traités aux EM_C qui ont poussés moins vite (+ 8,9 cm). Les autres semaines de mesure, il n'y a pas de différences significatives entre les différentes modalités. De même, il n'y pas de différence de de hauteur prise entre la première semaine de mesure et la 12^{ème} semaine de mesure, ni de tendance qui se dégage. Les gains en nombre de cm total gagné en hauteur, du repiquage à la dernière récolte, ne met pas en évidence de différence significative (p-value > 0,05) entre les différentes modalités. Néanmoins on remarque une croissance plus rapide lors des premières semaines de croissance pour les tomates traitées à la LiFoFer. Les mesures de diamètre au collet sont similaires pour les différentes modalités. Les comptages de gourmands et de nombre de grappe par pied ne diffèrent pas non plus. On retrouve en moyenne 3 gourmands par pieds et 1 grappe par gourmand. Le nombre moyen de fruit par grappe et nombre de fruit par pied présentent également des valeurs équivalentes pour chaque modalité.

3.3.2 Indicateurs de la santé des plantes

3.3.2.1 Incidence des ravageurs et phytopathogènes

Des pucerons sont dénombrés en début de croissance, quand les pieds de tomate sont dans la pépinière. Les aptères (Figure 31) sont de couleur verte et les antennes sont aussi grandes que le corps. L'espèce soupçonnée est *Myzus persicae* mais n'est pas identifiée avec certitude car aucun adulte n'a été aperçu. Les attaques ont eu lieu entre le 17/05 et le 25/05. Après cette date, les tomates sont placées à l'extérieur et la pression diminue très rapidement. Les modalités les plus attaquées en termes de nombre de pied attaqués (Figure 32) sont les tomates EM et LFF+EF. Toutefois, c'est sur la modalité LFF qu'on observe le plus haut nombre d'individu moyen par pied (Figure 33). Cela est dû à un pied comptant 36 individus. Les analyses statistiques ne révèlent toutefois pas de différences significatives pour cet indicateur.

3.3.2.2 Taux de Brix

Les taux de Brix moyens mesurés pour la récolte 1 et la récolte 3 sont présentés page suivante (Figure 34). Les données de taux de Brix sont disponibles pour la première (récolte 1) et la dernière récolte (récolte 3). Une erreur de manipulation ne permet pas d'exploiter les données de la deuxième récolte. Le taux de Brix moyen par modalité sur les 2 récoltes ne présente pas de différence significative. Il en va de même lorsque chaque récolte est analysée tour à tour (p-value > 0,05). Le taux de Brix moyen global de la première récolte est plus bas que la deuxième rendant probablement compte de la différence de maturité des fruits (Kleinhenz 2012).

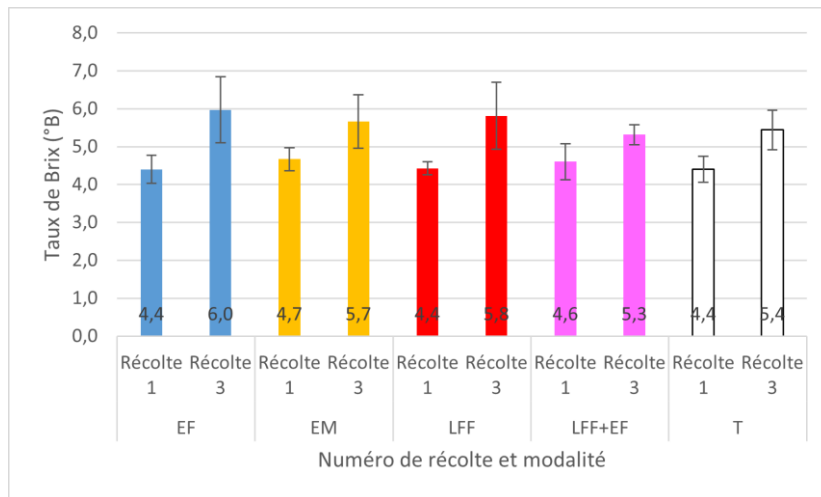


Figure 34: Taux de Brix moyen des tomates (°B) par modalité et par récolte

Figure 34: Average Brix level of tomatoes (°B) by modality and by harvest

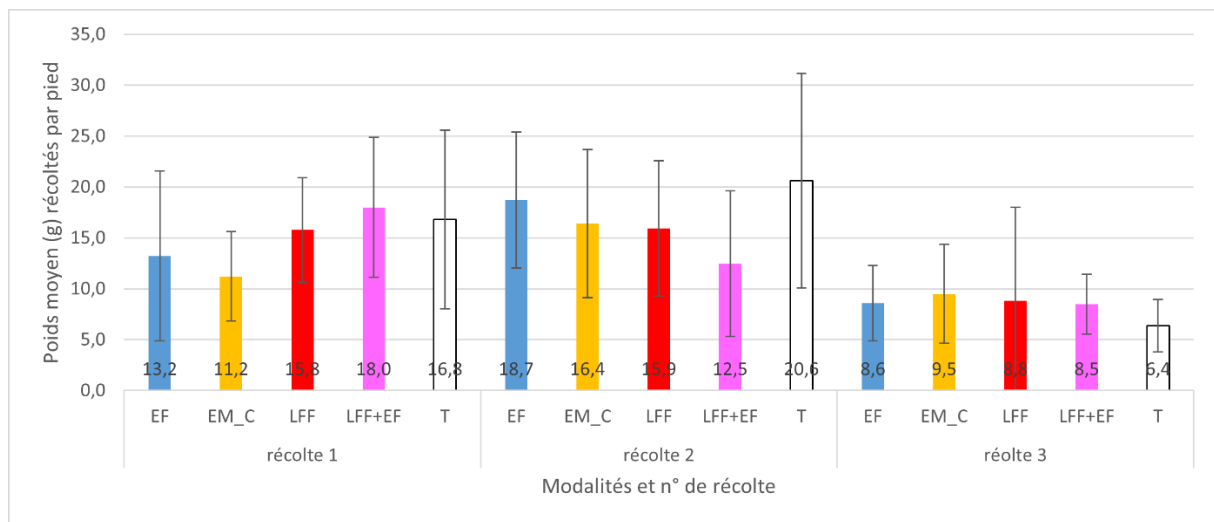


Figure 35: Poids moyen (g) récolté par pied de tomate par modalité pour les différentes récoltes

Figure 35: Average weight (g) harvested per tomato plant by modality for the different harvests

Tableau 9: Récapitulatif des données de rendement sur tomates

Table 9: Summary of tomato yield data

Modalité	Nombre de fruit récolté	Poids total récolté (g)	Poids moyen par fruit (g)
EF	37	250,3	6,8
EM_C	20	143,3	7,2
LFF	32	255,3	8,0
LFF+EF	34	259,5	7,6
T	45	346,7	7,7

3.3.3 Indicateurs du rendement

En tout, 3 récoltes sont effectuées pour un total de 1,2551kg de tomates. Il est décidé d'arrêter les récoltes le 23/08/2021 pour réaliser les traitements de données dans le cadre de ce rapport mais aussi car les plants de tomates commencent à flétrir. Les données détaillées dans le Tableau 9 indiquent que la récolte totale (somme des trois récoltes) la plus importante est de 346,7g pour la modalité témoin, suivie par la modalité LFF+EF avec 259,5g puis les modalités LiFoFer et Extrait Fermenté (respectivement 255,3g et 250,3g) et enfin la modalité microorganismes du commerce avec 143,3g. Pour ce laps de temps, c'est la modalité témoin qui a le plus produit. Les poids moyens des fruits sur les 3 récoltes sont analysés sur la Figure 35. Les poids moyens sont proches mais on remarque que pour la modalité LFF l'écart-type sur les données est grand, signifiant une grande variabilité du poids moyen des fruits. Lorsque chaque récolte est étudiée une à une, aucune différence significative de rendement en poids frais total récolté n'est mise en évidence, ni sur les données de poids moyen par fruit, ni sur les données de poids total par modalité.

4 ANALYSES ET DISCUSSION DES RESULTATS

4.1 EXPERIMENTATION N°1, CYCLE 1

Cette première partie de l'expérimentation n°1 met en avant un désavantage en termes de croissance racinaire (Lr et Br), de croissance végétative et de rendement (matière fraîche et matière sèche) pour les laitues traitées avec un mélange de LiFoFer et d'extrait fermenté d'ortie (LFF+EF). Les laitues de la modalité EF sont, pour ces indicateurs, équivalentes au témoin, voire légèrement avantagées. Ces résultats sont corroborés par la littérature scientifique dont les résultats encourageants concernant la croissance végétative, la floraison, le rendement, grâce à l'utilisation de purin d'ortie (Domenico 2019). Les laitues de la modalité LFF obtiennent quant à elles des résultats en-dessous ou équivalent au témoin pour les mesures de rendement en biomasse aérienne fraîche à la récolte. La combinaison des extraits fermentés d'ortie et de la LiFoFer semble néfaste au bon développement des laitues. Concernant les attaques de limaces, elles semblent avoir été plus fortes sur les modalités LFF+EF. Ce résultat est à mettre au regard des résultats obtenus sur la croissance végétative. En effet des attaques sont identifiées durant cinq semaines, les dommages causés sur les laitues de ces modalités peuvent donc s'être répercutés sur la croissance végétative et le rendement. Le diagnostic de sol par les PBI n'indiquent pas particulièrement de mauvaises conditions sur les placettes des laitues LFF+EF. Concernant les effets de la LiFoFer seule sur les laitues, les résultats obtenus pour les indicateurs de la croissance végétative ne distinguent pas significativement cette modalité du témoin sauf pour le diamètre global des laitues à la récolte, qui est plus petit. Cette observation est confirmée par les mesures de biomasse fraîche qui suivent la même tendance. Il serait intéressant de reconduire cet essai en se concentrant sur l'effet de la LiFoFer seule et de voir si la tendance se confirme à nouveau. En effet, cette piste semble prometteuse étant donné que plusieurs études indiquent une amélioration de la croissance et du rendement des laitues après un traitement aux EM (Criollo et al. 2011 ; Liriano González et al. 2019).



Figure 36 : Photographies des laitues du cycle 2 de la modalité EF, répétition 1, illustrant les disparités de stade de développement au sein d'une même placette expérimentale

Figure 36: Photographs of lettuce from cycle 2 of the EF model, replication 1, illustrating the disparities in development stage within the same experimental plot

Aucun phytopathogène n'ayant été identifié au cours de l'expérimentation, nous ne pouvons pas confirmer ou infirmer l'hypothèse concernant le potentiel de biocontrôle de la LiFoFer pour les maladies provoquées par les microorganismes sur les laitues.

Enfin, la comparaison des résultats des EM_C et de la LiFoFer ne donne de tendance sur aucun indicateur. De plus, les effets des EM_C sur la culture n'ont pas non plus été significatifs. Pour les prochaines expérimentations, on peut envisager d'utiliser le produit de référence fabriqué par la société EMRO. Ce produit ferait meilleure référence que le produit Synbiovie utilisé ici qui est peu évalué dans la littérature.

4.2 EXPERIMENTATION N°1, CYCLE 2

Les résultats obtenus pour le cycle 2 sont à prendre avec plus de précaution étant donné que moins de données ont pu être récoltées dû à la grande disparité de stade de développement des laitues à la récolte (voir Figure 36). De plus le cycle de croissance a été plus rapide donc moins de données de suivi de croissance sont à disposition pour évaluer l'effet de la LiFoFer. Les mesures de diamètre effectuées à la récolte et les mesures de biomasse fraîche montrent une différence significative entre les laitues de la modalité LFF+EF et la modalité EF. Bien qu'il n'y ait pas de différence avec le témoin pour ces deux modalités, une tendance se dégage en faveur des EF. L'analyse qualitative des nutriments mesurés dans la sève des plantes met en avant un taux de sucres totaux plus élevés pour les modalités EF et Témoin, indiquant un bon développement de la plante, ce qui est confirmé par les valeurs de rendement. L'analyse de sol BRDA-Hérody et le diagnostic T0 des PBI indiquent que le sol est assez compacté, voire asphyxié, ce qui favoriserait une quantité élevée de NH₄ dans le sol. Cela expliquerait les taux élevés de NH₄ trouvés dans les laitues et donc son absorption importante par ces dernières (Fernandes, Rossiello 1995). Globalement, les laitues traitées à la LiFoFer et aux extraits fermentés présentent une fois de plus des résultats inférieurs aux autres pour les indicateurs de croissance, de rendement et pour certains indicateurs de la santé des plantes.

4.3 EXPERIMENTATION N°1 : ANALYSE CROISEE DES CYCLES 1 ET 2

4.3.1 Comparaison du cycle 1 et 2

Les tendances des rendements obtenus pour les laitues du cycle 1 et du cycle 2 sont comparées. Il est observé la même baisse de rendement significative de la modalité LFF+EF par rapport à la modalité EF, Globalement au cours des deux cycles de culture la modalité LFF+EF présentent de moins bons résultats surtout pour les indicateurs de croissance et de rendement. Pour le cycle 2, il n'y a aucune attaque de limaces et pourtant, les laitues LFF+EF présentent de moins bons résultats. Dans ce cas, le lien entre les attaques de ravageurs et le faible rendement de la modalité LFF+EF ne peut être établi. Il semble donc que cette modalité soit défavorable au développement et au rendement des laitues. Il n'existe pas ou peu d'études combinant l'utilisation d'extrait fermenté d'ortie et l'utilisation de microorganismes bénéfiques, artisanaux ou non. C'est également la première fois que cette modalité est testée à l'association, il est donc difficile de confronter ces résultats à d'autres études.

Afin de mieux comprendre les interactions entre la LiFoFer et l'extrait fermenté d'ortie, il serait intéressant de reconduire des expérimentations avec différentes modalités d'application de ces deux préparations. En effet, les agriculteurs biologiques susceptibles d'utiliser la LiFoFer sont souvent déjà sensibilisés à l'utilisation de purin d'ortie. En attendant d'étoffer ces résultats, il faut être vigilant sur les recommandations faites aux agriculteurs qui voudraient utiliser de la LiFoFer et qui utilisent déjà de l'extrait fermenté d'ortie, afin de ne pas pénaliser leurs récoltes.

Concernant les effets de la LiFoFer seule sur les laitues de plein champ, on ne constate pas d'effet favorisant la croissance des plantes comparée à des laitues traitées à l'eau.

4.3.2 Critique du dispositif expérimental

Le poids des laitues récoltées est en deçà des laitues habituellement trouvées dans le commerce. Pour une laitue cultivée en agriculture biologique, il est recommandé de récolter lorsque le poids atteint environ 350g/plante (FRAB 2009). Ici le poids maximal est de 188,7g. Des facteurs tels que la densité élevée de plantation nécessaire à des fins d'expérimentation ainsi que le sol nouvellement travaillé ont pu limiter la croissance des laitues et leur rendement, nous éloignant d'une culture en condition de production. Concernant l'emplacement des modalités sur la parcelle, une erreur dans la disposition initiale des placettes d'expérimentation déséquilibre le plan expérimental prévu et ne permet plus de couvrir aussi bien l'hétérogénéité du terrain. Pour les prochaines expérimentations sur ce terrain, un rééquilibrage du plan expérimental serait approprié. Il n'est pas possible de réaliser un plan parfaitement équilibré car la parcelle est assez étroite. L'hétérogénéité du terrain et les conditions expérimentales peu adaptées à un objectif de production ont pu cacher les effets éventuels de la LiFoFer sur les cultures de laitues.

4.4 EXPERIMENTATION N°2

A la 5^{ème} semaine de croissance et 2 semaines après le début du traitement, les tomates traitées à la LiFoFer semble pousser plus rapidement. De plus, le facteur de croissance calculé entre la mesure à T0 et la dernière mesure de hauteur tend à être plus élevé pour les plants traités à la LFF (2,72). On peut émettre l'hypothèse que le traitement à la LiFoFer permettrait un taux de croissance plus élevé à un stade relativement jeune du plan de tomate. Un résultat similaire est observé pour un essai réalisé sur du maïs doux. L'utilisation d'EM est comparée avec celle d'un fertilisant chimique. Elle révèle que les plants fertilisés aux EM, malgré un retard de croissance aux premiers stades de la plante, le rattrapent ayant un taux de croissance plus élevé que le fertilisant chimique au stade « moyen » de la plante, sans différence finale de biomasse sèche et de rendement en grain (Kato et al. 1999). Une autre étude qui utilise un inoculant contenant un consortium de bactéries et champignons sur une culture de tomates constate une augmentation du rendement par rapport à des plants non inoculés (Inculet et al. 2019). Les constats ne sont pas similaires pour l'expérimentation 2. Cependant, les résultats obtenus ici sont à mettre au regard des attaques de pucerons ayant eu lieu la même semaine. Le 25/05 les tomates de la modalité EM_C et LFF+EF ont gagné moins de cm de hauteur que les autres modalités. A cette même date, un relevé de puceron est effectué et révèle que les modalités avec le nombre de pied le plus attaqué sont également les modalités EM_C et LFF+EF.

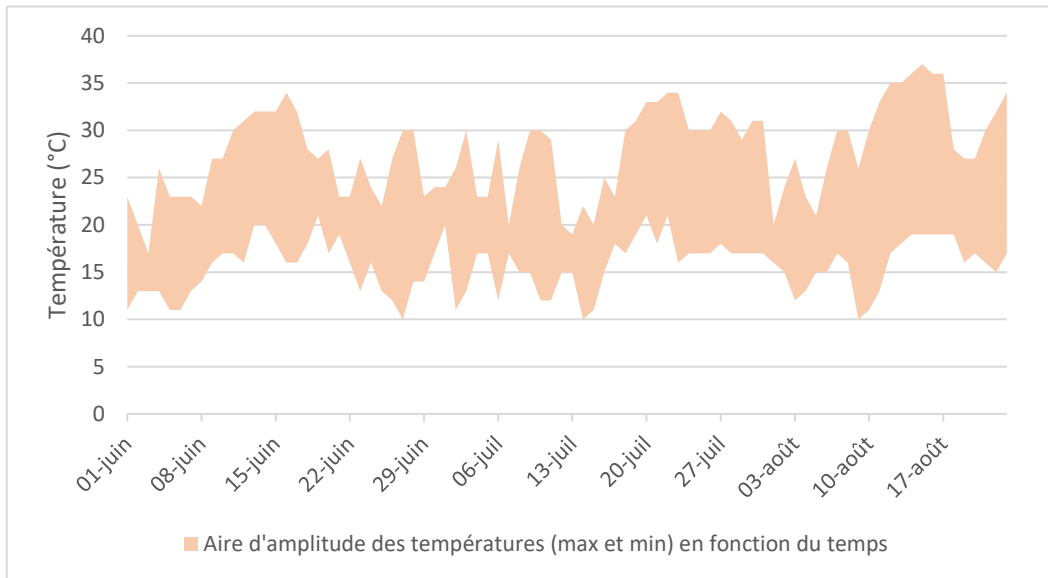


Figure 37: Relevés des températures minimales et maximales au cours de l'expérimentation sur tomate

Figure 37: Minimum and maximum temperature readings during the tomato experiment

Ainsi, pour éviter les biais provoqués par les attaques de ravageurs et consolider les observations, il serait intéressant de reconduire cet essai en pots sous un filet de protection évitant le passage des pucerons. Globalement, il n'y a pas de différence de croissance entre les différentes modalités, et pas de différences significatives avec la modalité témoin. La difficulté de mettre en évidence les effets de la LiFoFer sur la culture de tomate est possiblement lié aux conditions de culture. Les températures élevées du mois de juillet et août illustrée par le relevé de température ci-contre peuvent avoir limité la croissance des tomates (Figure 37). Une température supérieure à 35°C peut endommager la germination, la phase végétative, la floraison, la nouaison et la phase de maturation des fruits (Faruq et al. 2012). De plus, les tomates n'ont pas reçu d'ombre et l'irrigation n'a pas été suffisante tout au long de la culture. Les symptômes tels que le jaunissement et l'assèchement de certaines feuilles témoignant du stress hydrique sont accentués par un support de culture séchant. Ces éléments expliquent également le rendement global faible comparé au rendement potentiel de ce cultivar, les fruits pouvant peser entre 15 et 30 g, faisant entre 5 et 18 fruits par grappe. Ainsi, dans le cas de cette expérience, les traitements appliqués ne sont ni dommageables ni favorables à la croissance et au rendement des tomates.

4.5 DISCUSSION AUTOUR DES CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

4.5.1 Hétérogénéité du terrain

Des observations de terrain remettent en doute l'homogénéité du terrain utilisé pour les cycles 1 et 2 de l'expérimentation n°1 et ainsi sa viabilité à être utilisé pour des expérimentations de pleins champs. A la suite du diagnostic des plantes bio indicatrices, l'expert fait remarquer que le sol semble plus humide au nord (blocs 1 et 3) qu'au sud (placette 2 et 4). En effet, après vérification statistique, l'effet bloc est confirmé : les laitues des blocs 1 et 3 ont un meilleur rendement et un plus haut diamètre que les laitues des blocs 2 et 4. Une différence d'exposition au soleil est également notée. Les laitues à l'est (blocs 3 et 4) reçoivent plus d'ombre que les laitues des blocs 1 et 2. En effet, un bosquet apporte de l'ombre grâce aux arbres qu'il abrite. Ainsi, les résultats obtenus pour l'expérimentation 1 semblent fortement influencés par l'hétérogénéité du terrain et sont donc à interpréter avec précaution. Bien qu'il soit difficile de trouver un terrain homogène en région ardéchoise, une parcelle moins hétérogène serait préférable.

4.5.2 Les contraintes expérimentales : constats et perspectives

Les études menées au sein de l'association répondent à des contraintes de logistique et de coût. Certaines analyses plus coûteuses mais plus poussées pourraient être mise en place afin de mieux comprendre le fonctionnement de la LiFoFer. Par exemple, la mesure de l'activité bactérienne est un bon indicateur permettant d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur le court terme (Stark et al. 2007 ; Lagomarsino et al. 2009). Elle sera d'autant plus judicieuse dans le cas d'une expérimentation à durée limitée si la LiFoFer a un impact sur l'activité biologique du sol. L'association souhaite également évaluer le potentiel de la LiFoFer à allonger la durée de conservation des fruits et légumes une fois conservés. La littérature scientifique est encourageante quant à cette piste aux vues de la part importante des bactéries lactiques dans la LiFoFer. En effet ces bactéries auraient un potentiel de biocontrôle sur les pathogènes apparaissant post-récolte (Lamont et al. 2017).

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Face à la nécessité de développer des connaissances pratiques et des références scientifiques sur l'utilisation de produits à base de microorganismes et leur fonctionnement, l'association Terre et Humanisme, actrice du déploiement de l'agroécologie, forme un réseau important d'acteurs du monde agricole technique et scientifique pour travailler en réponse à cette problématique. Dans ce cadre, ce stage s'est particulièrement intéressé aux effets de la litière forestière fermentée (LiFoFer), testée empiriquement depuis plusieurs années en France et en Afrique de l'Ouest.

Les expérimentations menées pendant ce stage sur *Lactuca sativa* (laitue) et *Solanum lycopersicum* (tomate) ne permettent pas de mettre clairement en évidence un effet de la LiFoFer sur ces cultures. Pour la laitue, aucun traitement n'a permis une amélioration significative de la culture par rapport aux témoins traités à l'eau, que ce soit d'un point de vue de la santé de la plante, de la croissance végétative ou du rendement. Au contraire, la modalité LiFoFer combinée aux extraits fermentés d'ortie sur laitue semble même influencer négativement les indicateurs de croissance végétative et de rendement pour cette culture. Pour la culture de laitue, les hypothèses initiales d'effets positifs de la LiFoFer sur la croissance végétative, le rendement, la santé de la plante ainsi que de stimulation de la vie du sol ne peuvent être vérifiées. Cependant, pour la culture de tomate, la croissance végétative semble avoir été favorisée par l'application de LiFoFer au cours des stades « jeunes » de la plante (5^{ème} semaine de croissance).

Outre les biais expérimentaux constatés au cours de l'expérimentation menée sur les laitues, la méthode d'évaluation des effets de la LiFoFer peut être améliorée. Le nombre important d'objectifs sous-tendus par les essais rend difficile la caractérisation précise des effets potentiels de la LiFoFer. En effet, avant de pouvoir comparer la LiFoFer à d'autres produits similaires et avant d'explorer simultanément plusieurs pistes d'applications possibles de ce produit, il semble prioritaire de se concentrer sur la validation de l'effet d'augmentation du rendement des cultures. C'est une préoccupation importante qui passe pour la LiFoFer par la précision des préconisations d'utilisation. La dose de produit pur, la dilution, la fréquence et la période de traitement sont des éléments à préciser.

Au regard de la complexité et du peu de connaissances disponibles sur cette technologie qu'est la LiFoFer, il est important de continuer à collaborer avec les organismes de recherche et d'expérimentations partenaires du projet. Le développement d'un tel produit est très pertinent pour une agriculture en transition agroécologique, non seulement en France mais dans le monde entier. Les résultats obtenus sont encourageants, non seulement au travers du projet LiFoFer, mais aussi pour les préparations à base de microorganismes développées à travers le monde. De plus, en considérant la part des produits biologiques qui continue d'augmenter chaque année dans de nombreux pays, l'utilisation de ces produits est prometteuse (Rani, Kumar 2019). Les agriculteurs biologiques, conventionnels, de grandes et petites surfaces peuvent tous y trouver leur intérêt : les effets des bioproduits sont visibles sur le long terme dans l'agrosystème, il n'y a pas d'effets secondaires sur la santé humaine, ni sur l'environnement et la fabrication est peu coûteuse. Face aux constats exposés par les experts du climat dans le dernier rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), il est urgent de développer des solutions résilientes pour l'agriculture, une des premières victimes du changement climatique. Le développement de la LiFoFer est donc à poursuivre car elle répond à de nombreux enjeux sociaux, économiques et environnementaux actuels.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AERTS, Rien, 2003. The Role of Various Types of Mycorrhizal Fungi in Nutrient Cycling and Plant Competition. In : VAN DER HEIJDEN, Marcel G. A. et SANDERS, Ian R. (éd.), *Mycorrhizal Ecology* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. Ecological Studies. pp. 117-133. [Consulté le 2 avril 2021]. ISBN 978-3-540-00204-8. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-38364-2_5.
- AHEMAD, Munees et KIBRET, Mulugeta, 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. In : *Journal of King Saud University - Science*. 1 janvier 2014. Vol. 26, n° 1, pp. 1-20. DOI 10.1016/j.jksus.2013.05.001.
- ARRAS, G., CICCIO, V. De., ARRU, S. et LIMA, G., 1998. Biocontrol by yeasts of blue mould of citrus fruits and the mode of action of an isolate of *Pichia guilliermondii*. In : *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 1 janvier 1998. Vol. 73, n° 3, pp. 413-418. DOI 10.1080/14620316.1998.11510993.
- BACHELIER, Georges, 1978. *La faune des sols, son écologie et son action* [en ligne]. Paris : ORSTOM. [Consulté le 30 avril 2021]. Initiations-Documentations Techniques, 38. ISBN 978-2-7099-0530-5. Disponible à l'adresse : <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:09691>. Centre IRD de Bondy
- BERG, Gabriele, 2009. Plant-microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. In : *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1 août 2009. Vol. 84, n° 1, pp. 11-18. DOI 10.1007/s00253-009-2092-7.
- BHAT, Tauseef, AHMAD, Drlatief, GANAI, A et KHAN, Owais, 2015. Nitrogen Fixing Biofertilizers; Mechanism and Growth Promotion: A Review. In : *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 1 juillet 2015. Vol. 9, pp. 1675-1690.
- BHATTI, Asma Absar, HAQ, Shamsul et BHAT, Rouf Ahmad, 2017. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. In : *Microbial Pathogenesis*. 1 octobre 2017. Vol. 111, pp. 458-467. DOI 10.1016/j.micpath.2017.09.036.
- BORDENSTEIN, Seth R. et THEIS, Kevin R., 2015. Host Biology in Light of the Microbiome: Ten Principles of Holobionts and Hologenomes. In : *PLOS Biology*. 18 août 2015. Vol. 13, n° 8, pp. e1002226. DOI 10.1371/journal.pbio.1002226.
- BOTHA, Alfred, 2011. The importance and ecology of yeasts in soil. In : *Soil Biology and Biochemistry*. 1 janvier 2011. Vol. 43, n° 1, pp. 1-8. DOI 10.1016/j.soilbio.2010.10.001.
- BOZSIK, A., 1996. Studies on aphicidal efficiency of different stinging nettle extracts. In : *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*. 1 janvier 1996. Vol. 69, n° 1, pp. 21-22. DOI 10.1007/BF01905863.
- BURGES, A. et RAW, F. (éd.), 1967. *Soil biology*. London : Academic Press. QL110 .B8 1967
- CHARRIER, M., 2016. LIMACES DES CULTURES. Caractéristiques biologiques des Mollusques Gastéropodes terrestres. In : *ARVALIS - Institut du végétal* [en ligne]. 18 mars 2016. [Consulté le 30 juin 2021]. Disponible à l'adresse : <https://docplayer.fr/129242630-Limaces-des-cultures-caracteristiques-biologiques-des-mollusques-gasteropodes-terrestres-arvalis-institut-du-vegetal-charrier-maryvonne.html>.

CRIOLLO, Hernando, LAGOS, Tulio, PIARPUEZAN, Edwin et PÉREZ, Ruth, 2011. The effect of three liquid bio-fertilizers in the production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata). In : *Agronomía Colombiana*. décembre 2011. Vol. 29, n° 3, pp. 415-421.

DAS, Surajit, LYLA, P. S. et AJMAL KHAN, S., 2008. Distribution and generic composition of culturable marine actinomycetes from the sediments of Indian continental slope of Bay of Bengal. In : *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 1 mai 2008. Vol. 26, n° 2, pp. 166-177. DOI 10.1007/s00343-008-0166-5.

DOMENICO, Prisa, 2019. Bat guano and Nettle slurry (*Urtica dioica* L.) used as biostimulants on *Delosperma cooperi* and *Sedum rubrotinctum* plants. In : *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2019. Vol. 3, n° 2, pp. 017-023. DOI 10.30574/wjarr.2019.3.2.0058.

DUCERF, Gérard, 2018. Comment faire un diagnostic de sol dans une parcelle. In : *L'encyclopédie des plantes bioindicatrices alimentaires et médicinales, Guide de diagnostic des sols*. 6. S.l. : Promonature. pp. 56-59. ISBN 2-9519258-7-5.

EL-TARABILY, Khaled A. et SIVASITHAMPARAM, Krishnapillai, 2006. Potential of yeasts as biocontrol agents of soil-borne fungal plant pathogens and as plant growth promoters. In : *Mycoscience*. 1 février 2006. Vol. 47, n° 1, pp. 25-35. DOI 10.1007/s10267-005-0268-2.

EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY., 2008. *Environmental assessment of soil for monitoring. Volume I, Indicators & criteria*. [en ligne]. LU : Publications Office. [Consulté le 30 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://data.europa.eu/doi/10.2788/93515>.

FAESSEL, Ludovic, 2014. PRODUITS DE STIMULATION EN AGRICULTURE VISANT A AMELIORER LES FONCTIONNALITES BIOLOGIQUES DES SOLS ET DES PLANTES - ETUDE DES CONNAISSANCES DISPONIBLES ET RECOMMANDATIONS STRATEGIQUES. In : [en ligne]. 2014. [Consulté le 19 août 2021]. Disponible à l'adresse : <https://plateforme-documentaire.ctifl.fr/Record.htm?idlist=1&record=19594839124913120119>.

FARUQ, Golam, NEZHADAHMADI, Arash, M, Rahman et PRODHAN, Md Zakaria, 2012. Heat Tolerance in Tomato. In : *Life Science Journal*. 25 décembre 2012. Vol. 99, pp. 1936-19501097.

FELIX, Dorian, 2015. *Les Microorganismes Efficaces (EM)? Compilation de documents et témoignages cubains sur le fonctionnement, la production artisanale et l'usage de microorganismes efficaces en milieu paysan*. 2015. S.l. : s.n.

FERNANDES, Manlio Silvestre et ROSSIELLO, Roberto Oscar Pereyra, 1995. Mineral Nitrogen in Plant Physiology and Plant Nutrition. In : *Critical Reviews in Plant Sciences*. janvier 1995. Vol. 14, n° 2, pp. 111-148. DOI 10.1080/07352689509701924.

FRAB, 2009. *Les Fiches Techniques du réseau GAB/FRAB, Laitues, Batavias*. 2009. S.l. : s.n.

GARMENDIA, Alfonso, RAIGÓN, María Dolores, MARQUES, Olmo, FERRIOL, María, ROYO, Jorge et MERLE, Hugo, 2018. Effects of nettle slurry (*Urtica dioica* L.) used as foliar fertilizer on potato (*Solanum tuberosum* L.) yield and plant growth. In : *PeerJ*. 7 mai 2018. Vol. 6, pp. e4729. DOI 10.7717/peerj.4729.

GOBAT, J. M., ARAGNO, M. et MATTHEY, W., 2003. The living soil: basic pedology - soil biology. In : *The living soil: basic pedology - soil biology*. [en ligne]. 2003. [Consulté le 30 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20033067504>.

- GOLEC, Aníbal, LOKARE, Chinmay et GONZALEZ PEREZ, Pablo, 2013. Effective Microorganisms: Myth or reality? In : *Revista peruana de biología*, ISSN 1727-9933, Vol. 14, N° 2, 2007, pags. 315-319. 1 avril 2013. Vol. 14. DOI 10.15381/rpb.v14i2.1837.
- GUNNELL, David, EDDLESTON, Michael, PHILLIPS, Michael R. et KONRADSEN, Flemming, 2007. The global distribution of fatal pesticide self-poisoning: Systematic review. In : *BMC Public Health*. 21 décembre 2007. Vol. 7, n° 1, pp. 357. DOI 10.1186/1471-2458-7-357.
- HIGA, T. et WIDIDANA, G.N., 1991. The concept and theories of effective microorganisms. In : *Proceedings of the First International Conference on Kyusei Nature Farming*. 1 janvier 1991. pp. 118-124.
- HIGA, Teruo et PARR, James, 1994. Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agriculture and Environment. In : . 1 janvier 1994. Vol. 9.
- INCULET, Carmen-Simona, MIHALACHE, Gabriela, SELBITTO, Vincenzo Michele, HLIHOR, Raluca-Maria et STOLERU, Vasile, 2019. The Effects of a Microorganisms-Based Commercial Product on the Morphological, Biochemical and Yield of Tomato Plants under Two Different Water Regimes. In : *Microorganisms*. décembre 2019. Vol. 7, n° 12, pp. 706. DOI 10.3390/microorganisms7120706.
- ISLAM, Saif ul, 2018. Microorganisms in the Rhizosphere and their Utilization in Agriculture: A Mini-Review. In : *PSM Microbiology*. 15 octobre 2018. Vol. 3, n° 3, pp. 105-110.
- JEFFERY, S., GARDI, C., JONES, A., MONTANARELLA, L., MARMO, L., MIKO, L., RITZ, K., PERES, G., RÖMBKE, J. et VAN DER PUTTEN, W.H., 2010. *Atlas Européen de la biodiversité des sols*. Bureau des publications de l'Union Européenne. Luxembourg : s.n.
- JEFFREY, L S H, SAHILAH, A M, SON, R et TOSIAH, S, 2007. Isolation and screening of actinomycetes from Malaysian soil for their enzymatic and antimicrobial activities. In : . 2007. pp. 6.
- JOHNS, Christopher, 2015. Under Our Feet: Soil Microorganisms as Primary Drivers of Essential Ecological Processes. In : *Future Directions International* [en ligne]. 3 juillet 2015. [Consulté le 29 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.futuredirections.org.au/publication/under-our-feet-soil-microorganisms-as-primary-drivers-of-essential-ecological-processes/>.
- KATO, S., XU, Hui-lian, FUJITA, M., YAMADA, K. et UMEMURA, H., 1999. Effect of Organic Fertilizations and EM Applications on Growth Pattern, Nutrient Uptake and Grain Yield of Sweet Corn. In : . 1 janvier 1999.
- KLEINHENZ, Matthew D, 2012. Using °Brix as an Indicator of Vegetable Quality: An Overview of the Practice. In : . 2012. pp. 4.
- KOBAYASHI, Michiharu et HAQUE, Mohammad Z., 1971. Contribution to nitrogen fixation and soil fertility by photosynthetic bacteria. In : *Plant and Soil*. 1 décembre 1971. Vol. 35, n° 1, pp. 443-456. DOI 10.1007/BF02661870.
- LAGOMARSINO, A., MOSCATELLI, M. C., DI TIZIO, A., MANCINELLI, R., GREGO, S. et MARINARI, S., 2009. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment. In : *Ecological Indicators*. 1 mai 2009. Vol. 9, n° 3, pp. 518-527. DOI 10.1016/j.ecolind.2008.07.003.
- LAMONT, John R., WILKINS, Olivia, BYWATER-EKEGÅRD, Margaret et SMITH, Donald L., 2017. From yogurt to yield: Potential applications of lactic acid bacteria in plant production. In : *Soil Biology and Biochemistry*. 1 août 2017. Vol. 111, pp. 1-9. DOI 10.1016/j.soilbio.2017.03.015.

LEACH, A. W. et MUMFORD, J. D., 2008. Pesticide Environmental Accounting: A method for assessing the external costs of individual pesticide applications. In : *Environmental Pollution*. 1 janvier 2008. Vol. 151, n° 1, pp. 139-147. DOI 10.1016/j.envpol.2007.02.019.

LEGIFRANCE, [sans date]. *Arrêté du 18 avril 2011 autorisant la mise sur le marché du purin d'ortie en tant que préparation naturelle peu préoccupante à usage phytopharmaceutique*. S.l. : s.n.

LINDOW, Steven E. et BRANDL, Maria T., 2003. Microbiology of the Phyllosphere. In : *Applied and Environmental Microbiology*. avril 2003. Vol. 69, n° 4, pp. 1875-1883. DOI 10.1128/AEM.69.4.1875-1883.2003.

LIRIANO GONZÁLEZ, Ramón, PÉREZ RAMOS, Jovana, PÉREZ HERNÁNDEZ, Yunel, PLACERES ESPINOSA, Iraní, RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, Sergio Luis, PEÑA ALONSO, Daniela, LIRIANO GONZÁLEZ, Ramón, PÉREZ RAMOS, Jovana, PÉREZ HERNÁNDEZ, Yunel, PLACERES ESPINOSA, Iraní, RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, Sergio Luis et PEÑA ALONSO, Daniela, 2019. Improvement of the agricultural productivity of lettuce and radish by using efficient microorganisms. In : *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. décembre 2019. Vol. 72, n° 3, pp. 8937-8943. DOI 10.15446/rfnam.v72n3.76967.

LYNCH, J. M. et BRAGG, Elaine, 1985. Microorganisms and Soil Aggregate Stability. In : *Advances in Soil Science*. 1985. pp. 133-171. DOI 10.1007/978-1-4612-5088-3_3.

MARSCHNER, Horst, 2011. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. S.l. : Academic Press. ISBN 978-0-12-384906-9.

MARTIN, Claude, DIDON-LESCOT, Jean-François, COSANDEY, Claude, LAVABRE, Jacques, MARC, Vincent et COGNARD-PLANCQ, Anne-Laure, 2003. Les crues de type cévenol : recherches sur le versant sud du Mont-Lozère (France). In : HYDROLOGIQUES, Association Internationale des Sciences (éd.), *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions* [en ligne]. Montpellier, France : s.n. 2003. pp. 284-289. [Consulté le 13 juillet 2021]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00319881>.

MEAGY, Md J., EATON, Touria E. et BARKER, Allen V., 2013. Nutrient Density in Lettuce Cultivars Grown with Organic or Conventional Fertilization with Elevated Calcium Concentrations. In : *HortScience*. 1 décembre 2013. Vol. 48, n° 12, pp. 1502-1507. DOI 10.21273/HORTSCI.48.12.1502.

MOU, Beiquan, 2009. Nutrient Content of Lettuce and its Improvement. In : *Current Nutrition & Food Science*. 1 novembre 2009. Vol. 5, n° 4, pp. 242-248. DOI 10.2174/157340109790218030.

MUKHERJEE, Arpan, VERMA, Jay Prakash, GAURAV, Anand Kumar, CHOUHAN, Gowardhan Kumar, PATEL, Jai Singh et HESHAM, Abd El-Latif, 2020. Yeast a potential bio-agent: future for plant growth and postharvest disease management for sustainable agriculture. In : *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1 février 2020. Vol. 104, n° 4, pp. 1497-1510. DOI 10.1007/s00253-019-10321-3.

NAZRANOV, K. M., DIDANOVA, E. N. et KHALISHKHOVA, L. Z., 2021. Formation and development of the biopreparations market. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. mars 2021. Vol. 699, n° 1, pp. 012037. DOI 10.1088/1755-1315/699/1/012037.

OLLE, M. et WILLIAMS, I. H., 2013. Effective microorganisms and their influence on vegetable production – a review. In : *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 1 janvier 2013. Vol. 88, n° 4, pp. 380-386. DOI 10.1080/14620316.2013.11512979.

PANDIYAN, Kuppusamy, KUSHWAHA, Prity, KASHYAP, Prem Lal, BAGUL, Samadhan Yuvraj, KARTHIKEYAN, Nanjappan et SAXENA, Anil Kumar, 2021. 12 - Phyllosphere microbiome: modern prospectus and application. In : SOLANKI, Manoj Kumar, KASHYAP, Prem Lal, ANSARI, Rizwan Ali et KUMARI, Baby (éd.), *Microbiomes and Plant Health* [en ligne]. S.l. : Academic Press. pp. 345-366. [Consulté le 29 juillet 2021]. ISBN 978-0-12-819715-8. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197158000124>.

PARNELL, J. Jacob, BERKA, Randy, YOUNG, Hugh A., STURINO, Joseph M., KANG, Yaowei, BARNHART, D. M. et DILEO, Matthew V., 2016. From the Lab to the Farm: An Industrial Perspective of Plant Beneficial Microorganisms. In : *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7, pp. 1110. DOI 10.3389/fpls.2016.01110.

PEIX, Alvaro, RAMÍREZ-BAHENA, Martha H., VELÁZQUEZ, Encarna et BEDMAR, Eulogio J., 2015. Bacterial Associations with Legumes. In : *Critical Reviews in Plant Sciences*. 1 juin 2015. Vol. 34, n° 1-3, pp. 17-42. DOI 10.1080/07352689.2014.897899.

PÉRÈS, Guénola, 2003. *Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol* [en ligne]. phdthesis. S.l. : Université Rennes 1. [Consulté le 30 avril 2021]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007432>.

PFENNIG, N, 1967. Photosynthetic Bacteria. In : *Annual Review of Microbiology*. 1 octobre 1967. Vol. 21, n° 1, pp. 285-324. DOI 10.1146/annurev.mi.21.100167.001441.

PRÉFECTURE DE L'ARDÈCHE, 2005. *Plan de prévention des risques inondation, commune de Berrais Casteljau, Rapport de présentation, approbation* [en ligne]. 2005. S.l. : s.n. [Consulté le 12 avril 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.ardeche.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_de_presentation_PPRi_berrias_et_casteljau_cle08e2b2.pdf.

QUIROZ, Madelaine et CÉSPEDES, Cecilia, 2019. Bokashi as an Amendment and Source of Nitrogen in Sustainable Agricultural Systems: a Review. In : *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 1 mars 2019. Vol. 19, n° 1, pp. 237-248. DOI 10.1007/s42729-019-0009-9.

RAAIJMAKERS, Jos M., PAULITZ, Timothy C., STEINBERG, Christian, ALABOUVETTE, Claude et MOËNNE-LOCCOZ, Yvan, 2009. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. In : *Plant and Soil*. 1 août 2009. Vol. 321, n° 1, pp. 341-361. DOI 10.1007/s11104-008-9568-6.

RANI, Usha et KUMAR, Vivek, 2019. Microbial Bioformulations: Present and Future Aspects. In : PRASAD, Ram, KUMAR, Vivek, KUMAR, Manoj et CHOUDHARY, Devendra (éd.), *Nanobiotechnology in Bioformulations* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. Nanotechnology in the Life Sciences. pp. 243-258. [Consulté le 1 septembre 2021]. ISBN 978-3-030-17060-8. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-17061-5_10.

RITZ, Karl et YOUNG, Iain M., 2004. Interactions between soil structure and fungi. In : *Mycologist*. mai 2004. Vol. 18, n° 2, pp. 52-59. DOI 10.1017/S0269915X04002010.

SCHEUERELL, Steve et MAHAFFEE, Walter, 2002. Compost Tea: Principles and Prospects For Plant Disease Control. In : *Compost Science & Utilization*. 1 septembre 2002. Vol. 10, n° 4, pp. 313-338. DOI 10.1080/1065657X.2002.10702095.

SHAKIR, Sara, ZAIDI, Syed Shan-e-Ali, DE VRIES, Franciska T. et MANSOOR, Shahid, 2021. Plant Genetic Networks Shaping Phyllosphere Microbial Community. In : *Trends in Genetics*. 1 avril 2021. Vol. 37, n° 4, pp. 306-316. DOI 10.1016/j.tig.2020.09.010.

SINGH, Jay Shankar, PANDEY, Vimal Chandra et SINGH, D. P., 2011. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1 mars 2011. Vol. 140, n° 3, pp. 339-353. DOI 10.1016/j.agee.2011.01.017.

STARK, Christine, CONDRON, Leo M., STEWART, Alison, DI, Hong J. et O'CALLAGHAN, Maureen, 2007. Effects of past and current crop management on soil microbial biomass and activity. In : *Biology and Fertility of Soils*. 1 juin 2007. Vol. 43, n° 5, pp. 531-540. DOI 10.1007/s00374-006-0132-3.

SYNDICAT DU CHASSEZAC, 2015. *Contre de rivière Chassezac, Document 1 : Motivations et contenu du projet*. septembre 2015. S.l. : s.n.

TENCIO, Rolando, 2014. Uso de microorganismos beneficios en la agricultura organica en Costa Rica. In : *Ambientico*. 1 mai 2014. n° 243, pp. 41-49.

VANDENKOORNHUYSE, Philippe, QUAISER, Achim, DUHAMEL, Marie, VAN, Amandine Le et DUFRESNE, Alexis, 2015. The importance of the microbiome of the plant holobiont. In : *New Phytologist*. 2015. Vol. 206, n° 4, pp. 1196-1206. DOI 10.1111/nph.13312.

VORHOLT, Julia A., 2012. Microbial life in the phyllosphere. In : *Nature Reviews Microbiology*. décembre 2012. Vol. 10, n° 12, pp. 828-840. DOI 10.1038/nrmicro2910.

WANG, Yiming, PENG, Shuang, HUA, Qingqing, QIU, Chongwen, WU, Pan, LIU, Xiaoli et LIN, Xiangui, 2021. The Long-Term Effects of Using Phosphate-Solubilizing Bacteria and Photosynthetic Bacteria as Biofertilizers on Peanut Yield and Soil Bacteria Community. In : *Frontiers in Microbiology*. 16 juillet 2021. Vol. 12, pp. 693535. DOI 10.3389/fmicb.2021.693535.

ANNEXE I : RESUME DU MEMOIRE EN ANGLAIS – REPORT SUMMARY

Context and objectives of the project

To meet the increasing demand for food due to the growing world population, it is necessary to improve the environmental impact of agricultural production. One of the major challenges today is to achieve sustainable and environmentally sound agricultural production while maintaining the volumes produced. Current agricultural production methods, such as the inappropriate use of pesticides and chemical fertilisers, create environmental and health problems (Gunnell et al. 2007; Leach, Mumford 2008). Moreover, the beneficial interaction between plants and microorganisms has often been ignored in breeding strategies. Today, some strains of microorganisms are used and recognised for pathogen control and plant growth promotion, such as bacteria of the genus *Azospirillum* or *Rhizobium* (Berg 2009). These considerations are of primary importance as microbes perform crucial functions for plant nutrition and protection against pathogens (Raaijmakers et al. 2009). Some farmers have long made use of these microorganisms using fermented preparations (composts, lactic acid bacteria), and more recently specialised commercial preparations, including Prof. Teruo Higa's "Effective Microorganisms" (Higa, Parr 1994; Faessel 2014; Parnell et al. 2016). These Effective Microorganisms (EM) are the subject of a large, but often biased and low-quality literature - so much so that the question of their actual usefulness remains a controversial issue (Golec et al. 2013; Olle, Williams 2013). The EM concept was then adapted first in Costa Rica through close collaboration between farmers and researchers (Felix 2015; Tencio 2014). Heir to this adaptation, Fermented Forest Litter, hereafter 'LiFoFer', is a preparation based on forest litter, fermented under micro-aerobic conditions in the presence of molasses, cereal bran, and whey (Felix 2015). LiFoFer has two main specificities: its local origin and the great diversity of microbial strains used and supporting the natural balance of the targeted agrosystems while increasing the technical and financial accessibility of its production. Preparations of LiFoFer are being studied in France and in Western Africa (CIRAD) with the aim of characterising its physicochemical and microbiological properties (P. Christen, IRD) and assessing its impact on market garden crops (GABs). From this context emerged the need for a scientific evaluation of the effectiveness of LiFoFer under temperate conditions, on vegetable production among others. In a participatory research-action approach, Terre & Humanisme (T&H), FiBL France, CIRAD, IRD and organic farmers' groups are collaborating to better understand its action and, if necessary, to optimise its effectiveness, to give credibility to it, to capitalise on it and to disseminate new know-how in the service of agroecological agriculture. Preliminary observations tend to corroborate the hypothesis of a beneficial action of LiFoFer on the bioavailability of nutrients, the recycling of organic matter, and the resistance of plants to pathogens.

Thus, these results and the consultation of the stakeholders in this participatory research project led to the choice of the problematic of this thesis: **Given its complexity and the limited knowledge acquired,**

how can the various effects of LiFoFer be evaluated in an experimental approach that is as close as possible to the conditions of organic market garden production?

To do this, two experiments were set up:

Experiment n°1 on lettuce is carried out in the field and is divided into 2 crop cycles, called cycle 1 and cycle 2 respectively. These field trials make it possible to evaluate the effects of LiFoFer by considering interactions with the environment, in particular the soil. As LiFoFer is intended for agricultural actors, it is judicious to carry out this experimentation in conditions as close as possible to their own.

Experiment n°2 is carried out on a tomato crop in pots to guarantee a homogeneous crop support and to focus on the effects of LiFoFer on the crop.

These two crops, lettuce, and tomato are chosen because they represent an important part of the market in France and in Europe. Tomatoes are the most consumed vegetable in France. Lettuce, in addition to being an everyday vegetable, has a relatively short growing cycle (2 to 4 months depending on the season), which makes it a crop of choice for the experiments.

Methods

- LiFoFer production

LiFoFer is manufactured according to the protocol established by T&H which consists of a first fermentation to obtain solid LiFoFer and a second fermentation to obtain a solution to be diluted before use on crops.

There are two fermentation steps to make LiFoFer. The first fermentation consists in harvesting forest litter geographically close to the plot to be treated (same soil and climatic conditions) and mixed into a pile with wheat bran, goat's whey, a source of lactic acid bacteria, and organic sugarcane molasses, a source of easily assimilated carbon. Once mixed, the water content is adjusted to 35-40%, and the pile is transferred to a sealed container where it is tamped to remove as much air as possible. Fermentation lasts for a total of 1 month, at a temperature of 25-30°C, during which time the canister is regularly opened to vent the gas produced. The second fermentation consists in mixing the previously prepared solid LiFoFer with organic sugarcane molasses and. The solution is poured into an airtight container, in this case a stainless-steel tank, with a bung to allow the gas produced to escape without outside air entering. Fermentation lasts one week at a temperature of between 25°C and 30°C with a final pH between 3.5 and 4.

- Modalities

For both trials, the modalities are the same and they are described as follow. There are 5 modalities and 4 replicates per modality, i.e., 20 plots in all. Four blocks were delimited to avoid the variability of the terrain as much as possible (see Figure 10). The 4 replicates per modality are randomly distributed. The 5 modalities tested are as follows:

- Modality T, Control: The lettuces of the control modality are treated with water only. If water is used to treat the other modalities, the same amount is added here.

- Modality EF, Fermented Extract: To dissociate the potential effects of the fermented extract and LiFoFer, and to compare LiFoFer to another growth stimulator, this modality is treated with fermented nettle extract (*Urtica dioica*) alone, prepared at T&H as described in part 2.2.3.1.2.
- Modality EM_C, Commercially Effective Microorganism: In order to compare the efficacy of LiFoFer to a commercial product, a commercially effective microorganism (EM_C) modality is set up. The Swiss brand Synbiovie microorganism preparation presented is used because it is readily available and made from sugarcane molasses, just like LiFoFer.
- LFF, LiFoFer modality: LiFoFer treatments are carried out with LiFoFer prepared at T&H according to the method described in section 2.2.3.1.1 of this report.
- LFF+EF modality: The LiFoFer and Fermented Extract (LFF+EF) modality is a combination of the two previous modalities. As FEs are commonly used in organic farming, it is desirable to see whether they are compatible with the use of LiFoFer.

- Evaluated parameters

To assess the effect of LiFoFer, 3 main types of indicators are evaluated for each crop: plant health, vegetative growth, and yield indicators. The parameters evaluated are chosen according to several criteria: simplicity of execution, relevance of the measurement to the research objectives.

Plant health indicators include identification and count of pest and pathogens. Where pest or pathogen symptoms are identified, an index of leaf area coverage or destruction is established according to the severity of the symptoms. Brix content is also measured as it can evaluate part of the plant health. Vegetative growth indicators consist in measuring regularly plant height and size. Growth factor can be calculated from those data, indicating if some plants are more developed than others. Finally, yield indicator result from weighing the crops, possibly evaluating the dry matter content and the percentage of loss at harvest.

Main results

- Experiment 1, cycle 1

Main results were obtained for vegetative growth and yield. Measurements for lettuce diameter after 8 weeks of crop show that the LFF+EF modality differs from the other modalities by having a smaller average diameter than the other modalities (p -value < 0.05). This difference was maintained until harvest. The LFF modality differs progressively from the other modalities. At harvest, the average diameter was significantly smaller (p -value < 0.05) than the EF, EM_C and control modalities. The measurements of the diameter at the neck also allow to evaluate the vegetative growth of the lettuce and show significant differences during the last weeks of growth. From 03/06/21 onwards, the LiFoFer and EF treated modality has a significantly lower collar diameter (p -value < 0.05) than the EF, EM_C and LiFoFer only modalities (LFF). The differences are between 0.14mm and 0.25mm less diameter. However, the Control (T) modality did not show any difference with any other modality. The measurements of neck diameter and lettuce diameter show similarities. In both cases the LFF+EF

modality is less developed than the other modalities. Once again, the differences are visible at the end of the crop (last 2 weeks) and are more marked on the overall diameter measurements of the lettuce. The measurements of fresh biomass and dry biomass (Bmsec) of the lettuces show similar trends to each other. For fresh biomass, lettuces from the LFF+EF and LFF modalities weighed less than lettuces from the EF and Control modalities. There was a difference of up to 63g between LFF+EF and EF. For Bmsec, the differences are more pronounced. The biomass of LFF+EF is lower than all other lettuces, on average between 1.4 g difference with LFF and 3.2 g difference with EF. The dry matter rates are around 5% which is the expected value (Mou 2009). Although slightly higher for LFF (5.98%) and lower for the control (4.87%), no significant difference was observed between the dry matter rates (%MS) of the different modalities nor regarding the percentages of loss at harvest. The yields of the LiFoFer and LFF+EF treated lettuces were globally lower.

- **Experiment 1, cycle 2**

As for cycle 1, main results are obtained for vegetative growth and yield indicators. There is no difference in development between the lettuces and no trend in the first overall diameter measurement. Three weeks later, there was still no significant difference (p -value > 0.05), but a trend emerged on the average diameter and neck diameter measurements in favour of the larger EF variety. The LFF+EF lettuces had the smallest diameters. At harvest, the non-parametric Kruskal-Wallis test revealed that EF lettuces were 2.2 cm wider than LFF+EF lettuces (p -value < 0.05). For the neck diameter measurements, the same results were observed, with a significant difference at harvest between LFF+EF and EF (p -value < 0.05). The lettuces treated with EF and LiFoFer have a less good vegetative growth than the EF modality but remain like the control modality.

- **Experiment 2**

For this experiment on tomato, main result is obtained of vegetative growth, as no differences were found for yield and plant health. The height measurements are stopped on 12/07 because it is considered that the vegetative growth is finished. Thus, the measurements used were taken between 10/05 (day of the first treatment and the first measurements) and 12/07.

Overall, the differences in height between the modalities are small (see Figure 28). However, the growth factor (Figure 29) calculated between the measurement at T0 (10/05) and the last height measurement (12/07) is higher for the plants treated with LFF (2.7), followed by the Control (2.5), EF (2.4) and LFF+EF (2.13) modalities and finally the EM_C modality (2.0). Monitoring the height taken between each measurement (Figure 30) allows a more detailed analysis. Between the 3rd (T0) and 5th week of growth (T+2), the LiFoFer-treated tomatoes grew significantly faster than the EM_C and LFF+EF modalities, with an average gain of 5.1cm respectively. They are followed by tomato plants treated with water (Control: + 4.6cm) and those treated with fermented nettle extract (+ 4.2cm). The modalities treated with LFF+EF and EM_C have a slower growth (3.7 and 3.6 cm). Between 01/06 (T+4) and 15/06 (T+6) the LFF modality grew as much as the control modality (+10.1 and +9.8) and the tomato plants treated with EM_C grew less quickly (+8.9 cm). During the other weeks of the measurement, there were no significant differences between the different modalities. Similarly, there was no difference in height gained between the first week of measurement and the 12th week of measurement, nor was there a trend

that emerged. The gains in total number of cm gained in height, from transplanting to the last harvest, did not show any significant difference (p -value > 0.05) between the different modalities. Nevertheless, a faster growth during the first weeks of growth was observed for the tomatoes treated with LiFoFer. Neck diameter measurements were similar for the different modalities. The counts of suckers and the number of clusters per plant did not differ either. On average, there were 3 suckers per vine and 1 cluster per suckler. The average number of fruits per cluster and number of fruits per vine were also equivalent for each modality.

Discussion

- Experiment 1, cycle 1 and 2

Yield trends for lettuce from cycle 1 and cycle 2 are compared. The same significant yield decrease was observed for the LFF+EF modality compared to the EF modality. Overall, in both crop cycles, the LFF+EF modality showed poorer results, especially for growth and yield indicators. In cycle 2, there were no slug attacks and yet the LFF+EF lettuces performed worse. In this case, the link between pest attacks and the low yield of the LFF+EF modality cannot be established. Therefore, it seems that this modality is unfavourable for the development and yield of lettuce. There are few or no studies combining the use of fermented nettle extract and the use of beneficial microorganisms, whether home-made or not. Hence, it is difficult to compare these results with other studies. To better understand the interactions between LiFoFer and fermented nettle extract, it would be interesting to repeat experiments with different application modalities of these two preparations. Indeed, organic farmers likely to use LiFoFer are often already aware of the use of nettle slurry. Until these results are available, care should be taken when recommending to farmers who would like to use LiFoFer and who are already using fermented nettle extract, so as not to penalise their crops. Concerning the effects of LiFoFer alone on field lettuce, no effect on plant growth was observed compared to lettuce treated with water.

- Experiment 2

At the 5th week of growth and 2 weeks after the start of the treatment, the LiFoFer treated tomatoes seemed to grow faster. Moreover, the growth factor calculated between the measurement at T0 and the last height measurement tended to be higher for the LFF-treated plants (2.72). It can be hypothesised that the LiFoFer treatment would allow a higher growth rate at a relatively young stage of the tomato plant. A similar result was observed in a trial conducted on sweet corn. The use of EM is compared with that of a chemical fertiliser. It was found that the EM fertilised plants, despite a delay in growth in the early stages of the plant, recovered with a higher growth rate than the chemical fertiliser in the 'middle' stage of the plant, with no final difference in dry biomass and grain yield (Kato et al. 1999). Another study using an inoculant containing a consortium of bacteria and fungi on a tomato crop found an increase in yield compared to non-inoculated plants (Inculet et al. 2019). The findings are not similar for Experiment 2. However, the results obtained here should be seen in the light of the aphid attacks that took place the same week. On 25/05, the tomatoes of the EM_C and LFF+EF modalities gained less cm

in height than the other modalities. On the same date, an aphid survey was carried out and revealed that the modalities with the most attacked plants were also the EM_C and LFF+EF modalities.

Conclusion and perspectives

Faced with the need to develop practical knowledge and scientific references on the use of products based on microorganisms and their functioning, the Terre et Humanisme association is forming a large network of actors from the technical and scientific agricultural world to work in response to this problem. In this context, this internship was particularly interested in the effects of fermented forest litter (LiFoFer), which has been empirically tested for several years in France and West Africa. The experiments carried out on *Lactuca sativa* (lettuce) and *Solanum lycopersicum* (tomato) did not clearly show any effect of LiFoFer on these crops. For lettuce, none of the treatments resulted in a significant improvement of the crop compared to the water-treated controls, either in terms of plant health, vegetative growth, or yield. On the contrary, the LiFoFer modality combined with fermented nettle extracts on lettuce even seems to negatively influence the vegetative growth and yield indicators for this crop. However, for the tomato crop, vegetative growth seems to have been enhanced by the application of LiFoFer during the "young" stages of the plant (5th week of growth).

In addition to the experimental biases observed in the lettuce experiment, the method of assessing the effects of LiFoFer can be improved. Indeed, before LiFoFer can be compared to other similar products and before exploring several possible applications of this product, it seems to be a priority to focus on validating the effect of increasing crop yield. This is an important concern, which for LiFoFer requires more precise recommendations for use.

In view of the complexity and the limited knowledge available for this LiFoFer technology, it is important to continue to collaborate with the project's partner research and experimental organisations. The development of such a product is very relevant for an agriculture in agro-ecological transition, not only in France but worldwide. The results obtained are encouraging, not only through the LiFoFer project, but also for the micro-organism-based preparations developed throughout the world. Moreover, organic, conventional, large, and small-scale farmers can all benefit: the effects of bioproducts are effective on the long term, there are no side effects on human health or the environment, and production is inexpensive. In view of the findings of the latest IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report, it is urgent to develop resilient solutions for agriculture, one of the first victims of climate change. The development of LiFoFer should therefore be pursued because it meets many of today's social, economic, and environmental challenges.

ANNEXE II : ANALYSES LABORATOIRE DE LA METHODE BRDA-HERODY

Mesures	Surface 0-30cm	Profondeur 30-60cm	Valeurs de référence
<i>Pierrosité</i>	2,7	2,4	
<i>Coefficient de Fixation du sol (CF)</i>	0,5	0,9	0,3 - 0,6
<i>% Particules fines (argiles à feuillet et limons fins)</i>	14	17	
<i>% Limons grossiers</i>	0	0	
<i>% Sables</i>	69	41	
<i>Carbonatation</i>	3	3	0 - 3
<i>% Calcaire actif</i>	22		
<i>Alcalino-Terreux (AT) = Ca + Mg</i>	7,95	8,05	
<i>% Magnésium présent dans les AT</i>	1		10 à 15%
<i>Ca/Mg</i>	107,5		Optimum entre 8 et 12
<i>K/Mg</i>	1,3		Optimum entre 1 et 3
<i>Fer de Liaison (Fer L)</i>	44	52	70
<i>% MO totale (dosage classique)</i>	2,87		
<i>Humus stable</i>	2,79		2,95
<i>% MOF dans l'humus total (matière organique facilement attaquable par les microorganismes)</i>	7%	TRACE	20-25%
<i>3 F (matière organique d'accumulation très stable avec une activité biologique intense)</i>	1,6		0,4 - 0,6
<i>Nini (matière organique d'accumulation avec une activité biologique très faible)</i>	224		< 80
<i>P</i>	2		1% - 1,5%
<i>K</i>	3		
<i>Mg</i>	2		
<i>Aluminium</i>	0,2	0,2	
<i>Manganèse 1</i>	1,7	1,3	
<i>Manganèse 2</i>	1,7	1,3	

ANNEXE III : LISTE DES PARAMETRES EVALUES

Indicateur	Mesure	Unité de mesure	Réurrence	N°Expérimentation
Santé des plantes				
B•	Taux de Brix, indice de sucre soluble dans l'eau	(°B)	Fin pépinière et récolte	Toutes
	Teneur en nutriments de la sève (Sucres, pH, K, Ca, K/Ca, Mg, Na, NH ₄ , NO ₃ , N dans nitrate, N total, Cl, S, P, Si, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo, Al)	Sucres totaux : % Autres : ppm	Récolte	Expé n°1, cycle 2
Ravageurs et pathogènes				
	Comptage des ravageurs	Nombre d'individu/plant	1/semaine si présence	Toutes
	Indice de recouvrement/ destruction foliaire	Indice (%)	1/semaine si présence	Toutes
Indicateurs de la croissance végétative				
	Hauteur de plant*	cm	1/semaine	Expé n°1, cycle 1 Expé n°2
	Nombre gourmand/pied	nombre/plant	Ponctuel	Expé n°2
	Nombre grappe/gourmand	nombre/plant	Ponctuel	Expé n°2
	Nombre de fleurs avortées	nombre/plant	Ponctuel (fructification)	Expé n°2
	Nombre de fruits/grappe	nombre/plant	Récolte	Expé n°2
	Biomasse racinaire	g	Récolte	Expé n°1, cycle 1 Expé n°2
	Diamètre des plantes au collet*	cm	1/semaine	Toutes
	Longueur de racine	mm	Récolte	Expé n°1, cycle 1
	Facteur de croissance		Fin croissance végétative	Expé n°2
Indicateurs du rendement				
	Biomasse aérienne fraîche totale	g	Récolte	Toutes
	Biomasse aérienne fraîche après tri	g	Récolte	Expé n°1, cycle 1 et 2
	Biomasse aérienne sèche après tri	g	Récolte	Expé n°1, cycle 1
	Taux de matière sèche	% de matière fraîche	Récolte	Expé n°1, cycle 1
Indicateur de l'évolution des caractéristiques du sol				
	Plantes bio-indicatrices			Expé n°1, cycle 1

RESULTATS DES ANALYSES NOVACROP : Laitues cycle 2, modalité EF



Plant sap-sample ¹ 202108183148 **Sample Date:** 11-8-2021
 ² 202108183149
Name: Terre et Humanisme NGO **Location/plot:** TH
Address: 471 Chemin du Mas de Beaulieu **Cultivation:** Lettuce EF
 07230 Lablachere **Crop:** Lettuce
 France **Plant part:** ¹ Leaf (young) ² Leaf (old)

Remarks

Mineral		Current Level	Optimum		
Total Sugars	%	0,6	0,3 - 1,4	¹	
	%	0,1		²	
pH		6,3	6,0 - 6,3	¹	
		5,5		²	
EC	mS/cm	9,4	9,4 - 12,3	¹	
	mS/cm	16,7		²	
K - Potassium	ppm	3814	3250 - 4550	¹	
	ppm	6472		²	
Ca - Calcium	ppm	420	210 - 790	¹	
	ppm	1007		²	
K / Ca		9,08		¹	
		6,43		²	
Mg - Magnesium	ppm	115	100 - 200	¹	
	ppm	195		²	
Na - Sodium	ppm	10	40 - 124	¹	
	ppm	16		²	
NH4 - Ammonium	ppm	110	30 - 70	¹	
	ppm	221		²	
NO3 - Nitrate	ppm	<20	1390 - 3210	¹	
	ppm	<20		²	
N in Nitrate	ppm	<5	314 - 725	¹	
	ppm	<5		²	
N - Total Nitrogen	ppm	680	980 - 1490	¹	
	ppm	689		²	
Cl - Chloride	ppm	785	350 - 850	¹	
	ppm	1296		²	
S - Sulfur	ppm	162	50 - 90	¹	
	ppm	240		²	
P - Phosphorus	ppm	235	140 - 240	¹	
	ppm	279		²	
Si - Silica	ppm	12,0	2,1 - 6,4	¹	
	ppm	20,9		²	
Fe - Iron	ppm	0,37	0,50 - 1,55	¹	
	ppm	0,82		²	
Mn - Manganese	ppm	0,51	1,30 - 3,40	¹	
	ppm	0,89		²	
Zn - Zinc	ppm	2,29	1,00 - 2,20	¹	
	ppm	2,76		²	
B - Boron	ppm	0,27	0,40 - 1,20	¹	
	ppm	1,53		²	
Cu - Copper	ppm	0,30	0,15 - 0,30	¹	
	ppm	0,26		²	
Mo - Molybdenum	ppm	<0,05	< 0,05	¹	
	ppm	<0,05		²	
Al - Aluminium	ppm	<0,50	<0,50 - <0,50	¹	
	ppm	<0,50		²	

Consult your advisor for appropriate fertilizer recommendations.

301.20210723

Because NovaCropControl has no effect and / or no control over the sampling, NovaCropControl accepts no liability for adverse effects as a result of its analysis or advice provided.

RESULTATS DES ANALYSES NOVACROP : Laitues cycle 2, modalité EM_C



Plant sap-sample ¹ 202108183140 ² 202108183141 Sample Date: 11-8-2021
 Name: Terre et Humanisme NGO Location/plot: TH
 Address: 471 Chemin du Mas de Beaulieu Cultivation: Lettuce EM
 07230 Lablachere Crop: Lettuce
 France Plant part: ¹ Leaf (young) ² Leaf (old)

Remarks

Mineral		Current Level	Optimum		
Total Sugars	%	0,2	0,3 - 1,4	¹	
	%	0,1		²	
pH		5,6	6,0 - 6,3	¹	
		5,9		²	
EC	mS/cm	11,8	9,4 - 12,3	¹	
	mS/cm	18,6		²	
K - Potassium	ppm	4841	3250 - 4550	¹	
	ppm	7320		²	
Ca - Calcium	ppm	435	210 - 790	¹	
	ppm	930		²	
K / Ca		11,12		¹	
		7,87		²	
Mg - Magnesium	ppm	153	100 - 200	¹	
	ppm	231		²	
Na - Sodium	ppm	16	40 - 124	¹	
	ppm	19		²	
NH4 - Ammonium	ppm	176	30 - 70	¹	
	ppm	161		²	
NO3 - Nitrate	ppm	<20	1390 - 3210	¹	
	ppm	<20		²	
N in Nitrate	ppm	<5	314 - 725	¹	
	ppm	<5		²	
N - Total Nitrogen	ppm	733	980 - 1490	¹	
	ppm	683		²	
Cl - Chloride	ppm	1167	350 - 850	¹	
	ppm	1654		²	
S - Sulfur	ppm	173	50 - 90	¹	
	ppm	274		²	
P - Phosphorus	ppm	393	140 - 240	¹	
	ppm	258		²	
Si - Silica	ppm	20,7	2,1 - 6,4	¹	
	ppm	30,7		²	
Fe - Iron	ppm	0,93	0,50 - 1,55	¹	
	ppm	1,55		²	
Mn - Manganese	ppm	0,75	1,30 - 3,40	¹	
	ppm	0,86		²	
Zn - Zinc	ppm	2,55	1,00 - 2,20	¹	
	ppm	2,61		²	
B - Boron	ppm	0,89	0,40 - 1,20	¹	
	ppm	1,40		²	
Cu - Copper	ppm	0,44	0,15 - 0,30	¹	
	ppm	0,35		²	
Mo - Molybdenum	ppm	<0,05	< 0,05	¹	
	ppm	<0,05		²	
Al - Aluminium	ppm	<0,50	<0,50 - <0,50	¹	
	ppm	1,02		²	

Consult your advisor for appropriate fertilizer recommendations.

301.20210723

Because NovaCropControl has no effect and / or no control over the sampling, NovaCropControl accepts no liability for adverse effects as a result of its analysis or advice provided.

Résultats des analyses NOVACROP : Laitues cycle 2, modalité LFF+EF



Plant sap-sample ¹ 202108183146 **Sample Date:** 11-8-2021
² 202108183147
Name: Terre et Humanisme NGO **Location/plot:** TH
Address: 471 Chemin du Mas de Beaulieu **Cultivation:** Lettuce Lifofer+EF
07230 Lablachere **Crop:** Lettuce
France **Plant part:** ¹ Leaf (young) ² Leaf (old)


Remarks

Mineral		Current Level	Optimum			
Total Sugars	%	0,2	0,3 - 1,4	¹		
	%	0,1		²		
pH		5,4	6,0 - 6,3	¹		
		7,1		²		
EC	mS/cm	11,9	9,4 - 12,3	¹		
	mS/cm	16,2		²		
K - Potassium	ppm	4686	3250 - 4550	¹		
	ppm	6104		²		
Ca - Calcium	ppm	492	210 - 790	¹		
	ppm	634		²		
K / Ca		9,53		¹		
		9,63		²		
Mg - Magnesium	ppm	154	100 - 200	¹		
	ppm	191		²		
Na - Sodium	ppm	13	40 - 124	¹		
	ppm	15		²		
NH4 - Ammonium	ppm	161	30 - 70	¹		
	ppm	248		²		
NO3 - Nitrate	ppm	<20	1390 - 3210	¹		
	ppm	<20		²		
N in Nitrate	ppm	<5	314 - 725	¹		
	ppm	<5		²		
N - Total Nitrogen	ppm	620	980 - 1490	¹		
	ppm	567		²		
Cl - Chloride	ppm	1526	350 - 850	¹		
	ppm	2401		²		
S - Sulfur	ppm	175	50 - 90	¹		
	ppm	298		²		
P - Phosphorus	ppm	376	140 - 240	¹		
	ppm	136		²		
Si - Silica	ppm	17,8	2,1 - 6,4	¹		
	ppm	20,4		²		
Fe - Iron	ppm	0,63	0,50 - 1,55	¹		
	ppm	0,67		²		
Mn - Manganese	ppm	0,73	1,30 - 3,40	¹		
	ppm	0,40		²		
Zn - Zinc	ppm	2,33	1,00 - 2,20	¹		
	ppm	1,91		²		
B - Boron	ppm	0,81	0,40 - 1,20	¹		
	ppm	0,64		²		
Cu - Copper	ppm	0,39	0,15 - 0,30	¹		
	ppm	0,32		²		
Mo - Molybdenum	ppm	<0,05	< 0,05	¹		
	ppm	<0,05		²		
Al - Aluminium	ppm	<0,50	<0,50 - <0,50	¹		
	ppm	0,54		²		

Consult your advisor for appropriate fertilizer recommendations.

301.20210723

Because NovaCropControl has no effect and / or no control over the sampling, NovaCropControl accepts no liability for adverse effects as a result of its analysis or advice provided.

	Diplôme : Master 2 Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation / option : Agroecology Enseignant référent : Anne Jaffrezic
Auteur(s) : Clémentine DENIS Date de naissance* : 18/11/1996	Organisme d'accueil : Terre & Humanisme Adresse : 471 Mas de Beaulieu 07260 Lablachère
Nb pages : 26 Annexe(s) : 4 (13 pages)	
Année de soutenance : 2021	Maître de stage : Pascal Dantinne
Titre français : Effets de la Litière Forestière Fermentée sur la croissance végétative, la santé et le rendement de <i>Lactuca sativa</i> (laitue) et <i>Solanum lycopersicum</i> (tomate) en conditions expérimentales Titre anglais : Effects of Fermented Forest Litter on vegetative growth, health and yield of <i>Lactuca sativa</i> (lettuce) and <i>Solanum lycopersicum</i> (tomato) under experimental conditions	
Résumé (1600 caractères maximum) : La mise en œuvre de techniques agroécologiques résilientes est essentielle pour faire face aux enjeux agricoles environnementaux et socio-économiques actuels. Parmi ces techniques, l'utilisation de microorganismes se développe sous forme de préparations commerciales et artisanales. C'est le cas de la Litière Forestière Fermentée (LiFoFer) visant à stimuler la croissance, le rendement et la santé des plantes. Néanmoins, la littérature scientifique est encore éparsée à son sujet. L'objectif de cette étude est de confirmer les effets précédemment cités de cette préparation sur deux cultures maraîchères : <i>Lactuca sativa</i> et <i>Solanum lycopersicum</i> . Un essai en micro-parcelles sur 2 cycles de culture de laitues compare l'effet de la LiFoFer à celui d'une préparation commerciale et à un extrait fermenté d'ortie (EF), ainsi que la combinaison d'EF et de LiFoFer. La même expérience est répétée sur une culture de tomate en pots. Les résultats sur les laitues montrent que la combinaison des EF et de la LiFoFer ralentit la croissance végétative et diminue le rendement en biomasse fraîche jusqu'à 46% (p-value < 0,05). Sur la culture de tomates, la croissance végétative est plus importante pour la LiFoFer à la 5ème semaine de culture (+5,05cm) que pour les modalités utilisant la préparation commerciale (+3,61cm) et la combinaison EF et LiFoFer (+3,66cm). Les effets agronomiques de la LiFoFer concernant le rendement et la santé des plantes n'ont pas pu être confirmés dans cette étude. Les effets sur la stimulation de la croissance sont à confirmer par une prochaine étude consacrée à cet effet.	
Abstract (1600 caractères maximum) : The implementation of resilient agro-ecological techniques is essential to face the current agricultural environmental, economic, and social challenges. Among these techniques, the use of micro-organisms is developing in the form of commercial preparations but also in the form of artisanal preparations. This is the case of Fermented Forest Litter (LiFoFer) which aims to stimulate growth, yield, and health of plants. Nevertheless, the scientific literature on this subject is still sparse. The objective of this study is to confirm the above-mentioned effects of this preparation on two vegetable crops: <i>Lactuca sativa</i> and <i>Solanum lycopersicum</i> . A microplot trial on 2 cycles of lettuce crops compares the effect of LiFoFer to that of a commercial preparation based on microorganisms and a fermented nettle extract (EF), as well as the combination of EF and LiFoFer. The same experiment was repeated on a tomato crop in pots. The results on lettuce show that the combination of EF and LiFoFer slows down vegetative growth and decreases the fresh biomass yield by up to 46% (p-value < 0.05). In the tomato crop, vegetative growth was greater for LiFoFer at the 5th week of cultivation (+5.05cm) than for the modalities using the commercial preparation (+3.61cm) and the EF and LiFoFer combination (+3.66cm). The agronomic effects of LiFoFer on yield and plant health could not be confirmed in this study. The effects on growth promotion need to be confirmed in a further dedicated study.	
Mots-clés : Litière Forestière Fermentée, EM, microorganismes efficaces, bioinoculant, purin d'ortie Key Words: Fermented forest litter, EM, effective microorganisms, bioinoculant, nettle slurry	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires