



Faculté des bioingénieurs

Influence des biointrants à base de compost sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et de la plante

Auteure : Apolline Delvaux
Promoteur : Yannick Agnan (ELIE)
Lecteurs : Guillaume Lobet (ELIA)
Brieuc Hardy (CRA-W)

Année académique : 2022 – 2023

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur en sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude envers mon promoteur Yannick Agnan pour m'avoir accueillie dans son équipe et accompagnée tout au long de ce mémoire. À chaque étape de mon avancement, il a su trouver les mots justes pour m'encourager et me donner la confiance nécessaire pour persévérer. Son humour rafraîchissant a apporté de la légèreté dans les moments de stress, me permettant ainsi de mieux gérer les défis qui se présentaient à moi. Sa détermination indéfectible à voir ses étudiants réussir ont été une source de motivation sans faille. Je suis vraiment reconnaissante d'avoir eu la chance de bénéficier de son expertise et de sa personnalité. Merci infiniment.

Je remercie également Simon Vanderveken et Rémi Desmet pour leur aide précieuse dans les échantillonnages à Grez-Doiceau, le lancement de l'expérience en serre et les analyses à réaliser. Leurs conseils et leur expertise ont été très bénéfiques pour mon travail.

Je suis également infiniment reconnaissante envers les doctorants de Yannick Agnan, en particulier Bryan et Nathan, pour leur aide dans la réalisation de certaines de mes analyses et leurs précieux conseils.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers toute l'équipe SOLS pour leur accueil chaleureux, leurs recommandations et l'organisation des séminaires et des réunions. Un merci particulier à Maxime Thomas pour ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier la plateforme MOCA, en particulier Claudine Givron, Laurence Monin, Elodie De Vos et Hélène Dailly, pour leur soutien dans la réalisation de mes analyses.

Un grand merci à Thomas Dagbert et Guillaume Lobet pour leur aide dans la réalisation de mes scans racinaires.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers l'ensemble des mémorants avec lesquels j'ai partagé de précieux moments et qui m'ont offert un soutien moral d'une importance capitale. En particulier, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à Tanguy Do, Rosalie Dejardin, Sami Royer et Nicolas Lamine, mémorants de Yannick avec lesquels j'ai eu le privilège de mener à bien certaines manipulations et de bénéficier de leur aide inestimable.

Merci à mes lecteurs Briec Hardy et Guillaume Lobet qui ont accepté ce rôle et se sont intéressés à mon travail.

Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont joué un rôle dans cette aventure, même si je n'ai pas pu les mentionner individuellement. Votre soutien a été essentiel, et je vous suis infiniment reconnaissante.

Financement

Ce projet de recherche a été financé par les Fonds Baillet Latour



Table des matières

Remerciements	1
Financement.....	2
Table des matières	3
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	8
Glossaire	9
Liste des sigles	10
1. Introduction	1
2. État de l’art	3
2.1. Recours aux intrants en agriculture	3
2.1.1. Réglementation des intrants agricoles & politique agricole commune	4
2.1.2. Différentes formes d’agriculture	4
2.2. Biointrants	5
2.2.1. Diversité des biointrants	5
2.2.2. Biointrants à base de compost	8
2.2.3. Modes d’application	11
2.3. Efficacité des biointrants.....	15
2.3.1. Efficacité physique	17
2.3.2. Efficacité biologique.....	18
2.3.3. Efficacité chimique.....	23
3. Objectifs	26
4. Matériels & méthodes.....	27
4.1. Expérience en champ	27
4.1.1. Zone d’étude	27
4.1.2. Schéma d’analyses générales et modalités testées.....	28
4.1.3. Production et application des intrants	28
4.1.4. Échantillonnage et analyses.....	31
4.2. Expérience en serre	35
4.2.1. Zone d’étude	35
4.2.2. Schéma d’analyses générales et modalités testées.....	35

4.2.3.	Production et application des intrants.....	36
4.2.4.	Suivi tout au long de l'expérience	40
4.2.5.	Modes opératoires et analyses	42
4.3.	Traitement de données et analyses statistiques.....	46
5.	Résultats et discussion	47
5.1.	Expériences en champ.....	47
5.1.1.	Efficacité du thé de compost et des extraits végétaux (essai 2022)	47
5.1.2.	Efficacité des méthodes d'injection et d'enrobage (essai 2023).....	53
5.1.3.	Résumé et perspectives des essais en champ	57
5.2.	Résultats en serre.....	58
5.2.1.	Caractérisation des sols	58
5.2.2.	Caractérisation des intrants.....	59
5.2.3.	Résumé de l'expérience en serre.....	68
6.	Conclusions et perspectives	69
7.	Références	70
8.	Annexes.....	77

Liste des figures

Figure 1 : Classification des biointrants (Goulet 2021; Pierart 2017)	5
Figure 2 : Les biofertilisants microbiens ou bioinoculants (Mahmud et al. 2021).....	7
Figure 3 : Résistance aux stress biotiques et abiotiques améliorée par les biostimulants (Bhupenchandra et al. 2022).....	8
Figure 4 : Application de compost au sol comme amendement organique (Compost Applications 2012).....	9
Figure 5 : Production du jus de lombricompost grâce au lombricomposteur (Lombricomposteur 2016)	10
Figure 6 : Production du thé de compost (Comment faire du thé de compost s. d.).....	11
Figure 7 : Différents modes d'applications des biointrants (application foliaire, au sol, injection dans la tige, traitement de semences et traitement de racines).....	12
Figure 8 : Différents procédés pour le processus d'enrobage de semences (Pedrini et al. 2017)	14
Figure 9 : Technique de pralinage des racines d'un arbre fruitier (Desfemmes 2013)	15
Figure 10 : Impact général des biointrants sur la chimie, physique et biologie des sols.....	16
Figure 11 : Le compartiment du sol comme un milieu multiphasique (Service publique de l'assainissement francilien 2004).	17
Figure 12 : Système sol-plante dans son ensemble et rôle des organismes vivants (Jean-François 2020)	19
Figure 13 : Mécanismes d'action des biointrants sur la santé et la croissance végétale par l'introduction de substances nutritives et/ou de microorganismes bénéfiques.....	20
Figure 14 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phytostimulation ou de phytoprotection du blé favorisés par les biostimulants microbiens (Moenne-Loccoz et al. 2019).....	21
Figure 15 : Les différents mécanismes des microorganismes bénéfiques dans la lutte contre les pathogènes, par application au sol ou pulvérisation foliaire.	22
Figure 16 : Action des résidus de cultures et matières fertilisantes dans le sol et la solution de sol (Demarle et Saint-Macary 2021)	24
Figure 17 : Vues aériennes des parcelles de l'essai 2022 (a) et l'essai 2023 (b), Grez-Doiceau (Service publique de Wallonie 2023).	27
Figure 18 : Bac de production de compost de la Ferme de la Sarte. Processus de compostage contrôlé grâce aux capteurs d'humidité et de température , méthode Johnson Su (« Appel à projet CERES Agricultures en Transition » 2022).	28
Figure 19 : Parcelles d'expérimentation subdivision en bandes. Chaque drapeau noir correspond au centre des travées. Schéma Icograms Designer.	31
Figure 20 : Homogénéité minérale de la parcelle. Échantillonnage sur 3 bandes à 25 cm de profondeur	32
Figure 21 : Machine utilisée pour le comptage de mille grains (DRELLO MZ 2000)	33

Figure 22 : Exemple d'un scan racinaire (modalité/bande 8)	34
Figure 23 : Expérience en serre : neuf modalités différentes répliquées cinq fois	35
Figure 24 : Production du thé de compost pour l'expérience en serre – apport d'oxygène grâce au bulleur	37
Figure 25 : Étapes suivies en serre sur les 80 jours d'expérience.....	40
Figure 26 : Rhizons et seringues utilisées pour la récolte des solutions de sol	41
Figure 27 : prétraitements requis pour les analyses tout au long de l'expérience	42
Figure 28 : niveau de séparation pour les mesures de biomasse aérienne et racinaire	46
Figure 29 : Dénombrement moyen (2 répétitions) des germes totaux (charge microbienne totale) dans les intrants liquides (a) et solides (b) utilisés lors des trois expériences. Compost 1 = compost Johnson Su, Compost 2 = compost CMC, et Compost 3 = lombricompost Pur Ver	48
Figure 30 : Dénombrement moyen (2 répétitions) des moisissures (charge fongique) dans les intrants liquides (a) et solides (b) utilisés lors des trois expériences. Compost 1 = compost Jonhson Su, Compost 2 = compost CMC, et Compost 3 = lombricompost Pur Ver.....	48
Figure 31 : Rendement froment en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; n = 5)	49
Figure 32 : Poids de mille grains en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; n = 20)	51
Figure 33 : Matrice de corrélation basée sur le coefficient de Pearson, entre les différents minéraux dans les grains (mg/kg), le poids de mille grains (g ; PDMG) et le rendement total (kg/ha), pour toutes les modalités confondues. Une corrélation est faible entre 0 et 0.5 (positive) et 0 et -0.5 (négative), et forte entre 0.5 et 1 (positive) et -0.5 et - 1 (négative)..	52
Figure 34 : Concentration en magnésium et en calcium des grains en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; n = 3).....	53
Figure 35 : Influence des modalités sur quatre paramètres biologiques des plantes (émergence n = 3 ; biomasse aérienne n = 30 ; nombre de talles n = 30 ; nombre d'axes racinaires n = 15)	55
Figure 36 : Matrice de corrélation entre les différents minéraux totaux présents dans le sol, le nombre d'axes racinaires et la biomasse aérienne par plant, toutes modalités confondues (la Sarthe 2023)	56
Figure 37 : Concentration en calcium (total) dans le sol (jusque 15 cm de profondeur) en fonction des modalités (la Sarthe 2023 ; n = 3)	56
Figure 38 : Concentrations en minéraux totaux (a) et échangeables (b) dans les sols (échelle logarithmique, n = 3).....	58
Figure 39 : Concentration en minéraux totaux dans les composts utilisés pour l'enrobage (a ; moyenne de 2 valeurs ; compost 2 = CMC, Compost 3 = lombricompost Pur Ver) et dans les intrants liquides (b), et carbone organique dissous (b ; DOC, moyenne de 2 valeurs) dans le thé et extrait avec adjuvants. Echelle logarithmique.....	61

Figure 40 : Impact des différentes modalités sur la biomasse aérienne et racinaire par plant (n = 5).....	62
Figure 41 : Matrice de corrélation des éléments échangeables dans les sols (serre 2023) pour toutes les modalités confondues.	62
Figure 42 : Concentration en magnésium échangeable (a) et zinc échangeable (b) en fin d'expérience (serre 2023) mg/kg (n = 3 avant expérience ; n = 5 pour toutes les modalités confondues après expérience).	63
Figure 43 : Matrice de corrélation entre les minéraux présents dans la solution de sol (deux dates d'échantillonnage) pour toutes les modalités confondues.....	64
Figure 44 : Concentration en calcium dans la solution de sol en fonction de chaque modalité, et à deux dates différentes (premier histogramme = 1 ^{ère} date ; n = 3,4 ou 5)	65
Figure 45 : Concentration en cuivre dans la solution de sol en fonction de chaque modalité, et à deux dates différentes (premier histogramme = 1 ^{ère} date ; n = 3,4 ou 5)	65
Figure 46 : influence des modalités sur la concentration en carbone organique dissous de la solution de sol (2 ^e date d'échantillonnage ; n = 5).....	66
Figure 47: Matrice de corrélation entre les minéraux présents dans les parties aériennes pour les plantes toutes modalités confondues.	66
Figure 48 : Concentration en calcium dans les parties aériennes (mg/kg) en fonction des différentes modalités (n=5).....	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Expériences en champ en 2022 et 2023 sur du froment, caractérisation, modalités et réponse mesurée	28
Tableau 2 : Composition du thé de compost produit à la ferme de la Sarthe pour un volume total filtré de 800 L	29
Tableau 3 : Quantités nécessaires pour 100 kg de semences à la ferme de la Sarthe	30
Tableau 4 : Dose des intrants appliquée en champ	31
Tableau 5 : Expériences en serre en 2023 sur du froment, caractérisation, modalités et réponse mesurée.....	36
Tableau 6 : Quantité de chaque ingrédient pour la production du thé en serre.....	37
Tableau 7 : Quantités d'ingrédients pour la modalité des adjuvants seuls en serre.....	38
Tableau 8 : Quantité de chaque ingrédient pour l'enrobage de compost en serre	39
Tableau 9 : Quantités des biointrants à appliquer, rapportées à la surface d'un pot en serre	40
Tableau 10 : Statistiques des paramètres de suivi de la serre expérimentale entre le 25/01/2023 et le 15/04/2023	42
Tableau 11 : Moyennes et écart-types des paramètres du sol de l'expérience en serre (n = 3)	58

Glossaire¹

Pesticides : ensemble des produits phytopharmaceutiques et des biocides. Les produits phytopharmaceutiques sont utilisés spécifiquement dans l'agriculture sur les végétaux et produits végétaux tandis que les biocides sont employés pour un grand nombre d'autres utilisations (désinfectants, conservateurs pour produits cosmétiques, produits de traitement de l'eau, *etc.*)

Substance active : désigne tout produit chimique, extrait de plante, phéromone ou encore micro-organisme ayant une action contre les parasites ou bien directement sur les plantes. Celles-ci peuvent être associées à d'autres composants comme des phytoprotecteurs (supprime ou réduit les effets phytotoxiques des produits phytopharmaceutiques) ou encore synergistes (renforce l'activité de la substance active).

Adjuvants : produits mis sur le marché dans le but d'être mélangés aux produits phytopharmaceutiques directement par l'utilisateur pour en augmenter l'efficacité. En Belgique, ces adjuvants doivent suivre la même procédure d'autorisation qu'un produits phytopharmaceutiques. En d'autres mots, c'est une substance ajoutée à une autre pour en renforcer l'action.

Biopesticides : produits phytopharmaceutiques dont la composition repose sur des ingrédients naturels. Bien que ceux-ci soient d'origine naturelle, ils répondent à la définition européenne de PPP et doivent donc suivre exactement la même procédure que les produits phytopharmaceutiques pour l'autorisation de leur mise sur le marché et de leur utilisation. Des exemples sont les extraits de plantes, phéromones, micro-organismes, *etc.*

Fongicides : produits phytopharmaceutiques destinés à détruire les champignons microscopiques.

Formulation : forme sous laquelle le produit commercial est présenté.

¹Définitions reprises de l'ASBL Corder (Corder 2023)

Liste des sigles

PPP : produit phytopharmaceutique

TC : thé de compost

EC : extrait de compost

ICP: Inductively Coupled Plasma (Plasma à couplage inductif)

XRF : Portable X-Ray Fluorescence

TMF : TM foliaire

TMS : TM semis

1. Introduction

La croissance progressive de la population mondiale implique des besoins alimentaires de plus en plus importants, exerçant ainsi une forte pression sur les ressources naturelles. En effet, afin de répondre à ces besoins, les pratiques agricoles se sont intensifiées. Cependant, cette intensification, bien qu'elle ait permis de meilleurs rendements, a engendré des conséquences négatives d'un point de vue sanitaire et environnemental.

L'utilisation intensive de produits phytopharmaceutiques, tels que les fongicides, insecticides et herbicides, ainsi que l'utilisation d'engrais chimiques, peut contaminer les sols et les sources d'eau entraînant alors des conséquences sur la biodiversité terrestre et aquatique (CIRAD 2021). Les résidus de pesticides sur les aliments et leur volatilisation portent également atteinte à la santé humaine (CIRAD 2021). De plus, l'utilisation excessive de ces produits chimiques a contribué à la résistance des ravageurs et la persistance des maladies, nécessitant l'utilisation de quantités toujours plus importantes d'intrants chimiques pour obtenir les mêmes résultats (CIRAD 2021). En outre, il existe aujourd'hui une trop grande dépendance à l'égard des engrais chimiques de synthèse énergivores, dont le prix a fortement augmenté ces dernières années, exerçant ainsi une pression économique sur les agriculteurs (Amy 2021).

Face à cette situation critique, un intérêt grandit vers les stratégies de biocontrôle, désignant un ensemble de techniques d'origine biologique utilisées dans le but de lutter contre des agresseurs (microorganismes, nématodes, insectes, *etc.* ; CIRAD 2021). Plusieurs types d'agents peuvent être utilisés dans des stratégies de biocontrôle, en parallèle de substances permettant d'enrichir les sols sous forme de matières organiques exogènes (biofertilisants à base de compost, résidus végétaux ou déjections animales) et de microorganismes (bioinoculants). Tous ces intrants biologiques utilisés en agriculture sont appelés biointrants.

Cependant, il reste encore certains défis à relever quant à l'utilisation de biointrants en agriculture, notamment concernant la recherche sur les souches de microorganismes les plus efficaces, leur performance et leur fiabilité. C'est le cas par exemple pour le thé de compost, qui n'a attiré que récemment l'attention des scientifiques et a fait l'objet de certaines études. Il reste cependant encore à approfondir sur de nombreux aspects. Ces recherches se sont principalement focalisées sur des expériences *in vitro*, quelques-unes en serre et très peu en champ.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet de recherche de la ferme de la Sarte à Grez-Doiceau, s'étalant sur quatre ans et entamé en 2022. Cette étude est le lauréat de l'appel à projet « CERES – Agricultures en transition » en 2022. Elle évalue les effets de biointrants à base de compost, notamment le thé de compost, sur les services écosystémiques du sol ainsi que la qualité nutritionnelle des aliments et la productivité agricole. Des analyses y ont été et seront réalisées sur plusieurs cultures afin d'établir les possibles effets du thé et de l'extrait

de compost sous plusieurs formes d'application possibles. Les modalités testées permettront d'évaluer l'influence réelle de ces pratiques nouvelles.

C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrit ce travail de fin d'étude. Celui-ci se base sur deux expériences : une en champ réalisée dans le cadre du projet CERES et une en serre pour valider en conditions contrôlées les observations de l'expérience en champ. Le but de cette expérience sera d'apporter des réponses quant à l'efficacité d'intrants à base de compost sur les paramètres du sol et de la plante, en comparaison à des méthodes conventionnelles.

2. État de l'art

2.1. Recours aux intrants en agriculture

Les intrants utilisés en agriculture conventionnelle visent différents objectifs. Certains ont pour but d'améliorer les propriétés du sol (amendements) ou de la plante (fertilisant), d'autres de protéger les cultures contre des agents nuisibles, tels que les champignons, les adventices, les insectes ou les nématodes.

Les produits phytopharmaceutiques (PPP) font partie des pesticides et sont encore couramment utilisés pour protéger les cultures et plantes des maladies et des ravageurs dans le but d'assurer la santé et la sécurité alimentaire mondiale, objectif fixé par l'Union européenne (European Commission 2023). Il existe cependant plusieurs formes d'application selon leur cible et leurs moyens d'action : certains visent à prévenir les effets des agents nuisibles (fongicides, insecticides), d'autres agissent directement sur les processus vitaux des plantes (inhibiteurs de croissance), tandis que d'autres encore détruisent les plantes ou parties de plantes indésirables (herbicides, défanants en pommes de terre, anti-mousses ; Corder 2023). Toutefois, il convient de préciser que les PPP n'ont pas pour but d'apporter des éléments nutritifs (comme c'est le cas des engrais). Au niveau de sa composition, un PPP contient une substance active qui mise en mélange, est la responsable de l'activité majeure du produit. Les autres molécules du mélange permettent soit une meilleure adhésion de la substance active au végétal, soit de faciliter la pulvérisation. Différentes formulations existent, dépendant de la fonction que l'on donne au produit (Corder 2023).

L'utilisation des intrants agricoles varie fortement en quantités, types de produits utilisés et modes d'application, à la fois à l'intérieur d'un pays et entre différentes régions du monde, en raison de leur dépendance au climat et au type de culture (Le Campion et al. 2020). Les fongicides sont principalement utilisés dans les pays d'Europe du Nord-Ouest, où l'agriculture intensive en intrants chimiques est répandue (Le Campion et al. 2020; Przystalski et al. 2008).

L'utilisation excessive et inappropriée de ces pesticides peut entraîner des conséquences négatives sur les sols, l'eau et la biodiversité, ayant par conséquent des impacts sur la santé humaine et celle des écosystèmes (animaux et végétaux). Cela mène à une réglementation stricte sur l'utilisation des pesticides au niveau européen (European Commission 2023).

Les engrais chimiques de synthèse, quant à eux, sont utilisés pour fournir les nutriments essentiels aux plantes. Ils soulèvent deux problématiques majeures : leur production requiert des quantités considérables d'énergie provenant de matières fossiles, engendrant une forte dépendance des agriculteurs à leur égard, et l'excès de nutriments dans l'environnement, en particulier l'azote, peut entraîner des conséquences néfastes telles que l'eutrophisation, qui déséquilibre les écosystèmes aquatiques en favorisant la prolifération excessive d'algues et d'autres organismes, impactant ainsi la biodiversité et la qualité de l'eau. De ce fait, il est

essentiel de prendre en compte à la fois le coût énergétique de leur production et l'impact sur l'environnement causé par le déséquilibre des nutriments.

2.1.1. Réglementation des intrants agricoles & politique agricole commune

Les pays de l'Union européenne peuvent ajuster leurs stratégies et interventions pour réduire leur dépendance aux pesticides conformément aux objectifs de l'UE en matière d'agriculture durable, en mettant en œuvre des plans stratégiques dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) (European Commission 2023). La PAC, créée en 1962, vise à soutenir les agriculteurs dans la protection de leurs cultures, la préservation des écosystèmes agricoles et l'utilisation durable des pesticides. La stratégie de « La ferme à la table » de l'Union européenne vise à réduire de moitié l'utilisation des pesticides d'ici 2030, tout en encourageant des pratiques agricoles durables et des alternatives à faible risque (directive européenne 2009/128/CE ; Journal officiel de l'Union européenne 2009). En Belgique, des mesures ont également été prises pour réduire l'utilisation des pesticides en favorisant des pratiques agricoles durables et l'utilisation de produits alternatifs (European Commission 2023).

L'utilisation des composts et produits à base de compost répond aux objectifs fixés par les pays de l'Union européenne, visant notamment la réduction de 20 % de la quantité des déchets organiques mis en décharge d'ici 2010 et de moitié d'ici 2050 (De Corato 2020).

2.1.2. Différentes formes d'agriculture

Dans le but de répondre aux enjeux de durabilité de l'agriculture et de sortir du système d'agriculture conventionnelle, un grand nombre d'initiatives est né : agriculture biologique, agriculture de précision, agriculture intégrée, agriculture de conservation, agroécologie (dont l'un des piliers est le biocontrôle), *etc.* Chaque initiative est caractérisée par des pratiques ou des systèmes de production spécifiques avec des performances environnementales et socio-économiques associées (Therond et al. 2017). À titre d'exemple, l'agriculture de précision se réfère à la nature des technologies qu'elle utilise, l'agriculture biologique à la nature de ses intrants. La plupart de ces dénominations ne prend néanmoins pas en compte la nature des interactions entre les systèmes de production et leur environnement socio-économique à différentes échelles (locale, régionale, nationale ou mondiale ; Le Campion et al. 2020; Maeder et al. 2002).

L'agriculture biologique repose sur les principes suivants : utiliser le moins possible d'apports extérieurs et éviter l'emploi d'engrais et pesticides de synthèse. Bien que les méthodes biologiques ne puissent garantir une absence totale de résidus en raison de la pollution environnementale générale, elles visent à minimiser la pollution de l'air, des sols et de l'eau (FAO 2023). Les biointrants, regroupant les intrants biologiques utilisés en agriculture, sont

des alternatives aux intrants chimiques en termes de nature et de mode d'action (Goulet 2021).

Afin de répondre aux objectifs de réduction des PPP et engrais de synthèse, des méthodes biocontrôle existent, et s'inspirent des mécanismes et interactions naturels (Xicluna 2022). Il réunit un ensemble de solutions diverses étant toutes destinées à protéger les plantes contre les maladies et les attaques extérieures. Ces méthodes bien que parfois utilisées seules, sont très souvent associées avec d'autres solutions anciennes (rotation des cultures, travail du sol), ou modernes (robotique, sélection génétique, outils d'aide à la décision ; Xicluna 2022).

2.2. Biointrants

2.2.1. Diversité des biointrants

Les biointrants comprennent différentes catégories telles que les bioamendements, biofertilisants, biostimulants et les produits de biocontrôle (Figure 1). L'ensemble de ces biointrants agissent grâce à trois apports principaux, qui sont l'approvisionnement en matières organiques, en nutriments et en microorganismes bénéfiques, ou une combinaison des trois.

Les biointrants ne sont pas toujours à base de microorganismes, mais un tournant microbiologique et biotechnologique a été observé dans le secteur du biocontrôle, dans lequel la recherche et le développement se concentrent à présent sur les bactéries et les champignons, reléguant ainsi au second plan la macrofaune (insectes par exemple ; Goulet 2021).

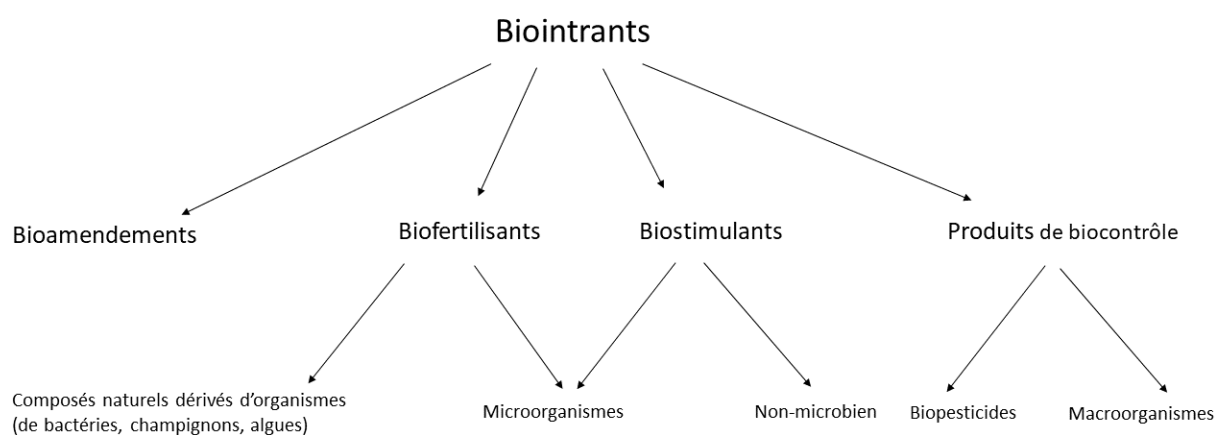


Figure 1 : Classification des biointrants (Goulet 2021; Pierart 2017)

Un bioamendement (Figure 1) est un amendement organique brut recyclé directement dans le sol, par exemple les effluents d'élevage et les engrais verts (Owen, Williams, et Griffith 2014). Ceux-ci fournissent des nutriments sous forme inorganique pour une absorption directe ou sous forme organique pour une minéralisation ultérieure en formes inorganiques

(Vessey 2003). Ces amendements peuvent aussi contenir des populations microbiennes comme des rhizobactéries pour un apport secondaire d'éléments nutritifs et d'autres fonctions de promotion de la croissance des plantes (Owen, Williams, et Griffith 2014). Un exemple typique de bioamendement est le compost (Pierart 2017 ; Owen, Williams, et Griffith 2014).

Un biofertilisant (Figure 1) est un produit pouvant contenir des micro/macro nutriments végétaux (apport de nutriments primaires) ou des composants organiques spécifiques qui, directement ou indirectement, stimulent l'activité microbienne et augmentent ainsi la mobilisation des nutriments du sol (apport de nutriments secondaires). Les biofertilisants améliorent donc la fertilité du sol grâce à leur contenu en composés naturels dérivés d'organismes et/ou en microorganismes (bioinoculants ; Goulet 2021). Ces biofertilisants constituent un outil prometteur dans les agroécosystèmes en tant que source supplémentaire d'éléments nutritifs pour les plantes (Garcia-Gonzalez et Sommerfeld 2016).

L'évolution des pratiques agricoles fait des biofertilisants un élément essentiel de la production agricole moderne et souligne l'importance des bioinoculants dans les années à venir. Un certain nombre de microorganismes de la rhizosphère sont connus pour exercer de multiples activités favorisant la croissance des plantes, mais peu ont été formulés dans des biofertilisants. Par conséquent, la recherche pour de nouvelles techniques permettant leur application étendue est nécessaire pour atteindre les objectifs de l'agriculture biologique (Maçik, Gryta, et Frąc 2020).

Les bioinoculants, tels que les bactéries fixatrices d'azote et les champignons mycorhiziens, sont des biofertilisants microbiens spécialement conçus en laboratoire pour transformer les éléments chimiques de l'air et du sol en formes assimilables par les plantes (fixation de l'azote atmosphérique, solubilisation du phosphore, *etc.*), offrant ainsi des solutions adaptées à divers types de sols et de systèmes de culture (Figure 2 ; Mahmud et al. 2021).

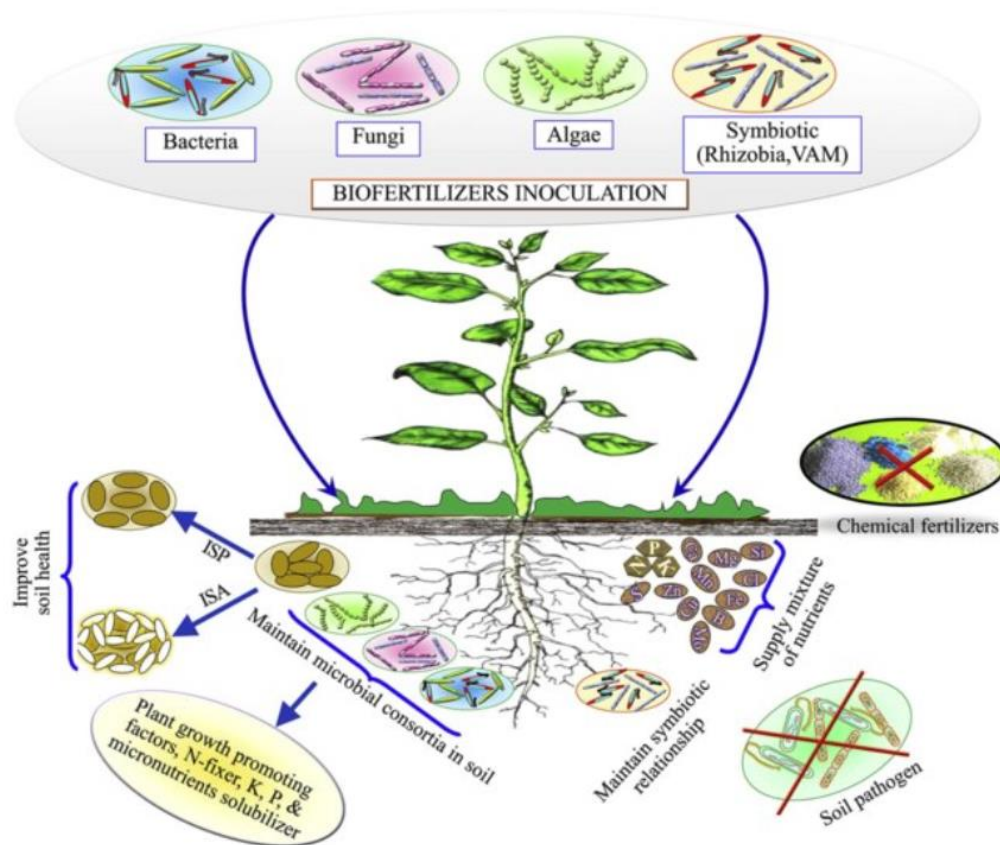


Figure 2 : Les biofertilisants microbiens ou bioinoculants (Mahmud et al. 2021)

Les biostimulants (Figure 1) visent à améliorer diverses caractéristiques des plantes et de leur rhizosphère, comme la tolérance aux stress, l'utilisation des éléments nutritifs, les caractéristiques qualitatives et la disponibilité des nutriments dans le sol ou la rhizosphère, indépendamment de leur composition en éléments nutritifs (Figure 3 ; Bhupenchandra et al. 2022). Leur action consiste à activer ou modifier les mécanismes physiologiques des plantes (Trimmer 2017; Demarle et Saint-Macary 2021). Les biostimulants se divisent en deux catégories : (1) les non-microbiens comprenant les acides organiques, les acides aminés et les extraits de plantes ; et (2) les microbiens principalement constitués de bactéries utilisées en traitement au sol ou traitement de semences (Trimmer 2017).

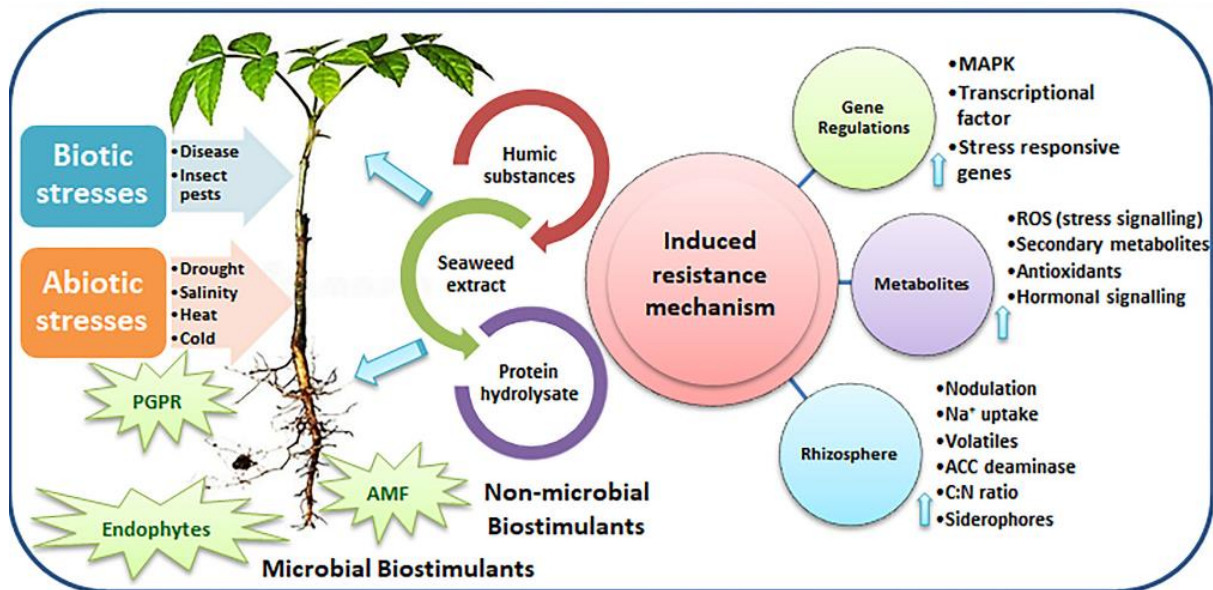


Figure 3 : Résistance aux stress biotiques et abiotiques améliorée par les biostimulants (Bhupenchandra et al. 2022)

Enfin, les **produits de biocontrôle** (Figure 1) se divisent en biopesticides d'un côté et macroorganismes (insectes, mites, nématodes ; Trimmer 2017) de l'autre. Les biopesticides peuvent être biochimiques ou microbiens. Les biopesticides biochimiques seront par exemple à base d'extraits de plante, d'acides organiques, de PGRs², de phéromones ou encore de minéraux (Bhupenchandra et al. 2022; Trimmer 2017). Les biopesticides sont dérivés de composés naturels comme les plantes et bactéries, ils visent des ravageurs très spécifiques et sont de façon inhérente, moins toxiques que les pesticides synthétiques.

2.2.2. Biointrants à base de compost

Production de compost

La production de compost (comme biofertilisant, bioamendement ou biostimulant) est une méthode utilisée pour recycler les déchets organiques, qu'ils soient produits à domicile ou commercialisés, et elle représente une opportunité pour utiliser des molécules organiques respectueuses de l'environnement et des microorganismes bénéfiques. Cependant, il existe encore peu d'études évaluant l'influence des composts sur la mobilité des éléments à l'interface sol-plante (Pierart 2017).

Le compostage est un processus biologique complexe qui permet de convertir les matières organiques biodégradables en matière organique stabilisée grâce à l'action de microorganismes endogènes (Moreno Flores 2008). Les différentes interprétations du compostage varient selon que les auteurs considèrent les transformations et réactions biochimiques

² Plant Growth Regulators

naturelles ou la maîtrise technique humaine (Znaïdi et Khedher 2002). La production de compost est toutefois soumise à des directives, règlements et lois nationales régissant sa pratique qu'il est essentiel de respecter pour garantir la qualité du compost produit (Znaïdi et Khedher 2002).

La production de compost se décompose en plusieurs phases qui ont toute leur importance dans la composition finale du compost. La première phase (thermophile) se caractérise par une élévation de la température pendant au moins 5-6 jours consécutifs, permettant d'éliminer ou d'inactiver les germes et les espèces microbiennes pathogènes pour les humains, les animaux et les plantes. Ensuite, la deuxième phase (mésophile) se traduit par un ralentissement progressif de la température. La dernière (maturation) marque l'achèvement de la stabilisation et de l'humification de la matière organique sur une période plus longue (De Corato 2020). Le processus de compostage doit être réalisé de manière à assurer une aération adéquate du tas de compost, favorisant ainsi le développement des microorganismes bénéfiques et la transformation des matières organiques (De Corato 2020).

Applications et bienfaits

Le compost est utilisé de manière polyvalente, à la fois comme conditionneur du sol pour améliorer sa structure et sa fertilité biologique, ainsi que comme amendement organique (Figure 4) favorisant la suppression naturelle des pathogènes végétaux du sol (Zaccardelli et al. 2006; De Corato 2020). En effet, grâce à sa composition riche en minéraux, oligoéléments, substances organiques et microorganismes bénéfiques, le compost améliore la qualité globale du sol et offre une solution efficace pour contrôler les agents pathogènes et les maladies des plantes, bien que les mécanismes impliqués doivent encore faire l'objet de recherche (De Corato 2020).



Figure 4 : Application de compost au sol comme amendement organique (Compost Applications 2012)

Le compost peut être utilisé seul ou en combinaison avec des consortiums microbiens exogènes pour améliorer la qualité du sol et la santé des plantes. Les thés de compost et les mélanges commerciaux d'acides humiques, d'acides fulviques, d'humine et de

micronutriments sous forme liquide sont également développés et présentent de nombreux avantages pour la croissance et la santé des plantes (De Corato 2020; Ayuso et Hernandez 1996).

Le lombricompost

Pour optimiser le processus et améliorer la qualité du compost, des techniques de lombricompost sont parfois utilisées. Cela consiste en la transformation de déchets organiques en les faisant passer par l'intestin de lombrics, où ils sont mélangés à des éléments minéraux, des microorganismes et des fermentas, qui améliorent les qualités organiques du matériau obtenu (Moreno Flores 2008). On peut en utiliser la matière solide comprenant donc les déjections lombrics et la matière organique, ou bien on peut uniquement utiliser le « thé de lombricompost », jus laissé par les déjections (Figure 5).

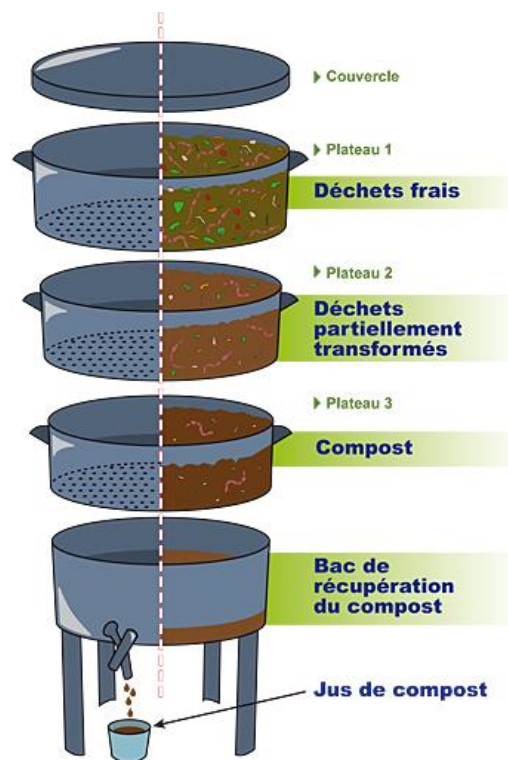


Figure 5 : Production du jus de lombricompost grâce au lombricomposteur (Lombricomposteur 2016)

Thé & extrait de compost

Le compost peut être utilisé et former la base de nouvelles solutions innovantes, telles que les extraits de compost (water extract) et les thés de compost (compost tea), ces deux termes étant parfois confondus dans la littérature scientifique. Les extraits sont obtenus à partir du compost par une simple extraction à l'eau de ses composants solubles (Joshi et al. 2009 ; De Corato 2020). Les thés de compost sont, quant à eux, obtenus par un processus de fermentation/oxydation permettant de déterminer de nouvelles conditions dans les principales caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des produits finaux (Figure 6).



Figure 6 : Production du thé de compost (Comment faire du thé de compost s. d.)

Les thés de compost (TC), peuvent être classés en deux catégories principales en fonction du niveau d'aération fourni par les systèmes d'air (Baldantoni et al. 2010 ; De Corato 2020; Scheuerell et Mahaffee 2002) : les thés de composts aérés et thés de compost non-aérés. Ce sont des solutions liquides filtrées à base de compost, produites par immersion et extraction du compost dans de l'eau pendant quelques heures à deux semaines.

La composition des thés et extraits dépend étroitement du compost à partir duquel ils sont obtenus (Ingham 2005; De Corato 2020). Au cours de l'extraction, les molécules organiques, les matières inorganiques solubles et les microorganismes en suspension augmentent en concentrations (Scheuerell et Mahaffee 2002). Des substances organiques commerciales (acide humique, acide fulvique et humine) peuvent être ajoutées notamment pour leurs effets sur la promotion de la croissance des plantes et la suppression des maladies végétales (Joshi et al. 2009 ; De Corato 2020). Les solutions à base de compost peuvent aussi dans certains cas être complétées par d'autres substances nutritives pour aider la croissance et le maintien des populations microbiennes qui décomposent la matière organique.

2.2.3. Modes d'application

Différents modes d'application existent pour administrer ces intrants biologiques, en fonction de leur état (liquide vs solide) et de l'objectif visé (Figure 7). Ces méthodes sont notamment celles de l'**application foliaire** *via* pulvérisation, l'**injection dans la tige**, l'**application au sol**, le **traitement des semences** (enrobage, trempage, imbibition), et le **traitement des racines** (pralinage, trempage des racines (root dipping ; Preininger et al. 2018 ; Mahanty et al. 2017). Certaines études ont par ailleurs évalué les différents modes d'application et leurs efficacité et impacts associés (Mujeeb et al. 2022; Efthimiadou et al. 2020; Akhtar et Mahmood 1994).

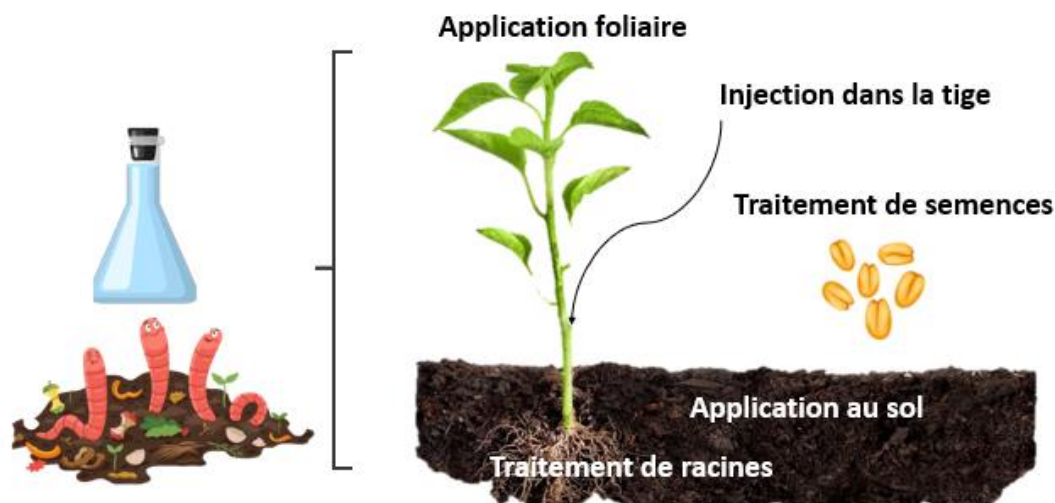


Figure 7 : Différents modes d'applications des biointrants (application foliaire, au sol, injection dans la tige, traitement de semences et traitement de racines).

Applications foliaires et au sol

L'application foliaire (par pulvérisation) permet de traiter les plantes soit tout au long de la saison, ou bien à certains stades de croissance. Elle est fréquemment utilisée dans le cas de l'application de bioinoculants (Preininger et al. 2018) et de biopesticides (Gan-Mor et Graham 2002). La pulvérisation peut également avoir lieu dans des conditions météorologiques particulières dans le but de lutter contre les maladies et les ravageurs des plantes (Preininger et al. 2018). Les pulvérisations microbiennes peuvent être appliquées plus ou moins fréquemment en fonction de la pression exercée par les maladies et ravageurs, ou en fonction de l'efficacité de la pulvérisation. Une pulvérisation réussie est généralement obtenue lorsque l'administration a lieu au moment opportun, et que la formulation microbienne est efficace (Preininger et al. 2018). Concernant **l'application au sol**, elle peut se faire directement par injection, enfouissement, incorporation, épandage (Dinesh et al. 2010) ou bien indirectement, par un traitement de semences ou de racines (Mahanty et al. 2017 ; van Elsas et Heijnen 1990).

Traitement de semences et enrobage

Le traitement de semences est un terme large désignant le processus selon lequel des graines sont soumises à un composé chimique (nutriment, hormone, pesticide, etc.), à un procédé tel que l'humidification ou le séchage, ou à d'autres formes variables d'énergie (radiation, chaleur, magnétisme, électricité, etc.) sans spécifier la méthode d'application précise (Scott

1989). Ce traitement de semences englobe de nombreuses méthodes comme l'habillage des semences³ (*seed dressing*), le trempage ou encore l'enrobage de semences (Scott 1989).

Ces traitements de semences présentent de nombreux avantages. Selon Schiffers et Fraselle (1982), les avantages du traitement de semences sont notamment une application plus efficace du pesticide sur la plante cible (dans le cas d'un traitement de semence comme vecteur de produit phytosanitaire), une réduction de la charge du produit par hectare, une plantation mécanique plus efficace, un semis de précision, une possibilité de combinaison de divers produits (notamment pesticides, engrais, bactéries, nutriments), une diminution des pertes, *etc.*

L'enrobage des semences est une catégorie de traitement de semences (principalement sur les variétés de légumes) consistant à appliquer de manière uniforme divers composants actifs sur les semences de culture. Cette technique a pour objectif de faciliter l'ensemencement en modifiant les propriétés physiques des semences (standardisation de leur masse et leur taille ; Afzal et al. 2020) et d'appliquer des substances bénéfiques comme les biostimulants, les nutriments et produits phytopharmaceutiques (Afzal et al. 2020).

Différentes catégories d'enrobage sont définies en fonction de leurs caractéristiques physiques. *Le film coating* (méthode d'enrobage où une fine couche externe de matériau est appliquée sur la graine, représentant généralement moins de 10 % de sa masse), *l'encrusting* (entraîne une augmentation de poids de la graine allant de 100 à 500 % tout en maintenant sa forme initiale visible) et le *pelleting* (la granulation recouvre complètement la forme originale de la graine, lui conférant une forme sphérique après le traitement ; Pedrini et al. 2017; Afzal et al. 2020).

Les matériaux utilisés dans les processus d'enrobage peuvent être classés de manière générale selon leur fonction de liants, de produits de remplissage et d'ingrédients actifs (Pedrini et al. 2017).

³ L'habillage des semences désigne l'application de solides finement broyés, généralement un fongicide ou un insecticide, saupoudrés sur la surface des semences en petites quantités pour protéger les semences contre les maladies et/ou les ravageurs (Scott 1989).

Liant : Liquide aux propriétés adhésives utilisé pour fournir un support structurel et retenir les ingrédients actifs.

Produit de remplissage : Matière poudreuse et inerte utilisée pour augmenter la forme et la taille des semences.

Ingrédient actif : C'est l'élément principal responsable de l'efficacité du matériau d'enrobage dans l'atteinte de ses objectifs. Il s'agit de composés de différentes natures comme des nutriments, adjuvants, promoteurs phyto-actifs, traceurs et

Mécanismes d'enrobage

Différents mécanismes sont utilisés pour enrober les semences (Figure 8). L'appareil à lit fluidisé (*fluidised bed*) utilise un flux d'air pour maintenir les graines en suspension et pulvérise le liquide d'enrobage sur les graines. La machine d'enrobage rotative (*rotary coater*) combine l'enrobage et la granulation en faisant tourner les graines dans un tambour cylindrique et en pulvérisant le liquide ou la boue sur les graines en mouvement. Le bac rotatif (*rotating pan*) est une machine traditionnelle où les liquides et les poudres sont pulvérisés sur les semences qui tournent dans un bac.

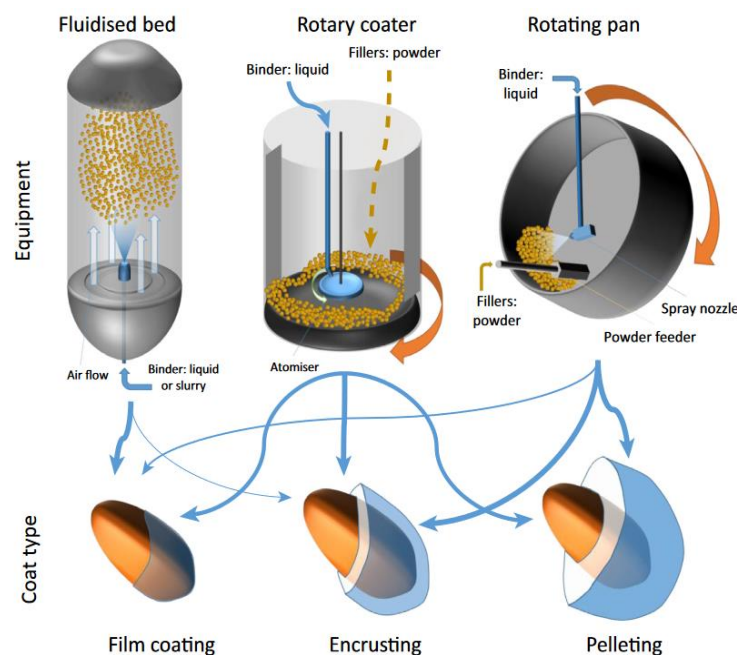


Figure 8 : Différents procédés pour le processus d'enrobage de semences (Pedrini et al. 2017)

Ces mécanismes sont couramment utilisés dans l'industrie de l'enrobage des semences pour des procédures automatisées. Cependant, des méthodes plus simples et moins coûteuses,

comme l'utilisation de bétonnières, peuvent être utilisées dans des contextes avec des ressources limitées (Pedrini et al. 2017; Afzal et al. 2020).

Traitement des racines

Le traitement des racines englobe plusieurs méthodes telles que le trempage, le pralinage (Figure 9) et l'injection racinaire. Le trempage des racines consiste à enduire le système racinaire des semis à racines nues d'une substance qui retient l'humidité ou stimule la croissance avant la plantation. Cette technique est principalement utilisée sur les arbres et arbustes, notamment depuis 40 ans sur les racines de conifère (Sloan 1994). Les forestiers et pépiniéristes ont utilisé cette technique pour éviter un dessèchement durant le stockage, pour empêcher que les racines ne dessèchent sur le site de plantation et afin d'améliorer la survie et croissance des semis après plantation. Les substances utilisées pour le trempage des racines peuvent être des boues de terre, de la vermiculite ou sphaigne broyée, de gels hydrophiles ou encore d'autres matériaux comprenant des composts organiques, composés biorégulateurs, pesticides ou autres produits chimiques (Sloan 1994 ; Rakotoarisoa, Tsujimoto, et Oo 2020 ; Sink et Grey 1999).



Figure 9 : Technique de pralinage des racines d'un arbre fruitier (Desfemmes 2013)

2.3. Efficacité des biointrants

Les biointrants sont utilisés dans le but d'améliorer la croissance et la santé des plantes (pour une meilleure performance des cultures). Leur efficacité repose sur une combinaison d'aspects physiques, biologiques et chimiques, qui sont étroitement liés et interagissent les uns avec les autres (Figure 10). Par exemple, certains paramètres physiques peuvent influencer la capacité d'adhérence et de colonisation des microorganismes bénéfiques sur les racines, tandis que l'aspect biologique concerne les interactions entre les microorganismes et la plante hôte, favorisant des processus tels que la fixation de l'azote ou la stimulation du

système immunitaire végétal. De plus, l'aspect chimique peut jouer un rôle clé en fournissant des nutriments essentiels ou en stimulant des voies métaboliques spécifiques (Smita et Ingole 2015).

Il est important de souligner que l'efficacité des biointrants peut varier en fonction de divers facteurs, tels que les conditions climatiques, le type de culture et de sol, l'échelle d'analyse (*in vivo*, *in vitro*, *in situ*), le mode d'application et l'état de santé des plantes, entre autres. Chaque biointrant possède des caractéristiques spécifiques, et il est difficile d'être exhaustif quant à leurs impacts recensés. Cependant, il est essentiel de comprendre que l'utilisation de biointrants peut entraîner des bénéfices significatifs en termes de rendement, de résilience des cultures et de durabilité agricole. Ces avantages sont obtenus en exploitant les interactions complexes entre les aspects physiques, biologiques et chimiques (Smita et Ingole 2015). Les biointrants agissent principalement par leurs apports en nutriments (sous forme inorganique), en matière organique (nutriments sous forme organique) et en microorganismes, ce qui engendre des effets divers sur le système sol-plante (Figure 10). Leur efficacité en termes de paramètres biologiques, chimiques et physiques a été et est encore évaluée, mais de nombreux aspects restent à étudier (Smita et Ingole 2015).

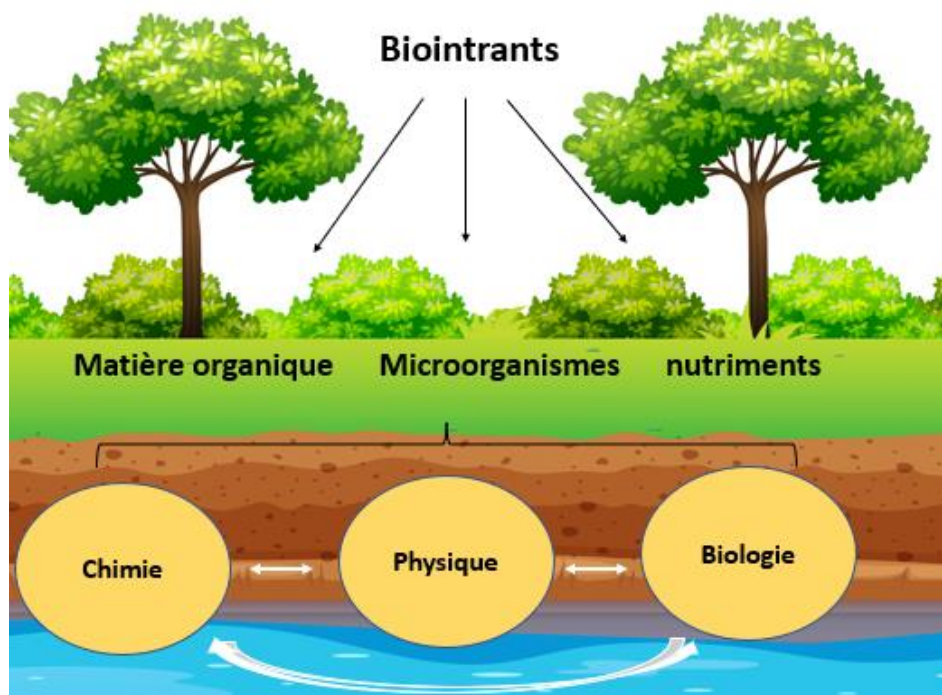


Figure 10 : Impact général des biointrants sur la chimie, physique et biologie des sols

2.3.1. Efficacité physique

Le carbone organique, contenu notamment dans les composts et intrants à base de compost, est essentiel au maintien de la fertilité physique du sol, et le carbone organique du sol subit clairement l'influence de l'apport de ce compost (Bhogal, Nicholson, et Chambers 2009; Carter, Sanderson, et MacLeod 2004).

Les propriétés physiques susceptibles d'être améliorées par l'addition de compost sont notamment la masse volumique apparente, la proportion de pores macroscopiques, le taux de diffusion de l'oxygène, et la proportion de pores remplis d'eau (Carter, Sanderson, et MacLeod 2004; Henry 1995). Ces pores permettant le passage de l'eau et des gaz (Figure 11), jouent un rôle crucial pour le développement de la biomasse et en particulier pour la croissance des plantes (Tessier, Le Bissonais, et Dambrine 1996). La capacité de rétention en eau peut également être améliorée grâce à l'addition du compost par cet impact sur la porosité du sol (Carter, Sanderson, et MacLeod 2004), ainsi que la capacité de rétention des nutriments.

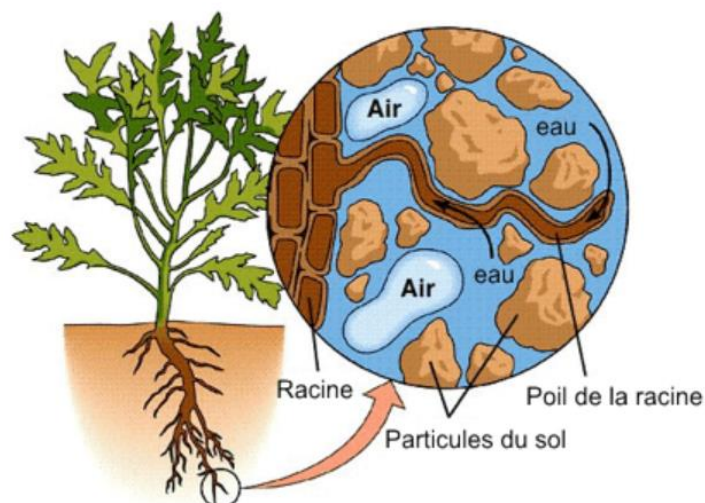


Figure 11 : Le compartiment du sol comme un milieu multiphasique (Service public de l'assainissement francilien 2004).

Des études de longue durée (dizaines d'années) sur l'apport d'amendements organiques ont démontré certains effets bénéfiques sur d'autres propriétés physiques des sols, notamment sur leur structure et leur stabilité (Christensen et Johnston 1997; Carter, Sanderson, et MacLeod 2004), et sur le capacité du sol à stocker le carbone (Bhogal, Nicholson, et Chambers 2009). La stabilité des agrégats étant d'une importance cruciale pour la fertilité des sols et les problèmes environnementaux associés, peut être affectée par ces apports en matière organique. En effet, la résistance des agrégats aux contraintes physiques influence directement la vulnérabilité du sol à l'encroûtement et à l'érosion, ainsi que la croissance et l'enracinement des cultures (Abiven, Menasseri, et Chenu 2009).

Impact de l'apport en microorganismes

Les microorganismes pouvant être apportés (ou leur développement favorisé) par divers intrants peuvent également impacter certains paramètres physiques du sol. La stabilisation des agrégats notamment, dans laquelle on pense que les microorganismes jouent un rôle majeur, a reçu la plus grande attention et a été étudiée pendant de nombreuses années (Lynch et Bragg 1985). Les microorganismes peuvent, en produisant des substances collantes qui aident à agréger les particules de sol en plus gros agrégats, améliorer la structure, la porosité et la stabilité du sol (Lynch et Bragg 1985). Le thé et l'extrait de compost par exemple, sont utilisés en agriculture notamment pour l'impact de leur diversité de populations bactériennes sur la structure et la rétention en eau des sols influençant par conséquent la profondeur des racines et la croissance des plantes (Shaban et Fazeli-Nasab 2015; Bond et Harris 1964).

Tous ces paramètres physiques des sols ont à leur tour une incidence sur d'autres propriétés comme la croissance et la performance des cultures, car ceux-ci ont des répercussions sur l'efficacité d'utilisation des nutriments du sol, la disponibilité en eau pour les plantes, leur tolérance à la sécheresse, la croissance du système racinaire, *etc.* (Lynch et Bragg 1985).

2.3.2. Efficacité biologique

Le sol abrite une multitude d'organismes vivants dont d'innombrables communautés microbiennes interagissant les unes avec les autres, et avec la rhizosphère (Figure 12). Cette diversité de micro et macroorganismes peut être renforcée par les apports de biointrants dans les sols, grâce aux matières organiques et nutriments que ces derniers utilisent comme source d'énergie, et par l'apport direct d'organismes bénéfiques. Les interactions entre les microorganismes, les champignons et la macrofaune sont cruciales pour le maintien de la santé et la croissance des plantes. Elles sont responsables de la décomposition de la matière organique et de la libération de nutriments essentiels pour la croissance des plantes (notamment l'azote, phosphore, potassium) et d'oligoéléments (Figure 12). Une fraction des éléments nutritifs libérée par la dégradation de la matière organique est ensuite utilisée pour nourrir la biomasse microbienne. Ces interactions peuvent aussi améliorer certains paramètres physiques des sols (comme l'aération, la porosité et la rétention en eau (Figure 12 ; Alabouvette et Cordier 2018)).

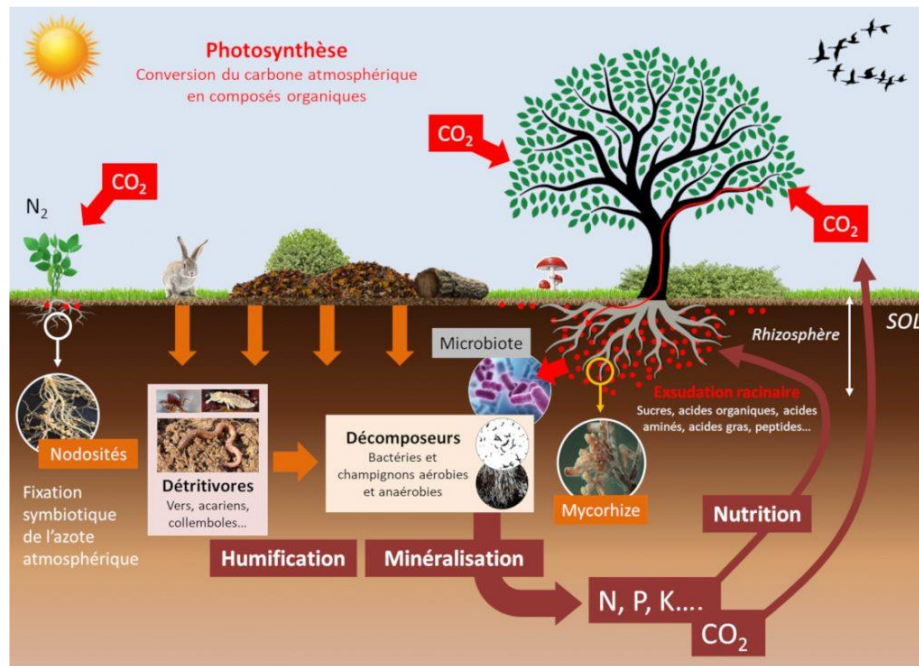


Figure 12 : Système sol-plante dans son ensemble et rôle des organismes vivants (Jean-François 2020)

Modification de la diversité microbienne

La composition microbienne qu'abrite la rhizosphère est d'une grande diversité. On y trouve des microorganismes soit sous forme libre, soit en étroite association avec les racines (*e.g.* symbiose avec les Fabaceae ou mycorhizes). La rhizosphère contient des organismes bénéfiques tels que les bactéries PGPR⁴, mais aussi des organismes délétères ou pathogènes comme certaines bactéries fluorescentes du groupe des *Pseudomonas*. Le genre *Trichoderma* regroupe un grand nombre d'espèces bénéfiques pour la croissance des plantes, tandis que les genres *Fusarium* ou *Phytophthora* contiennent de nombreuses espèces pathogènes pour les plantes (Alabouvette et Cordier 2018).

Pour favoriser la diversité microbienne fondamentale des sols, l'utilisation des biointrants se base sur deux techniques (Figure 13) : (1) stimulation des microorganismes bénéfiques (substances permettant leur développement et leur maintien ; Figure 13 *substances nutritives*) ; ou (2) introduction des microorganismes bénéfiques directement dans le sol. Une combinaison de ces deux techniques est également envisageable (Alabouvette et Cordier 2018).

⁴ Plant Growth Promoting Rhizobacteria

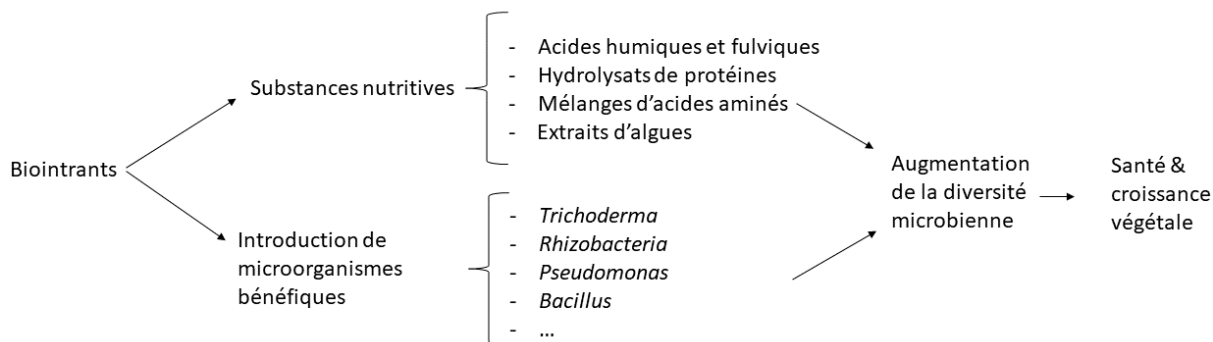


Figure 13 : Mécanismes d'action des biointrants sur la santé et la croissance végétale par l'introduction de substances nutritives et/ou de microorganismes bénéfiques

Certaines populations de microorganismes peuvent favoriser la croissance des plantes en rendant disponibles certains nutriments en les solubilisant (principalement le phosphore), en fixant l'azote atmosphérique, et en libérant dans la rhizosphère des substances hormonales (phytohormones- pour la croissance). En plus de favoriser la croissance végétale, certains biointrants microbiens permettent la suppression de certaines maladies transmises par le sol (Thomas et Singh 2019).

À titre d'exemple, *Paenibacillus polymyxa* (bactérie couramment présente dans les sols) a montré une variété d'effets bénéfiques pour les plantes, par la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphore, la production de molécules bénéfiques (antibiotiques, cytokinines, chitinase et enzymes hydrolytiques) et l'amélioration de la porosité du sol (Timmusk et al. 2017).

C'est en raison de ces services rendus par les microorganismes que l'industrie des biointrants a mis sur le marché beaucoup de biostimulants à base de microorganismes bénéfiques, bactéries ou champignons libres ou symbiotiques (Alabouvette et Cordier 2018). Plusieurs catégories de biofertilisants/biostimulants existent, contenant chacun des groupes de bactéries particuliers pour remplir différentes fonctions (fixation de l'azote, solubilisation du phosphore, apport de nutriments, synthèse d'hormones, etc. (Thomas et Singh 2019 ; Tableau A1). Certains contiennent plusieurs de ces groupes bactériens, remplissant ainsi un ensemble de fonctions de phytostimulation et phytoprotection (Figure 14).

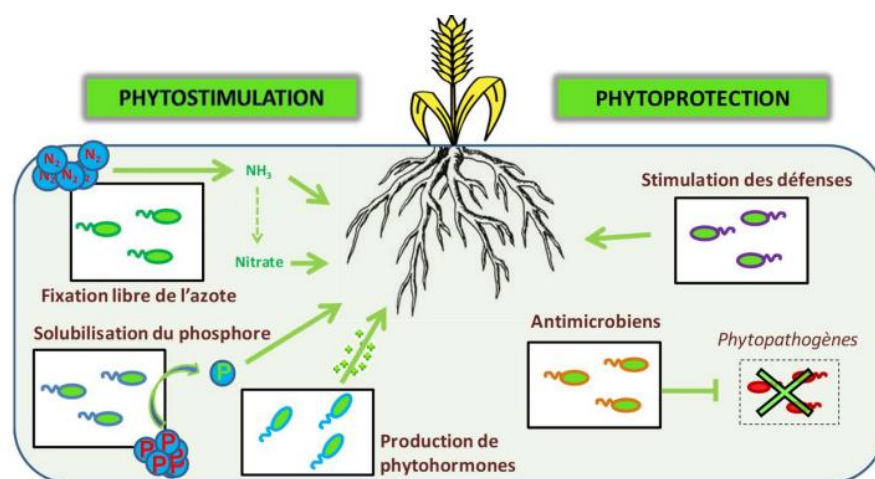


Figure 14 : Modes d'action des rhizobactéries bénéfiques, qui conduisent à des effets de phyto-stimulation ou de phyto-protection du blé favorisés par les biostimulants microbiens (Moenne-Loccoz et al. 2019).

Le compost, les extraits de compost et/ou thés de composts contiennent de nombreux groupes bactériens, notamment *Trichoderma*, *Rhizobacteria* et *Pseudomonas fluorescents*, connus pour stimuler la croissance des plantes (Siddiqui, Meon, Ismail, et al. 2008; Höflich, Wiehe, et Kühn 1994; Welke 2005) en raison de leur capacité à produire des métabolites secondaires, tels que des antibiotiques et des substances hormonales, à solubiliser le phosphate et à fixer l'azote, ainsi qu'à concurrencer les pathogènes du sol (Radja Commare et al. 2002). Enrichir les extraits de compost avec des nutriments végétaux ou des inoculants de biocontrôle tels que *Trichoderma* spp. pourrait améliorer leur efficacité biologique. *Trichoderma* spp. est l'agent de biocontrôle le plus efficace pour le contrôle des maladies dans divers systèmes hôte-pathogène in vitro et sur le terrain, en utilisant soit seul soit en combinaison avec d'autres microorganismes bénéfiques (Daghman 2005 ; Siddiqui, Meon, Razi, et al. 2008).

Mécanismes de protection contre les maladies et ravageurs de culture

Les biointrants sont notamment utilisés pour leur pouvoir de suppression ou de défense contre les maladies et ravageurs. C'est d'ailleurs un des effets fortement étudiés du thé de compost et de l'extrait de compost. Les interactions biologiques résultant à la suppression des pathogènes des plantes et du sol sont complexes car les maladies causées par les pathogènes surviennent dans un environnement dynamique (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

Cette protection contre les maladies est rendue possible par plusieurs mécanismes initiés par les microorganismes bénéfiques (Figure 15). Ils peuvent soit synthétiser certaines molécules (antibiotiques), soit agir par compétition, par résistance induite ou encore par parasitisme. Indirectement, le renforcement de la santé de la plante (par l'apport de nutriments par exemple) permet au végétal de stimuler son système de défense endogène et par conséquent se montrer plus résistant à l'attaque de ravageurs et de maladies.

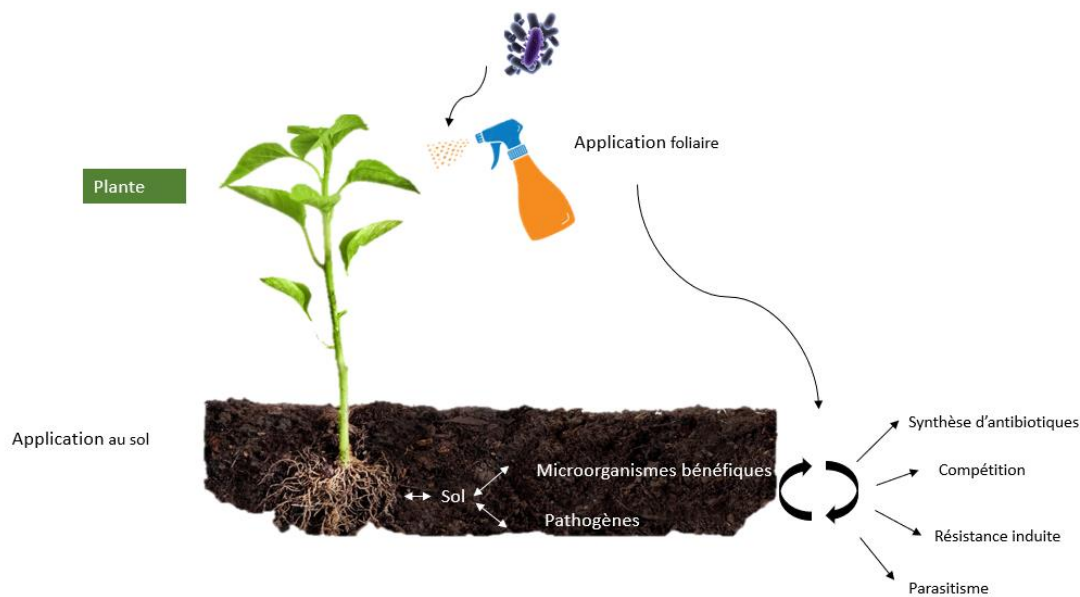


Figure 15 : Les différents mécanismes des microorganismes bénéfiques dans la lutte contre les pathogènes, par application au sol ou pulvérisation foliaire.

Il est important de noter que l'impact de l'utilisation des biointraants dans le cadre de la protection des plantes contre les maladies, dépend de plusieurs facteurs tels que le type de pathogène, la plante hôte et les conditions environnementales, et nécessite une compréhension approfondie des interactions entre les microorganismes bénéfiques et les pathogènes.

Certains microorganismes comme *Paenibacillus* sont capables de produire **des substances antibiotiques** (Figure 15 ; Thomas et Singh 2019) tant au niveau du sol qu'à la surface des feuilles. C'est notamment ce mécanisme d'antibiose qui est cité dans les études sur l'utilisation du thé de compost. Ces organismes bénéfiques favorisés par l'application de thé de compost produisent des antibiotiques ou autres substances toxiques pour les bactéries de l'organisme pathogène. Par exemple, la souche CHAO⁵ de *Pseudomonas fluorescent* produit des substances comme la pyolutéorine, qui interfère directement avec la croissance de divers agents pathogènes (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

Un autre mécanisme possible et notamment impliqué dans les effets du le thé de compost, c'est celui de la **compétition** (Figure 15 ; Shaban et Fazeli-Nasab 2015). Lorsque des microorganismes bénéfiques sont présents dans un milieu, ils ont tendance à supplanter les organismes pathogènes ou les champignons pour les sources de nourriture (Thomas et Singh 2019; Shaban et Fazeli-Nasab 2015; Siddiqui, Meon, Razi, et al. 2008). Ainsi leur survie est

⁵ Souche antagoniste de certains champignons phytopathogènes

généralement garantie, et réduit celle des pathogènes (Thomas et Singh 2019; Shaban et Fazeli-Nasab 2015; Siddiqui, Meon, Razi, et al. 2008).

La résistance induite (Figure 15) fait référence à la capacité de certains microorganismes bénéfiques qui colonisent les racines ou le feuillage des plantes à conférer une résistance à la plante contre les pathogènes. Ces microbes bénéfiques peuvent activer des gènes dans la plante qui augmentent sa tolérance à l'infection par des pathogènes, et activer certaines voies de signalisation, ce qui permet à la plante de mieux se défendre contre les maladies (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

Le parasitisme (Figure 15) dans le contexte de la protection des plantes contre les maladies fait référence à la capacité de certains microbes bénéfiques à se nourrir de pathogènes spécifiques, ce qui les empêche de causer des dommages aux plantes. Par exemple, les espèces de *Trichoderma* peuvent sécréter des enzymes digérant la paroi cellulaire de certains champignons pathogènes des racines, les empêchant de se multiplier et de causer des dommages aux plantes (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

L'utilisation de biofertilisants microbiens offre ainsi une protection contre certaines maladies transmises par le sol et par les insectes nuisibles, mais nécessite des études supplémentaires pour comprendre tous les mécanismes impliqués (Thomas et Singh 2019; Wani, Chand, et Ali 2013).

Stimulation de la macrofaune et incidence sur les sols

Les sols enrichis en matière organique et nutriments par les intrants sont plus favorables à la vie du sol et permettent aux organismes d'agir à leur tour sur certains paramètres. Bien que l'importance des microorganismes ait été souvent soulignée, le rôle de la macrofaune (>2 mm) joue un rôle essentiel dans la régulation des processus du sol et des cycles biogéochimiques (Walmsley et Cerdà 2017). Les organismes de la macrofaune, tels que les vers de terre, les isopodes et les insectes, sont des ingénieurs de l'écosystème capables d'améliorer la structure physique du sol, la composition des matières minérales et organiques et l'hydrologie, et d'influencer le flux de nutriments et d'énergie (Walmsley et Cerdà 2017).

2.3.3. Efficacité chimique

Le sol et la plante sont des systèmes dynamiques et complexes, où des interactions chimiques essentielles se produisent en permanence. La compréhension des réactions chimiques au niveau des plantes est essentielle pour assurer leur santé, leur développement optimal et leur productivité, permettant ainsi de développer de nouvelles technologies plus durables (Maeder et al. 2002). La fertilité chimique du sol dépend de sa concentration en éléments nutritifs, et la carence en ces éléments est devenue un obstacle majeur à la productivité, à la

stabilité et à la durabilité des sols (Smita et Ingole 2015; Maeder et al. 2002; Bhogal, Nicholson, et Chambers 2009).

Les biointrants, notamment ceux à base de compost, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des paramètres chimiques du sol et des plantes grâce à leur apport en matière organique et en nutriments (Figure 16). La matière organique présente dans les biointrants se décompose progressivement dans le sol, libérant des nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium (rôle dans la formation des tissus végétaux, la photosynthèse, la reproduction et la résistance aux stress ; Smita et Ingole 2015). Ces nutriments favorisent ainsi la croissance des plantes et les renforcent (Bhogal, Nicholson, et Chambers 2009; Nasef, Shaben, et El Hamid 2009) . La partie inorganrique des matières fertilisantes ne doit quant à elle pas passer par l'étape de décomposition et la partie retenue (non-lixiviée) peut directement se retrouver dans la solution de sol ou sur le complexe organo-minéral (Figure 16).

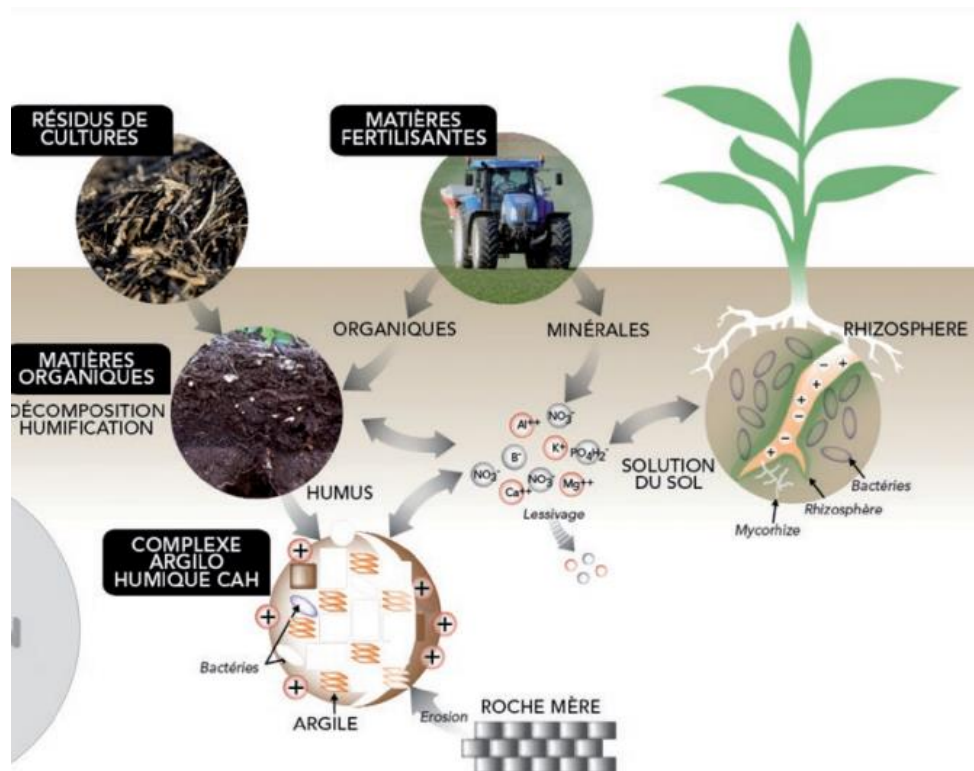


Figure 16 : Action des résidus de cultures et matières fertilisantes dans le sol et la solution de sol (Demarle et Saint-Macary 2021)

En outre, la matière organique apportée agit indirectement car améliorant la structure et la capacité de rétention (en eau et nutriments), elle retient ainsi mieux les nutriments et les rend donc plus disponibles. De plus, les matières organiques fournissent une source d'énergie aux microorganismes et favorise donc l'activité microbienne bénéfique dans le sol, contribuant ainsi à la décomposition des matières organiques, et donc à la libération de nutriments (Smita et Ingole 2015). L'apport simultané de matière organique et de microorganismes s'avère donc

bénéfique pour améliorer la disponibilité des nutriments pour la plante (Thomas et Singh 2019).

Les biointrants à base de compost contribuent également à l'équilibre du pH du sol. En présence de matière organique, le compost peut aider à tamponner les fluctuations du pH et à maintenir un niveau optimal pour la croissance des plantes (Smita et Ingole 2015). Les propriétés chimiques du sol telles que le pH et la capacité d'échange cationique sont déterminantes pour la disponibilité des nutriments pour les plantes. Par exemple, un sol acide peut limiter l'absorption des nutriments essentiels par les plantes, tandis qu'un sol alcalin peut entraîner des carences en micronutriments (un pH élevé diminuant la solubilité des micronutriments ; Smita et Ingole 2015).

Différences d'efficacité entre le thé de compost, l'extrait de compost et le compost brut

L'efficacité du thé, de l'extrait et du compost brut diffèrent dans la plupart des études réalisées. Les matières organiques apportées par le compost ont un effet à plus long terme en raison de leur décomposition lente, mais les intrants à base de compost, plus concentrés grâce à l'extraction et l'oxydation/fermentation, et souvent enrichis en microorganismes et/ou en éléments nutritifs, peuvent fournir plus de nutriments directement disponibles pour les plantes (Sánchez, Ospina, et Montoya 2017). L'augmentation d'absorption des nutriments est en effet fréquemment rapportée dans les études sur le thé de compost (Shaban et Fazeli-Nasab 2015). Les extraits et thés de compost présentent généralement des concentrations plus élevées en azote, phosphore, calcium et magnésium que les composts dont ils sont issus, ce qui en fait une source de nutriments plus importante (Nasef, Shaben, et El Hamid 2009; De Corato 2020). De plus, le thé de compost, grâce à une rétention accrue des microorganismes (dans le sol ou sur les surfaces foliaires), entraîne une augmentation de la rétention des nutriments et une amélioration de la qualité nutritionnelle des plantes (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

Étant donné que le thé et l'extrait de compost peuvent être pulvérisés sur les feuilles, on prétend qu'il s'agit d'une forme de compost plus rapidement disponible pour les plantes que les ajouts de compost au sol (Scheuerell et Mahaffee 2002). Cependant, il manque des preuves scientifiques concluantes et d'études examinant la capacité des thés de compost à fournir des nutriments pour confirmer ces observations (Hargreaves et al. 2013).

En résumé, les thés de compost peuvent fournir des nutriments plus concentrés et être rapidement disponibles pour les plantes, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer leur efficacité spécifique en termes de fourniture de nutriments. Les composts, quant à eux, ont des effets à plus long terme en améliorant la structure du sol et en y libérant des nutriments progressivement. Ils doivent être apportés en plus grande quantité que les extraits et thés, mais ces derniers (thé et extrait) peuvent nécessiter des applications plus fréquentes (Shaban et Fazeli-Nasab 2015).

3. Objectifs

La volonté de réduire l'utilisation des PPP et des engrais chimiques de synthèse grandit progressivement. Cette aspiration stimule l'émergence de nouvelles stratégies de biocontrôle qui visent à trouver des moyens novateurs pour combattre les ravageurs et apporter les nutriments indispensables aux plantes. Dans ce contexte de recherche de stratégies nouvelles, l'objectif de ce mémoire était d'évaluer les effets de l'apport de biointrants à base de compost sous plusieurs formes et applications (enrobages de semences, pulvérisations foliaires et injections au sol de thés et extraits de compost) sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et de la plante.

Deux approches distinctes ont été utilisées pour atteindre cet objectif :

- (i) Une première approche a été l'évaluation de ces impacts chimiques et biologiques en conditions naturelles. Pour ce faire, deux expériences ont été réalisées sur deux années consécutives en utilisant le froment comme modèle, dans un contexte environnemental établi (climat, topographie, facteurs pédologiques). Des composantes de rendement ont été mesurées lors de l'essai 2022 par la mesure de la masse des grains et l'analyse de leur composition minéralogique. En 2023, une analyse de l'homogénéité de la parcelle a été réalisée du point de vue chimique et physique. Ensuite, l'impact des traitements a été évalué sur les paramètres chimiques du sol par échantillonnage et analyses en laboratoire, ainsi que sur les paramètres biologiques de la plante (biomasse foliaire et structure racinaire).
- (ii) Une seconde approche était la validation des résultats en conditions contrôlées. A cet effet, une expérience en serre a été menée selon neuf modalités différentes combinant des enrobages, des injections au sol de thés, d'extraits de compost et d'adjuvants, répliquées chacune cinq fois. Avant l'application des traitements, certains paramètres chimiques et physiques ont été analysés sur les sols pour placer les résultats finaux dans leur contexte. Les paramètres d'intérêt ont ensuite été mesurés sur les sols, les plantes et les solutions de sol dans chacune des modalités.

Les deux expériences permettront d'établir, en intégrant des paramètres chimiques et biologiques, l'influence de ces intrants dans des conditions naturelles, puis de valider les résultats obtenus dans des conditions contrôlées. L'objectif est ainsi de déterminer avec précision les niveaux d'efficacité de ces intrants, afin de mieux comprendre les mécanismes d'action sous-jacents. Cela permettra de fournir des explications sur les effets observés de ces intrants dans la littérature scientifique, notamment leur impact dans la lutte contre les ravageurs.

4. Matériels & méthodes

4.1. Expérience en champ

4.1.1. Zone d'étude

Les essais en champ ont eu lieu à la ferme de la Sarte à Grez-Doiceau dans l'est du Brabant wallon (Wallonie, Belgique). Deux parcelles ont été sélectionnées pour les essais respectifs de 2022 (parcelle a ; 50,73603 °N, 4,743 °E ; Figure 17) et 2023 (parcelle b ; 50,725 °N, 4,743 °E ; Figure 17). Ces parcelles dont l'altitude varie entre 104 et 121 m, se situent dans le bassin versant de la Dyle. La parcelle *a* se situe au nord de la rivière et présente une pente de 9% en sa direction, tandis que la parcelle *b* située au sud de la rivière, affiche une pente d'environ 8% vers celle-ci. Ces caractéristiques topographiques sont importantes pour le drainage des eaux de surface et la collecte des précipitations dans chaque parcelle du bassin versant.

Les parcelles agricoles sont caractérisées par un sol limoneux à drainage naturel favorable ou principalement favorable dont la sensibilité à l'érosion est très faible (Aba1 ; Service publique de Wallonie 2023). Le matériau parental est le loess, reposant sur la formation géologique de Bruxelles. Les parcelles ont principalement servi à la culture céréalière (froment d'hiver, escourgeon et orge), à la culture de colza en 2021, et de pommes de terre (Service publique de Wallonie 2023).

Ces parcelles se situent dans la zone bioclimatique des Plaines et Vallées Scaldisiennes (Service publique de Wallonie 2023). Le climat y est de type tempéré océanique (Cfb selon la classification de Köppen) avec une pluviosité annuelle moyenne de 850 mm·a⁻¹ et une température moyenne de 10,5 °C (données 1996-2015 ; SPW 2018).







Figure 17 : Vues aériennes des parcelles de l'essai 2022 (a) et l'essai 2023 (b), Grez-Doiceau (Service publique de Wallonie 2023).

4.1.2. Schéma d'analyses générales et modalités testées

Les expériences en 2022 et 2023 ont été réalisées sur du froment, ont débuté par une caractérisation (des intrants et/ou des sols), les intrants y ont été appliqués puis la réponse a été mesurée par l'analyse de certains paramètres (Tableau 1).

Tableau 1 : Expériences en champ en 2022 et 2023 sur du froment, caractérisation, modalités et réponse mesurée

Expérience 2022 	Expérience 2023 
<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation - Des intrants : dénombrement germes totaux et moisissures 	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation - Des intrants : dénombrement germes totaux et moisissures - Des sols : Analyse granulométrique, pH, homogénéité minérale (Ca, Fe, K,P, Mg, Mn, Na)
<ul style="list-style-type: none"> Modalités testées (1) Témoin × 2 (2) Extraits végétaux (3) Thé de compost pulvérisé une fois (TC 1 ×) (4) Thé de compost pulvérisé deux fois (TC 2 ×) (6) Fongicides demi-dose (7) Fongicides dose pleine 	<ul style="list-style-type: none"> Modalités testées (1) Témoin × 2 (2) Injection d'extrait de compost (3) Enrobage au compost (4) TM semis
<ul style="list-style-type: none"> Mesure des impacts - Poids de mille grains (PDMG) - Rendement total (kg·ha⁻¹) - Composition en minéraux des grains  	<ul style="list-style-type: none"> Mesure des impacts - Emergence des plantes  - Biomasse aérienne - Nombre de talles - Système racinaire (nombre d'axes) - Composition en minéraux des sols

4.1.3. Production et application des intrants

Compost produit à la Sarthe

Le compost a été utilisé pour l'enrobage des semences, et pour la production de thé et d'extrait de compost. Le protocole de production du compost (compost *Johnson Su*; Figure 18) a eu lieu dans des bacs équipés de capteurs d'humidité et de température, ainsi que des grilles de ventilation. La combinaison de la température et de la durée de compostage est l'indicateur utilisé pour vérifier si l'apport d'oxygène a été suffisant au cours du processus.

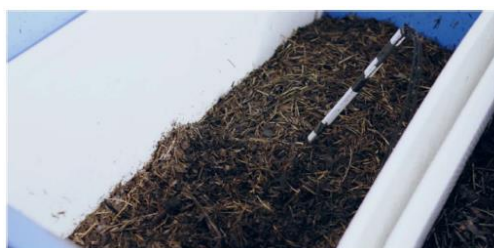


Figure 18 : Bac de production de compost de la Ferme de la Sarthe. Processus de compostage contrôlé grâce aux capteurs d'humidité et de température, méthode Johnson Su (« Appel à projet CERES Agricultures en Transition » 2022).

Extraits végétaux

Les extraits végétaux achetés dans le commerce (*BOOS' TA PLANTE*) sont issus d'infusions, de décoctions et de macérations de végétaux dans le but d'en extraire les métabolites secondaires, oligo-éléments et composés organiques.

Thé et extrait de compost

Le thé de compost produit à la Sarthe est un thé de compost oxygéné (TCO), c'est-à-dire qu'il est produit en conditions aérobies. Il est composé de divers ingrédients (Tableau 2).

Tableau 2 : Composition du thé de compost produit à la ferme de la Sarthe pour un volume total filtré de 800 L

Ingrédients	Quantité
Eau de pluie	850 L
Mélange de composts ⁶	20 L
Mélasse de canne à sucre	1 L
Acides humiques et fulviques	1 L
Hydrolysate de poisson	300 g
Volume total filtré	800 L

La préparation du thé débute 28 h avant la pulvérisation en remplissant une cuve d'eau, allumant l'aération et les thermoplongeurs. Ensuite, l'hydrolysate de poisson (*CPSP 90 ANOREL*[®]) et la mélasse (*France Mélasses*) sont dilués dans de l'eau chaude, et les ingrédients dissous ainsi que les acides organiques (acides humiques et fulviques ; *SOILTOP*) sont ajoutés dans la cuve. La solution est homogénéisée jusqu'à ce que l'eau atteigne une température de 18 °C. Par la suite, le compost est placé dans 4 sacs en nylon qui sont immergés dans l'eau. Le système fonctionne pendant 24 h à 18 °C, et le contenu est soutiré dans le sac de filtration. Enfin, la solution peut être pulvérisée directement.

La modalité d'extrait de compost lors des essais en champ consiste en un thé de compost n'ayant simplement ni subi l'étape de fermentation, ni été combinés avec des adjuvants. Ainsi elle consiste en fait au compost filtré avec l'eau.

⁶ Mélange en proportions égales de compost méthode Johnson Su produit à la ferme, compost CMC (Compostage Microbien Contrôlé) et lombricompost Pur Ver[®]

Enrobage des semences

L'enrobage des semences au compost a nécessité une paire de gants, deux seaux, une bétonnière, et la solution d'enrobage respectant des quantités d'ingrédients rapportées à 100 kg de semences (Tableau 3).

Tableau 3 : Quantités nécessaires pour 100 kg de semences à la ferme de la Sarthe

Ingrédients	Quantité
Eau non-chlorée à chauffer	150 mL
Compost Johnson Su	500 mL
Mélasses de canne à sucre	30 mL
Lait entier	200 mL
Eau non-chlorée température ambiante	1,7 L
Acides humiques et fulviques	250 mL
Poudre de basalte	1 L

Au niveau de la préparation, l'eau non-chlorée est chauffée à 50 °C puis ajoutée dans un flacon en polyéthylène téréphtalate (PET) avec la mélasse, le tout étant homogénéisé. Dans un premier seau, on ajoute le lait entier, le mélange mélasse-eau chaude, et les acides humiques et fulviques, avant d'homogénéiser. Le contenu du seau est ensuite ajouté et mélangé avec l'eau non-chlorée à température ambiante et le compost. L'enrobage est réalisé en combinant les semences avec le mélange obtenu dans la bétonnière pendant 5 min environ. Les semences reposent 2 h (pour absorber l'humidité), et la bétonnière retourne 5 min pendant qu'on y ajoute la poudre de basalte (répartition uniforme sur les semences ; *LavaUnion*).

Applications au champ

Une fois produits, les intrants ont été pulvérisés sur les feuilles ou appliqués au sol à des quantités déterminées (Tableau 4).

Tableau 4 : Dose des intrants appliquée en champ

Biointrant	Dose
Thé de compost	100 L·ha ⁻¹
Extrait de compost	100 L·ha ⁻¹
TM semis ⁷	75 kg·ha ⁻¹
Enrobage	Dose ingrédients mL·100 kg ⁻¹ de semence
Fongicides Caramba (métconazole)	0,5 L·ha ⁻¹ demi-dose 1,2 L·ha ⁻¹ dose pleine
Fongicides Prosaro (tébuconazole et prothioconazole)	0,3 L·ha ⁻¹ demi-dose 1 L·ha ⁻¹ dose pleine

Pour assurer la disponibilité en nutriments et la bonne croissance des plantes, des engrais de type N39 (150 L·ha⁻¹) et Vinatech (engrais NPK ; kg·ha⁻¹) ont notamment été appliqués en début d'expérience (Tableau A2).

4.1.4. Échantillonnage et analyses

Les deux parcelles d'expérimentation ont été divisées en plusieurs bandes de 13,5 m de large correspondant à l'application d'une modalité (Figure 19). Chaque bande était subdivisée en cinq zones (travées) représentant cinq réplicats (Figure 19).

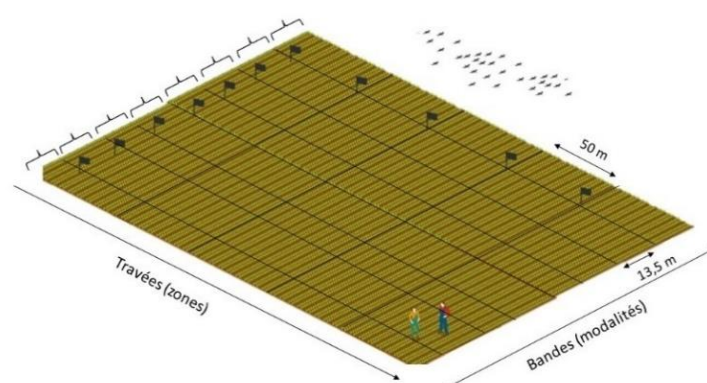


Figure 19 : Parcelles d'expérimentation subdivision en bandes. Chaque drapeau noir correspond au centre des travées. Schéma Icograms Designer.

⁷ Le TM Semis (TMS) est un engrais minéral préservant l'équilibre biologique et chimique autour de la graine et du système racinaire initial. Il est souvent utilisé en combinaison avec du TM foliaire (TMF), et sont tous deux de marque *TMCE*.

Caractérisations des intrants et des sols

Les intrants appliqués lors des deux expériences ont fait l'objet d'une analyse microbiologique pour quantifier les microorganismes présents via un dénombrement des moisissures et des germes totaux au laboratoire BCCM/MUCL (Belgian Coordinated Collections of Microorganisms / Mycothèque de l'UCLouvain). Pour ce faire, deux milieux de culture différents ont été utilisés : la gélose pour dénombrement (Plate Count Agar, PCA) pour les germes totaux, et la gélose rose-bengale (Rose Bengal Agar, RBA) pour le dénombrement des moisissures.

La mesure de l'homogénéité de la parcelle (échantillonnage le 17 janvier 2023 et envoyé au Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité ; CPAR) a consisté en la caractérisation physique et chimique de 9 échantillons de sol (25 premiers centimètres) prélevés aléatoirement à la tarière dans chacune des 9 zones considérées (travées 1,3 et 5 de 3 bandes n'ayant pas reçu de traitement), afin de répartir le plus largement possible la zone d'étude (expérience 2023 ; Tableau 1) . Les différents échantillons d'une zone étaient mélangés et homogénéisés afin d'obtenir un échantillon composite par bande × travée. Les analyses ont permis de classer les sols de la parcelle dans des sols de limon fin à très fin (analyse composition granulométrique par la méthode PTPS1, dérivée de NF X 31-107) et de pH moyen de 7,2 (pH-H₂O ; PTCS3-NF ISO 10390). Le contenu en minéral des sols a également été quantifié (Figure 20) par deux analyses principales (méthode PTCS10-Colorimétrie au bleu de molybdène ou méthode PTCS12-Spectrophotométrie d'absorption atomique). Le prétraitement requis pour ces analyses est une méthode dérivée de NF ISO 11464 où le sol est séché (<40 °C) et tamisé à 2 mm.

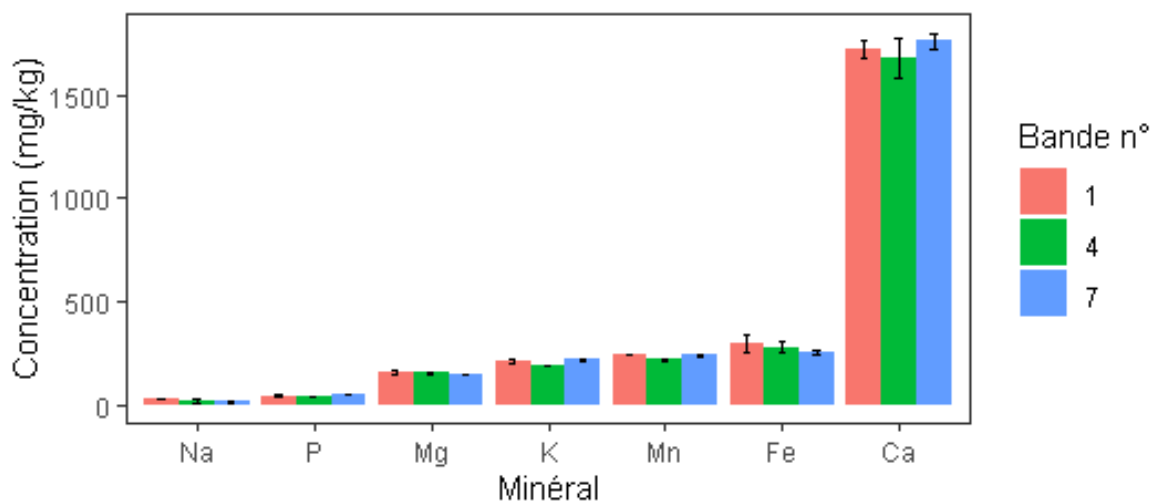


Figure 20 : Homogénéité minérale de la parcelle. Échantillonnage sur 3 bandes à 25 cm de profondeur

Ces analyses physiques et chimiques ont permis de valider l'hypothèse d'homogénéité de la parcelle. Par exemple, selon l'analyse statistique (Kruskal-Wallis) sur le contenu en minéraux

(Ca, Fe, K, P, Mg, Mn, Na) entre ces 3 bandes, les sols semblent assez homogènes, mis à part pour le potassium dont la p-valeur < 0,05.

Plusieurs paramètres ont ensuite été mesurés pour évaluer l'impact des différentes applications (mesure des impacts ; Tableau 1).

Analyse des grains

Après la récolte (essai 2022), une partie des grains de chaque bande × travée ont été analysés pour leur composition chimique et la masse de 1000 grains (poids de mille grains ; *PDMG*). La détermination du poids de mille grains a été réalisée à la ferme de Marbaix à l'aide d'un appareil dédié à cet effet (DRELLO Seed counter MZ 2000 ; Figure 21). Quatre répétitions ont été réalisées par bande × travée, soit 20 répétitions par bande.



Figure 21 : Machine utilisée pour le comptage de mille grains (DRELLO MZ 2000)

L'analyse de la composition chimique des grains (Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Na, P, Zn) a été réalisée par CPAR. Les travées 1,3 et 5 ont été considérées sur chaque bande. Les échantillons ont été broyés à 1 mm (broyeur à couteaux) puis analysés en l'azote total selon le protocole de combustion sèche (NF EN ISO 16634-1). Pour les autres éléments, une attaque à l'acide nitrique après calcination (450 °C) a été réalisée avant dosage par ICP (méthode dérivée de NF EN 15510).

Concentration en minéraux des sols

Lors de l'expérience 2023 (Tableau 1), 10 échantillons de sol (15 premiers centimètres) sur chacune des 15 zones considérées (travées 1,3 et 5 de chaque bande) ont été collectés pour l'effet des traitements sur la composition minérale du sol, selon le même protocole suivi pour l'analyse de l'homogénéité minérale de la parcelle. Les 10 échantillons collectés par travée ont ensuite mélangés et homogénéisés de sorte à avoir un échantillon à analyser par travée,

soit trois échantillons par bande. Ces sols ont été envoyés au laboratoire correspondant (CPAR), directement après leur prélèvement.

Analyses sur les plantes

L'analyse de l'émergence des plantes (réalisée le 17 janvier 2023) a consisté à compter le nombre de plantes levées par unité de surface, par un cadre de 1 m² placé sur une zone représentative de la travée (deux bords parallèles aux lignes de semis). À l'intérieur de ce cadre, l'entièreté des graines levées a été comptée, sur une ligne de semis sur une longueur de 1 m, résultat ensuite extrapolé à une unité de surface en fonction de l'écartement entre les lignes de semis. Une seule ligne a été comptée dans les zones considérées de cette expérience, puis extrapolée en multipliant par 4 pour obtenir un résultat par m².

Pour l'analyse des parties aériennes et racinaires, dix plantes ont été récoltées (le 16 février 2023) sur 15 zones considérées (travées 1, 3 et 5 de chaque bande) grâce à une bêche pour creuser à 30 centimètres de profondeur et récolter les plantes en les préservant un maximum. Les racines déjà très longues et fragiles n'ont pas pu être entièrement échantillonnées. C'est pourquoi les mesures de la masse et de la longueur racinaires n'ont pas été prises en compte dans cette étude. D'autres mesures peuvent être prises au niveau racinaire et aérien, en l'occurrence le nombre d'axes racinaires et la biomasse aérienne.

Les systèmes aériens ont été séchés à l'étuve à 65 °C durant 72 h afin de mesurer leur masse sèche grâce à une balance de précision. Les systèmes racinaires ont été conservés dans un mélange 50 : 50 d'éthanol et d'eau à 4 °C afin de minimiser leur décomposition, puis été analysés grâce à un scanner (EPSON scan ; Figure 22) et le nombre d'axes racinaires totaux a été compté.

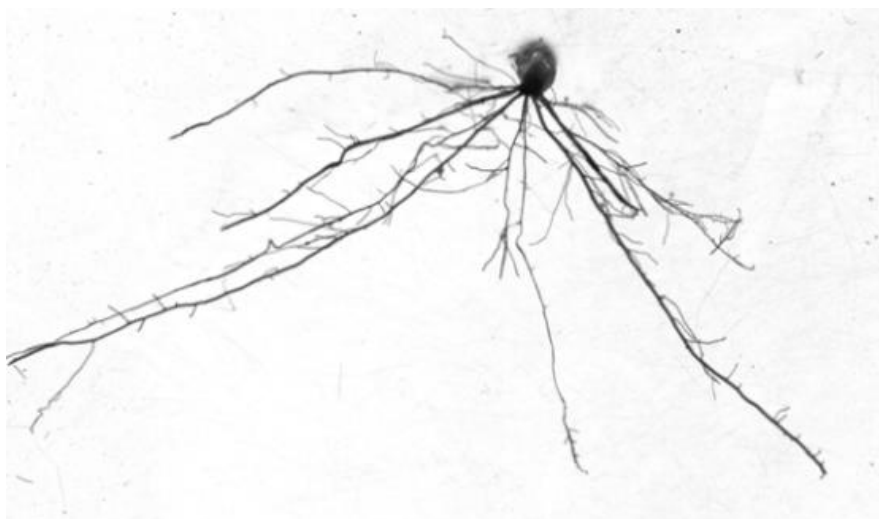


Figure 22 : Exemple d'un scan racinaire (modalité/bande 8)

4.2. Expérience en serre

4.2.1. Zone d'étude

La terre utilisée pour l'expérience en serre provient d'une parcelle de la ferme de Marbaix (50,669 °N, 4,636 °E) échantillonnée sur une même zone d'environ 10 m². Ce sol est limoneux à drainage naturel favorable (Aba1 ; Service publique de Wallonie 2023). Ces sols ont été homogénéisés et répartis dans des pots de 10 L dans les serres de SEFY pendant 80 jours (25 janvier au 15 avril 2023 ; Figure 23).

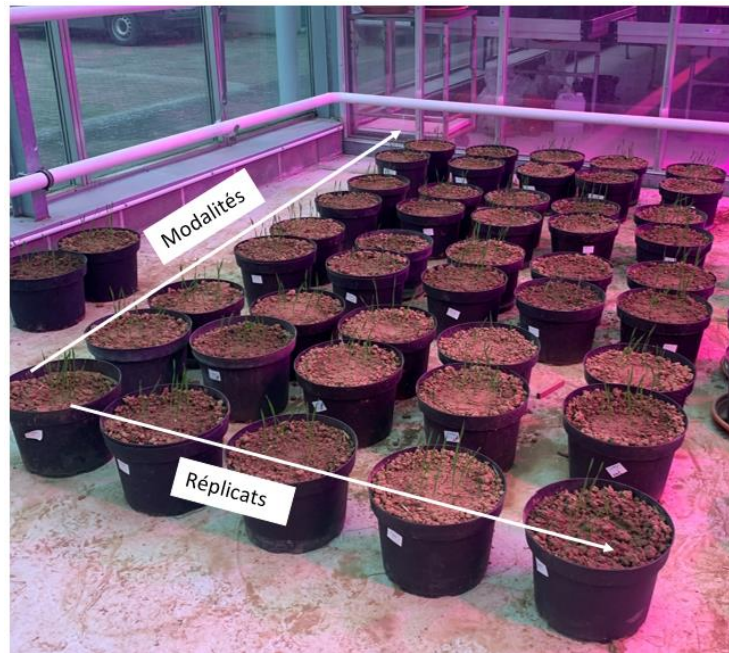





Figure 23 : Expérience en serre : neuf modalités différentes répliquées cinq fois

4.2.2. Schéma d'analyses générales et modalités testées

Dans cette expérience, 9 modalités différentes ont été testées, chacune répliquée 5 fois (Figure 23). Les modalités tirées des expériences en champ sont celles de l'application du thé de compost (en injection et non en application foliaire), l'injection d'extrait de compost, l'enrobage et le TM semis (Tableau 5). L'application de fongicides n'a pas fait l'objet d'une modalité dans cette expérience, ni le facteur de répétition d'application, puisque chaque intrant a été appliqué une seule fois.

En début d'expérience (avant applications), les sols et intrants ont été échantillonnés afin de les caractériser (plusieurs paramètres évalués). Des mesures ont également été prises pendant (sur les solutions de sol), et après l'expérience (parties aériennes, racines et sol ; Tableau 5).

Tableau 5 : Expériences en serre en 2023 sur du froment, caractérisation, modalités et réponse mesurée

 Expérience serre 2023 	
<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation - Des intrants : dénombrement germes totaux et moisissures, et analyse minérale - Des sols: Analyse granulométrique, pH, CEC, C/N, éléments échangeables, minéraux totaux 	
<ul style="list-style-type: none"> • Modalités testées (1) témoin (2) Enrobage au compost CMC (3) Enrobage au lombricompost Pur Ver® (4) Thé de compost (5) Extrait de compost (6) Adjuvants (7) Extrait de compost avec adjuvants (8) TM semis (9) TM semis et TM foliaire 	
<ul style="list-style-type: none"> • Mesure des impacts - Minéraux et DOC de la solution de sol - Éléments échangeables des sols - Biomasses aériennes et racinaires - Minéraux totaux des parties aériennes 	

4.2.3. Production et application des intrants

Les intrants identiques à ceux en champ ont suivi le même protocole de production. C'est le cas du thé de compost, de l'enrobage et de l'extrait de compost. Au niveau des quantités, elles ont été transposées du champ à la serre, c'est-à-dire que les quantités appliquées à l'hectare (Tableau 4) ont été adaptées à la surface des pots (~0,07 m²).

Thé de compost

Pour la production du thé de compost, la recette a été réalisée afin d'obtenir 1,2 L de thé (proportions identiques de chaque ingrédient à la recette initiale ; Tableau 6), afin d'avoir les quantités nécessaires pour les analyses ultérieures (500, 500 et 100 mL), et l'application.

Tableau 6 : Quantité de chaque ingrédient pour la production du thé en serre

Ingrédient	Quantité
Eau de pluie	1,275 L
Lombricompost Pur Ver®	30 mL
Mélasse de canne à sucre	1,5 mL
Acides humiques et fulviques	1,5 mL
Hydrolysat de poisson	450 mg
Volume total filtré	1,2 L

Le matériel disponible et les quantités nécessaires n'étant pas identiques à l'expérience au champ, la production a été adaptée pour imiter au mieux le protocole de la Sarthe. Tout d'abord, le bulleur (Alita Air Compressor Model AL-40 ; Figure 24) a été installé, branché et plongé dans l'eau de pluie (dans un récipient de capacité minimale de 2 L) de sorte qu'il amène de l'oxygène à la solution en permanence. Ensuite, l'hydrolysat de poisson et la mélasse ont été dilués dans de l'eau chaude. Ces ingrédients dissous et les acides humiques et fulviques ont été ajoutés dans le récipient de deux litres. La solution a reposé et été homogénéisée. Le lombricompost a été ajouté à la solution, et l'aération a fonctionné durant 24 heures. Enfin, celle-ci a été filtrée sur un tamis de 200 µm avant d'être appliquée.



Figure 24 : Production du thé de compost pour l'expérience en serre – apport d'oxygène grâce au bulleur

Extrait de compost avec et sans adjuvants

L'extrait de compost est simplement de l'eau filtrée à travers le compost, donc un thé sans adjuvants ni l'étape de fermentation/oxydation. Pour un volume total filtré de 50 mL, 53 mL

d'eau de pluie ont d'abord été mesurés avant d'être mélangés avec 1,25 mL de lombricompost. La solution a agité durant 30 minutes puis a été filtrée sur un tamis de 200 μm .

Le mélange d'adjuvants et d'extrait de compost consiste à la même composition que le thé, omettant intentionnellement l'étape d'oxydation. Requérant une quantité supérieure en vue des analyses ultérieures, les quantités produites sont semblables à celles du thé de compost (Tableau 6). L'hydrolysate de poisson et la mélasse de canne à sucre ont été dilués dans de l'eau chaude. Ensuite l'eau de pluie a été versée dans un grand b cher avant d'y ajouter l'hydrolysate et la mélasse dissous, ainsi que les acides humiques et fulviques. La solution a été homog n s e avant d'y ajouter le lombricompost. Cette solution a agité durant 30 minutes avant d'être filtrée sur un tamis de 200 μm .

Adjuvants

Cette modalit e consiste à appliquer seulement les adjuvants, c'est-à-dire les ingrédients ajoutés au thé (sauf le compost). En l'occurrence, il s'agit de la mélasse de canne à sucre, des acides humiques et fulviques ainsi que l'hydrolysate de poisson, le tout dilué dans l'eau de pluie (Tableau 7). Aucune filtration n'était requise puisque le lombricompost n'entra t pas dans la composition. La quantité a été produite en plus grande quantité que nécessaire à l'application, pour éviter les pertes dans le matériel, étant donné la viscosité des ingrédients (mélasse et acides humiques et fulviques).

Tableau 7 : Quantités d'ingrédients pour la modalité des adjuvants seuls en serre

Ingrédient	Quantité
Eau de pluie	1,115 L
Mélasse de canne � sucre	1,31 mL
Acides humiques et fulviques	1,31 mL
Hydrolysate de poisson	393 mg

Enrobages de composts

L'enrobage est réalisé pour 10 plantes, dont 5 avec un type de compost (compost CMC), et l'autre moitié avec un autre (compost Pur Ver[ ] acheté dans le commerce). Les ingrédients et quantités sont donc semblables, mais avec un type de compost distinct. Comme pour les adjuvants, la solution d'enrobage a été produite en plus grande quantité d  à la viscosité de certains ingrédients (Tableau 8).

Tableau 8 : Quantité de chaque ingrédient pour l'enrobage de compost en serre

Ingrédients	Quantité
Eau milli-Q ^{®8}	3,91 mL
Compost (CMC ou Pur Vert)	26,2 mL
Mélasse de canne à sucre	1,56 mL
Lait entier	10,42 mL
Eau milli-Q température ambiante	88,6 mL
Acides humiques et fulviques	13 mL
Poudre de basalte	52,4 mL

L'eau a été chauffée à 50 °C avant de l'ajouter dans un flacon (PET) contenant la de mélasse. La solution a agité jusqu'à homogénéisation totale. Le lait et les acides humiques et fulviques ont été ajoutés, et le mélange a à nouveau été homogénéisé. L'eau milli-Q à température ambiante y a été versée, avec la quantité requise de compost. Le tout mélangé, les semences ont été agitées avec une quantité de la solution d'enrobage durant cinq minutes avant d'y reposer pendant deux heures pour que les grains absorbent l'humidité. Après ces deux heures, la poudre de basalte a été ajoutée avant de remuer le tout durant 5 minutes.

Application des intrants

Les doses à appliquer sont les quantités du champ (Tableau 9Tableau 4), rapportées à la surface du pot (Tableau 9). Les quantités du TM foliaire (TMF) à l'hectare sont de 0,5 L. L'application de ces intrants a nécessité dans la majeure partie des cas une dilution dans de l'eau milli-Q afin de faciliter l'application des volumes initiaux très faibles.

⁸De l'eau milli-Q[®] a été utilisée comme équivalent à l'eau non-chlorée à chauffer. Il s'agit d'une ultra purifiée par un système de filtres/résines/membranes et dont la résistivité est de 18,2 MΩ cm à 25 °C).

Tableau 9 : Quantités des biointrants à appliquer, rapportées à la surface d'un pot en serre

Biointrant	Dose par pot
Thé de compost	700 µL
Extrait de compost (& avec adjuvants)	700 µL
Adjuvants seuls	700 µL
Enrobage	1 mL
TMS	525 mg
TMF	3,5 µL

Concernant les quantités pour l'enrobage, il aurait fallu mettre 168 µL (10 graines par pot) si l'on s'en tenait aux quantités du champ. Cependant cette quantité était tellement infime qu'elle n'atteignait qu'une mineure partie des graines, les autres n'étant alors même pas humidifiées par le liquide. Ainsi, la quantité a été majorée à 1000 µL afin que toutes les graines soient humidifiées,

Le TMF est à appliquer sur la surface des feuilles et il a été appliqué lors du début du tallage afin d'imiter l'expérience en champ.

4.2.4. Suivi tout au long de l'expérience

L'expérience en serre a débuté le 26 janvier 2023 (semis et application des biointrants) et a duré 80 jours (Figure 25).

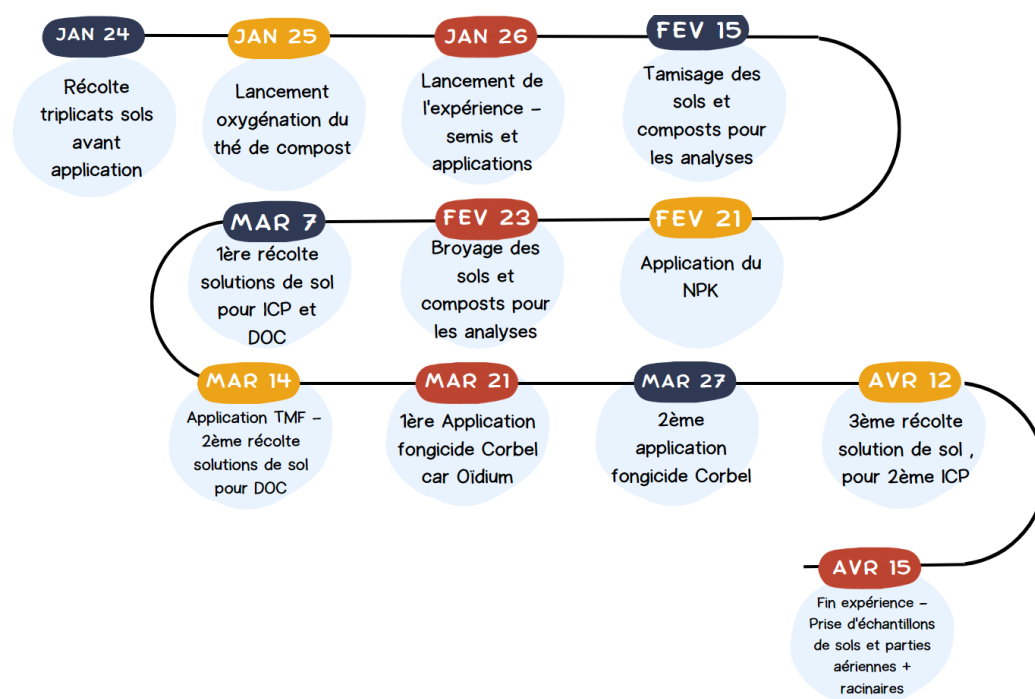


Figure 25 : Étapes suivies en serre sur les 80 jours d'expérience

Semis

Les graines de froment ont été semées le 26 janvier 2023 (10 graines par pot, 1 cm de profondeur), simultanément à l'application des biointrants, hormis le TMF qui lui a été appliqué plus tard, plus précisément au stade du tallage (14 mars ; Figure 25).

Application d'engrais NPK

Pour assurer la disponibilité en nutriments et la bonne croissance des plantes, 4,5 g d'engrais NPK 7-9-14 ont été appliqués dans tous les pots après moins d'un mois d'expérience (21 février ; Figure 25) selon les besoins en azote de 58,5 kg·ha⁻¹ du froment.

Installation des rhizons

Juste après le semis, des rhizons⁹ (Rhizosphere Research Products, Netherlands ; Figure 26) ont été installés au centre de chaque pot. Les rhizons utilisés sont constitués d'une membrane de 10 cm en polyéther sulfone hydrophile, avec des pores de 0,15 µm. Une seringue est connectée à ces rhizons afin d'exercer une succion pendant une trentaine de minutes, permettant ainsi d'échantillonner la solution de sol. Pour ce faire, une quantité d'eau était versée (1 L ou 1,5 L), avant de les activer (6 heures plus tard).



Figure 26 : Rhizons et seringues utilisés pour la récolte des solutions de sol

Paramètres de suivi et arrosage

Lors de l'expérience, des taches d'oïdium sont apparues vers la moitié du mois de mars. Un fongicide (*Corbel*) a été appliqué à une semaine d'intervalle (1^{er} et le 7 mars 2023). L'application de ce fongicide s'est avérée plutôt efficace puisque les taches ont disparu après environ une semaine.

⁹ Ces rhizons ont d'abord suivi une procédure stricte de nettoyage, passant consécutivement dans 3 bacs (24 heures dans chacun), remplis d'acide nitrique à 0,5% (1^{er} bac), à 2% (2^{ème} bac), et de l'eau milli-Q (3^e bac).

Les paramètres de suivi (température ambiante, humidité de l'air et l'irradiance) ont été mesurés par des capteurs au sein de la serre (Tableau 10).

Tableau 10 : Statistiques des paramètres de suivi de la serre expérimentale entre le 25/01/2023 et le 15/04/2023

Paramètre	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Température ambiante (°C)	20,4	1,2	18,6	29,9
Humidité (%)	69	0,18	99	25
Irradiance (W/m ²)	85,33	155,24	0	985

L'arrosage a été réalisé tout au long de l'expérience de façon uniforme pour tous les pots, en fonction des besoins hydriques. En début d'expérience, 400 mL étaient nécessaires deux fois par semaine, en fin d'expérience, 1 L à la même fréquence.

4.2.5. Modes opératoires et analyses

Échantillonnage et prétraitements

Les sols (avant et après expérience), les composts et les plantes ont nécessité des traitements avant leurs analyses (Figure 27).

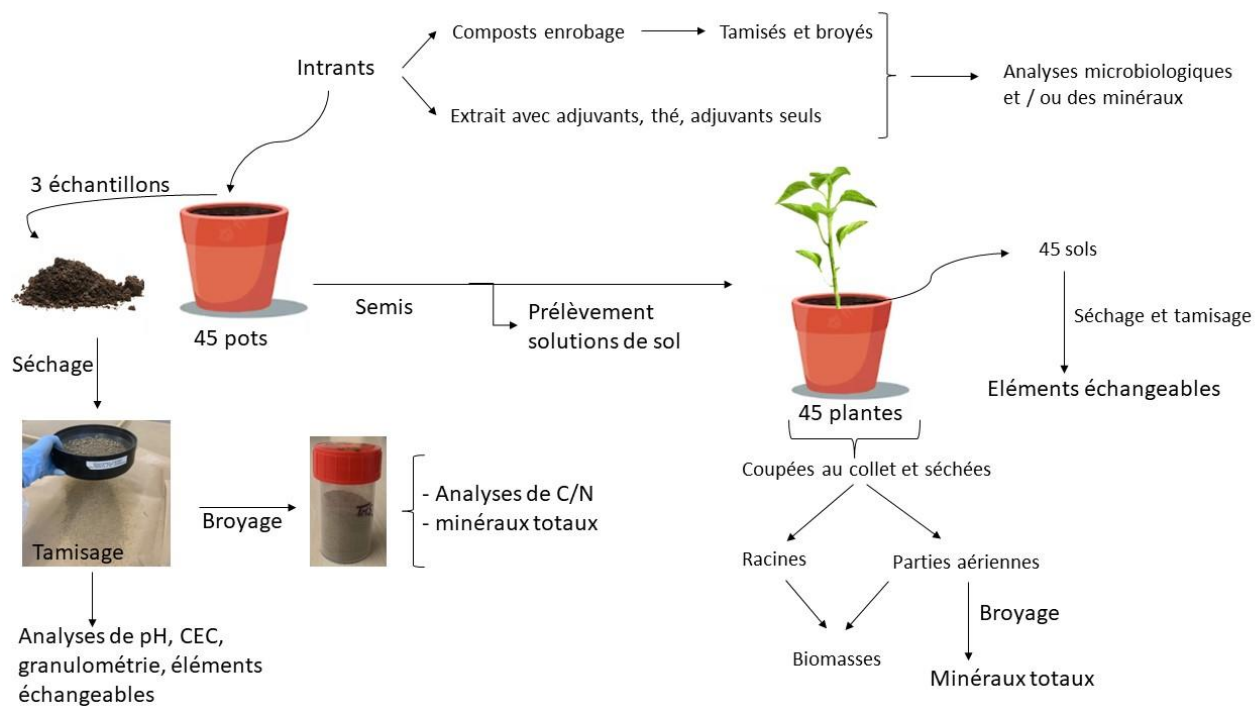


Figure 27 : prétraitements requis pour les analyses tout au long de l'expérience

Les sols ont été séchés (une semaine à 25 °C en salle de séchage du hall EFOR, UCLouvain), tamisés à 2 mm, dans certains cas broyés (Retsch® Vibratory Disc Mill RS 200) avant de pouvoir être analysés. Les plantes en fin d'expérience ont été coupées au niveau du collet, séchées à l'étuve (65 °C pendant 72 heures), et les parties aériennes ont été broyées pour l'analyse minérale (broyeur végétaux Foss TM Cyclotec 1093).

Durant l'expérience, la solution de sol a été récoltée à trois reprises pour des analyses de carbone organique dissous (7 et 14 mars ; Figure 25), et minéraux (cations, le 7 mars et le 12 avril ; Figure 25). Une quantité minimale de 15 mL de solution était requise, or lors la première récolte d'ICP, il n'y avait pas assez de solution dans chaque rhizon. Certains réplicats ont donc été fusionnés afin d'avoir 15 mL pour chaque échantillon.

i. Caractérisation des sols

Les sols ont été caractérisés en début d'expérience (analyse granulométrique, CEC, éléments échangeables, pH, et C/N), en prélevant trois échantillons de sol avant applications (Figure 27).

Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de caractériser la proportion des constituants de la fraction fine (argiles, limons, sables) dans les échantillons étudiés. Cette analyse est basée sur le principe de sédimentation démontré par la loi de Stokes. Des prétraitements (Figure 27) et une sédimentation sur colonne sont nécessaires. La méthode s'est déroulée en quatre étapes (Baize 2018).

La première étape est celle de la destruction de la matière organique (au départ de 10 g de sol) par une solution de peroxyde d'hydrogène 6 %. Les argiles sont ensuite dispersées par une solution d'hexamétaphosphate de sodium (HMPS ; 44 g·L⁻¹). Après avoir complété à l'eau, les échantillons sont soumis à un traitement aux ultrasons pour faciliter la dispersion des particules de sol. La troisième étape consiste à tamiser les sables. Les échantillons sont placés dans une colonne de 1 L et deux tamis sont utilisés (tamis de 250 µm pour séparer les sables grossiers (SG) et tamis de 50 µm pour séparer les sables fins (SF)). Les sables sont récupérés dans une coupelle, séchés à 105 °C et pesés. Enfin, la dernière étape implique la récupération des fractions limoneuses fines (LF) et grossières (LG) ainsi que des argiles (A) par sédimentation. Cette étape est réalisée en prélevant des échantillons à différents moments : au début, à 4 minutes et 48 secondes, et après 24 heures. Chaque échantillon est ensuite séché à 105 °C et pesé.

Pour calculer les fractions granulométriques, les poids des fractions de sables grossiers et fins sont directement mesurés après tamisage et évaporation. Les fractions de limons grossiers et fins sont calculées en différence de masse entre chaque échantillon récupéré et évaporé après

le temps de sédimentation requis. Pour les argiles, il est nécessaire de soustraire la masse d'HMPS présente dans les 20 mL prélevés. Les valeurs sont ensuite regroupées en sous-fractions de sables, limons et argiles, afin de pouvoir placer le type de sol sur le triangle textural (triangle de Aisne).

Capacité d'échange cationique

Pour mesurer la CEC, la méthode utilisée est celle de Metson (1956). Elle consiste en une extraction sur colonne et permet de mesurer la CEC à pH 7. Cette technique pourrait entraîner une sur ou sous-estimation de la CEC effective, si jamais le sol n'avait pas un pH réel = 7.

Les échantillons sont d'abord mélangés avec du sable et placés dans des colonnes d'extraction, avec des blancs de sable réalisés également. Ensuite, les cations échangeables sont extraits en ajoutant une solution d'acétate d'ammonium et lavés avec de l'éthanol, et analysés à l'ICP-AES. Les ions NH_4^+ sont ensuite extraits avec une solution de KCl. Enfin, l'ammonium est dosé en utilisant un kit (Spectroquant®) et la spectrophotométrie (spectrophotomètre Thermo Scientific Genesys 10S Vis® à 690 nm).

Les échantillons étalons en spectrophotométrie permettent d'établir une droite de calibration reliant l'absorbance à la concentration en ammonium.

Mesure des éléments échangeables par ICP-AES après extraction

Les trois échantillons de sols ont également été analysés à l'ICP-AES pour leur contenu en éléments échangeables, après être passés à une extraction au chlorure de calcium CaCl_2 $0,01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (20 mL ; préparée à partir de chlorure de calcium dihydraté (analaR NORMAPUR) sur 2 g de sol (rapport 1 : 10). Les suspensions de sol - CaCl_2 ont été mises à l'agitateur (Edmund Bühler GmbH™) durant 2 heures et au centrifugeur (Jouan GR4-12) durant 25 minutes à 2500 rpm. Les solutions ont été filtrées sur papier Whatman® 41 (porosité uniforme) et 15 mL de ces solutions filtrées dans des tubes (polypropylène à fond conique ; 15 mL) ont été acidifiées avec l'acide nitrique Suprapur® à 65 % avant d'être analysées à l'ICP-AES.

Mesure du pH (H_2O)

L'acidité active se détermine à travers le pH H_2O qui reflète le pH de la solution en équilibre avec le sol. Ce sont les protons (H^+) libres en solution qui sont mesurables. Une suspension sol-eau milli-Q en rapport 1:5 est réalisée, en prenant 5 g de sol et ajoutant 25 mL d'eau milli-Q. La mesure du pH est effectuée dans le surnageant par une sonde-pH (WTW Sentix® 81) et un pH-mètre (WTW InoLab® pH 720) ayant été calibrée à l'aide de deux solutions standard à pH 4 et pH 7.

Carbone total sur azote total

Les teneurs en carbone (C) total et azote (N) des sols et des matières organiques apportées sont mesurées par chromatographie en phase gazeuse (Baize 2018), réalisé par un analyseur élémentaire (Elementar vario EL cube®). Les formes totales représentent l'ensemble de toutes les formes de C et N minéral et organique présentes dans un échantillon de sol. Pour ce faire, les échantillons des trois sols réalisés en duplicats, ont été placés dans des feuilles d'étain afin d'éliminer complètement l'air et éviter les interférences (échantillons allant de ~ 16 à 27 mg).

Minéraux totaux

Les trois échantillons de sol ont été analysés au pXRF (Portable X-ray Fluorescence) dans le but d'évaluer leur teneur en minéraux totaux (modes *Soil* et *Mining*), chaque analyse durant 90 secondes. Le modèle utilisé pour cette analyse est le Thermo Scientific Niton XL3t GOLDD+. Pour comparer les résultats du pXRF avec les bases de données et les normes existantes, une recalibration par rapport à la méthode de référence est nécessaire (en l'occurrence, le protocole de mise en solution par eau régale et dosage par ICP-AES).

ii. Caractérisation des intrants

Certains intrants ont également été analysés, au niveau microbiologique (dénombrement des germes totaux et moisissures ; deux composts enrobage, thé et extrait avec adjuvants), pour leur carbone organique dissous (thé et extrait avec adjuvant), et pour leurs contenus en minéraux (deux composts pour enrobage, thé, extrait avec adjuvants et adjuvants seuls).

Pour l'analyse des minéraux, le thé de compost, l'extrait de compost avec adjuvants, et les adjuvants seuls ont été récoltés dans des différents pots en plastique (PET) en vue d'une analyse par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry ou spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif ; Thermo iCAP 6000). Les composts ont été analysés au pXRF selon même protocole que pour les sols pour mesurer les minéraux totaux.

iii. Impact des différentes modalités

Carbone organique dissous et cations dans les solutions de sol

Les solutions de sol collectées durant l'expérience ont été analysées pour quantifier les cations et le carbone organique dissous. Les cations ont été analysés à l'ICP-AES dans 15 mL de solution de sol, après avoir ajouté 6 gouttes d'acide nitrique Suprapur® à 65 % dans chaque tube, permettant d'éviter les interférences lors de l'analyse.

Éléments échangeables par ICP-AES après extraction

Les 45 échantillons de sol prélevés dans chaque pot en fin d'expérience ont également fait l'objet d'une analyse des éléments échangeables après extraction au CaCl_2 selon le même protocole que pour les 3 sols initiaux (ci-dessus), après avoir été séchés et tamisés à 2 mm.

Biomasses et minéraux totaux dans les parties aériennes

Les parties aériennes et racinaires ont été pesées (plantes coupées au niveau du collet ; Figure 28). Le nombre de plantes par pot a été compté (allant de 6 à 10, mais pas significativement différent entre les modalités) afin de transposer les masses par pot à une masse par pied. Les parties aériennes ont ensuite été analysés au pXRF pour quantifier les minéraux totaux (après prétraitements ; Figure 27).

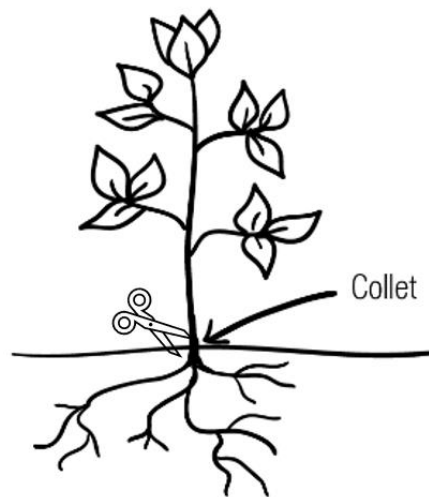


Figure 28 : niveau de séparation pour les mesures de biomasse aérienne et racinaire

4.3. Traitement de données et analyses statistiques

L'ensemble du traitement de données et des analyses statistiques a été réalisé sur le logiciel libre Rstudio. Les matrices de corrélations réalisées sont basées sur le calcul du coefficient de Pearson (r). La détermination des différences significatives de données entre plusieurs groupes a été réalisée par le test statistique non-paramétrique de Kruskal-Wallis avec un test post-hoc de Dunn (avec ajustement de Bonferroni). Contrairement aux tests paramétriques, il ne fait pas d'hypothèses sur la distribution des données (XLSTAT s. d.) Le test de Dunn est utilisé comme test post-hoc et permet de comparer les paires de groupes de manière plus spécifique, en identifiant quels groupes diffèrent significativement des autres. La p-valeur est ensuite calculée à partir de cette statistique. Les p-valeurs permettent de classer les résultats selon qu'ils sont significatifs ($p < 0,05$), hautement significatifs ($p < 0,01$) ou très hautement significatifs ($p < 0,001$).

5. Résultats et discussion

5.1. Expériences en champ

Les intrants appliqués en champ ont été caractérisés d'un point de vue microbiologique, et l'effet de ces intrants (par pulvérisation, enrobage et injection) sur la composition minérale des grains et du sol, des paramètres de rendement, et sur les systèmes aériens et racinaires, a été évalué.

5.1.1. Efficacité du thé de compost et des extraits végétaux (essai 2022)

Le thé 1 utilisé lors de l'expérience en champ de 2022 a une charge microbienne totale de l'ordre de $2 \cdot 10^8$ cellules/mL de solution (Figure 29a) et une charge fongique de 286 cellules/mL (Figure 30a).

La charge microbienne totale et la charge fongique des thés sont fortement influencées par la nature du compost utilisé, les conditions de production (température, humidité, dilutions, aération ou non, temps d'aération, *etc.*) et les ingrédients utilisés lors de la production (adjuvants, inoculum, *etc.* ; Ingham 2005). Il est à noter que le thé 1 a été produit à partir d'un mélange de composts (compost par la méthode Johnson Su : compost CMC : lombricompost Pur Ver), puis complété avec des adjuvants et aéré durant 24 h. L'ajout des adjuvants et l'aération ont donc pu jouer un rôle dans le développement des microorganismes observés.

Ces nombreux paramètres conditionnant le développement microbien rendent complexe la formation de thé entièrement identique au niveau microbiologique d'une production à l'autre, et la comparaison du dénombrement à des valeurs de la littérature. La faible densité fongique est en revanche fréquemment observée dans les thés de compost aérés, comme c'est le cas pour le thé 1 (Figure 30a), et diminue généralement avec le temps d'incubation (Min Jeong et al. 2015).

Le dénombrement des microorganismes sans séquençage ne donne cependant qu'une information partielle puisqu'ils ne sont pas identifiés. En effet, selon la diversité des microorganismes présents, ils peuvent potentiellement jouer sur la décomposition de la matière organique et donc le recyclage des nutriments, et agir sur les défenses contre les organismes nuisibles (Thomas et Singh 2019).

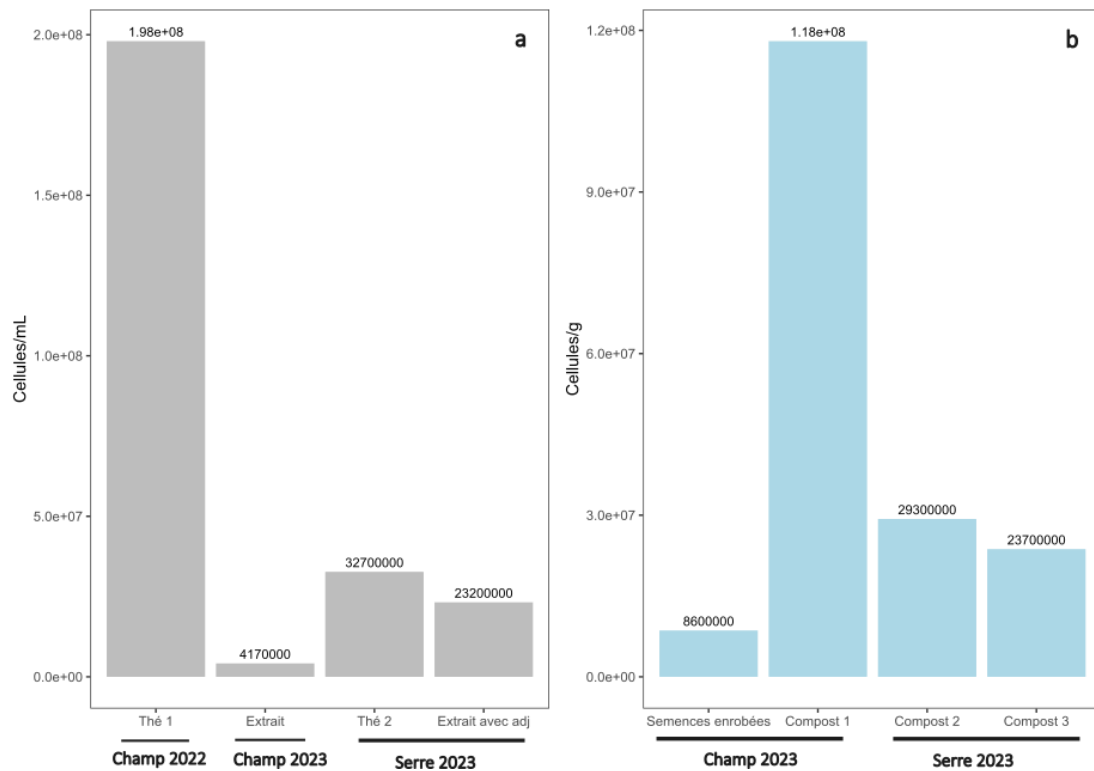


Figure 29 : Dénombrement moyen (2 répétitions) des germes totaux (charge microbienne totale) dans les intrants liquides (a) et solides (b) utilisés lors des trois expériences. Compost 1 = compost Johnson Su, Compost 2 = compost CMC, et Compost 3 = lombricompost Pur Ver

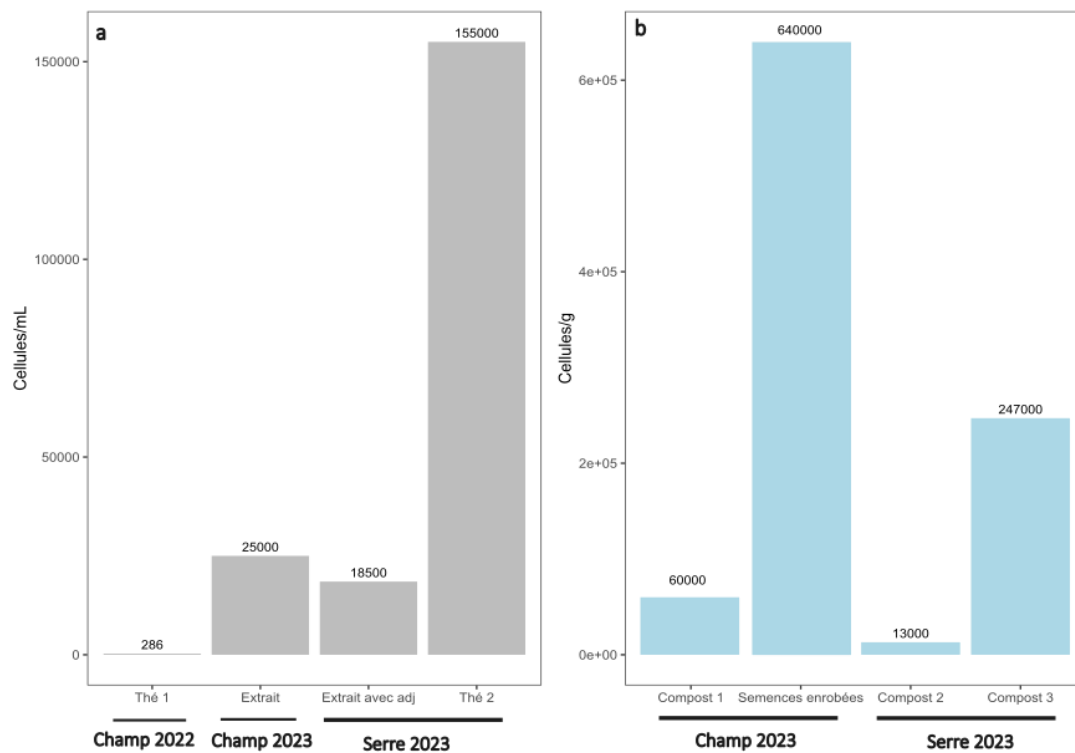


Figure 30 : Dénombrement moyen (2 répétitions) des moisissures (charge fongique) dans les intrants liquides (a) et solides (b) utilisés lors des trois expériences. Compost 1 = compost Johnson Su, Compost 2 = compost CMC, et Compost 3 = lombricompost Pur Ver

Rendement supérieur permis par une double application de thé de compost

L'effet des différentes modalités sur le rendement total a été testé (Figure 31) et a montré une différence entre les deux témoins, non-significative mais suffisante que pour qu'un seul des témoins ne présente de différences significatives avec une autre modalité (entre le témoin 2 et la pulvérisation de thé 2 x, et entre le témoin 1 et les extraits végétaux). Ce résultat met en évidence une possible hétérogénéité de la parcelle, pouvant être source de biais dans les résultats, qu'il est important à considérer lors de leur interprétation.

Le thé de compost pulvérisé 2 x donne un rendement moyen significativement supérieur aux modalités d'extraits végétaux ($p < 0,001$), de fongicide dose pleine ($p < 0,01$), au thé de compost pulvérisé 1 x ($p < 0,01$) et au témoin 2 ($p < 0,05$). Le résultat par rapport au témoin 2 au vu de la différence avec le témoin 1, est à prendre avec prudence. En revanche l'efficacité de cette modalité semble crédible au vu des différences significatives avec plusieurs modalités.

La différence significative entre la simple et la double pulvérisation de thé démontre l'importance du nombre d'applications dans le cadre des pulvérisations foliaires de thé, ce qui est cohérent avec ce qui est rapporté dans la littérature concernant l'importance de la fréquence d'application des thés (Shaban et Fazeli-Nasab 2015). La différence significative entre le thé pulvérisé 2 x et le fongicide dose pleine peut être due à l'efficacité du thé, mais également à un effet potentiellement phytotoxique du fongicide lorsqu'il est appliqué à une telle dose.

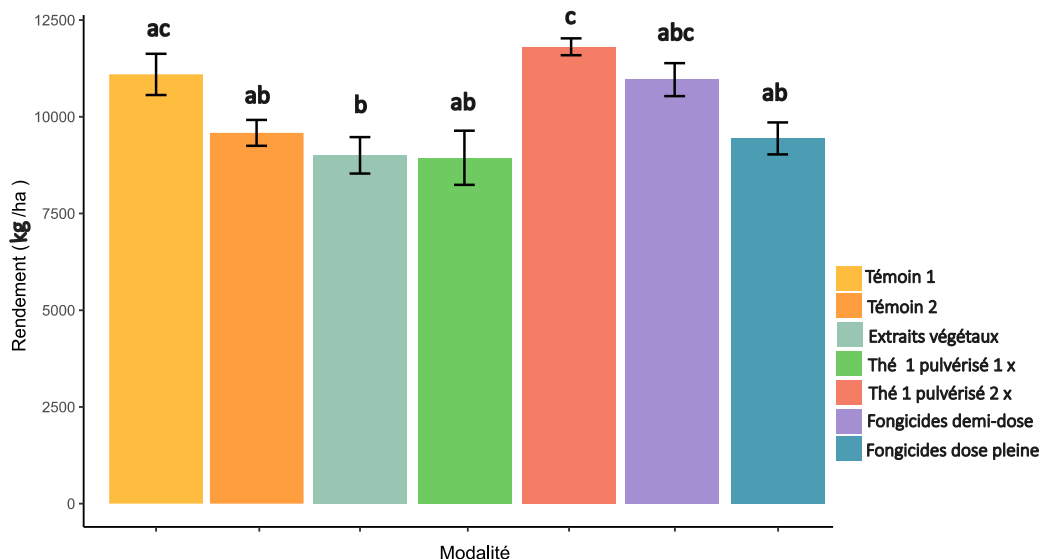


Figure 31 : Rendement froment en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; $n = 5$)

Ce rendement total est fonction du nombre de plantes par hectare (lié à l'émergence des plantes), du nombre de grains par plante (lié au nombre d'épis par plante et d'épillet par épi),

et de la masse des grains. Il est donc intéressant d'évaluer l'effet des modalités sur ces paramètres pour comprendre à quel niveau l'effet a lieu. L'impact des applications sur la masse des grains a donc été mesurée par une mesure de poids de mille grains (PDMG), et a présenté des différences significatives pour certaines modalités (Figure 32).

La modalité thé de compost pulvérisé 2 × a donné un PDMG significativement supérieur à celui de la pulvérisation de thé appliqué 1x ($p < 0,001$), au témoin 1 ($p < 0,05$) et au fongicide demi-dose ($p < 0,001$). L'unique tendance similaire par rapport au rendement total est donc le thé de compost pulvérisé 2 × par rapport au thé pulvérisé 1 ×. Le rendement total est 1,28 × supérieur et le PDMG 1,05 × supérieur pour la pulvérisation de thé 2 × (Tableau A3). Dans ce cas-là, l'augmentation du rendement est donc principalement due à l'augmentation de la masse des grains.

La modalité des extraits végétaux donne un PDMG supérieur aux fongicides demi-dose ($p < 0,001$), au témoin 1 ($p < 0,01$), et à la simple pulvérisation de thé ($p < 0,001$). Pour le rendement total en revanche, cette modalité (extrait végétaux) n'était significativement supérieure à aucune autre, et la tendance entre le témoin 1 et les extraits végétaux était inverse à la tendance pour le PDMG (rendement moyen 1,2 × supérieur pour le témoin 1, mais PDMG moyen 1,03 × inférieur). Ainsi, d'autres facteurs que la masse des grains doit intervenir dans cette variation de rendement (nombre de talles, nombre d'épillets par épi, etc.) Ainsi, même si la masse des grains pour la modalité des extraits végétaux est supérieure à celle du témoin 1, elle est compensée par le nombre de grains à l'hectare.

D'autres modalités sont significativement différentes pour leur PDMG mais ne le sont pas pour le rendement, comme la modalité témoin 2 dont le PDMG moyen est supérieur par rapport au thé pulvérisé 1 × ($p < 0,001$), et au fongicide demi-dose ($p < 0,01$), et le fongicide dose pleine dont le PDMG moyen est supérieur au thé pulvérisé 1 × ($p < 0,01$). La tendance différente entre le PDMG et le rendement montre encore une fois le rôle d'autres paramètres que le PDMG dans le rendement total, et la corrélation entre le PDMG et le rendement est d'ailleurs globalement assez faible (Figure 33).

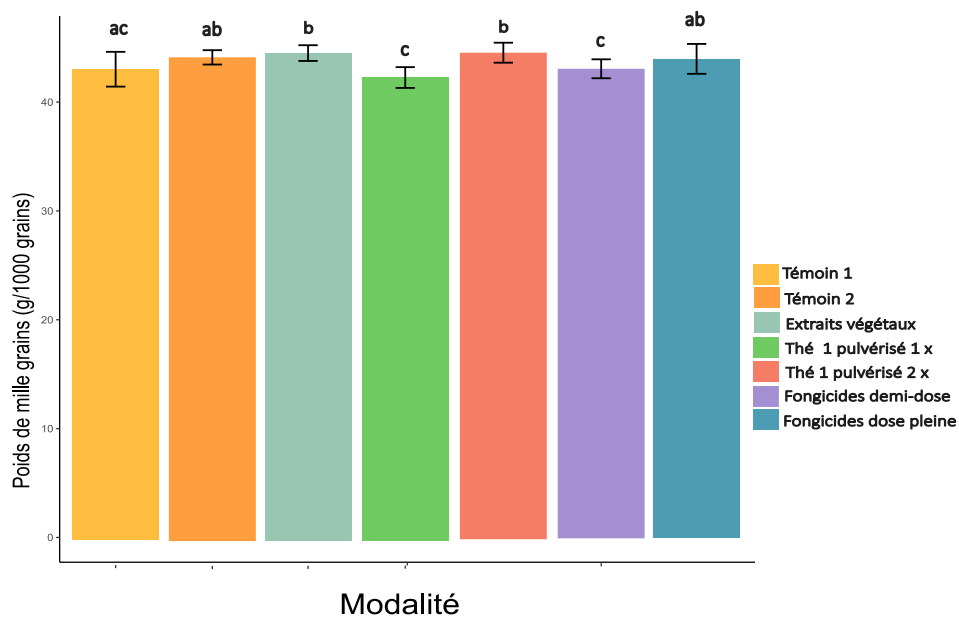


Figure 32 : Poids de mille grains en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; n = 20)

Influence des modalités sur la concentration des minéraux dans les grains

Suite à ces analyses de masse (kg/ha et PDMG), une analyse chimique des grains a été réalisée dans le but de voir si les différentes applications foliaires ont eu un effet sur leur composition minérale (Figure 34), et de pouvoir potentiellement les relier aux augmentations de rendement et de la masse grains (Figure 33).

Certaines concentrations en éléments minéraux sont très fortement corrélées dans les grains (Figure 33). C'est le cas, par exemple, du trio potassium-phosphore-magnésium qui ont des coefficients de Pearson supérieurs à 0,7, ou du cuivre avec le zinc. Ces corrélations permettent de rendre compte de comportements similaires entre les éléments pour évaluer l'influence des modalités testées. Les concentrations en éléments minéraux dans les grains ont ensuite été comparés entre les modalités. Les concentrations en magnésium (illustration du groupe avec le phosphore et le potassium) et en calcium ne présentent aucune différence significative entre les modalités (Figure 34).

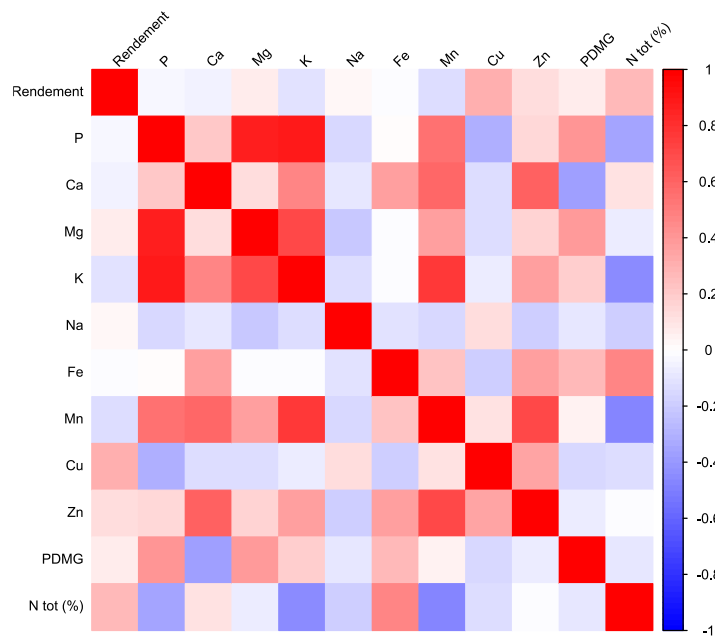


Figure 33 : Matrice de corrélation basée sur le coefficient de Pearson, entre les différents minéraux dans les grains (mg/kg), le poids de mille grains (g ; PDMG) et le rendement total (kg/ha), pour toutes les modalités confondues. Une corrélation est faible entre 0 et 0.5 (positive) et 0 et -0.5 (négative), et forte entre 0.5 et 1 (positive) et -0.5 et -1 (négative).

La concentration des minéraux dans les grains tels que le magnésium et le calcium n’a pas été impactée par les applications d’extraits végétaux, de thé et de fongicides (Figure 34). Une telle augmentation a pourtant été rapportée dans certaines études notamment concernant l’utilisation du thé de compost (Hargreaves et al. 2009 ; Eudoxie et Martin 2019).

Une telle augmentation aurait pu notamment être expliquée par l’apport de minéraux par les intrants, ou par l’action indirecte des applications sur l’état de la plante qui en meilleure santé, serait capable de puiser plus de nutriments du sol. Cet effet n’est pas observé dans cette expérience, potentiellement car les quantités appliquées ne sont pas suffisantes que pour observer cet effet. Une autre cause potentielle pour l’absence de différence significative de ces concentrations serait qu’une augmentation de la quantité de calcium dans le grain puisse être occultée par une augmentation de la masse de ce grain, et ne pas être observée dans la concentration.

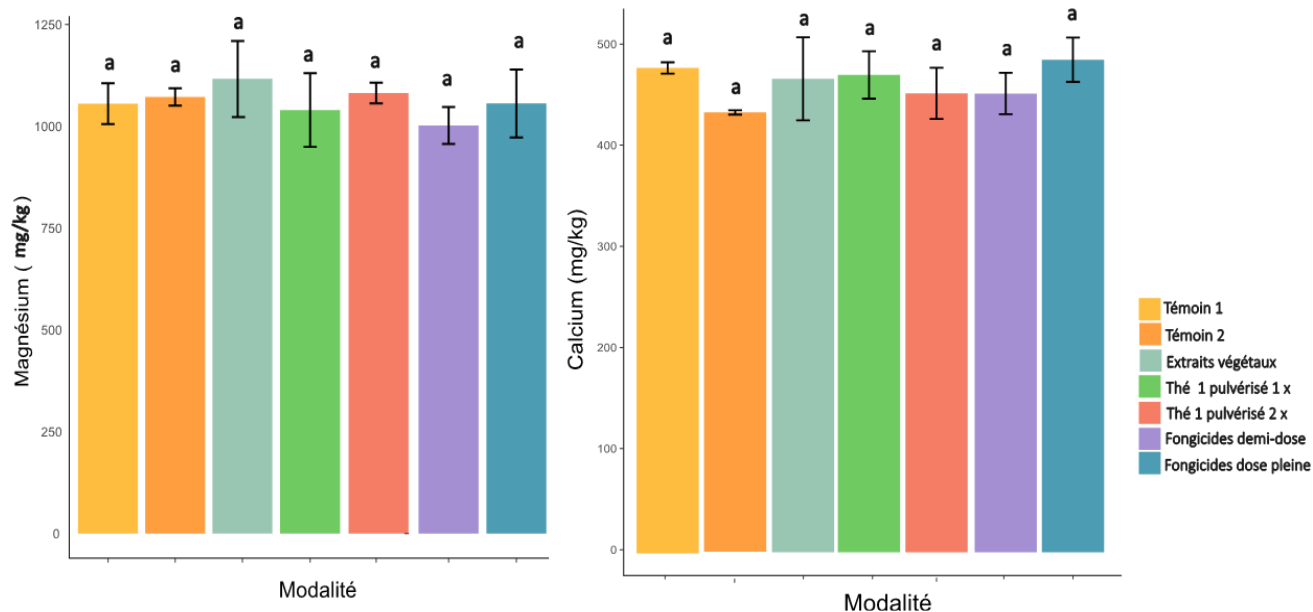


Figure 34 : Concentration en magnésium et en calcium des grains en fonction des différentes modalités (expérience 2022 à la Sarthe ; n = 3)

Relation entre le poids de mille grains et leur contenu minéral

Le PDMG ne présente pas de corrélation forte avec un minéral analysé (Figure 33) et il n’y a pas non plus de tendance pour certaines modalités dans ces relations PDMG avec minéral (calcium : Figure A1 ; magnésium : Figure A2).

N’ayant ici pas de forte corrélation avec la concentration en minéraux des grains, il est difficile de comprendre par quel mécanisme exact la masse des grains a été favorisée. Le phénomène peut découler de mécanismes complexes et des rapports entre les minéraux. Certains minéraux importants dans la qualité du grain n’ont pas pu être analysés dans le cadre de cette expérience (comme le soufre) et jouent certainement un rôle clé dans ces mécanismes (Bonnot 2016). Les résultats observés pourraient également être expliqués par des actions indirectes via les microorganismes du thé influençant la disponibilité et l’activité des hormones végétales par exemple (El-Din et Hendawy 2010; Osama et Ali 2015).

5.1.2. Efficacité des méthodes d’injection et d’enrobage (essai 2023)

Caractérisation microbiologique des intrants

L’extrait de compost a une charge microbienne totale de l’ordre de $4,2 \cdot 10^6$ cellules/mL (< thé 1 ; Figure 29a) et une charge fongique de 25 000 cellules/mL (> thé 1, Figure 30a). Cette différence peut venir du compost utilisé, et du processus de production. L’extrait de compost n’ayant pas suivi de processus de fermentation ou d’oxydation, et n’étant pas complété avec des adjuvants (>> au thé 1), la charge microbienne totale inférieure par rapport au thé semble

cohérente avec ce qui est dit dans la littérature (Shaban et Fazeli-Nasab 2015), rapportant l'impact positif des adjuvants et de l'oxydation sur le développement des microorganismes. La charge microbienne totale inférieure peut impacter la libération des nutriments de la solution par rapport au thé 1. La différence au niveau fongique peut être la conséquence de la nature du compost utilisé.

Le compost 1 utilisé pour l'enrobage dans l'expérience 2023 à la Sarthe a une charge microbienne totale de l'ordre de $1,2 \cdot 10^8$ cellules/g (Figure 29b) et une charge fongique de 60 000 cellules/g (Figure 30b). Les semences enrobées à ce même compost 1, ont quant à elles, une charge microbienne totale de l'ordre de $8,6 \cdot 10^6$ cellules/g et une charge fongique de 640 000 cellules/g. La charge microbienne totale est donc plus grande pour le compost 1 que pour les semences enrobées, mais la tendance s'inverse pour la charge fongique.

Hormis les conditions de fabrication des intrants comme mentionné précédemment (température, pH, humidité, C/N, etc. ; Wright, Gryganskyi, et Bonito 2016), les différences de population microbienne peuvent s'expliquer par la phase thermophile dans la production de compost. La production de compost impliquant une phase thermophile manquante ou plus courte (comme c'est le cas dans les vermicompost), ont selon la littérature recensée, une population fongique plus forte. Des températures plus basses et une humidité durant le compostage permettent de favoriser les champignons par rapport aux bactéries (Wright, Gryganskyi, et Bonito 2016).

Pas d'effet significatif des modalités sur les paramètres biologiques des plantes

L'impact de l'injection d'extrait, d'enrobage de compost et de TM semis a été évalué sur quatre paramètres biologiques différents : l'émergence des plantes, la biomasse aérienne, le nombre de talle par plante et le nombre d'axes racinaires (Figure 35).

Les différentes modalités n'ont pas d'effet significatif sur l'émergence des plantes (Figure 35A), la biomasse aérienne (Figure 35B), ni le nombre d'axes racinaires totaux par plante (Figure 35D). L'émergence des plantes n'ayant pas été impactée, une différence de rendement potentielle ne serait donc pas expliquée par ce paramètre-là. Le nombre de talle par plante, en revanche, est significativement différent (inférieur) pour le TM semis par rapport aux autres modalités, excepté par rapport à l'injection d'extrait (Figure 35C). Ainsi aucun effet n'a été observé par rapport au témoin, sauf pour le TM semis qui a un nombre de talles par plante inférieur ($p < 0,001$) à celui du témoin (bien que reste seulement $1,2 \times$ inférieur). Ce nombre inférieur de talles du TM semis n'est pourtant pas reflété dans la différence de biomasse aérienne (Figure 35B). Ainsi, le nombre de feuilles par talle, ou bien la hauteur des talles, ont certainement été supérieurs, contrebalançant cette tendance.

Les effets de l'enrobage et de l'injection d'extrait ne sont donc dans cette expérience, pas significatifs pour ces trois paramètres biologiques étudiés, bien que ces méthodes soient

parfois utilisées dans le but d'améliorer certains de ces paramètres biologiques énoncés. En effet, les méthodes d'enrobage sont parfois utilisées notamment pour leur effet sur l'émergence des plantes, bien que cet effet ne soit pas observé pour l'ensemble des techniques d'enrobage (Pedrini et al. 2017). Les extraits de compost à certaines doses peuvent également impacter la germination, en la stimulant, grâce à son apport de nutriments, son impact sur la physique des sols, ou par son action via certaines hormones (Scheuerell et Mahaffee 2002), parfois même en l'inhibant (phytotoxicité ; Scheuerell et Mahaffee 2002).

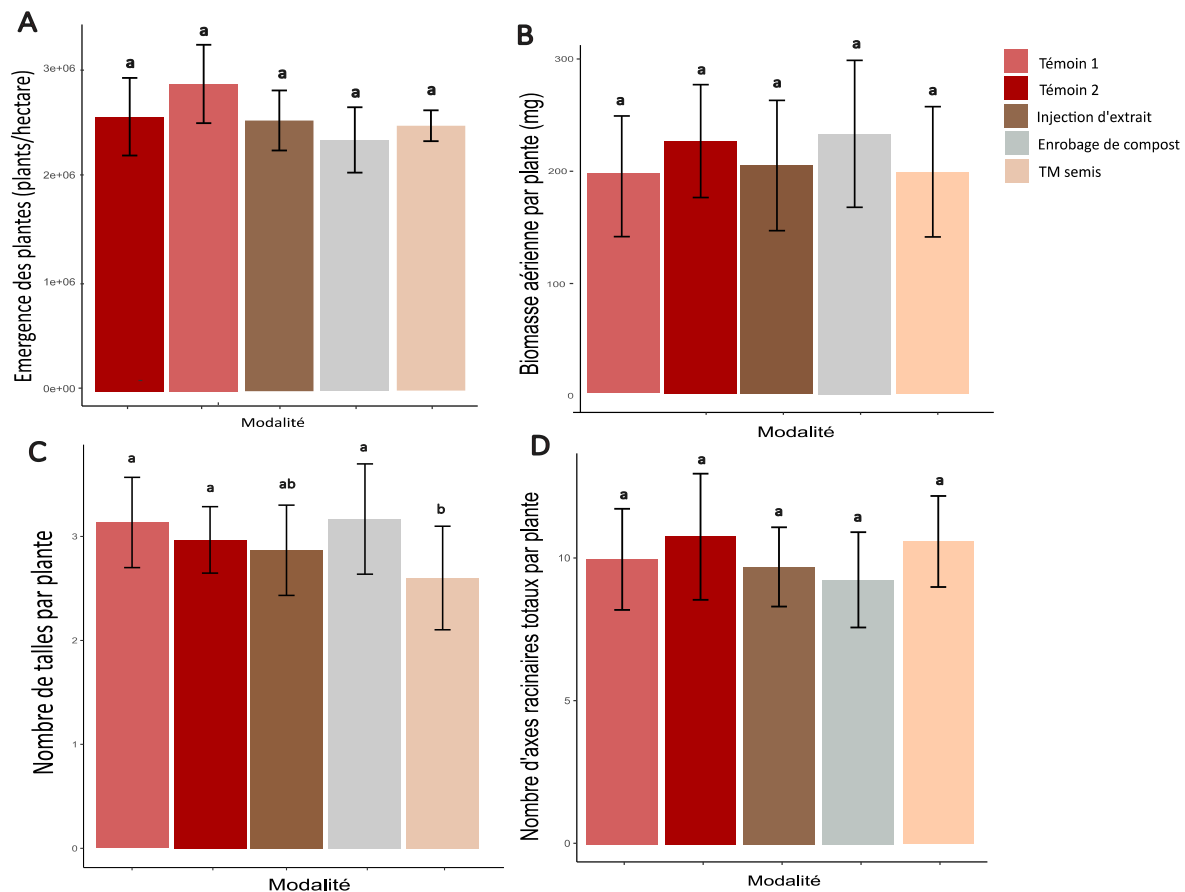


Figure 35 : Influence des modalités sur quatre paramètres biologiques des plantes (émergence n = 3 ; biomasse aérienne n = 30 ; nombre de tiges n = 30 ; nombre d'axes racinaires n = 15)

La biomasse aérienne et le nombre d'axes racinaires ne sont pas corrélés l'un à l'autre, ni fortement corrélés à un minéral analysé dans le sol (Figure 36). D'autres paramètres racinaires tels que la longueur et le diamètre des racines seraient intéressants à prendre en compte dans cette relation avec la biomasse et les minéraux, et de voir s'ils sont affectés par les différentes applications.

Influence des traitements sur le contenu en minéral du sol

Certains minéraux présents dans le sol présentent une forte corrélation positive entre eux (Figure 36). C'est le cas du quatuor potassium - phosphore - magnésium - calcium (coefficients de Pearson supérieurs à 0,57). À titre d'exemple, la concentration en calcium du sol n'a pas

été significativement impactée par les modalités testées : injection d'extrait, enrobage de compost ou TM semis (Figure 37). Des résultats similaires sont observés pour les autres éléments. Il est à noter qu'il s'agit ici des concentrations totales dans le sol pendant l'expérience et non dans les grains comme réalisé dans l'essai de 2022 (Figure 33), ce qui limite les effets potentiels. Ainsi, on peut conclure que les modalités d'injection d'extrait et d'enrobage de compost selon les protocoles testés dans cette expérience, ne semblent pas impacter la concentration en minéraux du sol.

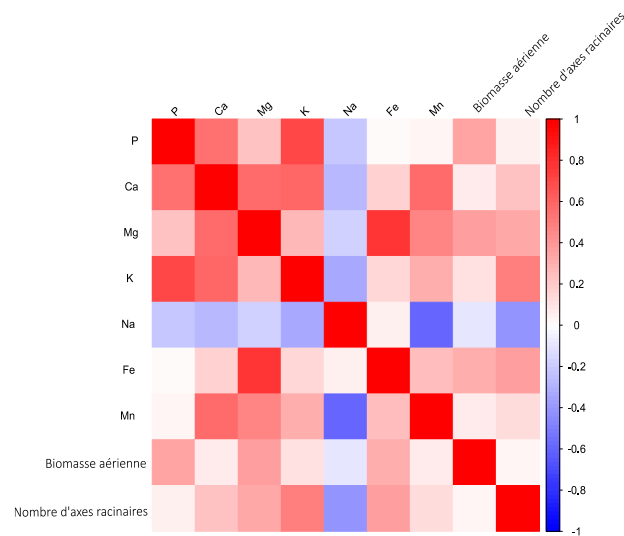


Figure 36 : Matrice de corrélation entre les différents minéraux totaux présents dans le sol, le nombre d'axes racinaires et la biomasse aérienne par plant, toutes modalités confondues (la Sartre 2023)

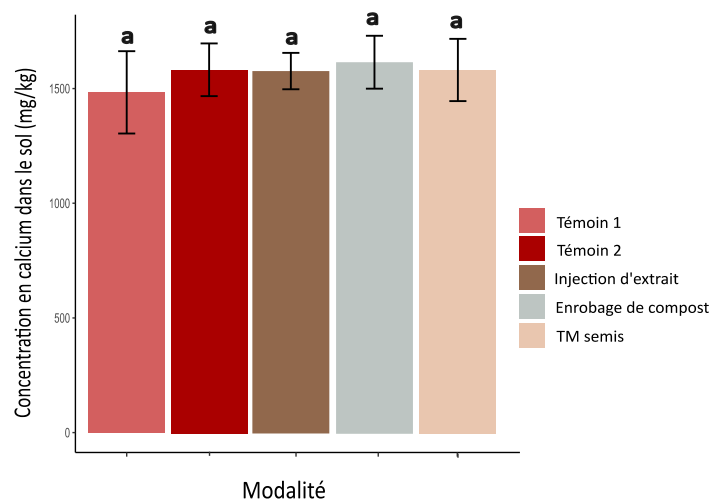


Figure 37 : Concentration en calcium (total) dans le sol (jusque 15 cm de profondeur) en fonction des modalités (la Sartre 2023 ; n = 3)

5.1.3. Résumé et perspectives des essais en champ

En résumé, les différentes applications par voie foliaire (thé 1 ou 2 ×) et par application au sol (injection d'extrait et enrobage) n'ont eu qu'un effet très limité sur les paramètres biologiques et chimiques étudiés. Le thé pulvérisé 2 × a cependant affecté le rendement total et la masse des grains lors de l'essai 2022, attestant de l'importance de la fréquence des pulvérisations.

Ces résultats non-significatifs peuvent être potentiellement causés par une hétérogénéité du sol en champ, ou d'une non-efficacité des intrants, du moins dans les conditions de culture de l'expérience.

Ainsi, pour pallier le possible impact de l'hétérogénéité des sols à l'échelle du champ, une expérience dans des conditions contrôlées combinant certaines des modalités testées, a été réalisée. Pour ce faire, l'effet de ces différents intrants (thé, extrait, TM) sous des formes et applications diverses (injection, enrobage, pulvérisation) a été testé dans des conditions contrôlées (température et humidité). Cet effet a été évalué à l'aide de paramètres similaires à ceux étudiés en champ, ainsi que de paramètres complémentaires.

5.2. Résultats en serre

5.2.1. Caractérisation des sols

Les sols provenant du centre de Marbaix sont de type limon argileux (Tableau 11), de pH 7 et de capacité d'échange cationique de $12,7 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$. Ils ont un rapport carbone sur azote d'environ 10 indiquant une décomposition de la matière organique rapide. Il s'agit d'un sol assez caractéristique des parcelles agricoles en Europe.

Tableau 11 : Moyennes et écart-types des paramètres du sol de l'expérience en serre ($n = 3$)

Paramètre	pH	CEC ($\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$)	C/N	% sables	% limons	% argiles
Moyenne	7,1	12,7	9,8	13,75	66,55	19,70
Ecart-type	0,02	0,13	0,23	1,08	2,17	1,46

Les valeurs de concentration en minéraux totaux et en éléments échangeables ont été mesurées et varient peu entre les réplicats, excepté pour le zinc échangeable dont un des réplicats a une concentration 35 fois inférieure aux deux autres (Figure 38). Les variations minimales de concentration observées entre les réplicats peuvent être attribuées à l'hétérogénéité naturelle des sols. Les sols ne sont pas parfaitement uniformes et peuvent présenter des variations dans leur composition chimique à petite échelle.

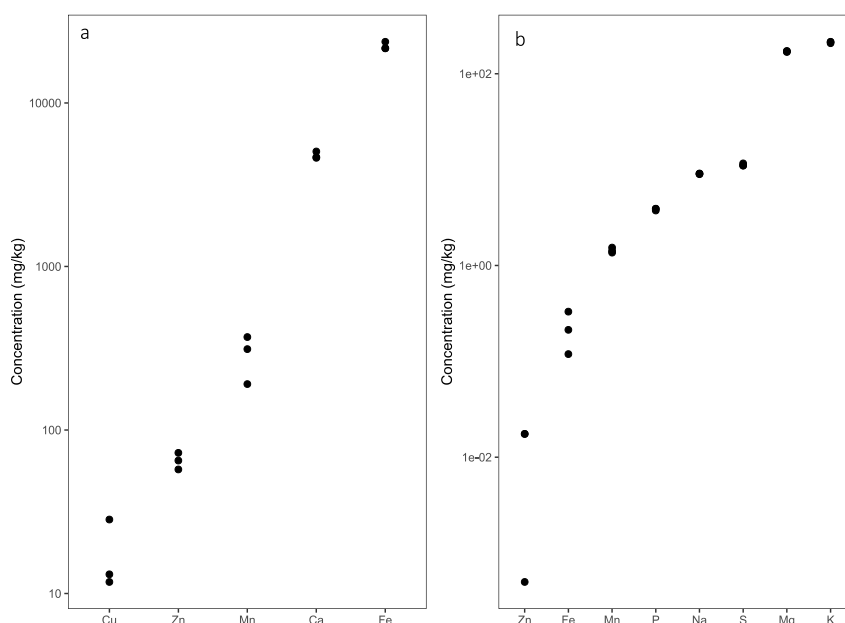


Figure 38 : Concentrations en minéraux totaux (a) et échangeables (b) dans les sols (échelle logarithmique, $n = 3$)

5.2.2. Caractérisation des intrants

Charge microbienne totale et charge fongique

Le thé 2 utilisé pour l'expérience en serre (produit à partir du lombricompost Pur Ver), a une charge microbienne totale de $3,3 \cdot 10^7$ cellules/mL, 6,1 fois inférieure à celle du thé 1 utilisé en champ (Figure 29a), mais une charge fongique nettement (536 fois) supérieure au thé 1 (Figure 30a). L'extrait avec adjuvants a une charge microbienne totale de $2,3 \cdot 10^7$ cellules/mL, soit 5,5 fois supérieure à l'extrait sans adjuvants utilisé en champ ($4,17 \cdot 10^6$ cellules/mL), mais inférieure au thé 2. La charge fongique reste supérieure pour le thé 2 par rapport à l'extrait avec adjuvants (Figure 30a). Les différences de charge totale et fongique dans ces intrants liquides sont, comme dit précédemment, fonction des conditions de production et du type de compost utilisé. L'ajout d'adjuvants et le processus de fermentation peuvent également jouer un rôle dans ces populations microbiennes. La différence de charge microbienne entre le thé 2 et l'extrait avec adjuvants par exemple, produits à partir du même compost des mêmes adjuvants, pourrait être la conséquence de l'étape d'oxydation réalisée pour le thé, permettant l'extraction des microorganismes durant 24 h par rapport à l'extrait pour lequel le compost est filtré après 30 minutes.

Pour les enrobages, les composts 2 et 3 ont respectivement une charge microbienne totale de $2,9 \cdot 10^7$ et $2,4 \cdot 10^7$ cellules/g de compost (1,2 fois supérieur pour le compost 2 ; Figure 29b), tandis que la tendance s'inverse au niveau fongique, où le compost 3 a une charge fongique 19 fois supérieure au compost 2 (Figure 30b). La différence de population microbienne peut être expliquée par le raisonnement expliqué précédemment.

Globalement, on peut voir que les charges microbiennes totales et fongiques suivent les mêmes tendances pour le thé 1 et le compost 1 : elles sont supérieures pour la charge totale, et inférieures pour la charge fongique, et le compost 1 fait partie de la composition du thé 1. La méthode de production du compost Johnson Su semble favoriser fortement la prolifération des microorganismes et notamment des organismes fongiques, par rapport à d'autres composts. La différence de quantité de microorganismes totale dans ces intrants peut influencer le contenu et le potentiel de libération des nutriments issus de la décomposition de la matière organique, des solutions et des enrobages. Il est ainsi intéressant de pouvoir comparer leurs contenus en minéraux (Figure 39) et de voir s'ils sont liés à la différence de charge microbienne totale.

Contenu des intrants en minéraux : composts et intrants liquides

Le compost 3 a des concentrations totales en minéraux supérieures au compost 2 excepté pour le fer et l'aluminium où la tendance est inversée (Figure 39a). Les concentrations totales en manganèse sont identiques pour les deux composts. Ainsi les champignons peuvent potentiellement avoir plus contribué à la libération de nutriments. Il faut également prendre en considération l'hétérogénéité potentielle des composts ayant été analysés, ayant été répliqués 2 fois pour les analyses. La différence microbienne totale peut également ne pas être suffisante pour significativement impacter la libération des nutriments.

Concernant les intrants liquides, les adjuvants seuls ont une concentration en minéraux plus basse que l'extrait de compost avec adjuvants et le thé de compost (thé 2), excepté pour le zinc où la concentration est supérieure pour les adjuvants (Figure 39b). Cette différence entre les adjuvants, l'extrait avec adjuvants et le thé semble cohérente puisque les trois intrants contiennent les mêmes adjuvants, mais les adjuvants seuls n'ont pas pu bénéficier des microorganismes apportés par le compost. Ainsi les microorganismes issus des composts peuvent décomposer la matière organique et en libérer des nutriments, dans le thé et l'extrait.

L'extrait de compost a une concentration supérieure au thé pour certains minéraux mesurés (Cu, Na, S) et pour le carbone organique dissous (Figure 39b). L'extrait a toutefois une charge microbienne 1,43 fois inférieure à celle du thé (Figure 29a). La différence en carbone organique dissous entre l'extrait avec adjuvants et le thé (1,4 fois supérieur dans l'extrait) peut être expliquée par le fait que l'oxydation a augmenté la consommation du carbone organique par les microorganismes, et donc la concentration en carbone organique a diminué, ou bien par la différence du processus d'extraction du DOC entre le thé et l'extrait avec adjuvants. La concentration en minéraux inférieure peut paraître surprenante car la dégradation de la matière organique libère des nutriments. Elle peut potentiellement être expliquée par l'utilisation de certains minéraux par les microorganismes, ou de la même façon que pour le DOC, c'est-à-dire par la différence du processus d'extraction entre les deux intrants.

Au vu des différences en charge microbienne totale, en charge fongique et en minéraux, il est intéressant d'évaluer comment les différents intrants vont agir sur le système sol-plante, sur la concentration en minéraux du sol, le prélèvement des plantes, la biomasse, etc. Par exemple, dans les intrants liquides, les adjuvants seuls ayant une concentration inférieure pour la quasi-totalité des minéraux, on peut se demander si cette modalité aura un impact moindre par rapport au thé et à l'extrait, ou bien s'il y aura un effet significativement différent des modalités entre elles et/ou avec les témoins ? On peut également se demander si, le thé 1 et le compost 1 ayant une charge microbienne totale et fongique supérieures, auront des effets plus significatifs que les autres thés et composts pour enrobage, ou bien si la charge fongique a plus d'importance sur les effets par exemple.

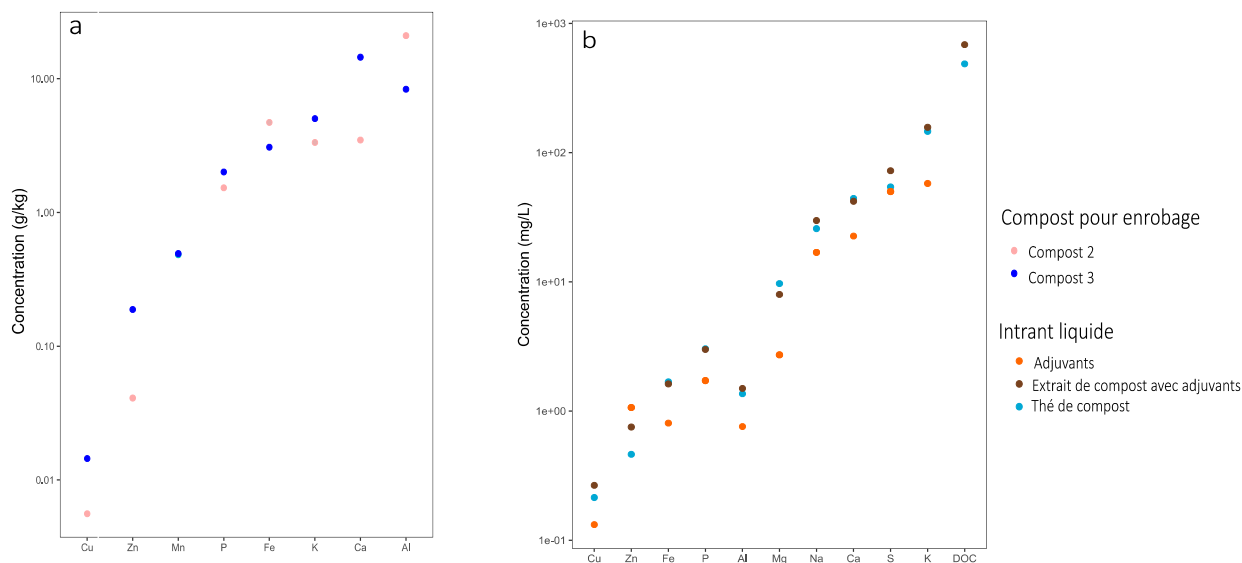


Figure 39 : Concentration en minéraux totaux dans les composts utilisés pour l'enrobage (a ; moyenne de 2 valeurs ; compost 2 = CMC, Compost 3 = lombricompost Pur Ver) et dans les intrants liquides (b), et carbone organique dissous (b ; DOC, moyenne de 2 valeurs) dans le thé et extrait avec adjuvants. Echelle logarithmique.

Effet des modalités sur la biomasse

La biomasse aérienne par plante a été évaluée en fonction des différentes modalités, comme pour l'essai en champ de 2023 (Figure 40a), ainsi que la biomasse racinaire par plant (Figure 40b). Les résultats ne montrent aucune différence significative et sont similaires à ceux obtenus dans l'essai en champ. Ceci montre qu'aucune modalité testée ne présente un effet sur la biomasse aérienne ou racinaire, ce qui contredit les observations de la littérature montrant des résultats souvent positifs du thé de compost (pulvérisation ou injection de thé, extrait, ou enrobage) sur la biomasse aérienne (Osama et Ali 2015; Pedrini et al. 2017). Les biomasses racinaires et aériennes ne sont pas fortement corrélées ($r = 0,24$; Figure 47 ; Figure A4). Ces deux paramètres ne présentent en effet pas toujours de corrélation, puisque la plante peut investir dans son système aérien ou racinaire en fonction des nutriments disponibles et de son environnement.

Les conditions de culture sont également à considérer lors de l'interprétation de ces résultats. En effet, les plantes sont cultivées dans des pots dont l'espace est plus restreint qu'en champ. Ainsi, ces conditions peuvent impacter le développement du système racinaire. De plus, la biomasse a été calculée par plante, le nombre de plantes variant entre 6 et 10 dans chaque pot. Ainsi, il pourrait y avoir un impact de compétition pour l'espace entre les plantes d'un même pot (Figure A5). La moyenne des biomasses aériennes est en effet inférieure pour les pots ayant un nombre maximal de plantes (10 par pot), en revanche le nombre de plantes par pot n'est pas significativement différent entre les modalités.

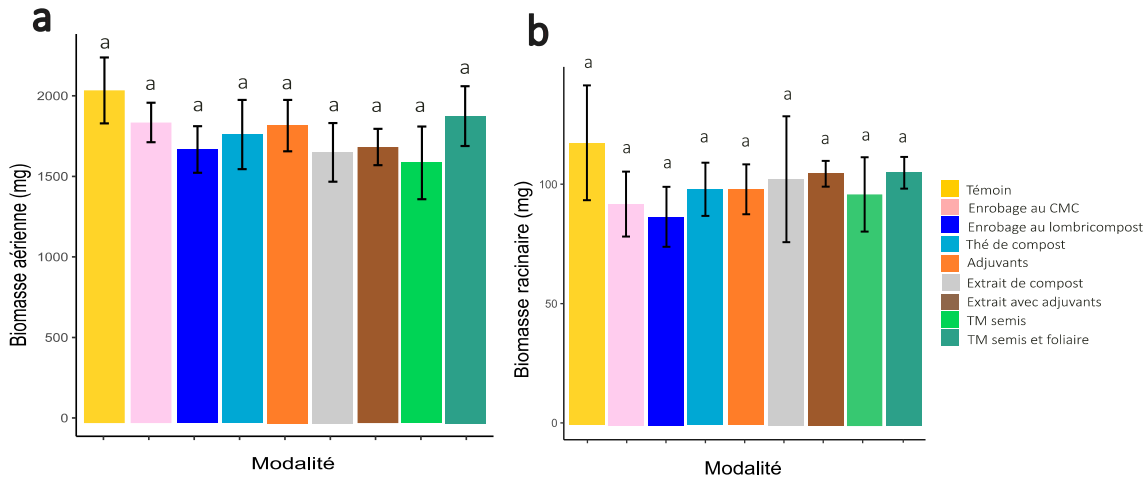


Figure 40 : Impact des différentes modalités sur la biomasse aérienne et racinaire par plant (n = 5)

Effets des traitements sur les minéraux du sol, de la solution du sol et de la plante

La concentration des éléments échangeables des sols a été évaluée en début et en fin d'expérience, en fonction des différentes modalités. Certains de ces éléments présentent des corrélations fortes comme le trio potassium-phosphore-magnésium qui ont des coefficients de Pearson supérieurs à 0,6 (Figure 41), et pour le phosphore échangeable avec le soufre échangeable ($r = 0,66$), lui-même avec le sodium ($r = 0,64$). Le fer et le manganèse sont peu corrélés avec d'autres éléments. La corrélation entre le phosphore et le potassium était forte pour les deux expériences en champ également, dans les grains et dans le sol (Figure 33 et Figure 36) et la corrélation entre le potassium et le phosphore avec le magnésium était également forte dans les grains, moins dans le sol en champ (Figure 33 et Figure 36). Cette corrélation entre le phosphore et le potassium peut être notamment liée à l'application d'engrais NPK pour les trois expériences.

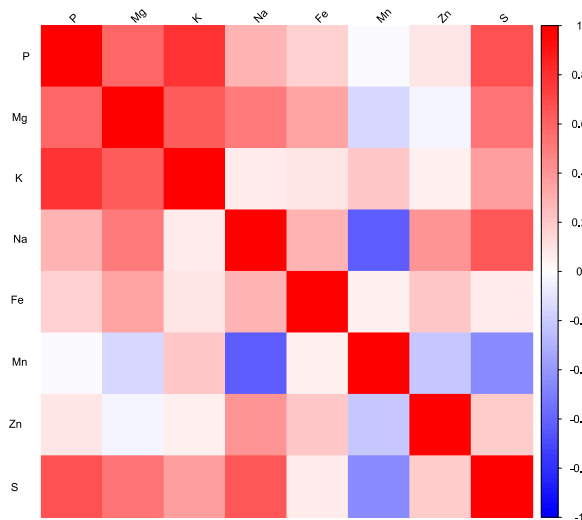


Figure 41 : Matrice de corrélation des éléments échangeables dans les sols (serre 2023) pour toutes les modalités confondues.

Dans le contexte d'évaluation des effets des différents intrants appliqués, il est intéressant d'évaluer leur impact sur le contenu en éléments échangeables du sol. Dans un premier temps, le magnésium échangeable a été analysé sur les sols des 45 pots. La concentration en magnésium n'a pas été affectée de façon significative par les différents intrants (Figure 42). La concentration en zinc échangeable a également été évaluée selon les différentes modalités, mais cette concentration n'a, tout comme pour le magnésium, pas été affectée significativement par les modalités (Figure 42) les variances étant parfois très grandes (modalité adjuvants par exemple).

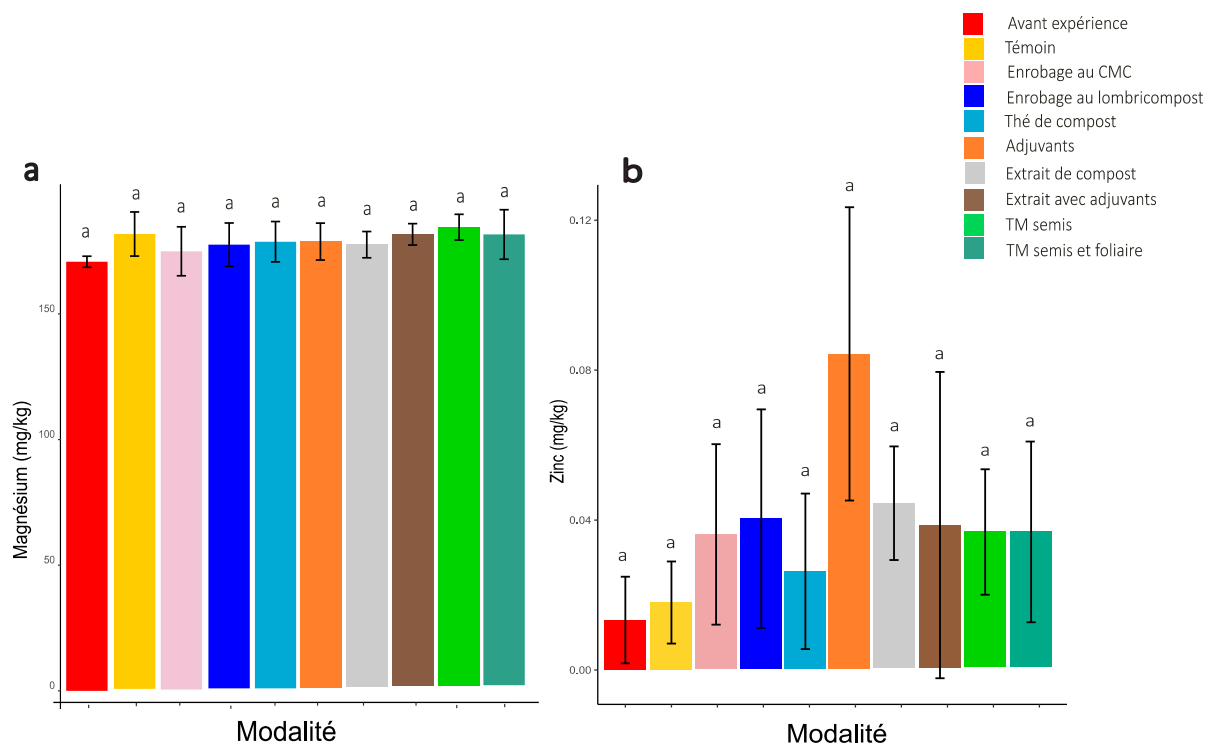


Figure 42 : Concentration en magnésium échangeable (a) et zinc échangeable (b) en fin d'expérience (serre 2023) mg/kg (n = 3 avant expérience ; n = 5 pour toutes les modalités confondues après expérience).

Concentration en minéraux dans la solution de sol

Les minéraux présents dans la solution de sol ont été mesurés à deux dates différentes (Figure 25) et certains présentent de très fortes corrélations (Figure 43). C'est le cas par exemple du quatuor magnésium-potassium-sodium-calcium dont les coefficients de Pearson sont supérieurs à 0,76. Le potassium et le phosphore ne sont en revanche ici pas fortement corrélés, contrairement à la concentration dans les grains, la concentration totale des sols en champ et en éléments échangeables en serre.

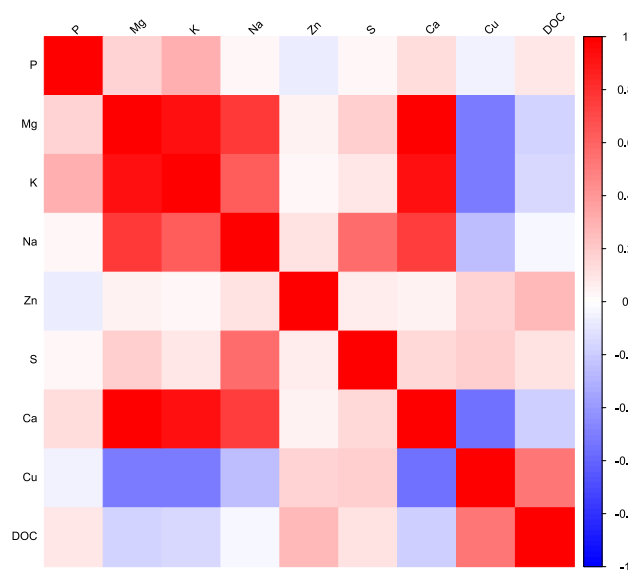


Figure 43 : Matrice de corrélation entre les minéraux présents dans la solution de sol (deux dates d'échantillonnage) pour toutes les modalités confondues.

La concentration en calcium des solutions de sols prélevées lors des deux dates a été mesurée. Lors de la première date, les modalités n'ont pas impacté significativement la concentration dans la solution de sol. En revanche, lors du second prélèvement, la concentration en calcium mesurée a été significativement impactée par les applications (Figure 44).

La différence de concentration en calcium (ici diminution) entre le premier et le second prélèvement de solution de sol peut être la conséquence de plusieurs phénomènes. Elle peut découler d'un prélèvement plus ou moins important de calcium de la plante (absorption du Ca^{2+}), d'un changement de pH (et donc de disponibilité notamment du calcium), d'un appauvrissement du calcium sur la CEC, de la lixiviation, ou encore une combinaison de ces paramètres.

Lors du second prélèvement, la modalité des adjuvants seuls avait une concentration inférieure à celle du témoin ($p < 0,05$). La concentration lors du premier prélèvement avait déjà une moyenne plus basse, bien que cette différence ne fût pas significative. Ce n'est pas une plus forte réduction de calcium dans la solution de sol entre les deux dates qui a causé cette différence significative pour les adjuvants par rapport au témoin, puisque la concentration en calcium a plus diminué en moyenne pour le témoin (3,53 fois inférieure pour le second prélèvement par rapport au premier), que pour les adjuvants (3,4 fois inférieure pour le second prélèvement). La cause de cette différence est difficilement explicable par la modalité, car le thé et l'extrait de compost n'ont pas été impactés de la même façon, or ils contiennent ces mêmes adjuvants. Cette différence pourrait par exemple être la conséquence d'une plus grande adsorption du calcium sur le complexe d'échange.

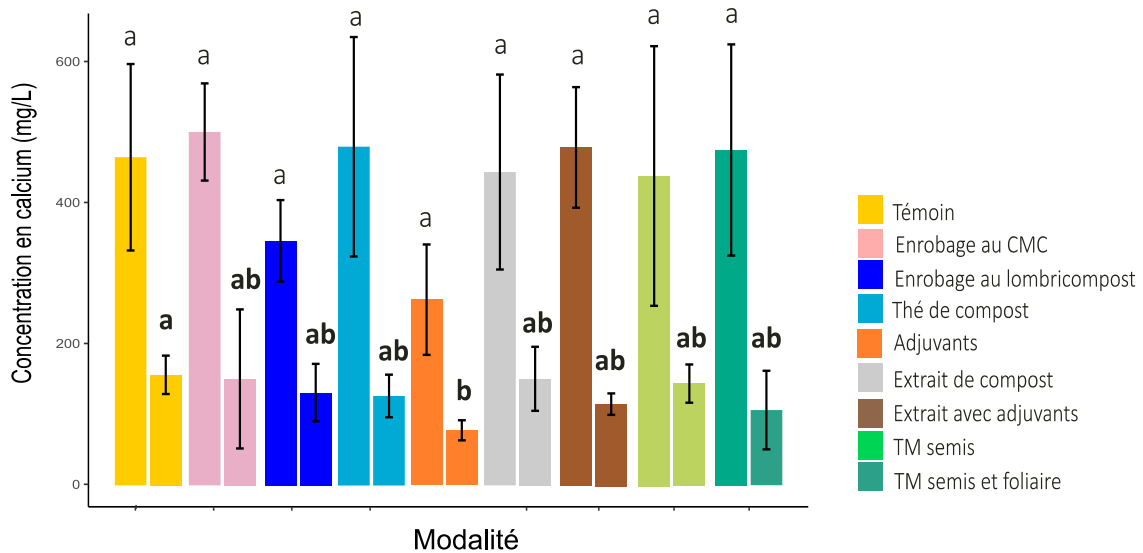


Figure 44 : Concentration en calcium dans la solution de sol en fonction de chaque modalité, et à deux dates différentes (premier histogramme = 1^{ère} date ; n = 3,4 ou 5)

La concentration en cuivre dans la solution de sol a également été mesurée pour les deux dates d'échantillonnage, mais celle-ci n'a pas été impactée significativement par les modalités (Figure 45). Entre les deux dates, la concentration en cuivre dans la solution de sol a augmenté, contrairement au calcium. Cette augmentation en cuivre n'est pas étonnante au vu des études rapportées dans la littérature (Arbalestrie et al. 2022).

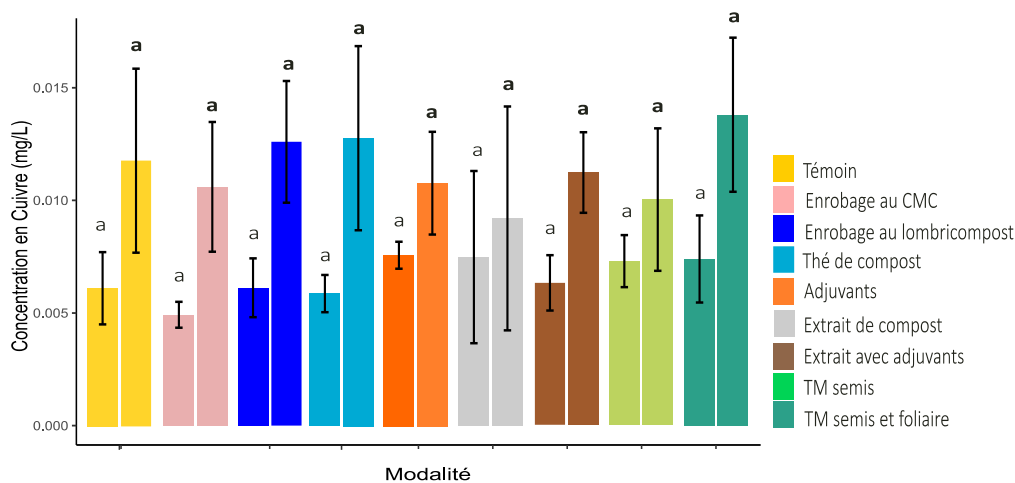


Figure 45 : Concentration en cuivre dans la solution de sol en fonction de chaque modalité, et à deux dates différentes (premier histogramme = 1^{ère} date ; n = 3,4 ou 5)

Lien entre les nutriments et le carbone organique dissous dans la solution de sol

Le carbone organique dissous dans la solution de sol ne présente pas de corrélation forte avec les minéraux analysés (corrélation la plus forte étant celle avec le cuivre ; coefficient = 0,53 ; Figure 43). Ce carbone organique dissous n'a pas été significativement impacté par les

différentes applications (Figure 46). Le carbone organique dissous n'étant ni impacté par les modalités, ni corrélé aux minéraux de la solution de sol, il ne pourrait pas expliquer les différences de minéraux de la solution de sol.

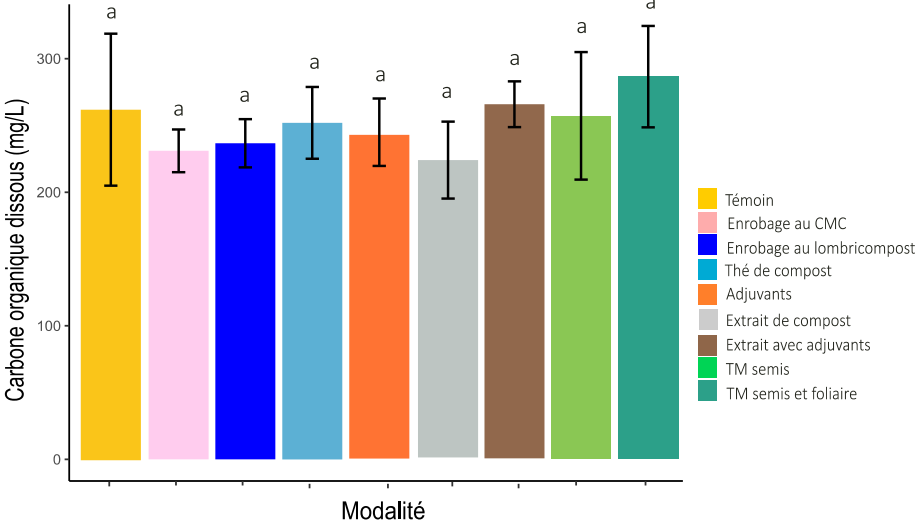


Figure 46 : influence des modalités sur la concentration en carbone organique dissous de la solution de sol (2^e date d'échantillonnage ; n = 5)

Effet des modalités sur le prélèvement des nutriments par les plantes

La concentration en minéraux totaux a été analysée sur l'ensemble des parties aériennes des plantes. Au niveau des minéraux dans la plante, il y a nettement moins de corrélations entre les minéraux (Figure 47), la corrélation la plus forte étant celle entre le cuivre et le zinc (coefficient de Pearson de 0,5).

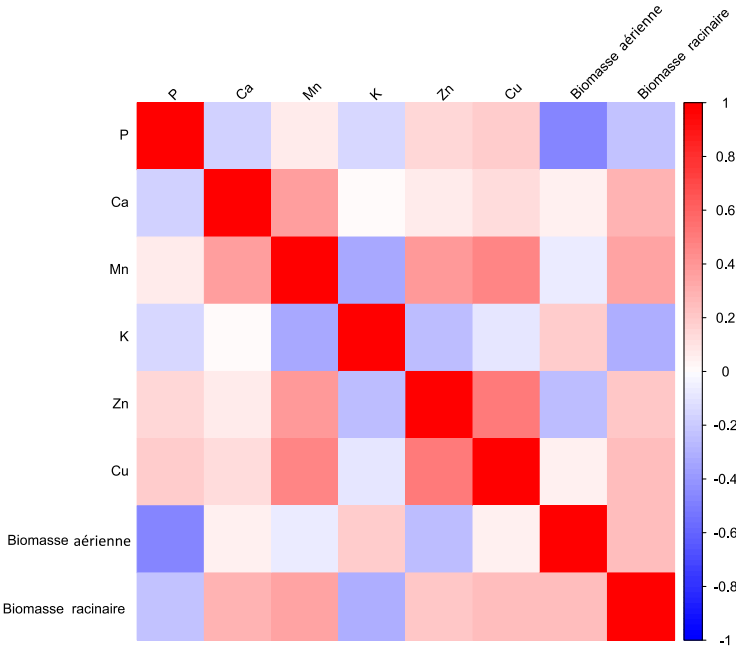


Figure 47: Matrice de corrélation entre les minéraux présents dans les parties aériennes pour les plantes toutes modalités confondues.

La concentration en calcium total des plantes n'a pas été impactée par les différentes applications (Figure 48), tout comme les autres minéraux analysés.

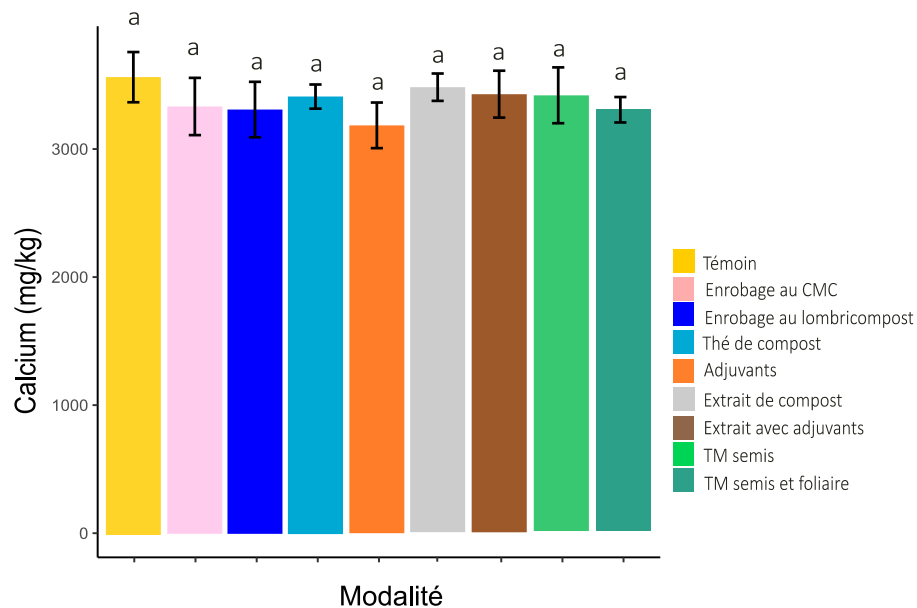


Figure 48 : Concentration en calcium dans les parties aériennes (mg/kg) en fonction des différentes modalités (n=5)

Relation entre la biomasse aérienne et le contenu en minéraux des plantes

Les corrélations entre la biomasse aérienne et le contenu en minéraux des plantes sont assez faibles ; Figure 47). La corrélation la plus forte de toutes est celle avec le phosphore ($r = -0,48$ et points dispersés ; Figure A6), mais reste faible. La relation avec le calcium par exemple est ultra faible (0,045).

5.2.3. Résumé de l'expérience en serre

L'expérience menée en serre n'a pas permis de montrer d'effet significatifs des modalités testées sur les paramètres chimiques et biologiques du sol et de la plante étudiés, à l'exception du calcium dans la solution de sol, pour lequel la modalité ne fournit pas d'explication claire. Ces résultats non significatifs peuvent être expliqués par plusieurs facteurs spécifiques à l'expérience.

Il est possible que les quantités d'intrants appliquées aient été insuffisantes pour observer des effets, en particulier dans des conditions de culture optimales où les plantes ne subissaient aucun stress, tel que le stress hydrique ou les carences en nutriments. L'utilisation d'un engrais NPK standard au début de l'expérience, par exemple, peut avoir masqué les éventuelles différences induites par les biointrants, en particulier pour les minéraux tels que l'azote, le phosphore et le potassium, qui n'ont pas été pris en compte dans les analyses.

De plus, les résultats de biomasse en serre peuvent avoir été affectés par l'espace limité du pot utilisé dans l'expérience, ce qui peut influencer la croissance racinaire. Il serait intéressant d'explorer d'autres paramètres racinaires tels que le diamètre et la longueur totale des racines, bien que ce dernier paramètre soit plus complexe à étudier à l'échelle d'un pot.

Enfin, une durée d'expérience plus longue pourrait potentiellement permettre d'observer des résultats qui n'ont peut-être pas été détectés lors de cette expérience de 3 mois. Il est possible que les effets des biointrants se manifestent progressivement sur le long terme et nécessitent une période plus étendue pour être pleinement observables.

6. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'efficacité de biointrants à base de compost, en utilisant différentes méthodes d'application (enrobage, pulvérisation, injection), et d'analyser leurs effets sur des paramètres chimiques et biologiques du sol et de la plante. Trois expériences ont été menées, deux en conditions naturelles (champ) et une en conditions contrôlées (serre). L'objectif principal était de participer à la recherche sur les mécanismes sous-jacents de l'action des biointrants et de contribuer ainsi à leur développement.

Les principaux résultats de cette étude ont montré une absence d'effet des biointrants à base de compost, tant au niveau chimique qu'au niveau biologique, à l'exception du thé de compost pulvérisé deux fois, qui a présenté un effet significatif sur le rendement total et la masse des grains, mettant en évidence l'importance de la fréquence d'application. La méthode de pulvérisation, la différence de population microbienne (supérieure aux autres intrants liquides) ou la fréquence d'application pourraient potentiellement expliquer cet effet observé par rapport à l'absence d'effet lors du second essai en champ (combinant enrobage de compost et injection d'extrait) et de l'essai en serre (combinant enrobages, injections d'extrait avec et sans adjuvants, et de thé de compost). L'absence d'effets observés dans ces expériences peut être attribuée à divers facteurs tels que l'hétérogénéité des sols sur le terrain, les quantités insuffisantes d'intrants, l'absence de résultats à court terme, l'absence de stress induit et la limitation spatiale des racines dans les pots expérimentaux.

En guise de perspectives, il serait intéressant de mener des analyses avec des doses plus élevées et dans des conditions de stress afin d'évaluer si dans de telles circonstances, l'application de biointrants peut avoir une plus-value sur le sol ou la plante. L'étude de paramètres racinaires et de paramètres de rendement supplémentaires serait également pertinente, ainsi qu'une étude à plus long terme. Enfin, réaliser un bilan de masse des nutriments en prenant en compte les intrants, les nutriments initialement présents dans le sol et les prélèvements effectués permettraient d'évaluer plus précisément l'apport des biointrants et leur impact sur le cycle des nutriments dans les systèmes agricoles. Ces perspectives contribueraient à approfondir notre compréhension des effets des biointrants et à optimiser leur utilisation dans une perspective de durabilité agricole.

7. Références

- Abiven, Samuel, Safya Menasseri, et Claire Chenu. 2009. « The Effects of Organic Inputs over Time on Soil Aggregate Stability – A Literature Analysis ». *Soil Biology and Biochemistry* 41 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>.
- Afzal, Irfan, Talha Javed, Masoume Amirkhani, et Alan G. Taylor. 2020. « Modern Seed Technology: Seed Coating Delivery Systems for Enhancing Seed and Crop Performance ». *Agriculture* 10 (11): 526. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110526>.
- Akhtar, Mohammad, et Irshad Mahmood. 1994. « Potentiality of Phytochemicals in Nematode Control: A Review ». *Bioresource Technology* 48 (3): 189-201. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90146-5](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90146-5).
- Alabouvette, Claude, et Christelle Cordier. 2018. « Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes ». *Innovations Agronomiques* 69: np. <https://doi.org/10.15454/UIJG8L>.
- Amy, Charlotte. 2021. « Optimiser la nutrition azotée et phosphorée du colza pour une production durable via l'utilisation de biointrants améliorant le fonctionnement du phytobiome ». Phdthesis, Normandie Université. <https://theses.hal.science/tel-03609145>.
- « Appel à projet CERES Agricultures en Transition ». 2022. Grez-Doiceau.
- Arbalestrie, Bryan, Julie Falys, Nathan Bemelmans, Adil Thami, Laurence Monin, Elodie Devos, et Yannick Agnan. 2022. « Rare Earth Elements in an Intercropping Cover Crop to Evaluate the Trace Element Transfer from Soil to Plant ». *Biogeochemistry* 161 (3): 373-87. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-00989-7>.
- Ayuso, M, et T Hernandez. 1996. « Stimulation of barley growth and nutrient absorption by humic substances originating from various organic materials - ScienceDirect ». 1996. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852496000648?via%3Dihub>.
- Baize, Denis. 2018. *GUIDE DES ANALYSES EN PÉDOLOGIE*. Savoir faire. Quae.
- Baldantoni, Daniela, Anna Leone, Paola Iovieno, Luigi Morra, Massimo Zaccardelli, et Anna Alfani. 2010. « Total and Available Soil Trace Element Concentrations in Two Mediterranean Agricultural Systems Treated with Municipal Waste Compost or Conventional Mineral Fertilizers ». *Chemosphere* 80 (9): 1006-13. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.033>.
- Bhokal, A., F. A. Nicholson, et B. J. Chambers. 2009. « Organic Carbon Additions: Effects on Soil Bio-Physical and Physico-Chemical Properties ». *European Journal of Soil Science* 60 (2): 276-86. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01105.x>.
- Bhupenchandra, Ingudam, Sunil Kumar Chongtham, Elangbam Lamalakshmi Devi, Ramesh R., Anil Kumar Choudhary, Menaka Devi Salam, Manas Ranjan Sahoo, et al. 2022. « Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance ». *Frontiers in Plant Science* 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.967665>.
- Bond, R. D., et J. R. Harris. 1964. « The Influence of the Microflora on the Physical Properties of Soils. I. Effects Associated with Filamentous Algae and Fungi ». *Soil Research* 2 (1): 111-22. <https://doi.org/10.1071/sr9640111>.
- Bonnot, Titouan. 2016. « Réponse du grain de blé à la nutrition azotée et soufrée : étude intégrative des mécanismes moléculaires mis en jeu au cours du développement du

- grain par des analyses -omiques ». Phdthesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. <https://theses.hal.science/tel-01544587>.
- Carter, M. R., J. B. Sanderson, et J. A. MacLeod. 2004. « Influence of Compost on the Physical Properties and Organic Matter Fractions of a Fine Sandy Loam throughout the Cycle of a Potato Rotation ». *Canadian Journal of Soil Science* 84 (2): 211-18. <https://doi.org/10.4141/S03-058>.
- Christensen, B. T., et A. E. Johnston. 1997. « Chapter 18 Soil Organic Matter and Soil Quality— Lessons Learned from Long-Term Experiments at Askov and Rothamsted ». In *Developments in Soil Science*, édité par E. G. Gregorich et M. R. Carter, 25:399-430. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80045-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80045-1).
- CIRAD. 2021. « Les intrants biologiques en plein essor en Amérique du Sud ». CIRAD. 15 juin 2021. <https://www.cirad.fr/les-actualites-du-cirad/actualites/2021/perspective-n-55-intrants-biologiques-en-amerique-du-sud>.
- Comment faire du thé de compost. s.d. wikiHow. Consulté le 25 mai 2023. <https://fr.wikihow.com/faire-du-th%C3%A9-de-compost>.
- « Compost Applications ». 2012. 2012. <http://theupturnedspade.blogspot.com/2012/04/compost-applications.html>.
- Corder. 2023. « Produits autorisés | CORDER ASBL ». 2023. <https://www.corder.be/fr/comite-regional-phytoutilisateurs-professionnels-agricoles-et-horticoles/produits-autorises>.
- Daghman, Mohamed Ibrahim. 2005. « Delivery Systems of Trichoderma Inoculants for the Control of Rhizoctonia Diseased in Brassica Rapa ». Malaysia. http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/59/1/1000548931_t_fp_2005_37.pdf.
- De Corato, Ugo. 2020. « Agricultural Waste Recycling in Horticultural Intensive Farming Systems by On-Farm Composting and Compost-Based Tea Application Improves Soil Quality and Plant Health: A Review under the Perspective of a Circular Economy ». *Science of The Total Environment* 738 (octobre): 139840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139840>.
- Demarle, Olivier, et Marie-Emmanuelle Saint-Macary. 2021. « Biostimuler l'interface sol-plante pour l'amélioration des productions végétales ».
- Desfemmes, Clémentine. 2013. « Le pralinage ». 10 novembre 2013. <https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/pralinage-arbres-arbustes-racines,1251.html>.
- Dinesh, R, S Hamza, V Srinivasan, et A Manjusha. 2010. « Short-Term Incorporation of Organic Manures and Biofertilizers Influences Biochemical and Microbial Characteristics of Soils under an Annual Crop [Turmeric (Curcuma Longa L.)] | Elsevier Enhanced Reader ». 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.108>.
- Efthimiadou, Aspasia, Nikolaos Katsenios, Sofia Chanioti, Marianna Giannoglou, George Katsaros, et Nikola Djordjevik. 2020. « Effect of foliar and soil application of plant growth promoting bacteria on growth, physiology, yield and seed quality of maize under Mediterranean conditions ». Scientific reports. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1038/s41598-020-78034-6.pdf>.
- El-Din, Azza A Ezz, et S F Hendawy. 2010. « Effect of Dry Yeast and Compost Tea on Growth and Oil Content of Borago Officinalis Plant ».
- Elsas, J. D. van, et C. E. Heijnen. 1990. « Methods for the Introduction of Bacteria into Soil: A Review ». *Biology and Fertility of Soils* 10 (2): 127-33. <https://doi.org/10.1007/BF00336248>.

- Eudoxie, Gaius, et Micah Martin. 2019. « Compost Tea Quality and Fertility ». In *Organic Fertilizers - History, Production and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86877>.
- European Commission. 2023. « Pesticides and Plant Protection ». European Commission. 28 février 2023. https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides_en.
- FAO. 2023. « Outils de gestion durable des terres | Portail d'information sur les sols | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ». Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 2023. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/outils-de-gestion-durable-des-terres/fr/>.
- Gan-Mor, Samuel, et Matthews Graham. 2002. « Recent Developments in Sprayers for Application of Biopesticides an Overview ». 2002. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00277-5](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00277-5).
- Garcia-Gonzalez, Jesus, et Milton Sommerfeld. 2016. « Biofertilizer and Biostimulant Properties of the Microalga *Acutodesmus Dimorphus* ». *Journal of Applied Phycology* 28 (2): 1051-61. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>.
- Goulet, Frédéric. 2021. « Intrants biologiques et politiques agricoles en Amérique du Sud : entre ruptures et continuités ». *Perspective*, n° 55: 1-4. <https://doi.org/10.19182/perspective/36381>.
- Hargreaves, J.C, M.S. Adl, et PR Warman. 2013. « The Effects of Municipal Solid Waste Compost And Compost Tea on Mineral Element Uptake And Fruit Quality of Strawberries ». *Compost: science & utilization*. England. <https://sci-hub.st/10.1080/1065657x.2009.10702406>.
- Hargreaves, Jennifer C, M Sina Adl, et Philip R Warman. 2009. « Are Compost Teas an Effective Nutrient Amendment in the Cultivation of Strawberries? Soil and Plant Tissue Effects ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89 (3): 390-97. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3456>.
- Henry, R. 1995. *Potato Compost: Production and Use*. Charlottetown.
- Höflich, G., W. Wiehe, et G. Kühn. 1994. « Plant Growth Stimulation by Inoculation with Symbiotic and Associative Rhizosphere Microorganisms ». *Experientia* 50 (10): 897-905. <https://doi.org/10.1007/BF01923476>.
- Ingham, Elaine. 2005. « The Compost Tea Brewing Manual ». Oregon. <https://biblioteca.matinhocheiroso.com/Compost%20Tea%20Brewing%20Manual,%20The%20-%20Elaine%20R.%20Ingham%20-.pdf>.
- Jean-François, BRIAT. 2020. « Nourrir les plantes en polluant moins ? » *Encyclopédie de l'environnement* (blog). 16 juin 2020. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/nourrir-plantes-polluant-moins/>.
- Joshi, Deeksha, K. S. Hooda, J. C. Bhatt, B. L. Mina, et H. S. Gupta. 2009. « Suppressive Effects of Composts on Soil-Borne and Foliar Diseases of French Bean in the Field in the Western Indian Himalayas ». *Crop Protection* 28 (7): 608-15. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.03.009>.
- Journal officiel de l'Union européenne. 2009. « Directive 2009/128/CE du parlement et du conseil. », 24 novembre 2009.
- Le Campion, A., F.-X. Oury, E. Heumez, et B. Rolland. 2020. « Conventional versus Organic Farming Systems: Dissecting Comparisons to Improve Cereal Organic Breeding

- Strategies ». *Organic Agriculture* 10 (1): 63-74. <https://doi.org/10.1007/s13165-019-00249-3>.
- Lombricomposteur. 2016. 1000Bxl En Transition. 1 janvier 2016. <http://1000bxlenttransition.be/all-project-list/lombricomposteur/>.
- Lynch, J. M., et Elaine Bragg. 1985. « Microorganisms and Soil Aggregate Stability ». In *Advances in Soil Science*, édité par B. A. Stewart, 133-71. *Advances in Soil Science*. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3_3.
- Maçik, Mateusz, Agata Gryta, et Magdalena Frąc. 2020. « Chapter Two - Biofertilizers in Agriculture: An Overview on Concepts, Strategies and Effects on Soil Microorganisms ». In *Advances in Agronomy*, édité par Donald L. Sparks, 162:31-87. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>.
- Maeder, Paul, Andreas Fliessbach, David Dubois, Lucie Gunst, Padruot Fried, et Urs Niggli. 2002. « Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming ». *Science* 296 (5573): 1694-97. <https://doi.org/10.1126/science.1071148>.
- Mahanty, Trishna, Surajit Bhattacharjee, Madhurankhi Goswami, Purnita Bhattacharyya, Bannhi Das, Abhrajyoti Ghosh, et Prosun Tribedi. 2017. « Biofertilizers: A Potential Approach for Sustainable Agriculture Development ». *Environmental Science and Pollution Research* 24 (4): 3315-35. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>.
- Mahmud, Aliyu, Sudhir Upadhyay, Abhishek Srivastava, et Ali Bhojiya. 2021. « Biofertilizers: A Nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress ». *Current Research in Environmental Sustainability* 3 (juillet). <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100063>.
- Min Jeong, Kim, Chang Shim Ki, Park Jong Ho, Hong Sung Jun, et Kim Jin Ho. 2015. « Effect of Aerated Compost Tea on the Growth Promotion of Lettuce, Soybean, and Sweet Corn in Organic Cultivation », 2015. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4564151/>.
- Moenne-Loccoz, Yvan, Agathe Mini, Rohan Richard, Jordan Valente, Claire Prigent-Combaret, et Jacques LE Gouis. 2019. « INTERACTIONS RACINES x RHIZOBACTERIES ET LEUR VARIABILITE GENETIQUE CHEZ LE BLE ».
- Moreno Flores, Osvaldo. 2008. « Agricultura Urbana: Nuevas Estrategias de Integración Social y Recuperación Ambiental en la Ciudad. » <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117766>.
- Mujeeb, Fakhar, Abid Ali, Muhammad Amjad Qureshi, Ghulam Sarwar, Muhammad Asif Ali, Hina Javed, Munazza Rafique, Fraza Ijaz, et Shabana Ehsan. 2022. « Comparative Study of Application Methods of Biofertilizer for Growth Enhancement of Cereals ».
- Nasef, M, A Shaben, et A El Hamid. 2009. « EFFECT OF COMPOST, COMPOST TEA AND BIOFERTILIZER APPLICATION ON SOME CHEMICAL SOIL PROPERTIES AND RICE PRODUCTIVITY UNDER SALINE SOIL CONDITION. » https://jacb.journals.ekb.eg/article_90823_591aac2912be56c73f43ee04ba71293.pdf.
- Osama, A, et M Ali. 2015. « Role of Humic Substances and Compost Tea in Improvement of Endogenous Hormones Content, Flowering and Yield and Its Components of Faba Bean (*Vicia Faba L.*) ». *Annals of Agricultural Science, Moshtohor* 53 (3): 373-84. <https://doi.org/10.21608/assjm.2015.109889>.
- Owen, D, A.P. Williams, et G.W. Griffith. 2014. « Use of Commercial Bio-Inoculants to Increase Agricultural Production through Improved Phosphorous Acquisition | Elsevier Enhanced Reader ». 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.012>.

- Pedrini, Simone, Jason Stevens, David J. Merritt, et Dixon Kingsley. 2017. « Seed Coating: Science or Marketing Spin? | Elsevier Enhanced Reader ». février 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.11.002>.
- Pierart, Antoine. 2017. « Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Bioamendments in the Transfer and Human Bioaccessibility of Cd, Pb, and Sb Contaminant in Vegetables Cultivated in Urban Areas ». Phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III. <https://theses.hal.science/tel-01559305>.
- Preininger, Claudia, Ursula Sauer, Ana Bejarano, et Teresa Berninger. 2018. « Concepts and Applications of Foliar Spray for Microbial Inoculants ». *Applied Microbiology and Biotechnology* 102 (17): 7265-82. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9173-4>.
- Przystalski, M., A. Osman, E. M. Thiemt, B. Rolland, L. Ericson, H. Østergård, L. Levy, et al. 2008. « Comparing the Performance of Cereal Varieties in Organic and Non-Organic Cropping Systems in Different European Countries ». *Euphytica* 163 (3): 417-33. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9715-4>.
- Radja Commare, R., R. Nandakumar, A. Kandam, S. Suresh, M. Bharathi, T. Raguchander, et R. Samiyappan. 2002. « Pseudomonas Fluorescens Based Bio-Formulation for the Management of Sheath Blight Disease and Leafhopper Insect in Rice ». *Crop Protection* 21 (8): 671-77. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00020-0).
- Rakotoarisoa, Njato Mickaël, Yasuhiro Tsujimoto, et Aung Zaw Oo. 2020. « Dipping Rice Seedlings in P-Enriched Slurry Increases Grain Yield and Shortens Days to Heading on P-Deficient Lowlands in the Central Highlands of Madagascar ». *Field Crops Research* 254 (septembre): 107806. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107806>.
- Sánchez, Óscar J., Diego A. Ospina, et Sandra Montoya. 2017. « Compost Supplementation with Nutrients and Microorganisms in Composting Process ». *Waste Management* 69 (novembre): 136-53. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>.
- Scheuerell, Steve, et Walter Mahaffee. 2002. « Compost Tea: Principles and Prospects For Plant Disease Control ». *Compost Science & Utilization* 10 (4): 313-38. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702095>.
- Schiffers, Bruno, et J. Fraselle. 1982. « L'enrobage des semences: perspectives actuelles et futures. » 88 (janvier).
- Scott, James M. 1989. « Seed Coatings and Treatments and Their Effects on Plant Establishment ». In *Advances in Agronomy*, édité par N. C. Brady, 42:43-83. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60523-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60523-4).
- Service public de l'assainissement francilien. 2004. « Les propriétés du sol | SEINE AVAL ». 5 mai 2004. <https://bouesseineaval.siaap.fr/?p=26>.
- Service public de Wallonie. 2023. « Géoportail de la Wallonie ». SPW. 2023. <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=175345.31724556227,177882.6764869474,157056.1749407448,157910.7808166232>.
- Shaban, Hatam, et Bahman Fazeli-Nasab. 2015. « An Overview of the Benefits of Compost tea on Plant and Soil Structure ». *Advances in BioResearch* 6 (février): 154-58. <https://doi.org/10.15515/abr.0976-4585.6.1.154158>.
- Siddiqui, Yasmeen, Sariah Meon, Razi Ismail, Mawardi Rahmani, et Asgar Ali. 2008. « Bio-Efficiency of Compost Extracts on the Wet Rot Incidence, Morphological and Physiological Growth of Okra (*Abelmoschus Esculentus* [(L.) Moench]) ». *Scientia Horticulturae* 117 (1): 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.03.008>.
- Siddiqui, Yasmeen, Sariah Meon, Ismail Razi, et Rawardi Rahmani. 2008. « Bio-Potential of Compost Tea from Agro-Waste to Suppress *Choanephora Cucurbitarum* L. the Causal

- Pathogen of Wet Rot of Okra | Elsevier Enhanced Reader ». décembre 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.11.008>.
- Sink, Kenneth C., et William E. Grey. 1999. « A Root-Injection Method to Assess Verticillium Wilt Resistance of Peppermint (*Mentha × Piperita* L.) and Its Use in Identifying Resistant Somaclones of Cv. Black Mitcham ». *Euphytica* 106 (3): 223-30. <https://doi.org/10.1023/A:1003591908308>.
- Sloan, John P. 1994. *Tree Planters' Notes*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Smita, Tale, et Sangita Ingole. 2015. « A Review on Role of Physico-Chemical Properties in Soil Quality », 10.
- SPW. 2018. « Pluviométrie - État de l'environnement wallon ». Etat de l'environnement wallon. 2018. http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eew/contents/indicatorsheets/PHYS 1.html.
- Tessier, D, Yves Le Bissonais, et Etienne Dambrine. 1996. « Qualité chimique et physique des sols : spatiale et évolution. » *Etude et Gestion des Sols* 3 (janvier): 229-44.
- Therond, Olivier, Jean-Roger Estrade, Richard Guy, et Michel Duru. 2017. « Caractériser la diversité des formes d'agriculture : au delà de l'opposition entre bio et conventionnel ». *sfecologie.org*. 2017. <https://sfecologie.org/regard/r74-sept-2017-formes-agriculture-michel-duru-et-al/>.
- Thomas, Lebin, et Ishwar Singh. 2019. « Microbial Biofertilizers: Types and Applications ». In *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*, édité par Bhoopander Giri, Ram Prasad, Qiang-Sheng Wu, et Ajit Varma, 1-19. Soil Biology. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_1.
- Timmusk, Salme, Lawrence Behers, Julia Muthoni, Anthony Muraya, et Anne-Charlotte Aronsson. 2017. « Perspectives and Challenges of Microbial Application for Crop Improvement ». *Frontiers in Plant Science* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00049>.
- Trimmer, Mark. 2017. « Dunham Trimmer – Biological Control Industry ». 2017. <https://dunhamtrimmer.com/>.
- Vessey, J.K. 2003. « Plant Growth Promoting Rhizobacteria as Biofertilizers ». *Plant and Soil* 255 (2): 571-86. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>.
- Walmsley, Alena, et Artemi Cerdà. 2017. « Soil macrofauna and organic matter in irrigated orchards under Mediterranean climate ». *Biological Agriculture & Horticulture* 33 (4): 247-57. <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1336486>.
- Wani, Sartaj, Subhash Chand, et Tahir Ali. 2013. « Potential Use of Azotobacter chroococcum in Crop Production: An Overview ». *Current Agriculture Research Journal* 1 (1): 35-38. <https://doi.org/10.12944/CARJ.1.1.04>.
- Welke, Sylvia E. 2005. « The Effect of Compost Extract on the Yield of Strawberries and the Severity of Botrytis cinerea ». *Journal of Sustainable Agriculture* 25 (1): 57-68. https://doi.org/10.1300/J064v25n01_06.
- Wright, Christopher, Andrii P. Gryganskyi, et Gregory Bonito. 2016. « Fungi in Composting ». In *Fungal Applications in Sustainable Environmental Biotechnology*, édité par Diane Purchase, 3-28. Fungal Biology. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42852-9_1.
- Xicluna, Pascal. 2022. « Qu'est-ce que le biocontrôle ? » Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. 2022. <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrole>.

- XLSTAT. s. d. « Test non-paramétrique sur k échantillons indépendants: test de Kruskal-Wallis ». XLSTAT, Your data analysis solution. Consulté le 4 juin 2023. <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/test-non-parametrique-sur-k-echantillons-independants-test-de-kruskal-wallis>.
- Zaccardelli, M., D. Perrone, A. Del Galdo, I. Giordana, G. Villari, et M. Bianco. 2006. « Multidisciplinary approach to validate compost use in vegetable crop systems in campania region (italy): effect of compost fertilization on processing tomato in field cultivation. » *Acta Horticulturae*, n° 700 (janvier): 285-88. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.700.50>.
- Znaïdi, Ibrahim El Akram, et Mohamed BEN Khedher. 2002. « Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes ».

8. Annexes

Tableau A1: Bactéries utilisées dans la production des biofertilisants microbiens (bioinoculants ; Thomas et Singh 2019)

Group of biofertilizers	Sub-group	Examples
Nitrogen-fixing	Free-living	<i>Anabaena</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Beijerinckia</i> , <i>Derxia</i> , <i>Aulosira</i> , <i>Tolypothrix</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Stigonema</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Rhodospseudomonas</i> , <i>Rhodospirillum</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Chromatium</i> , and <i>Bacillus polymyxa</i>
	Symbiotic	Rhizobia (<i>Rhizobium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Sinorhizobium</i> , <i>Azorhizobium</i> <i>Mesorhizobium</i> <i>Allorhizobium</i>), <i>Frankia</i> , <i>Anabaena azollae</i> , and <i>Trichodesmium</i>
	Associative	<i>Azospirillum</i> spp. (<i>A. brasilense</i> , <i>A. lipoferum</i> , <i>A. amazonense</i> , <i>A. halopraeferens</i> , and <i>A. irakense</i>), <i>Acetobacter diazotrophicus</i> , <i>Herbaspirillum</i> spp., <i>Azoarcus</i> spp., <i>Alcaligenes</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Klebsiella</i> , and <i>Pseudomonas</i>
Phosphorus (microphos)	Phosphate-solubilizing	<i>Bacillus megaterium</i> var. <i>phosphaticum</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. circulans</i> , <i>B. polymyxa</i> , <i>Pseudomonas striata</i> , <i>Penicillium</i> spp., <i>Aspergillus awamori</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Agrobacterium</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Aereobacter</i> , <i>Flavobacterium</i> , and <i>Erwinia</i>
	Phosphate-mobilizing	Arbuscular mycorrhiza (<i>Glomus</i> sp., <i>Gigaspora</i> sp., <i>Acaulospora</i> sp., <i>Scutellospora</i> sp., and <i>Sclerocystis</i> sp.), ectomycorrhiza (<i>Laccaria</i> spp., <i>Pisolithus</i> spp., <i>Boletus</i> spp., <i>Amanita</i> spp.), ericoid mycorrhiza (<i>Pezizella ericae</i>), and orchid mycorrhiza (<i>Rhizoctonia solani</i>)
Micronutrients	Potassium solubilizing	<i>Bacillus edaphicus</i> , <i>B. mucilaginosus</i> , and <i>Paenibacillus glucanolyticus</i>
	Silicate and zinc solubilizing	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Thiobacillus thiooxidans</i> , and <i>Saccharomyces</i> sp.
Growth promoting	Plant growth-promoting rhizobacteria	<i>Agrobacterium</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Arthrobacter</i> , <i>Actinoplanes</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Erwinia</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Amorphosporangium</i> , <i>Cellulomonas</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Streptomyces</i> , and <i>Xanthomonas</i>

Tableau A2 : Préparation, interventions et fertilisations lors de l'expérience en champ (2022)

	Date	Machine	Intrant et dose		Commentaire
Préparation de la terre	14-oct	Terrano dent ULD			Profondeur travail 15 cm
Semis	14-oct	Horsch Express	KWS Ultim	125 kg/ha	
Autres interventions	20-oct		Méthaldéhyde	3 kg/ha	Anti-limaces
Fertilisation 1	05-mars		N39	150 l/ha	
			Acide Humique	10 l/ha	
Fertilisation 2	14-mars		Vinatec	150 kg/ha	
Désherbages	28-mars		Cabri	0.25 g/ha	
			Axial	0.9 l/ha	
			TMF	0.5 l/ha	
Fertilisation 3	30-mars		Vinatec	150 kg/ha	
Fertilisation 4	31-mars		N39	150 l/ha	
			ATS	5 l/ha	
			Acide humique	3 l/ha	
			Mélasse	1 l/ha	
Pulvérisation 1	14-mai		Extraits vg	Extrait fluide ortie	10 l/ha
			Thé compost	TCO	100 l/ha
			Fongicide	Caramba	1.2 l/ha
			Fongicide 1/2	Caramba	0.5 l/ha
Pulvérisation 2	30-mai		Extraits vg	Décoction prêle	10 l/ha
			Thé compost	TCO	100 l/ha
			Fongicide	Prosaro	1 l/ha
			Fongicide 1/2	Prosaro	0.3 l/ha

TCO: Thé de compost oxygéné, production à la ferme

Tableau A3 : Rendement moyen et PDMG moyen pour les applications de thé (1x ou 2x)

Paramètre mesuré	TC 2 x	TC 1 x
Rendement moyen (kg/ha)	11696	9106
PDMG moyen (g)	44,7	42,6

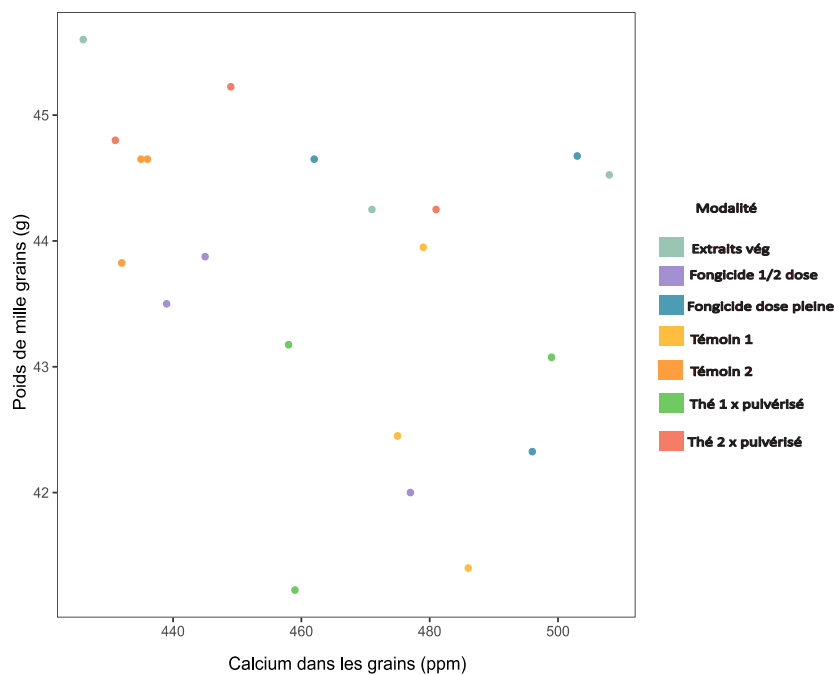


Figure A1 : Poids de mille grains (g) en fonction de leur concentration en calcium (mg/kg) de l'essai 2022 avec n = 3

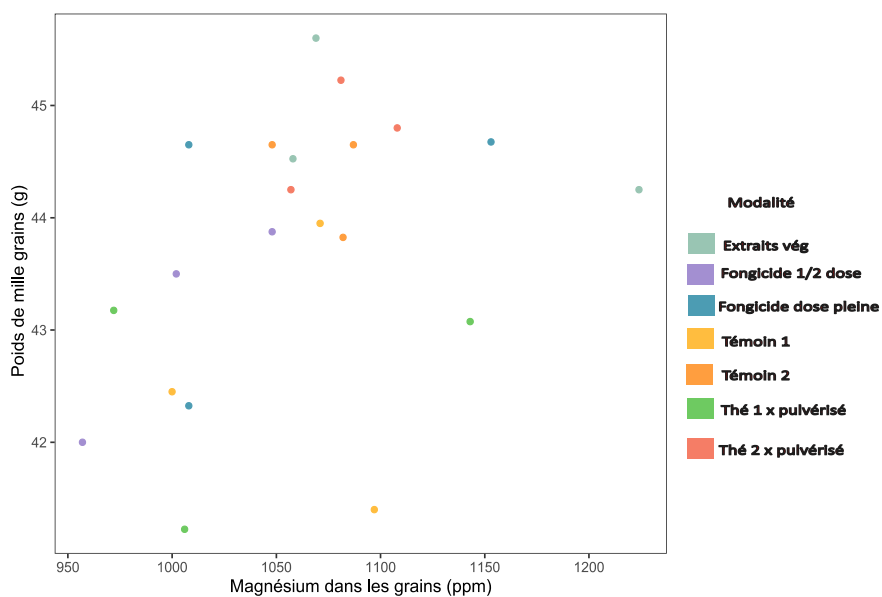


Figure A2 : Poids de mille grains (g) en fonction de leur concentration en magnésium (mg/kg) de l'essai 2022

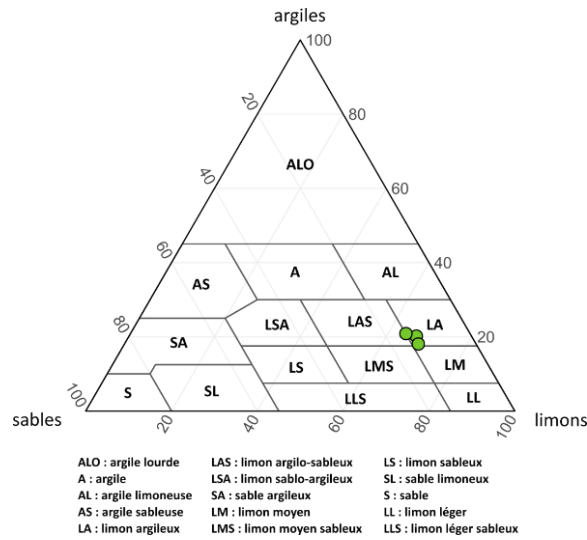


Figure A3: Triangle textural de l'Aisne – trois répliquats correspondant à un sol limon argileux

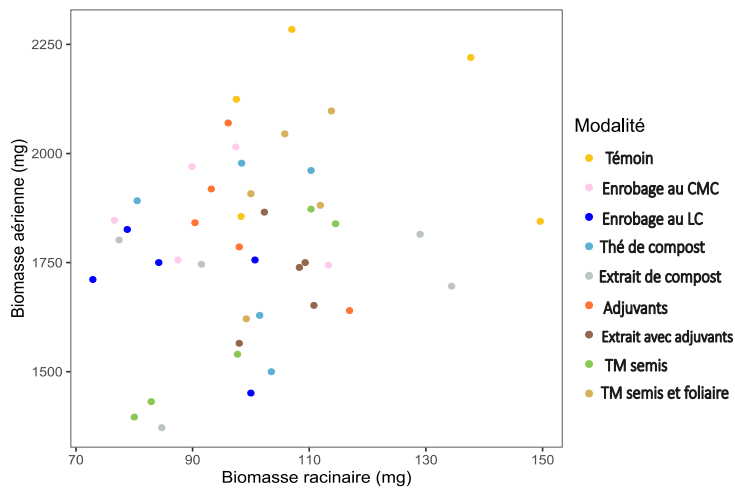


Figure A4 : relation entre les biomasses aérienne et racinaire par plante (n = 5) pour les 9 modalités

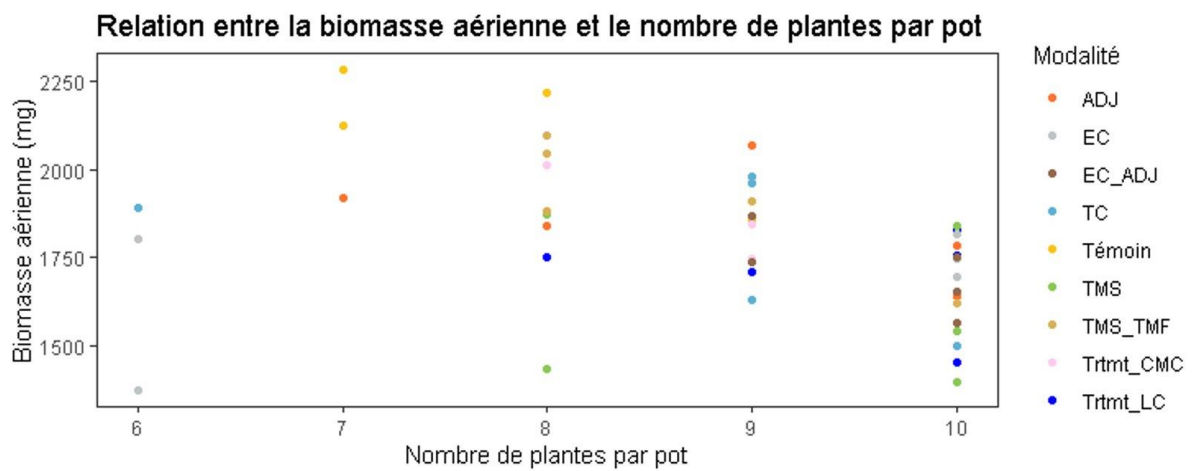


Figure A5 : Relation entre la biomasse aérienne et le nombre de plantes par pot

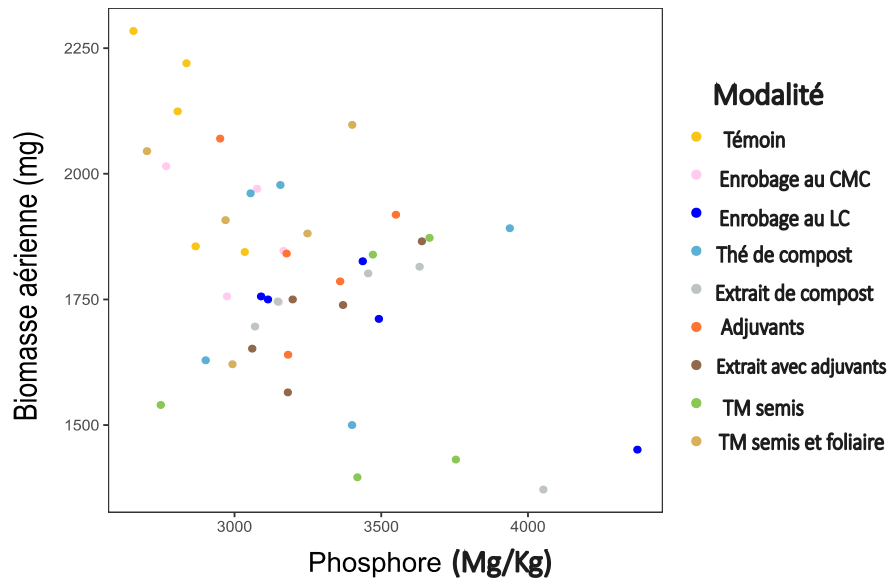


Figure A6: Relation entre la biomasse aérienne par plant (mg) et la concentration en phosphore dans les parties aériennes (mg/kg) avec $n = 5$

Influence des biointrants à base de compost sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et de la plante

Apolline Delvaux

Dans un contexte de réduction de l'utilisation des pesticides et des intrants chimiques de synthèse, l'intérêt pour les biointrants, notamment à base de compost, ne cesse de croître. Bien que des effets physiques, biologiques et chimiques aient été observés, il existe encore un manque de connaissances sur leur réelle efficacité et les mécanismes impliqués dans ces résultats. De plus, la variabilité des résultats obtenus est importante en raison de la diversité des produits utilisés et des méthodes de production.

Dans ce contexte, ce mémoire s'inscrit dans un projet de recherche de 4 ans mené à la ferme de la Sarte à Grez-Doiceau. Deux expériences en conditions naturelles (champ) d'une durée d'un an chacune, et une expérience en conditions contrôlées (serre) d'une durée de 3 mois, ont été réalisées. Le but était d'évaluer les effets des biointrants à base de compost sur les services écosystémiques du sol, la qualité nutritionnelle des aliments et la productivité agricole. Les modalités testées sont le thé de compost, l'extrait de compost et différentes méthodes d'enrobage. Les paramètres étudiés sur le terrain comprenaient des paramètres de rendement, la composition minérale des grains et des sols, ainsi que la structure racinaire. L'expérience en serre a combiné différentes modalités testées en champ et a également inclus des analyses chimiques des sols et des plantes, ainsi que l'évaluation de la biomasse. L'objectif de cette expérience en serre était de valider les résultats obtenus sur le terrain et de pallier le problème de l'hétérogénéité des sols à l'échelle d'une parcelle.

Les principaux résultats obtenus sur le terrain ont montré des effets limités des différentes applications de biointrants sur les paramètres biologiques et chimiques étudiés, à l'exception du thé de compost pulvérisé deux fois, qui a montré un effet significatif sur le rendement total et la masse des grains. Cela souligne l'importance de la fréquence d'application. En revanche, les résultats obtenus en serre n'ont pas été significatifs pour la plupart des paramètres étudiés. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces résultats non-significatifs, tels que l'hétérogénéité des sols sur le terrain, les quantités insuffisantes d'intrants appliquées, les conditions adéquates de culture, la fertilisation préalable. De plus, des contraintes liées à l'expérimentation en serre, comme la restriction spatiale des pots, pourraient avoir influencé certains résultats.

En conclusion, cette étude a révélé une absence d'effet ou un effet très limité des biointrants sur les paramètres étudiés. Pour faire progresser les connaissances et répondre aux objectifs mentionnés précédemment, des perspectives futures incluent l'analyse de doses plus élevées dans des conditions de stress, l'étude de paramètres racinaires supplémentaires et l'évaluation des bilans de masse des nutriments apportés par les intrants et leur impact sur le cycle des nutriments dans les systèmes agricoles. Ces perspectives contribueraient à approfondir la compréhension des effets des biointrants et à optimiser leur utilisation dans une perspective de durabilité agricole.