

## Mémoire de Fin d'Etudes



Maison des maraîchers

La Métairie Neuve

44860 Pont-Saint-Martin.

Tel : 02 28 27 03 03

<p><b>Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)</b> <b>Parcours : Plant Health and Protection (PHP)</b></p>
---

Année universitaire 2023 - 2024

<p><b>Développement de solutions alternatives de protection des cultures maraîchères nantaises</b></p>
--

Projet SUPERNOMA - Année III

Par : Andréa MARTELLI

Soutenu à Angers le : 10/09/2024

Maîtres de stage : Armelle Braud, Marylou Lorne



## Mémoire de Fin d'Etudes



Maison des maraîchers

La Métairie Neuve

44860 Pont-Saint-Martin.

Tel : 02 28 27 03 03

### **Master 2 Mention Biologie Végétale (BV) Parcours : Plant Health and Protection (PHP)**

Année universitaire 2023 - 2024

### **Développement de solutions alternatives de protection des cultures maraîchères nantaises**

Projet SUPERNOMA - Année III

Par : Andréa MARTELLI

Soutenu à Angers le : 10/09/2024

Maîtres de stage : Armelle BRAUD, Marylou Lorne



### **ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT**

Je, soussignée, **Andréa MARTELLI**,

déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature :



## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaitais adresser mes remerciements à **Armelle Braud** et **Marylou Lorne**, pour la bienveillance de leur encadrement, leur disponibilité, la confiance qu'elles m'ont accordée dans la gestion des essais ainsi que pour le temps qu'elles ont consacré à la relecture et à la correction de ce mémoire.

Je souhaitais aussi exprimer ma reconnaissance envers M. **Philippe Simier**, pour son investissement et pour la qualité de son accompagnement durant ce stage mais aussi depuis le début de mon cursus universitaire. Ses remarques pertinentes et conseils avisés m'ont permis, au fil des ans, d'améliorer la qualité de mon raisonnement et de mes travaux.

Merci également à **Séverine Bosseur** pour m'avoir supervisée avec enthousiasme lors de mes essais au CTIFL, m'avoir appris à reconnaître les symptômes racinaires d'une infestation par *Pythium*, et pour avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions concernant les divers produits et protocoles.

L'analyse des données aurait été bien plus fastidieuse sans les explications d'**Arjuna Ravindirane** et de **Pierre Parodi** ; la tâche moins agréable sans **Vincent Olive**, **Alix Graveleau** et **Juliette Pruvot** qui m'ont prêté main forte lors des semis, du cerclage ou encore de la récolte des couverts ; les pauses moins légères sans **Fama Diallo**, que je remercie sincèrement pour son oreille attentive et ses paroles encourageantes.

Je tenais également à remercier l'ensemble des conseillers du pôle Plein Champ, **Thomas Loirat**, **Jean-Michel Landrin**, **Sylvain Gerard** qui m'ont emmenée avec eux sur le terrain pour me faire découvrir leur métier et m'ont fait profiter de leur expérience ; **Brigitte Pelletier**, pour avoir établi ma convention auprès du CTIFL ; **Sophie Jolivet** et **Sandrine Herguais**, qui effectuent un travail de l'ombre, pourtant essentiel.

Je quitte le CDDM avec une pensée pour **Flavie Morin**, à qui je souhaite une rémission rapide et totale, et en n'oubliant pas **Emmanuel Torlasco**, **Laura Boissinot**, **Kumba Chassain**, **Léa Lemonnier**, **Adrien Le Mene**, **Aurore Jegou**, **Véronique Cerceau** et **Gabrielle Prouvost**, avec qui je n'ai que peu échangé mais qui ont fait partie de mon quotidien durant ce stage.

Ces dernières lignes sont pour ma famille et mes amis qui m'ont témoigné un soutien sans faille pendant ces six mois et m'ont permis de mener à bien ce stage.



# TABLE DES MATIERES

Glossaire .....	
Liste des abréviations .....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
Liste des annexes .....	
<b>Développement de solutions alternatives de protection des cultures maraîchères nantaises .....</b>	<b>1</b>
1. Introduction .....	1
1.1. Histoire et chiffres du maraîchage en zone ligérienne .....	1
1.2. Pathosystèmes étudiés .....	2
1.2.1. <i>Pythium</i> spp. - <i>Valerianella locusta</i> .....	2
1.2.2. <i>Rhizoctonia solani</i> - <i>Raphanus sativus</i> .....	3
1.3. Méthodes de protection : la désinfection des sols .....	4
1.3.1. Usage et arrêt du métam-sodium .....	4
1.3.2. Méthodes alternatives actuelles et inconvénients .....	5
a) Solarisation	
b) Désinfection vapeur	
1.4. Alternatives étudiées .....	6
1.4.1. Biofumigation .....	6
1.4.2. Composts suppressifs .....	7
1.5. Projet SUPERNOMA .....	8
1.6. Objectifs du stage .....	8
2. Matériels et méthodes .....	9
2.1. Préparation des inoculums .....	9
2.2. Intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche .....	9
2.2.1. Intrants contre <i>Pythium</i> spp. en caissettes en phytotron .....	9
2.2.2. Analyse de sol <i>Pythium</i> .....	10
2.3. Intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> sur radis .....	11
2.3.1. Intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> en caissettes sous serre .....	11
2.3.2. Analyses de sol <i>Rhizoctonia</i> .....	12
2.4. Criblage des intrants <i>in vitro</i> .....	12
2.5. Analyses statistiques .....	12
3. Résultats .....	13
3.1. Intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche .....	13



3.2.	Intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> sur radis.....	14
3.3.	Criblage des intrants <i>in vitro</i> .....	16
4.	Discussion .....	17
4.1.	Efficacité des intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche .....	17
4.2.	Efficacité des intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> .....	17
4.3.	Capacité prédictive et pertinence du criblage <i>in vitro</i> des intrants .....	21
5.	Conclusions et perspectives .....	23
5.1.	Conclusions .....	23
5.2.	Nouvelles pistes de lutte contre <i>Pythium</i> spp. ....	24
5.3.	Nouvelles pistes de lutte contre <i>Rhizoctonia solani</i> .....	25
6.	Bibliographie.....	25
6.1.	Ouvrages .....	25
6.2.	Ressources en ligne .....	29
6.2.1.	Références du glossaire.....	29
6.2.2.	Références de l'ouvrage .....	29
	Annexes .....	

## GLOSSAIRE

**Allélopathie** : phénomène biologique par lequel un organisme produit une ou plusieurs substances biochimiques qui influencent la germination, la croissance, la survie et la reproduction d'autres organismes [a].

**Andain** : méthode de production de grands volumes de compost par empilement en longues rangées de la matière organique ou des déchets biodégradables [b].

**β diversité** : permet de mesurer la biodiversité en quantifiant les différences de composition des communautés en identifiant les facteurs responsables de cette différence. Consiste en la comparaison de la diversité des espèces entre écosystèmes ou le long de gradients environnementaux (suppose la comparaison du nombre de taxons uniques à chacun des écosystèmes) [c].

**Biofumigation** : libération de composés biocides bénéfiques aux cultures suivant l'incorporation dans le sol de couverts végétaux, d'amendements organiques et de composts.

**Biostimulation** : stimulation des processus naturels favorisant/améliorant l'absorption ou l'utilisation des nutriments, la tolérance aux stress abiotiques, la qualité ou le rendement de la culture, indépendamment de la présence de nutriments. Permise par des substances et/ou des micro-organismes aux plantes ou à la rhizosphère [d].

**Densité** : pourcentage de plantes levées par rapport au nombre de graines semées.

**Groupe d'anastomose** : ensemble des individus de la même espèce ayant des caractéristiques de virulence différentes, capables de plasmogamie (union du contenu cytoplasmique). Ainsi, ils peuvent présenter des symptômes différents de ceux produits par un groupe individuellement [e].

**Hyphes** : structure végétative filamenteuse du champignon.

**Mycovirus** : virus fongiques.

**Sclérotés** : forme de conservation résistante souvent pigmentée retrouvée chez certains champignons.

**Stimulation de défenses naturelles** : consiste, selon un principe rappelant celui de la vaccination, à activer le système de défense des cultures de sorte qu'elles se trouvent en état de résistance au moment d'une éventuelle agression [f].

**Suppressivité** : capacité d'un compost à réduire voire éliminer l'impact d'un phytopathogène tellurique sur son hôte.

## LISTE DES ABREVIATIONS

**AG** : Groupe d'Anastomose.

**ANOVA** : ANalysis Of Variance.

**ANSES** : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

**ARELPAL** : Association Régionale d'Expérimentation Légumière des PAYS de la Loire.

**PAS** : Pile Aérée Statique.

**BB** : Biofumigation à base de Brassicacée.

**ACB** : Agent de Contrôle Biologique.

**CA** : Chiffre d'Affaires.

**CDDL** : Comité Départemental de Développement Légumier.

**CEL** : Carotte Extrait de Levure.

**CR** : Culture de Révélation.

**CTIFL** : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

**ETP** : Equivalent Temps Plein.

**GAP** : Grand Abri Plastique.

**GLM** : Generalized Linear Model.

**GLMNB** : Negative Binomial Generalized Linear Model.

**GSL** : Glucosinolate(s).

**ITC** : IsoThioCyanate(s).

**LMM** : Linear Mixed-effects Model.

**MO** : Matière Organique.

**AO** : Amendements Organiques.

**OP** : Organisation de Producteurs.

**PET** : PolyEhylène Téréphtalate.

**PNPP** : Préparations Naturelles Peu Préoccupantes.

**PPP** : Produits PhytoPharmaceutiques.

**SAU** : Surface Agricole Utilisée.

**SUPERNOMA** : SUPrimer les pathogènes en Repérant les NOuveautés en Maraîchage.

**UV** : UltraViolet.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Affiche de promotion des maraîchers nantais datant de 1975 .....	
Figure 2. Superficies des cultures de légumes frais en Pays de la Loire (2010) [1] .....	
Figure 3. Carte des six zones principales de production du maraîchage nantais [2] (d'après Fédération des maraîchers nantais, 2023).....	
Figure 4. Cycle de développement de <i>Pythium</i> spp. (van West <i>et al.</i> , 2003) et symptômes sur mâche ( <i>Valerianella locusta</i> ) .....	
Figure 5. Nature et fréquence des espèces de <i>Pythium</i> associées à 66 parcelles de mâche dépérissantes de la région nantaise (Gaudin <i>et al.</i> , 2018) .....	
Figure 6. Cycle de vie de <i>Rhizoctonia solani</i> (Agrios, 2005) et symptômes sur radis ( <i>Raphanus sativus</i> ) [6].....	
Figure 7. Structure chimique du métam-sodium [8] .....	
Figure 8. Film de solarisation sous GAP (photothèque CDDM, 2023) .....	
Figure 9. Désinfection vapeur par système de plaque métallique ou de bâche [13], [14] .....	
Figure 10. Processus de biofumigation à l'échelle cellulaire (d'après Ahuja <i>et al.</i> , 2010, schéma réalisé sur Canva) .....	
Figure 11. Facteurs influençant les relations biofumigant – microorganismes telluriques (traduit d'après Tagele <i>et al.</i> , 2021).....	
Figure 12. Déroulé chronologique de l'essai d'intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche .....	
Figure 13. Echelle de sévérité symptômes causés par <i>Pythium</i> spp. sur mâche (observation à la loupe binoculaire, G x 20 à 40, AM, 27/02/2024) .....	
Figure 14. Déroulé chronologique de l'essai d'intrants contre <i>R. solani</i> sur radis.....	
Figure 15. Systèmes racinaires de radis sain (a) et nécrosé (b) après infection par <i>R. solani</i> 21-714-5 RR (AM, 23/04/2024, CDDM) .....	
Figure 16. Protocole de criblage <i>in vitro</i> des intrants (schéma réalisé sur Biorender) .....	
Figure 17. Evolution de la densité des mâches en sol non inoculé (a) et inoculé avec <i>P. violae</i> 21-700-4 et <i>P. valerianellae</i> 23-885-43 (b) en culture de révélation 1 .....	

Figure 18. Inoculum en <i>P. violae</i> 21-700-4 et <i>P. valerianellae</i> 23-885-43 selon la modalité au terme de la culture de révélation 1 .....	
Figure 19. Evolution de la densité de radis en sol non inoculé (a) et inoculé avec <i>R. solani</i> 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 1 .....	
Figure 20. Evolution de la densité de radis en sol non inoculé (a) et inoculé avec <i>R. solani</i> 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 2 .....	
Figure 21. Inoculum en <i>R. solani</i> 21 714 5 RR selon la modalité en fin de cultures de révélation 1 (23/04) et 2 (10/05).....	
Figure 22. Evolution de la surface du mycélium de <i>R. solani</i> 21 714 5 RR en présence de différents composts .....	
Figure 23. Evolution de la surface du mycélium de <i>P. violae</i> 21-700-4 en présence de différents composts.....	
Figure 24. Evolution de la surface du mycélium de <i>P. valerianellae</i> 23-885-43 en présence de différents composts .....	
Figure 25. Familles de virus signalés comme infectant <i>R. solani</i> (Abdoulaye <i>et al.</i> , 2019).....	
Figure 26. Structures chimiques du magnolol (Mo <i>et al.</i> , 2021) et de l'eugénol [17] .....	

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Biofumigants potentiels ayant montré des effets suppressifs contre <i>Pythium</i> spp. et/ou <i>Rhizoctonia solani</i> (d'après Tagele <i>et al.</i> , 2021) .....	
Tableau II. Modalités d'inoculation de <i>Pythium</i> et d'apport d'intrants pour l'essai <i>Pythium</i> /mâche. .....	
Tableau III. Caractéristiques des intrants pour les doses apportées .....	
Tableau IV. Modalités d'inoculation de <i>R. solani</i> et d'apport d'intrants pour l'essai <i>Rhizoctonia</i> /radis.....	
Tableau V. Biofumigants ayant augmenté les populations de <i>Pythium</i> spp. et/ou de <i>Rhizoctonia solani</i> (d'après Tagele <i>et al.</i> , 2021) .....	
Tableau VI. Comparatif des résultats des essais d'intrants contre <i>R. solani</i> 21 714 5 RR en caissettes sur les trois ans du projet SUPERNOMA (d'après L'Hostis (2023) et Mahamat (2022)) .....	
Tableau VII. Champignons et oomycètes bénéfiques identifiés, isolés de composts suppressifs, système(s) phytopathogène(s) respectif(s) et mécanisme d'action de l'effet suppressif si connu (d'après Lutz <i>et al.</i> , 2020) .....	

## LISTE DES ANNEXES

Annexe I. Conditions de culture en serre froide CDDM.....	
Annexe II. Dispositifs expérimentaux pour les essais en caissettes d'intrants contre <i>Pythium</i> spp. (a) (AM, 15/08/2024, CDDM) et <i>Rhizoctonia solani</i> (b) (A. Braud, 03/2024, CDDM).....	
Annexe III. Disposition des caissettes en phytotron dans le cadre de l'essai d'intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche en culture de révélation 1 (CR 1) et en culture de révélation 2 (CR 2) ...	
Annexe IV. Protocole d'utilisation du Nitratecheck 404 (d'après Ricard, 2020) .....	
Annexe V. Disposition des caissettes en serre dans le cadre de l'essai d'intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> sur radis pour les cultures de révélation 1 et 2.....	
Annexe VI. Densité moyenne des mâches en caissettes en culture d'inoculation en fonction du type d'inoculum .....	
Annexe VII. Densité des mâches en caissettes pour les modalités inoculées avec sol inoculé avec <i>P. violae</i> 21-700-4 et <i>P. valerianellae</i> 23-885-43 en culture d'inoculation .....	
Annexe VIII. Evolution du taux d'azote nitrique par intrant sur l'intégralité de l'essai d'intrants contre <i>Pythium</i> spp. sur mâche .....	
Annexe IX. Densité moyenne des radis en caissettes en culture d'inoculation en fonction du type d'inoculum .....	
Annexe X. Densité des radis en caissettes pour les modalités inoculées avec <i>R. solani</i> 21 714 RR en culture d'inoculation.....	
Annexe XI. Evolution de la densité des radis en sol non inoculé (a) et en sol inoculé avec <i>R. solani</i> 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 3 .....	
Annexe XII. Evolution du taux d'azote nitrique par intrant sur l'intégralité de l'essai d'intrants contre <i>Rhizoctonia solani</i> sur radis .....	
Annexe XIII. Amélioration de l'aspect des jeunes plants de radis en présence de compost de champignonnière en sol inoculé et non inoculé avec <i>R. solani</i> 21 714 5 RR (AM, 2024, CDDM) .	
Annexe XIV. Aspect des mycéliums de <i>Rhizoctonia solani</i> 21-714-5 RR, de <i>Pythium violae</i> 21-700-4 et de <i>Pythium valerianellae</i> 23-885-43 86 h après mise en culture (AM, 2024, CDDM) .....	

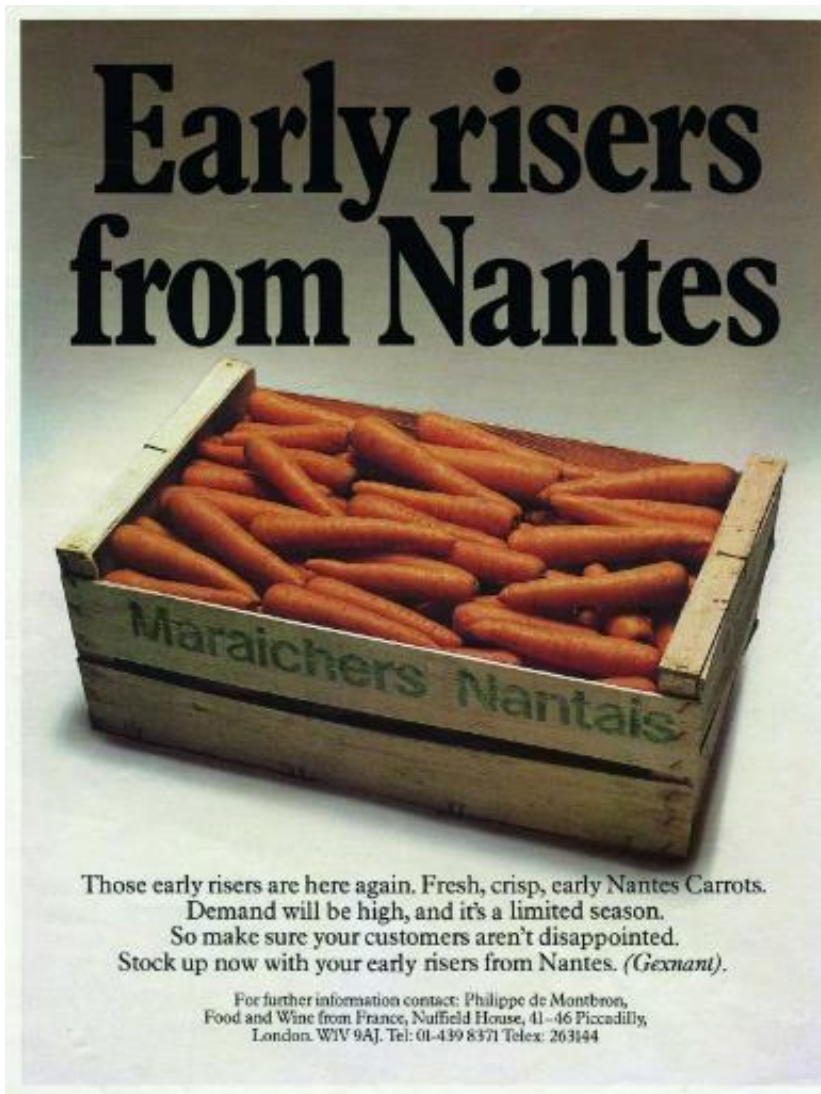


Figure 1. Affiche de promotion des maraîchers nantais datant de 1975.

© coll. Danielle Rapetti, Archives de Nantes



# Développement de solutions alternatives de protection des cultures maraîchères nantaises

## 1. Introduction

*Ce mémoire porte sur les travaux réalisés lors d'un stage de six mois, effectué au sein du pôle Plein Champ du Comité Départemental de Développement Maraîcher (CDDM). Le CDDM est une association assurant l'accompagnement technique des entreprises de production au travers de conseils individuels et collectifs de l'expérimentation. Il est présidé par M. Cyril Pogu (maraîcher de plein champ et adhérent de l'association) et dirigé par M. Emmanuel Torlasco. La direction technique est assurée par Mme Brigitte Pelletier. Les bureaux du CDDM sont regroupés au sein de la Maison des Maraîchers, une ferme expérimentale intégrée gérée par la Fédération des Maraîchers Nantais, syndicat indépendant des maraîchers. Cet établissement accueille près d'une vingtaine de collaborateurs, ingénieurs et techniciens et regroupe les structures de développement du maraîchage nantais, divisés en quatre pôles : un pôle énergie, un pôle environnement, un pôle serre et un pôle plein champ. Les outils qui y sont disponibles sont un phytotron, une serre à plants de 250 m<sup>2</sup>, de grands abris plastiques de 3300 m<sup>2</sup> subdivisés en 4 zones, des réserves d'eau expérimentales ainsi que des parcelles hors-site, mises à disposition par les maraîchers pour les essais. Les programmes d'expérimentation qui y sont menés sont de différentes ampleurs : propres aux organisations de producteurs, régionaux, inter-régionaux (Bretagne - Pays de la Loire), nationaux, ou encore européens. Pour des raisons techniques, certaines expérimentations ont été effectuées sur le site du CTIFL\* auprès de l'équipe détachée du CDDM présente sur place.*

### 1.1. Histoire et chiffres du maraîchage en zone ligérienne

L'histoire du maraîchage nantais débute dès 1513 avec la création de la Corporation des Jardiniers et se poursuit en 1884 avec la création de la Corporation Saint Fiacre. Le premier Syndicat des jardiniers-maraîchers de Nantes voit le jour en 1889, et en 1928, la Fédération des Groupements Maraîchers Nantais est créée. A partir de 1930, on voit apparaître en vert sur les cageots la marque « MN », se voulant symbole de l'unité de la profession et de garantie de la qualité des produits (figure 1). La Fédération des Maraîchers Nantais, telle qu'elle existe aujourd'hui, a été créée en 2006. La Maison des Maraîchers Nantais ne sera établie qu'en 2016 dans l'objectif d'accompagner le développement des entreprises, de défendre les intérêts collectifs et moraux de ses adhérents, de promouvoir la filière, les cultures, les métiers et de répondre aux attentes sociétales et environnementales (ARELPAL, 2021).

Le maraîchage nantais produit environ 180 000 t/an de légumes frais, répondant ainsi à raison de 350 g de légumes/jour, aux besoins annuels de 1 400 000 personnes, soit l'équivalent de la

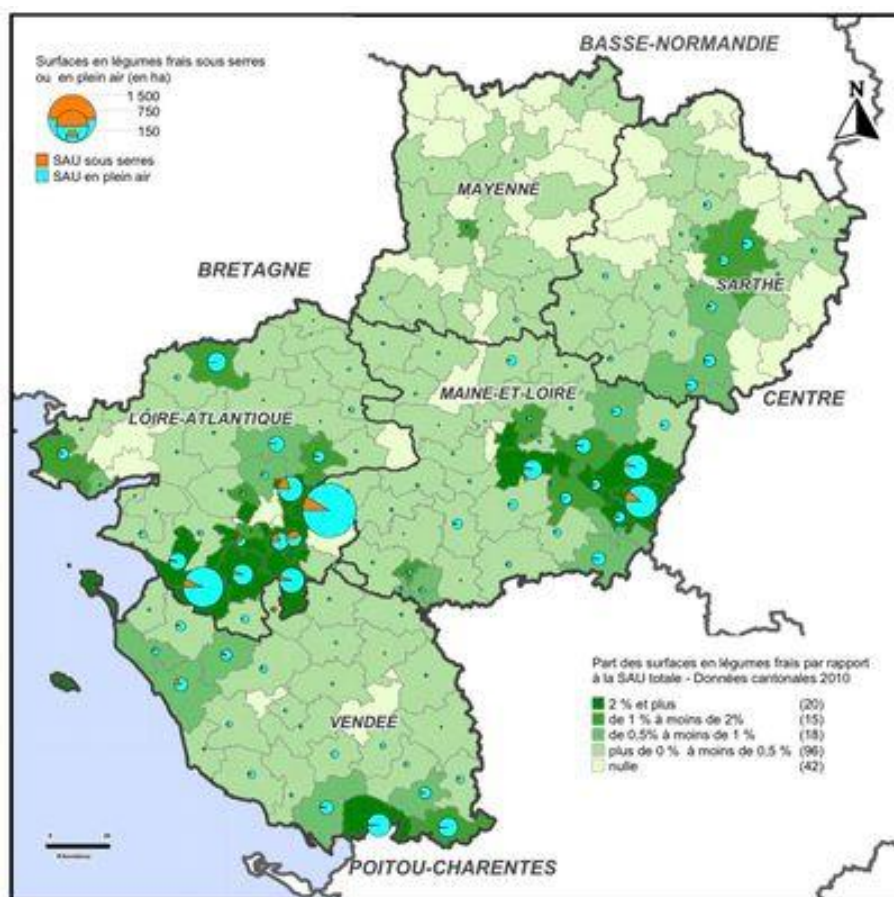


Figure 2. Superficies des cultures de légumes frais en Pays de la Loire (2010) [1].

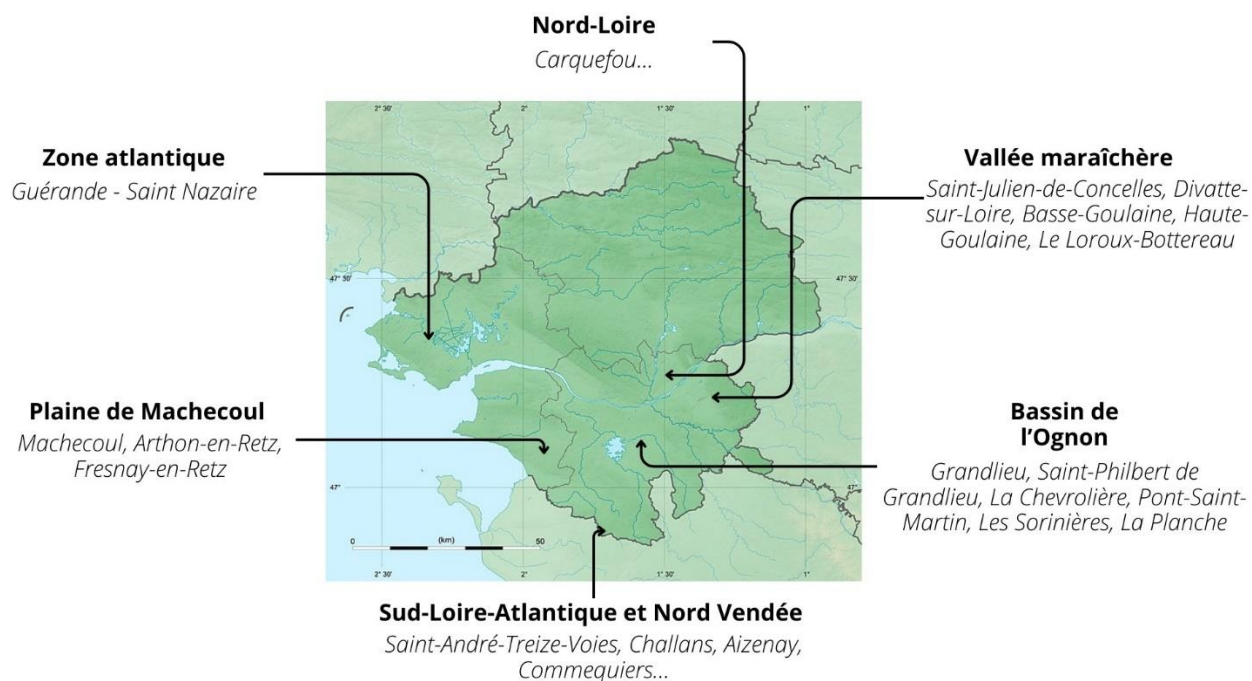


Figure 3. Carte des six zones principales de production du maraîchage nantais [2] (d'après Fédération des maraichers nantais, 2023).

population de Loire-Atlantique (figure 2). Cette production contribue à hisser la Loire-Atlantique au 11ème rang national pour la production de légumes et de fraises (Fédération des maraichers nantais, 2023). Le maraîchage nantais regroupe 190 exploitations, soit environ 4700 hectares cultivés (1,1 % des 435 000 ha de SAU\* du département) répartis en six zones de production principales en Loire-Atlantique, nord Vendée et plus récemment ouest Maine et Loire (figure 3). Cette activité génère 300 millions d'euros de CA\* (soit près de 20 % du CA agricole de Loire-Atlantique), 2388 emplois directs (ETP\*) et 3000 emplois saisonniers [3]. SCA Océane, SAS Nanteurop, Sarl 3 Vitaprim, Sarl Loire Europe, SAS Racine Carrées sont les principales OP\* du secteur, assurant la mise en marché de près de 85 % de la production. Trente-cinq espèces sont cultivées dans la région avec six productions emblématiques, caractérisées pour la plupart par des rotations courtes, une occupation du sol quasi permanente et des travaux du sol intenses (ARELPAL, 2021) : le muguet, la mâche, le radis, le poireau, la tomate et le concombre. La région est le premier producteur français (65 % de la production nationale) et le deuxième producteur européen de mâche avec 5585 hectares fournissant 26500 t/an. La moitié de la production française est destinée à l'export vers l'Europe. La mâche représente 40 % du CA du maraîchage nantais et occupe environ 1500 salariés. Elle est cultivée en rotation avec des jeunes pousses (e.g. roquette, épinards, laitues) ou des légumes bottes primeurs dont le radis, pour lequel la région est le premier producteur national avec une production de 8630 t/an, soit l'équivalent de 30 % de la consommation française (Fédération des maraichers nantais, 2023).

## 1.2. Pathosystèmes étudiés

Les nombreux recours anthropiques (travail du sol, utilisation de PPP\*) et la diversité d'espèces légumières cultivées amènent les producteurs à faire face à un très large panel de ravageurs et bioagresseurs (microorganismes, invertébrés, vertébrés). Certains, communs à toutes ces cultures, peuvent ainsi très largement proliférer et se disséminer dans le sol. La mauvaise gestion de ces ennemis cultureux entraîne de lourdes répercussions économiques. En 2015-2016, une destruction par anticipation de 50 % des récoltes de mâche a été nécessaire en raison du dépérissement hivernal (Gaudin *et al.*, 2018). Nous nous focaliserons ici sur deux pathosystèmes : *Pythium* spp. responsable du dépérissement hivernal de la mâche et *Rhizoctonia solani* causant notamment le rhizoctone et la fonte de semis sur culture de radis.

### 1.2.1. *Pythium* spp. - *Valerianella locusta*

Le genre *Pythium* caractérise des micro-organismes oomycètes rattachés aux straménopiles et comprend de nombreuses espèces phytoparasites [4]. Les principales étapes du cycle de vie de la plupart des espèces de *Pythium* infectant les racines sont similaires. Le cycle de vie d'un *Pythium* sp. typique (figure 4, a) se compose de deux cycles généralement stimulés par des conditions environnementales différentes. Le cycle asexué se caractérise par la production de sporanges, pouvant germer directement dans un liquide ou sur une surface pour produire un tube

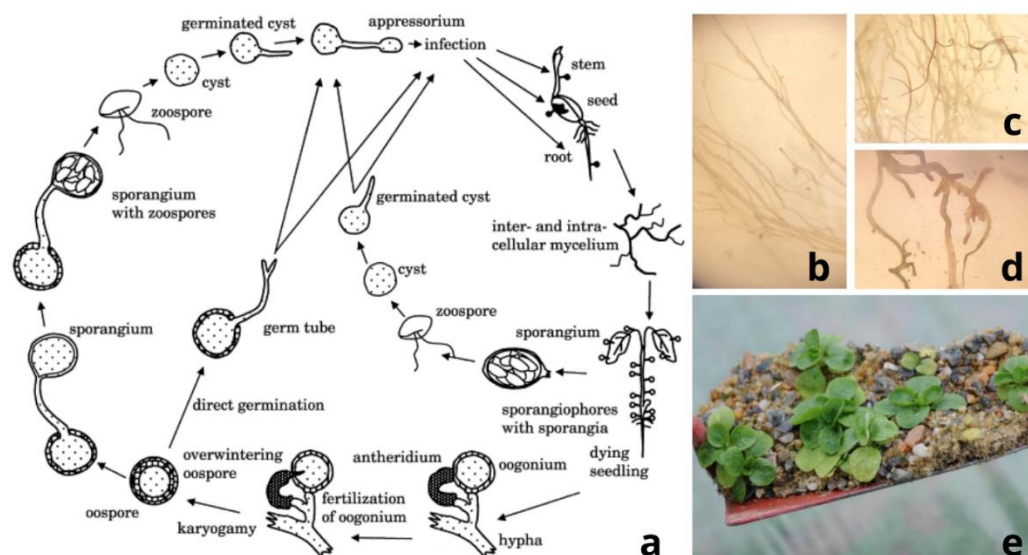


Figure 4. Cycle de développement de *Pythium* spp. (van West *et al.*, 2003) et symptômes sur mâche (*Valerianella locusta*). Cycle de développement de *Pythium* spp. (a). Les zoospores sont souvent retenues dans une vésicule de décharge s'évaginant du pore du sporange (cycle asexué). Libérées par la rupture de la vésicule, elles nagent à la recherche de tissus hôtes (graines, racines, tiges ou feuilles) où elles se fixent et s'enkystent en quelques minutes grâce aux adhésines présentes à leur surface. Le kyste développe alors un tube germinatif pouvant pénétrer dans l'hôte directement ou par l'intermédiaire d'un appressorium ou d'une structure semblable. En utilisant les nutriments acquis de l'hôte sensible, les hyphes\* intracellulaires se ramifient à travers le tissu végétal en un réseau de mycélium absorbant, à partir duquel la sporulation se produit sur la plantule mourante. L'oosporogénèse (cycle sexué) implique la production d'une oogone femelle et d'un anthéridium mâle qui se développe vers l'oogone et fusionne avec elle (van West *et al.*, 2003) ; racines saines (b) ; racines légèrement atteintes (c) ; racines sévèrement atteintes (d) ; mâches symptomatiques (e) (Nododus, 2016). (Photos b, c, d : AM, 27/02/2024, CDDM).

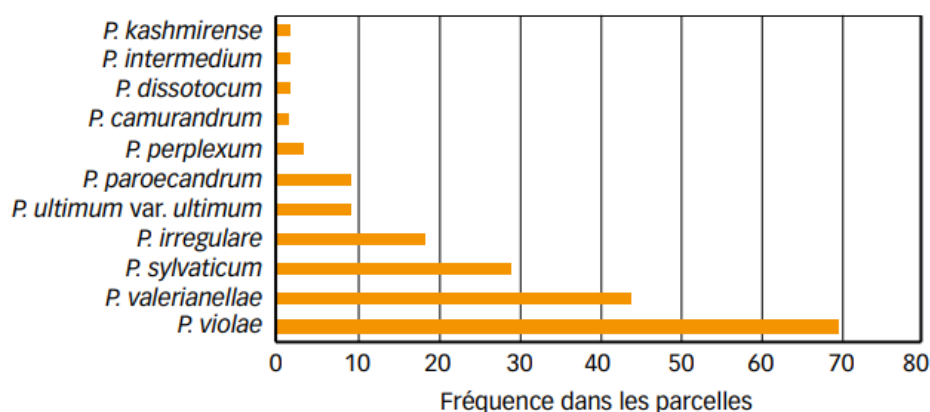


Figure 5. Nature et fréquence des espèces de *Pythium* associées à 66 parcelles de mâche dépérissantes de la région nantaise (Gaudin *et al.*, 2018).



germinatif (germination directe) ou se différencier par un processus de clivage cytoplasmique pour former des zoospores uninucléées et biflagellées (germination indirecte). Ce cycle asexué bref peut se répéter de nombreuses fois au cours de la croissance d'une plante. Le cycle sexué génère des oospores à paroi épaisse adaptées à l'hivernage et à la survie en conditions défavorables (van West *et al.*, 2003). Les symptômes apparaissent toujours en période hivernale à partir de la mi-novembre et peuvent être visibles jusqu'en mars pour les cycles de culture supérieurs à huit semaines. Le dépérissement (figure 4e) se caractérise par une croissance réduite, un jaunissement et un flétrissement brutal de la mâche en fin de culture. L'observation du système racinaire permet de constater des brunissements plus ou moins prononcés et étendus (figure 4b, c, d). Les racines se nécrosant progressivement, les symptômes foliaires ne se manifestent qu'à partir du dernier tiers de la culture (stade 4-6 feuilles), obligeant les producteurs à anticiper la récolte au détriment du rendement (Gaudin *et al.*, 2018). Les espèces de *Pythium* utilisées dans le cadre de cette étude sont *P. violae* et *P. valerianellae* (figure 5), cette dernière étant une nouvelle espèce spécifique au bassin nantais identifiée par Gaudin *et al.* en 2018.

### 1.2.2. *Rhizoctonia solani* - *Raphanus sativus*

*R. solani sensu lato* est une espèce de champignon pathogène facultatif de l'ordre des Cantharellales, le plus souvent rencontrée à l'état anamorphe (hyphes et sclérotés\*). C'est le pathogène végétal tellurique le plus répandu au monde. Il est considéré très destructeur, sa vaste gamme d'hôtes lui permettant de provoquer des maladies sur une grande variété de cultures d'importance agronomique. Sur radis (Brassicacée), il est responsable de fontes de semis et de pourriture racinaire (rhizoctone) [5]. Les groupes d'anastomose\* (AG) 2-1 et 9 causent des dommages considérables sur Brassicacées ; l'AG 12 est particulièrement dommageable sur radis (Garcia *et al.*, 2006). En l'absence d'hôte, *R. solani* peut persister de nombreuses années dans le sol sous forme de sclérotés ou de mycélium sur des débris végétaux en décomposition (figure 6a, 1). Les sclérotés de *R. solani* peuvent être dispersés par le vent, l'eau (pluie, drainage, irrigation...) et les mouvements du sol (érosion, culture, déracinement...). Le stade téléomorphe (*Thanatephorus cucumeris*) permet la transmission aéroportée de basidiospores, phénomène de contamination rarement observé en champ (Akber *et al.*, 2022). *R. solani* étant déjà présent dans la plupart des sols, cette capacité de dispersion ne semble pas cruciale. L'apparition de la maladie dépendrait davantage d'une combinaison de facteurs environnementaux (présence d'une plante hôte et/ou de ses résidus, précipitations abondantes, températures élevées au printemps et en été, mauvaise structure du sol réduisant le drainage et favorisant le développement d'un microclimat humide dans le sol). Le compactage augmente considérablement les dommages causés par ce pathogène, en particulier dans les sols lourds [7]. Si des infestations par *R. solani* peuvent se produire tôt dans la saison (pendant la fermeture de la canopée), la maladie n'est généralement pas apparente avant la fin de l'été ou le début de l'automne, avec un risque accru en décembre et janvier. Les dégâts associés à *R. solani* sur radis apparaissent sous forme de

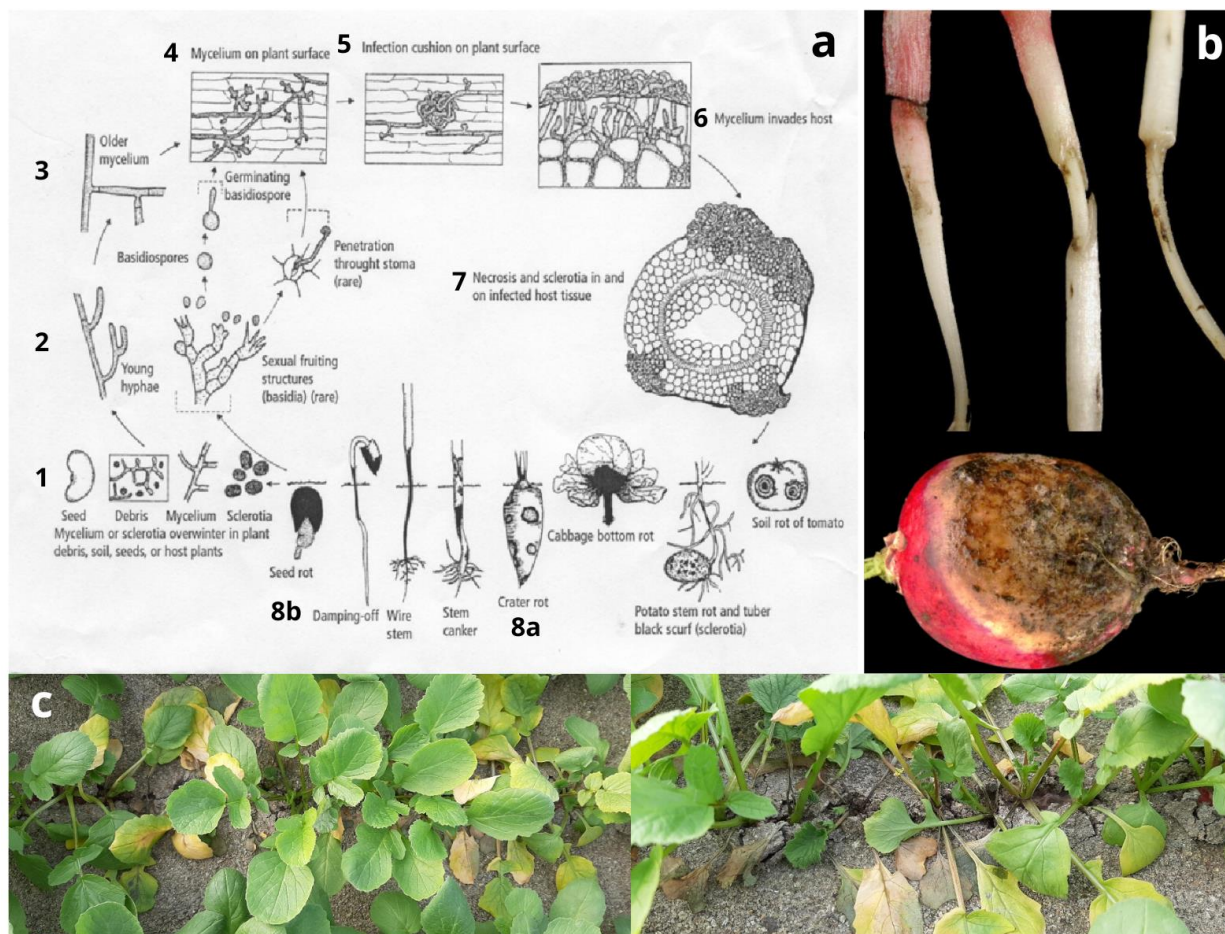


Figure 6. Cycle de vie de *Rhizoctonia solani* (Agrios, 2005) et symptômes sur radis (*Raphanus sativus*) [6]. Cycle de vie de *R. solani* (a) : Le mycélium et les sclérotés passent l'hiver dans les débris végétaux (1). Lorsque la température du sol atteint environ 15 °C, les exsudats racinaires des plantes hôtes activent les sclérotés qui génèrent des hyphes (2) jusqu'à formation d'un mycélium (3). Celui-ci entre en contact avec les racines et se fixe à leur surface (4). Il prolifère ensuite sur la racine et produit des structures caractéristiques en « T », appelées « coussins d'infection » (5). Grâce à des enzymes de dégradation de la paroi cellulaire, *R. solani* envahit et colonise le tissu racinaire de l'hôte (6). Au fil de son développement, le pathogène détourne les ressources de la plante et les utilise pour sa propre croissance. Le mycélium envahit progressivement les cellules, les tue et produit des structures de survie (sclérotés) à l'intérieur de celles-ci (7). Les vaisseaux xylémiens sont attaqués et les tissus nécrosent causant la pourriture du collet et des racines (8a) ou la fonte des semis (8b) selon le stade de la culture [7] ; symptômes sur tubercules jeunes et développés de radis (b) ; symptômes foliaires en parcelle (c) (photothèque CDDM, 2022).

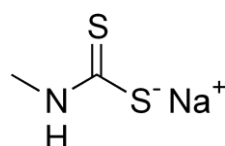


Figure 7. Structure chimique du métam-sodium [8].

taches circulaires/semi-circulaires définies en champ. Bien que petites en début de saison, ces taches ont tendance à s'étendre le long des rangs et dans les cas particulièrement virulents, peuvent affecter des rangées entières voire l'intégralité de la culture. Les premiers symptômes observés sont un flétrissement soudain du feuillage évoluant progressivement vers une chlorose puis une nécrose des feuilles. De nouvelles feuilles peuvent apparaître avant que la plante ne meure. Dans les racines et la couronne, on observe des déformations, une pourriture sèche brun foncé ou noire, en surface et/ou à l'intérieur, en fonction de la virulence du foyer (figure 6b). La différence entre tissus sains et malades est nette. Dans certains cas, les racines peuvent disparaître complètement [7]. *R. solani* peut causer des dégâts à tout stade de développement de la culture, causant la perte de plantules en s'attaquant au stade cotylédons ou le pourrissement des tubercules à un stade de développement physiologique du radis plus avancé.

### 1.3. Méthodes de protection : la désinfection des sols

#### 1.3.1. Usage et arrêt du métam-sodium

Une des méthodes de protection contre les pathogènes telluriques a longtemps été la désinfection des sols au métam-sodium (figure 7), un biocide à très large spectre utilisé comme fumigant des sols [8]. Son utilisation a été interdite en Europe dès 2009, cependant certains pays dont la France ont accordé une dérogation au secteur agricole en attendant la mise en place d'alternatives. Cependant, à la suite d'un accident survenu à l'automne 2018 dans le Maine-et-Loire ayant entraîné l'intoxication d'au moins 70 personnes après épandage du produit chez un producteur de mèche, le métam-sodium a été définitivement interdit d'utilisation par l'ANSES\* sur le territoire français [9]. D'autres accidents liés à l'utilisation de cette substance ont précédemment été signalés : en 2018, 5 cas d'intoxication ont été rapportés dans le Finistère [10] ; en octobre 2016, plus de 80 cas d'intoxication parmi les travailleurs d'une ferme horticole en Ouganda, entraînant 27 hospitalisations, ont été constatés. Bien que le métam-sodium soit généralement considéré comme présentant un faible risque lorsqu'utilisé conformément aux instructions du fabricant, l'exposition professionnelle en l'absence des mesures de sécurité recommandées peut avoir de graves conséquences pour la santé (Nakubulwa *et al.*, 2018). De plus, les microorganismes telluriques essentiels au maintien de la santé du sol et de la productivité des cultures, peuvent être affectés par la fumigation chimique utilisée pour supprimer les pathogènes du sol. Les réponses du microbiome du sol à la fumigation au métam-sodium dépendent du contexte et des pratiques de gestion biotiques, abiotiques et agricoles. Entre sols fumigés et non fumigés, et en fonction de l'historique de la fumigation, l'abondance relative des taxons bactériens et fongiques prédominants varie, en particulier, celle des levures basidiomycètes, diminuée dans les sols fumigés (Li *et al.*, 2022). Dans le cadre du plan Ecophyto 2+ (objectif de réduction de 50 % des PPP d'ici 2025 [11]) et de la demande sociétale de produits plus respectueux de l'environnement, les producteurs sont appelés à réduire progressivement l'utilisation de PPP de synthèse tout en devant maintenir une agriculture économiquement





Figure 8. Film de solarisation sous GAP (photothèque CDDM, 2023). Film de solarisation réutilisable transparent (en PET\* de 30 à 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, non perforé, traité anti-UV\*), utilisable de mi-mai à fin juin pendant les jours les plus longs (CDDM, communication personnelle). Afin de garantir son efficacité, le film de solarisation doit être laissé en place 45 jours minimum pour les cultures sous abri et 60 jours pour les cultures de plein champ [12].



Figure 9. Désinfection vapeur par système de plaque métallique ou de bâche [13], [14]. L'utilisation de plaques métalliques (a) appelées cloches ou coffres permet une désinfection en surface (10 cm maximum) et est la méthode préférée en maraîchage. L'injection de vapeur sous bâche plastique (b) permet une désinfection en profondeur (b) [16]. La désinfection vapeur par système de plaque métalliques qui nécessitait traditionnellement un déplacement régulier est désormais effectuée par un automate.



performante. Une grande part de la lutte actuelle et future repose donc sur l'utilisation de produits de biocontrôle comme alternatives aux produits de synthèse chimique (ARELPAL, 2021).

### 1.3.2. Méthodes alternatives actuelles et inconvénients

#### a) Solarisation

La solarisation est une technique culturale alternative au désherbage ou à la désinfection chimique [12], permettant de désinfecter les couches superficielles du sol (jusqu'à environ 30 cm) en détruisant certains bioagresseurs telluriques et adventices. Elle consiste en la mise en place d'un film plastique (figure 8) induisant une élévation de la température du sol (jusqu'à 40 °C à 50 °C ou plus sous abri) sous l'effet du rayonnement solaire. La température est suivie à l'aide de sondes à plusieurs profondeurs de sol. Cette méthode à action multicible est surtout employée sous GAP ou sous serre, mais reste toutefois applicable sur de petites surfaces en plein champ. Elle est à priori peu coûteuse, adaptable à différents types de sol, non-toxique avec un impact limité sur l'environnement et est éventuellement compatible avec les traitements chimiques (utilisation possible en complément de doses réduites de PPP). Elle est également utilisable en complément à un engrais vert, après broyage et enfouissement [15]. Cependant, c'est une méthode longue, qui nécessite un ensoleillement important et ne peut donc généralement être pratiquée qu'en été où elle peut mobiliser une serre ou parcelle durant plusieurs semaines [12]. Sa faisabilité et son efficacité sont donc étroitement liées aux conditions météorologiques (ensoleillement, vent...). Sa mise en place est technique et exigeante en temps, la gestion des films plastiques après utilisation (récupération, recyclage...) est également à prendre en compte. La solarisation est peu efficace sur des sols dont le taux en MO\* est élevé. Elle manque également d'efficacité contre les bioagresseurs localisés en profondeur (e.g. *Fusarium*), les formes de conservation peu sensibles aux élévations de température (e.g. sclérotés, chlamydospores) et les pathogènes dont la mobilité permet une retraite en profondeur (e.g. nématodes). Finalement, c'est une méthode non sélective qui impacte la biodiversité du sol et nécessite donc une alternance avec d'autres techniques [15].

#### b) Désinfection vapeur

La désinfection vapeur (figure 9) est un autre moyen de lutte physique permettant de contrôler la plupart des bioagresseurs présents du sol (champignons, nématodes, semences d'adventices...) surtout employé sous serre pour les cultures légumières. Testée avec succès par le CDDM en comparaison au métam-sodium pour lutter contre le dépérissement de la mâche (Gaudin *et al.*, 2018), elle consiste en l'injection de vapeur d'eau à 180 °C pour élever la température du sol jusqu'à 85-90 °C. Si la désinfection vapeur peut être réalisée toute l'année, la période estivale reste la plus propice. En effet, plus le sol est froid et humide (conditions hivernales), plus la quantité de chaleur nécessaire à une désinfection efficace sera élevée [16]. Cette méthode n'introduit aucun facteur nocif persistant dans le sol, les délais de remise en culture sont très brefs. Néanmoins, une élévation du niveau d'azote ammoniacal par destruction des bactéries

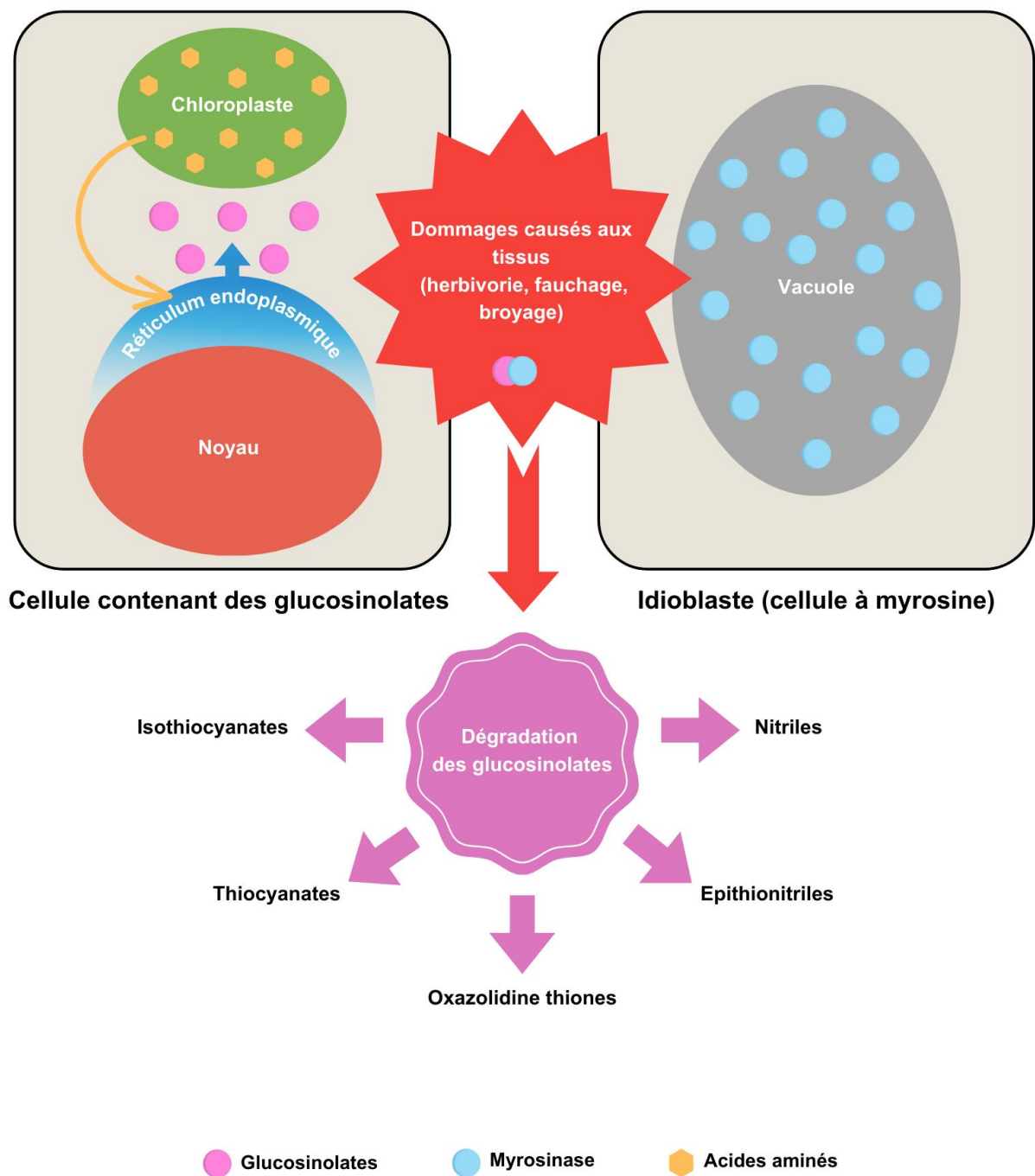


Figure 10. Processus de biofumigation à l'échelle cellulaire (d'après Ahuja *et al.*, 2010, schéma réalisé sur Canva). Les glucosinolates et la myrosinase, contenus dans des cellules différentes, entrent en contact après lésion des tissus. Leur rencontre engendre alors une réaction d'hydrolyse aboutissant à la formation de molécules toxiques et volatiles (e.g. nitriles, isothio- et thiocyanates). Ces molécules s'échappent ensuite dans la rhizosphère par des fissures dans la paroi cellulaire où elles sont alors susceptibles d'affecter divers microorganismes du sol.

nitrifiantes ou une modification du pH du sol peuvent être observées, conduisant parfois à des phytotoxicités augmentant ce délai. La vapeur convertie en eau est également susceptible d'entraîner un lessivage des éléments nutritifs. Finalement, la désinfection vapeur est très consommatrice en combustible et coûteuse dans sa mise en œuvre, souvent longue et fastidieuse [16].

## 1.4. Alternatives étudiées

La solarisation comme l'utilisation de vapeur donnent des résultats parfois insatisfaisants et sont contraignantes d'utilisation. Additionnellement, ces deux méthodes impactent significativement, et de manière non-sélective, la microfaune du sol. L'ensemble de la population de microorganismes telluriques s'en trouve réduite créant un vide écologique propice à une recolonisation rapide par des microorganismes phytopathogènes. Afin d'étoffer les connaissances actuelles, de faire face à l'apparition de nouvelles problématiques sanitaires et de pallier le retrait de certaines substances actives du marché, il est nécessaire de poursuivre les recherches et le développement de techniques alternatives appliquées seules ou en combinaison. L'utilisation de plantes allélopathiques\*, la mycorhization, le déploiement des PNPP\*, l'installation de plantes pièges et l'apport d'intrants suppressifs semblent être des stratégies prometteuses (ARELPAL, 2021). **L'objectif de cette étude sera d'évaluer la biofumigation\* et l'utilisation de composts suppressifs en vue d'un déploiement dans les exploitations maraîchères ligériennes.**

### 1.4.1. Biofumigation

Le terme « biofumigation » désigne de manière globale les effets bénéfiques dérivés de l'incorporation de couverts végétaux, d'AO\* libérant des composés biocides dans le sol. Initialement, la biofumigation consiste en une culture intercalaire d'espèces contenant dans leurs tissus de grandes concentrations de métabolites toxiques. L'utilisation de biofumigants a permis de réduire de 35 % le coût des fumigants chimiques, accroissant les avantages économiques de la communauté agricole. Elle s'applique à des cultures annuelles ou pérennes et augmente la fertilité du sol en améliorant sa structure, sa teneur en eau et en MO, ses propriétés physicochimiques et son activité microbienne (Tagele *et al.*, 2021). Lors de la destruction de la culture (broyage et enfouissement), des métabolites sont libérés et ont une action biocide ou répulsive sur un certain nombre de bioagresseurs et ravageurs de manière analogue à certains fumigants chimiques dont l'usage est aujourd'hui interdit (ARELPAL, 2021). Les Brassicacées contiennent dans des cellules séparées des GSL\* et de la myrosinase qui une fois en contact (après lésion des tissus) engendrent une réaction d'hydrolyse (figure 10) amenant à la synthèse de composés toxiques notamment d'ITC\*, de nitriles et de thiocyanates (Ahuja *et al.*, 2010). Parmi ces composés, les ITC ont un effet biocide général plus important que les nitriles ou les thiocyanates. L'allyl ITC, libéré par la moutarde (Montaut *et al.*, 2012), serait l'ITC le plus efficace dans la suppression des pathogènes fongiques. L'effet biocide des biofumigants varie en fonction

**Biofumigant**

- Type et concentration des GSL
- Type de produits d'hydrolyse des GSL

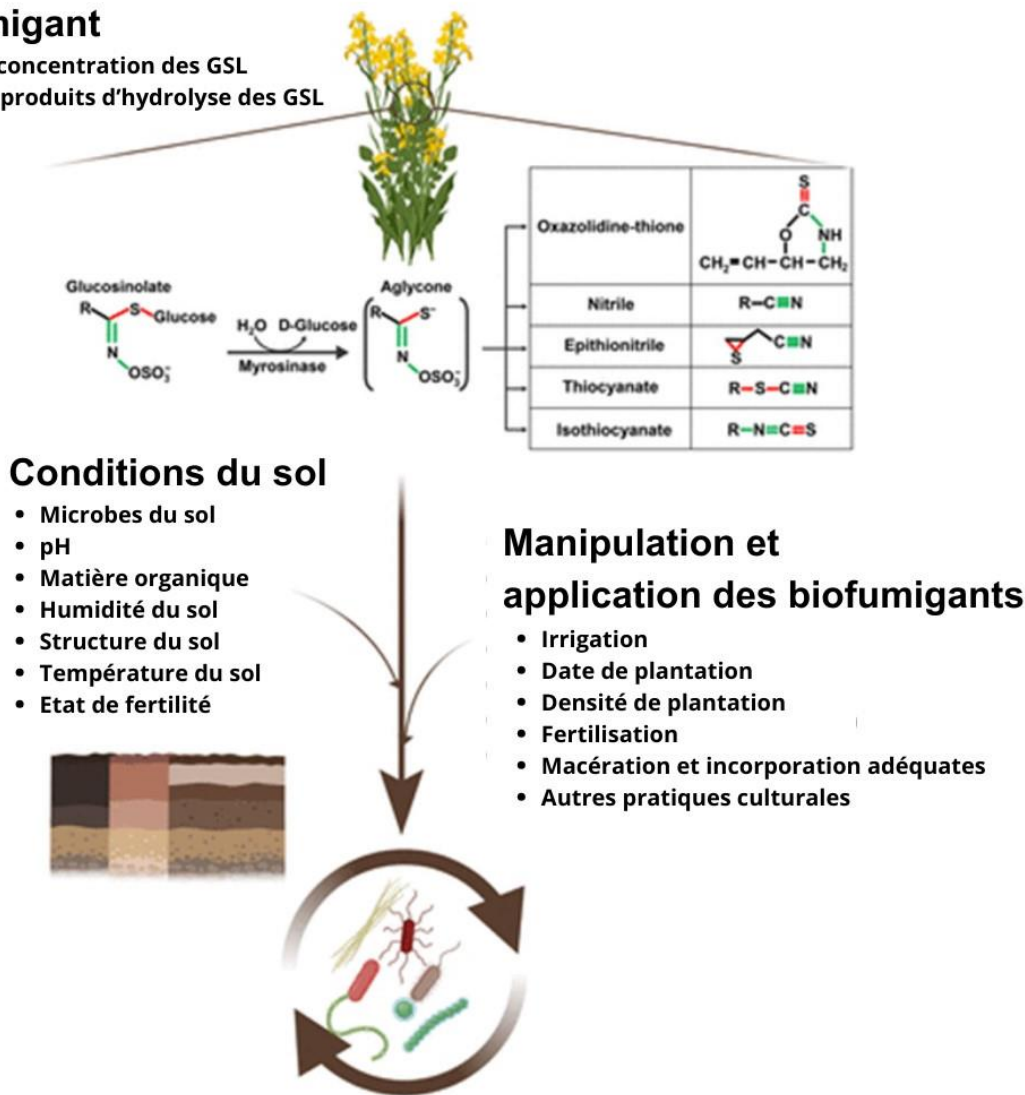


Figure 11. Facteurs influençant les relations biofumigant – microorganismes telluriques (traduit d’après Tagele *et al.*, 2021).

Tableau I. Biofumigants potentiels ayant montré des effets suppressifs contre *Pythium* spp. et/ou *Rhizoctonia solani* (d’après Tagele *et al.*, 2021).

Espèce de Brassicacée	Pathogène efficacement contrôlé
<i>Brassica juncea</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Rhizoctonia solani</i></li><li>• <i>Pythium</i> spp.</li></ul>
<i>Brassica napus</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Rhizoctonia solani</i></li><li>• <i>Pythium</i> spp.</li></ul>
<i>Brassica carinata</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Rhizoctonia solani</i></li></ul>
<i>Eruca vesicaria</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Rhizoctonia solani</i></li></ul>

de la proportion des principaux GSL. Les GSL aliphatiques (surtout la sinigrine) sont plus toxiques que les GSL indoliques. La gluconasturtine est le GSL aromatique le plus efficace. Le degré de sensibilité des microorganismes telluriques aux différents groupes de GSL aliphatiques est très variable (Tagele *et al.*, 2021). La chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes a observé une efficacité de la biofumigation avec une application de *Brassica carinata* (moutarde d'Abyssinie) à 250 g/m<sup>2</sup> (incorporée pendant 14 à 21 jours) pour lutter contre la fusariose sur salade (Pons *et al.*, 2018). Les Poacées telles que les sorghos (e.g. *Sorghum bicolor*, *S. sudanense*) contiennent de grandes concentrations foliaires en dhurrine, hydrolysée en cyanure d'hydrogène lorsque les tissus sont endommagés (broyage, fauchage, herbivorie). Les conditions environnementales (type et pH du sol, température) et de conduite (irrigation, profondeur d'enfouissement, type de broyage...) influencent la proportion de molécules biocides susceptibles d'atteindre leurs organismes cibles (figure 11). Plus la teneur en MO du sol est élevée, plus l'adsorption des composés biocides est élevée réduisant ainsi leur efficacité. Les sols plus légers, comme les sols sableux du bassin maraîcher nantais, permettraient donc une meilleure diffusion des gaz toxiques. Les ITC peuvent également être dégradés par les bactéries du sol formant ainsi des composés secondaires moins toxiques (Gimsing et Kirkegaard, 2009). Les pertes en composés biocides peuvent aussi provenir de la volatilisation (Price *et al.*, 2005) et dans une moindre mesure de la lixiviation. La BB\* est une méthode prometteuse pour lutter contre les pathogènes et les ravageurs telluriques (tableau I). Elle contribue à neutraliser le pH du sol, alors que les engrais minéraux provoquent une acidification. Les champignons étant comparativement plus tolérants à un pH plus bas que les bactéries, la BB permettrait dans une certaine mesure de rééquilibrer les diversités fongique et bactérienne. Un effet négatif de la BB sur la  $\beta$  diversité\* bactérienne et fongique a été rapporté par plusieurs auteurs mais est encore incertain. L'obstruction de la diversité microbienne du sol permettrait aux pathogènes de s'établir rapidement, entraînant une plus forte intensité de la maladie (Tagele *et al.*, 2021).

#### 1.4.2. Composts suppressifs

La lutte contre les agents pathogènes telluriques tels que *Pythium* spp. et *Rhizoctonia solani* est possible en utilisant des composts présentant des effets suppressifs contre ces pathogènes, sous serre ou en plein champ. Neher *et al.* (2017) ont étudié la suppressivité\* de différents composts sur le rhizoctone du radis, maladie courante en Pays de la Loire. La maturité des composts et le processus de compostage auraient un impact sur la sévérité de la maladie. Les lombricompost et digestats anaérobies seraient notamment plus suppressifs que les composts issus des processus PAS\* et les composts maturés en andains\*. La maturité du compost augmenterait la suppressivité, les composts peu décomposés ou matures auraient des effets suppressifs sur *R. solani*, contrairement aux composts partiellement décomposés. Les composts de fumier de bovins laitiers et/ou d'écorce de feuillus supprimeraient plus la maladie que ceux issus de fumier de volailles. Une MO\* semble supprimer un type de pathogène mais rarement plusieurs et



certaines composts peuvent s'avérer phytotoxiques au-delà d'un certain seuil (e.g. vermicompost efficace appliqué à 5 %, phytotoxique appliqué à 25 % en raison d'excès en éléments dont les nitrates, entraînant une conductivité trop élevée dans le sol). Deux mécanismes de suppressivité sont évoqués : soit par réduction de l'expression de la maladie, soit par réduction de la croissance et de la survie de l'agent pathogène. La combinaison des deux mécanismes est possible. Ces mécanismes sont permis par les propriétés intrinsèques des composts (composition chimique et microbienne, disponibilité en éléments nutritifs). Les sources de compost et les pathosystèmes sont nombreux. Le criblage des composts nécessite l'utilisation d'indicateurs simples à mesurer et représentatifs de la capacité suppressive du compost. L'abondance microbienne (notamment en *Pseudomonas fluorescens*, bactéries sporulantes du genre *Bacillus sp.* et *Trichoderma spp.*), la mesure de la dégradation de la fluorescéine diacétate ou la maturité des nématodes (évaluée selon leur poids), en sont quelques exemples. A l'inverse, certains indicateurs (ratio C/N, pH...) semblent non-corrélés à la suppressivité des composts et ne constituent donc pas une base prédictive. L'identification de ces indicateurs est une étape cruciale pour discriminer les MO, cependant les analyses peuvent s'avérer fastidieuses et onéreuses. L'évaluation à priori de la faisabilité de telles mesures est donc indispensables (ARELPAL, 2021).

### 1.5. Projet SUPERNOMA

Le projet SUPERNOMA\* s'étend sur une durée de trois ans et vise à améliorer l'efficacité des intrants et à maîtriser les bioagresseurs dans le maraîchage et les cultures légumières par des approches préventives et curatives. Ce projet régional démarré le 01/01/2022 s'achèvera le 31/12/2024. Le chef de file de ce projet est l'ARELPAL\*, les autres partenaires sont le CDDM\*, le CTIFL, et le CDDL\*. Le projet s'articule autour de trois axes : 1. l'identification et les essais de couverts assainissants (couverts à effets allélopathiques (biocide, mycorrhizotrophe, piège ou répulsif), couverts détruits pour la biofumigation) ; 2. l'identification et essais d'intrants exogènes d'origine naturelle (intrants à effet biocides (biofumigation, biocontrôle), intrants à effet stimulateur de défense des plantes (PNPP, extraits végétaux et mycorrhizes) et intrants à effet suppressif (composts et thés de composts)) ; 3. la communication et diffusion des résultats (organisation des visites d'essai pour et chez les producteurs et instituts techniques agricoles, diffusion des résultats, pilotage et coordination du projet) (ARELPAL, 2021).

### 1.6. Objectifs du stage

Une étude bibliographique sera d'abord effectuée afin de compléter les recherches des années précédentes avec des éléments plus récents. Simultanément, des méthodes de criblage de biofumigants et de composts suppressifs *in vitro* seront évaluées en complément d'essais réalisés en 2022. Un des objectifs est de corréler ces essais *in vitro* aux résultats obtenus en caissettes de sol ou en parcelles. Dans la continuité des essais effectués en 2022-2023, l'efficacité de couverts assainissants ou d'intrants biodésinfectants sera vérifiée par la mise en place d'essais à différentes échelles (caissette sous serre, phytotron, parcelles expérimentales



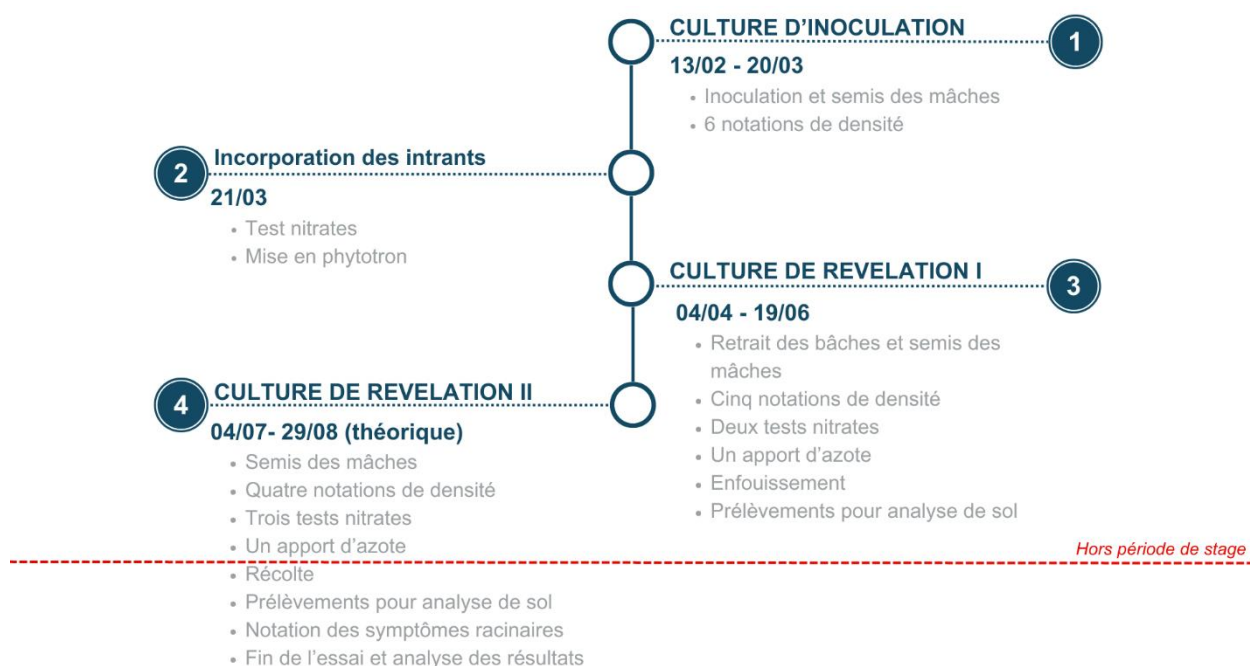


Figure 12. Déroulé chronologique de l'essai d'intrants contre *Pythium* spp. sur mâche.

Tableau II. Modalités d'inoculation de *Pythium* et d'apport d'intrants pour l'essai *Pythium*/mâche.

Modalités	Inoculation	Fournisseur de l'intrant	Nature de l'intrant	Dose hectare	Dose caissette (g)
M1 Fertil'Eveil inoc	Oui	Fertileveil	Compost	20 t/ha	240
M2 Cobiotech inoc	Oui	Dietaxion	Microorganismes	300 g/ha	1
M3 Cobiotech + Fertil'Eveil inoc	Oui		Compost + microorganismes	20 t/ha + 300g/ha	240 + 1
M4 Compost de champignonnière inoc	Oui		Compost	40 t/ha	480
M5 Gaia Orgaloire inoc	Oui	Terrial	Compost	20 t/ha	240
M6 Avresne inoc	Oui	Avresne	Compost	10 t/ha	120
M7 Tourteau de <i>B. carinata</i> inoc	Oui	Terrial	Pellets	2 t/ha	24
M8 Témoin sol nu inoc	Oui	/	/	/	/
M9 Fertil'Eveil	Non	Fertileveil	Compost	20 t/ha	240
M10 Cobiotech	Non	Dietaxion	Microorganismes	300 g/ha	1
M11 Cobiotech + Fertil'Eveil	Non		Compost + microorganismes	20 t/ha + 300g/ha	240 + 1
M12 Compost de champignonnière	Non		Compost	40 t/ha	480
M13 Gaia Orgaloire	Non	Terrial	Compost	20 t/ha	240
M14 Avresne	Non	Avresne	Compost	10 t/ha	120
M15 Tourteau de <i>B. carinata</i>	Non	Terrial	Pellets	2 t/ha	24
M16 Témoin sol nu	Non	/	/	/	/



au CDDM ou chez le producteur). Des essais identiques seront mis en place dans le cadre de l'évaluation de l'efficacité de différents composts suppressifs. Un travail d'analyse statistique et de synthèse des données collectées au cours des différents essais sera également réalisé afin de rédiger les comptes-rendus des essais suivis. Finalement une analyse comparative des essais des années précédentes sera effectuée. Le matériel biologique nécessaire (isolats de *Pythium* spp. et *Rhizoctonia solani*, graines de mâche, de radis) a été réuni avant le début du stage. L'équipe d'accueil dispose par ailleurs des infrastructures et du savoir-faire nécessaires à la réalisation des expérimentations prévues. Seules les analyses moléculaires et chimiques ont été effectuées par des laboratoires tiers (respectivement Vegenov et Capinov).

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Préparation des inoculums

Des sacs contenant 50 g de vermiculite (CAMN, granulométrie variable), fermés par un bouchon de coton cardé, sont autoclavés durant 1 h à 120 °C). Deux-cent-cinquante ml de milieu de culture sont ensuite ajoutés dans les sacs qui sont de nouveau autoclavés (15 min, 120 °C). Le milieu de culture varie selon le pathogène cultivé : *R. solani* est cultivé dans du malt liquide (Biokar, 20 g/l) et *P. violae* et *P. valerianellae* sont cultivés dans du milieu CEL\* (jus de carotte bio (marque variable, 50 ml/l) et extrait de levure (Biokar, 2 g/l)). Les sacs sont alors inoculés avec les champignons remis en culture quelques jours avant sur boîte de Petri (10 explants de 4 mm de diamètre par sac) et sont finalement placés en chambre climatisée pour incubation (18 °C, 2 à 6 semaines, avec un idéal situé entre 3 et 4 semaines).

### 2.2. Intrants contre *Pythium* spp. sur mâche

#### 2.2.1. Intrants contre *Pythium* spp. en caissettes en phytotron

Dans un premier temps, une culture d'inoculation (figure 12) est mise en place en serre froide (conditions de culture en annexe I) dans des caissettes (30 x 40 x 23 cm) contenant du sol maraîcher désinfectées à la vapeur sous bâche pendant 1 h. Deux souches de *Pythium* sont inoculées dans le sol des caissettes (25 g de *Pythium valerianellae* 23-885-43 et 50 g de *Pythium violae* 21-700-4) dans l'objectif d'obtenir une pression pathogène dans le sol donnant 30 à 40 % de plants atteints. Pour la culture d'inoculation et la première culture de révélation (CR), 80 graines de mâche non traitées (*Valerianella locusta*, variété Audace, HM Clause, en feuille de papier) sont placées dans chaque caissette et recouvertes d'une fine couche de sable. L'apport d'une quantité d'eau normalisée entre caissettes est rendu possible grâce à un compteur d'intervalles (*application Interval Timer, Su-Au Hwang, version 2.2.6*). La fréquence et l'intensité des arrosages varient en fonction des conditions météorologiques. La densité\* est relevée dès l'apparition des cotylédons, de manière bimensuelle puis hebdomadaire. A partir du moment où elle n'évolue plus, l'homogénéité de la densité entre modalités est vérifiée statistiquement.

Tableau III. Caractéristiques des intrants pour les doses apportées. MS : masse sèche ; MO : matière organique ; C/N : rapport carbone/azote ; Keq : coefficient d'équivalence en azote engrais minéral/engrais organique ; ISMO : Indice de Stabilité des Matières Organiques. Les données ont été collectées à partir des fichiers techniques des fournisseurs et des analyses faites par le laboratoire Capinov (bleu) sur chaque matière en mars 2024.

Intrant	MS	C/N	ISMO	MO totale (g/kg brut)	Apport en C (t/ha)	N total (g/kg)	Keq	Apport en N (kg/ha)	Dose d'apport (t/ha)
Pellets de tourteau de <i>B. carinata</i>	88,70%	7,3	65%	801,7	0,52	55,13	1	110	2
Compost de champignonnière	38,90%	12	59%	128,2	1,51	5,33	0,15	32	40
Fertil'Eveil	57,00%	8,6	73%	292,4	2,13	8,62	0,2	34	20
Avresne	65,30%	11,5	61%	453,4	1,38	19,78	0,25	49	10
Gaia Orgaloire	50,60%	11,2	54%	263,9	1,42	11,78	0,15	35	20

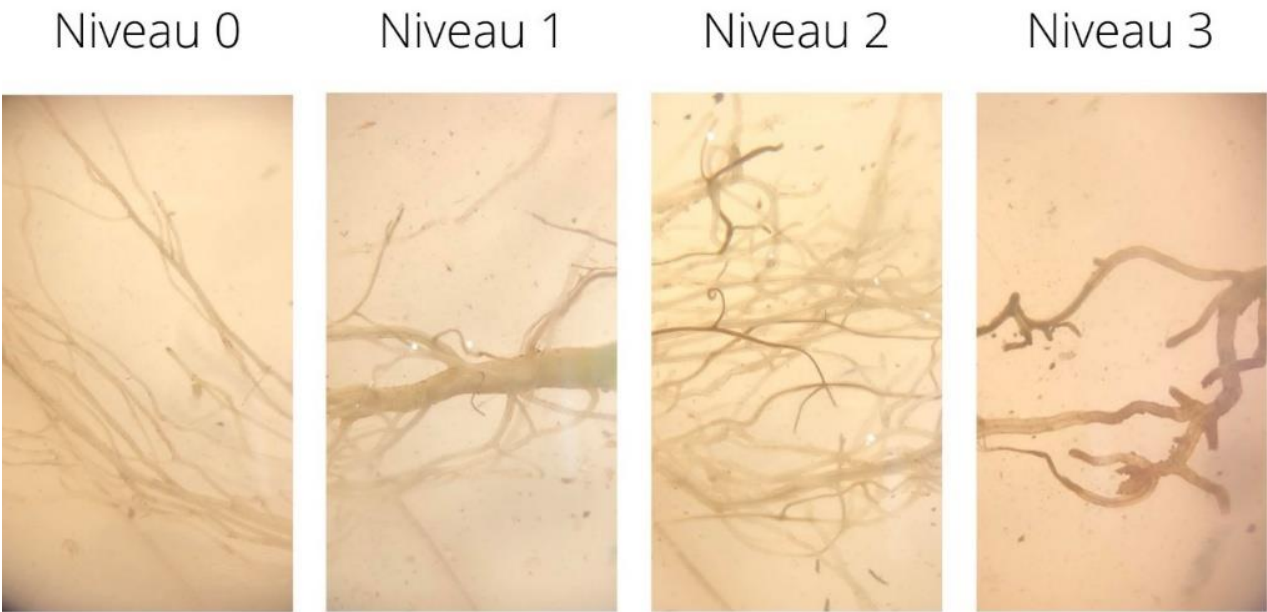


Figure 13. Echelle de sévérité symptômes causés par *Pythium* spp. sur mâche (observation à la loupe binoculaire, G x 20 à 40 ; AM, 27/02/2024, CDDM). Niveau 0 : système racinaire indemne de nécroses, mâche saine ; niveau 1 : extrémités du système racinaire secondaire atteintes de nécroses, mâche commercialisable à récolter sous une semaine ; niveau 2 : système racinaire secondaire entièrement nécrosé, feuilles jaunies, plante tassée ; niveau 3 : pivot principal nécrosé, plante jaune et flétrie.

Chaque culture est laissée en place pour une durée minimale de 8 semaines. Au terme de la culture d'inoculation, les intrants (tableau II) sont amendés dans des proportions telles que le taux de carbone apporté par chacun soit le plus similaire possible (tableau III) et en fonction des résultats des années passées. Les pellets de tourteau de *Brassica carinata* (moutarde d'Abyssinie) ont précédemment montré une phytotoxicité à une dose de 6 t/ha (L'Hostis, 2023) et seront testé ici à 2 t/ha conformément aux recommandations du fournisseur. Le produit du laboratoire Cobiotech correspond à un mélange de souches de *Bacillus* sp, utilisé pour assainir les litières animales ensuite compostées pour produire le compost Fertil'Eveil. Les composts et pellets sont ensuite incorporés dans les caissettes sur 15 cm de hauteur de sol (imitation de la profondeur de travail du cultivateur en conditions réelles de culture) à l'aide d'une griffe à main. Quatre répétitions sont réalisées par modalité. Les caissettes sont placées en phytotron selon un plan randomisé (annexes II et III) en conditions hivernales (durée jour : 8 h, 12 °C ; température de nuit : 8 °C) pour la fin de l'essai. Les 4 répétitions des modalités tourteau de *B. carinata* sont bâchées ensemble (bâche plastique noire maintenue par une corde) afin de favoriser la rétention des composés biofumigants libérés lors de la dégradation des pellets. Après 15 jours, les bâches sont retirées et la CR1 est semée de manière identique à la culture d'inoculation. Au terme de la CR 1, les plants sont enfouis en profondeur dans les caissettes (maintien de l'inoculum) laissées ensuite 15 jours au repos avant d'être semées à nouveau. Le deuxième semis est effectué à 100 graines de mâche non traitées (*Valerianella locusta*, variété Parade, HM Clause, libres) par caissette (5 rangs de 20 graines), sans sablage. Ce changement de variété de mâche et de méthode de semis est opéré en raison d'une hétérogénéité de levée observée en CR 1. Les caissettes sont placées en phytotron selon un nouveau plan randomisé (annexe III) dans les mêmes conditions de température et d'éclairage que celles de la CR 1. La CR 2 est suivie de manière identique à la CR 1. En fin CR 2, 10 plantes sont prélevées par répétition. Le système racinaire de chaque plante est observé sous loupe binoculaire et se voit attribuer le niveau de symptômes correspondant (figure 13). Le taux de nitrates du sol est mesuré par extraction liquide à l'eau (ratio de masse = 1/1) dans le surnageant à l'aide de bandelettes et d'un réflectomètre Nitratecheck 404 (annexe IV) tout au long de l'expérience. Pour chaque date d'évaluation de l'état de la fertilisation azotée, une mesure unique est effectuée sur un pool homogénéisé de 8 prélèvements par modalité (soit 2 prélèvements par répétition). Le taux d'azote nitrique est ajusté à 60 kgN/ha (besoin en azote de la mâche pour un cycle de développement complet dans ces conditions) avec une solution de YaraTera® Amnitra et d'eau afin de gommer les hétérogénéités de développement et d'écarter l'hypothèse d'une absence de levée liée à la « faim d'azote ».

### 2.2.2. Analyse de sol *Pythium*

Les analyses moléculaires des échantillons de sol sont effectuées par le laboratoire Vegenov. Enfin de cultures de révélation 1 et 2, la quantité d'inoculum est déterminée par qPCR à partir d'échantillons de sol (triplicata par modalité, M1 à M8 et M16). A l'aide d'une tarière, 50 ml de sol

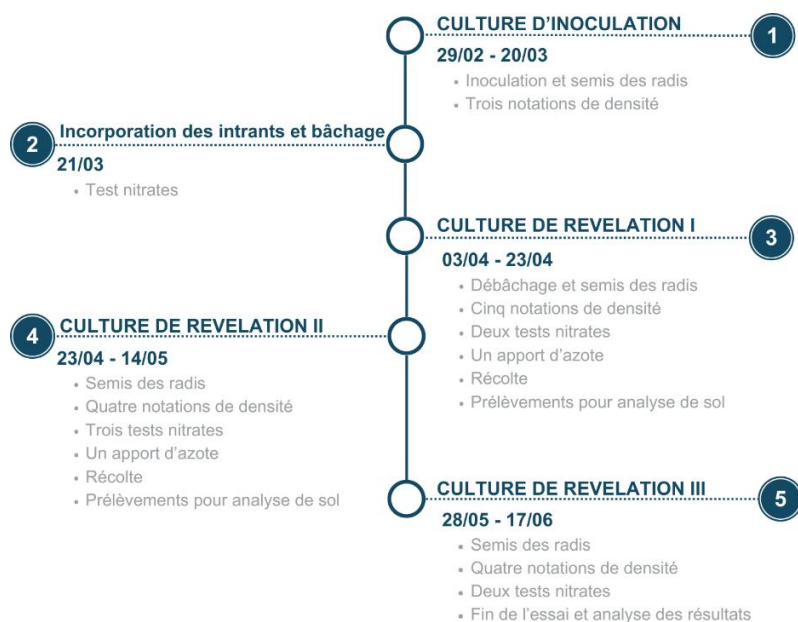


Figure 14. Déroulé chronologique de l'essai d'intrants contre *R. solani* sur radis.

Tableau IV. Modalités d'inoculation de *R. solani* et d'apport d'intrants pour l'essai *Rhizoctonia*/radis. NI : non inoculé. Les modalités M9 à M16 ont été abandonnées (absence de pathogénicité de *R. solani* 22 839 RR sur radis, voir 3.2.). M19 R4 et M19 R1 ont reçu respectivement 0.65 g et 0 g de Cobiotech (manque de produit à la suite d'imprécisions de pesée).

Modalités	Inoculum	Fournisseur de l'intrant	Nature de l'intrant	Dose hectare	Dose caissette (g)
M1 Fertil'Eveil 714	21 714 5 RR	Fertileveil	Compost	20 t/ha	240
M2 Cobiotech 714	21 714 5 RR	Dietaxion	Microorganismes	300 g/ha	1
M3 Cobiotech + Fertil'Eveil 714	21 714 5 RR		Compost + microorganismes	20 t/ha + 300g/ha	240 + 1
M4 Compost de champignonnière 714	21 714 5 RR		Compost	40 t/ha	480
M5 Gaia Orgaloire 714	21 714 5 RR	Terrial	Compost	20 t/ha	240
M6 Avresne 714	21 714 5 RR	Avresne	Compost	10 t/ha	120
M7 Tourteau de <i>B. carinata</i> 714	21 714 5 RR	Terrial	Pellets	2 t/ha	24
M8 Témoin sol nu 714	21 714 5 RR	/	/	/	/
M9 Fertil'Eveil 839	22 839 21 RR	Fertileveil	Compost	20 t/ha	240
M10 Cobiotech 839	22 839 21 RR	Dietaxion	Microorganismes	300 g/ha	1
M11 Cobiotech + Fertil'Eveil 839	22 839 21 RR		Compost + microorganismes	20 t/ha + 300g/ha	240 + 1
M12 Compost de champignonnière 839	22 839 21 RR		Compost	40 t/ha	480
M13 Gaia Orgaloire 839	22 839 21 RR	Terrial	Compost	20 t/ha	240
M14 Avresne 839	22 839 21 RR	Avresne	Compost	10 t/ha	120
M15 Tourteau de <i>B. carinata</i> 839	22 839 21 RR	Terrial	Pellets	2 t/ha	24
M16 Témoin sol nu 839	22 839 21 RR	/	/	/	/
M17 Fertil'Eveil NI	NI	Fertileveil	Compost	20 t/ha	240
M18 Cobiotech NI	NI	Dietaxion	Microorganismes	300 g/ha	1
M19 Cobiotech + Fertil'Eveil NI	NI		Compost + microorganismes	20 t/ha + 300g/ha	240 + 1
M20 Compost de champignonnière NI	NI		Compost	40 t/ha	480
M21 Gaia Orgaloire NI	NI	Terrial	Compost	20 t/ha	240
M22 Avresne NI	NI	Avresne	Compost	10 t/ha	120
M23 Tourteau de <i>B. carinata</i> NI	NI	Terrial	Pellets	2 t/ha	24
M24 Témoin sol nu NI	NI	/	/	/	/

sont prélevés par répétition (1 à 3) et conservés dans des tubes Falcon™ de même volume à basse température (4-6 °C) en attendant l'envoi. Pour chaque échantillon de sol, deux extractions d'ADN et deux qPCR sont réalisées. Le seuil de détection minimal est de 0.11 (pgADNcible)/g de sol. Les ADN constituant les témoins positifs proviennent des souches transmises à Vegenov par le CDDM (*P. valerianellae* 23-885-43 et *P. violae* 21-700-4). Quatre jeux d'amorces spécifiques à *P. irregulare*, *P. violae*, *P. valerianellae* et *P. ultimum* sont utilisés pour l'amplification. La spécificité des amorces a été validée de manière interne par Vegenov par test sur différentes espèces de *Pythium* (*P. dissotocum*, *P. intermedium*, *P. irregulare*, *P. kashmirensense*, *P. paroecandrum*, *P. perplexum*, *P. sylvaticum*, *P. ultimum*, *P. violae*, *P. valerianellae*). Le témoin négatif est réalisé avec de l'eau.

## 2.3. Intrants contre *Rhizoctonia solani* sur radis

### 2.3.1. Intrants contre *Rhizoctonia solani* en caissettes sous serre

Une culture d'inoculation est d'abord mise en place (figure 14). L'ensemble sol-caissette est préalablement désinfecté à la vapeur sous bâche pendant 1 h. Les souches *Rhizoctonia solani* 21-714-5 RR et *Rhizoctonia solani* 22-839-21 RR sont inoculées dans le sol des caissettes (30 x 40 x 23 cm) à hauteur de 5 g/caissette chacune. La pression pathogène visée est de 30 à 40 % de pertes sur culture. Cinquante graines de radis non traitées (*Raphanus sativus*, variété Fluo F1, Vilmorin) sont semées dans chaque caissette en cinq rangées de dix graines dans des sillons profonds d'environ 1 cm, régulièrement espacés. Le placement des caissettes sous serre froide (conditions de culture en annexe I) est randomisé (annexe II et V) afin d'éviter un effet bordure. L'arrosage est effectué de manière similaire à l'essai 2.2.1. Le relevé de densité est effectué de manière bihebdomadaire. Lors du dernier relevé de densité, les radis sont extraits du sol et seuls ceux présentant un système racinaire sain (figure 15) sont comptabilisés. Les intrants sont ensuite amendés (souche 714 uniquement) dans des proportions telles que les taux de carbone apportés par chaque intrant soient les plus similaires possible (tableau III). Les couverts et intrants sont ensuite incorporés dans les caissettes de manière identique à l'essai 2.2.1. (tableau IV). Les quatre répétitions des modalités tourteau de *B. carinata* sont bâchées ensemble. Les caissettes sont laissées en serre pour la fin de l'essai. Après deux semaines et rééquilibrage de l'humidité entre caissettes bâchées et non bâchées, la CR 1 est semée de manière identique à la culture d'inoculation. Les CR sont suivies de la même manière que la culture d'inoculation. Une fois la levée achevée (stagnation de la densité), les radis sont arrachés et la partie racinaire uniquement est enfouie dans le sol pour les modalités inoculées (conservation de l'inoculum). Pour les modalités témoin, les radis sont entièrement retirés des caissettes. Une seconde CR est semée à l'issue de la première et une troisième CR est mise en place avec les amendements ayant démontré une efficacité contre *R. solani* en CR 1 et 2 uniquement. Le taux de nitrates du sol est mesuré par extraction liquide à l'eau (ratio de masse = 1/1) dans le surnageant à l'aide de bandelettes et d'un réflectomètre Nitracheck 404 (annexe III) tout au long de l'expérience. Pour





Figure 15. Systèmes racinaires de radis sain (a) et nécrosé (b) après infection par *R. solani* 21-714-5 RR (AM, 23/04/2024, CDDM).

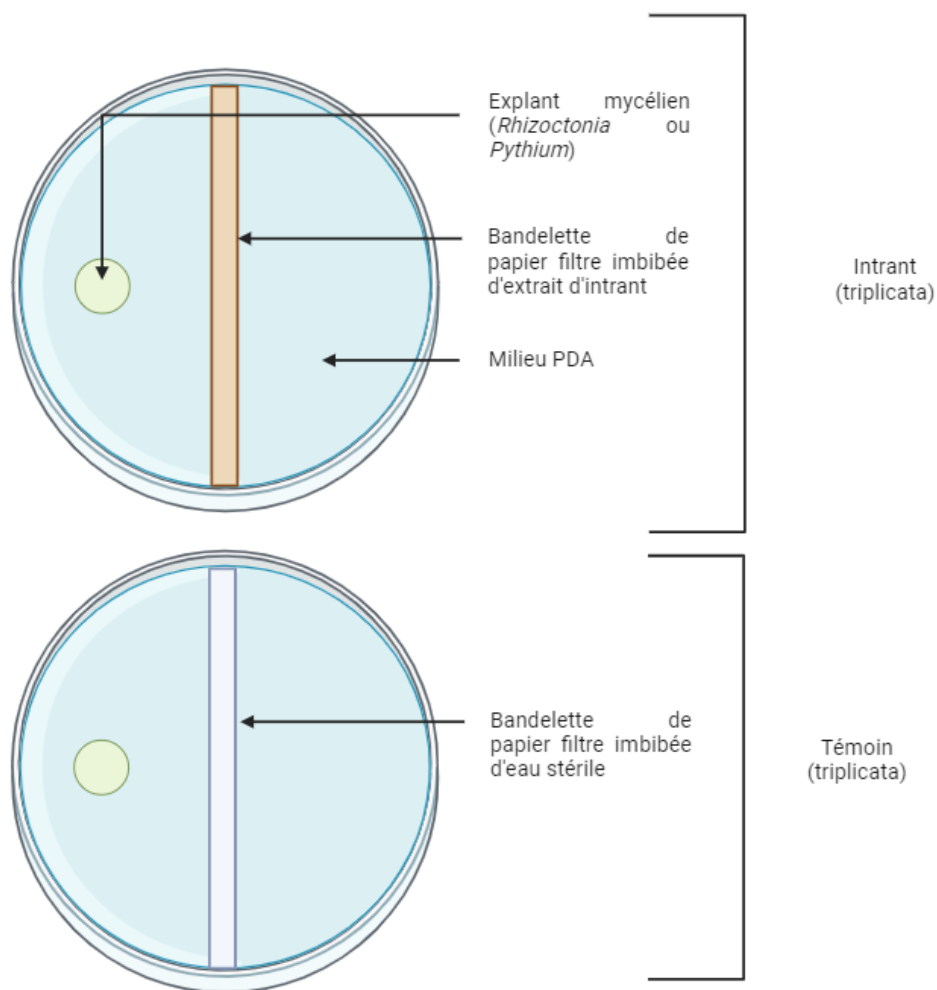


Figure 16. Protocole de criblage *in vitro* des intrants (schéma réalisé sur Biorender).

chaque date d'évaluation de l'état de la fertilisation azotée, une mesure unique est effectuée sur un pool homogénéisé de 8 prélèvements par modalité (soit 2 prélèvements par répétition). Ce taux d'azote nitrique est ajusté à 40 kgN/ha (besoin du radis pour un cycle de développement complet dans ces conditions) avec une solution de YaraTera® Amnitra et d'eau afin de gommer les hétérogénéités de développement, d'écarter l'hypothèse d'une absence de levée liée à la « faim d'azote » ou à l'inverse d'empêcher une fertilisation trop élevée favorisant le développement du rhizoctone (M. Lorne, communication personnelle).

### 2.3.2. Analyses de sol *Rhizoctonia*

En fin de cultures de révélation 1 et 2, la quantité d'inoculum est déterminée par qPCR à partir d'échantillons de sol (triplicata par modalité, M1 à M8 et M24). A l'aide d'une tarière, 50 ml de sol sont prélevés par répétition (1 à 3) et conservés dans des tubes Falcon™ de même volume à basse température (4-6 °C) en attendant l'envoi. Pour chaque échantillon de sol, deux extractions d'ADN et deux qPCR sont réalisées. Deux amorces, dont la spécificité a été préalablement vérifiée en interne par Vegenov, sont utilisées : une spécifique de l'espèce *R. solani* et une spécifique du clade AG2\_1 auquel appartiennent les souches RR 21-714-5 et RR 22-839-21. Le seuil de détection minimal est de  $1.10^{-5}$  ng d'ADN/μl. Le témoin positif est réalisé avec la souche RR 21-714-5, le témoin négatif avec de l'eau.

### 2.4. Criblage des intrants *in vitro*

Pour chaque compost (Avresne, Fertil'Eveil, Gaia Orgaloire, champignonnière), 5 g de MO sont mis en solution dans 50 ml d'eau osmosée stérile contenue dans un flacon stérile avec bouchon. Les flacons sont placés sur agitation durant 4 à 5 h à température ambiante. Des explants mycéliens issus de cultures de *R. solani* 21-714-5 RR, *P. valerianellae* 23-885-43 et *P. violae* 21-700-4 datant au plus d'une semaine sont découpés à l'aide d'un emporte-pièce de 4 mm de diamètre en conditions stériles. Sur des boîtes de Petri contenant du milieu PDA et à l'aide d'une lame de scalpel est déposé un explant de l'isolat par boîte (figure 16). Des bandelettes de papier filtre stérile (5 mm de largeur, longueur égale à celle du diamètre d'une boîte de Petri) sont imbibées d'extrait de MO et placées au centre de la boîte à l'aide d'une pince fine (figure 16). Pour le témoin, la bandelette est imbibée d'eau osmosée stérile. Les positionnements de l'explant mycélien et de la bandelette sont normalisés (utilisation d'un gabarit). Chaque condition est testée en triplicata. Les boîtes sont placées en étuve à 25 °C pour incubation durant 5 jours. Le suivi est effectué à 24 h, 48 h, 72 h et 86 h et consiste à tracer le contour du mycélium au marqueur fin. L'arrêt des mesures est effectué au plus tard au moment où le mycélium de la condition témoin recouvre l'entièreté de la gélose. Le dessous des boîtes est photographié avec un témoin de taille et la surface du mycélium est mesurée à l'aide du logiciel ImageJ (version 1.54g).

### 2.5. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont réalisées sous R (version 4.3.3) à l'aide de l'environnement

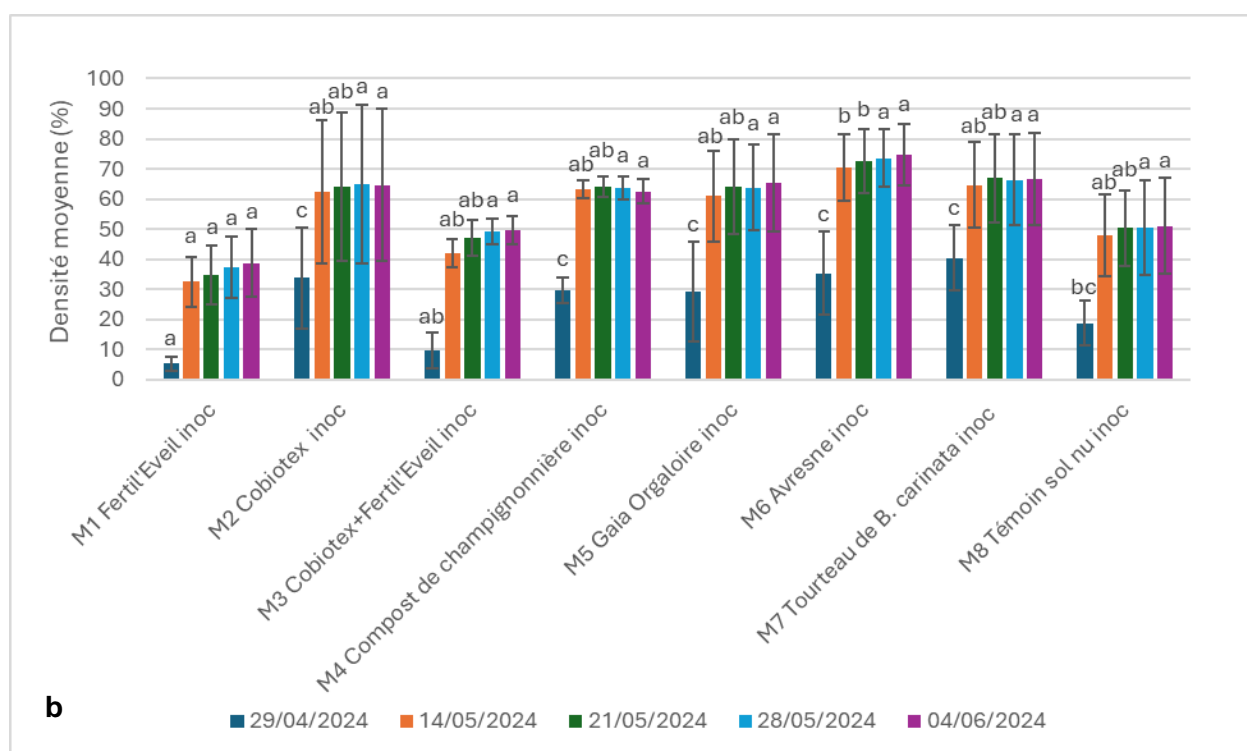
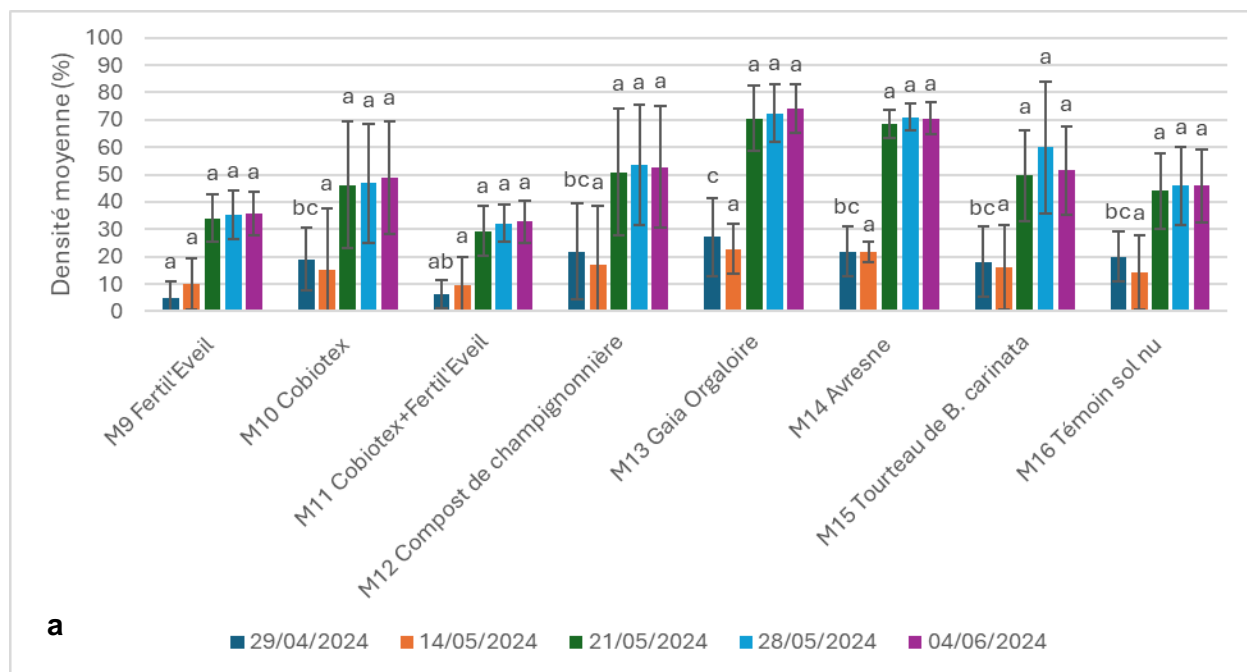


Figure 17. Evolution de la densité des mâches en sol non inoculé (a) et inoculé avec *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 (b) en culture de révélation 1. Les données sont les moyennes de 4 répétitions (3 répétitions pour la modalité M3)  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).



Rstudio (version 2023.12.1) et considèrent toutes un risque  $\alpha$  de 5 %. Des analyses de variance (ANOVA\*, fonction `Anova()`, librairie `car`) avec test post-hoc de Tukey sont effectuées sur les mesures de densité de radis et de mâche, sur les résultats des analyses de sol (*R. solani* uniquement) ainsi que sur les mesures de surface de mycélium. Les modèles statistiques utilisés pour les données de densité sont le modèle linéaire généralisé ajusté (GLM\*, fonction `glm()`, librairie `stats`) ou le modèle linéaire généralisé binomial négatif (GLMNB\*, fonction `glm.nb()`, librairie `MASS`) quand les données ne permettent pas l'utilisation du premier modèle (sur-dispersion des résidus non correctible par transformation de variable). Pour les données de croissance mycélienne et les analyses de sol (si effectuées sur plusieurs dates) le modèle utilisé est le modèle linéaire mixte (LMM\*, fonction `lmer()`, librairie `lme4`). La comparaison des densités moyennes générales entre caissettes inoculées avec *R. solani* RR 21-714-5, *R. solani* RR 22-839-21 et non inoculées est effectuée via un test de Dunn-Kruskal-Wallis. Pour la comparaison des densités moyennes générales entre caissettes inoculées avec le mélange de *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 et les caissettes non inoculées, un test de Fligner-Policello est réalisé. Pour les données d'analyse de sol *P. violae* et *P. valerianellae*, des ANOVA par permutation (fonction `perm.anova()`, librairie `RVAideMemoire`) sont effectuées.

## 3. Résultats

### 3.1. Intrants contre *Pythium* spp. sur mâche

Une différence significative entre la densité moyenne en caissettes inoculées (51.11 %) et la densité moyenne en caissettes non inoculées (81.03 %) est constatée au terme de la culture d'inoculation ( $p = 2.2 \cdot 10^{-16}$ , annexe VI). Le taux de pression pathogène moyen (ensemble des relevés) obtenu est d'environ 29.92 %, valeur suffisamment proche des 30 % minimum requis. Ce taux se situe à environ 32.4 % si l'on considère uniquement les valeurs du dernier relevé de densités de la culture d'inoculation, témoignant du succès de l'inoculation et permettant la poursuite de l'essai. A partir du moment où la densité n'évoluait plus (15/03), l'homogénéité de densités entre modalités a été vérifiée statistiquement. La densité n'étant initialement pas homogène durant cette première culture (annexe VII), les répétitions 1 et 2 des modalités 2 et 4 et les répétitions 1 et 2 des modalités 7 et 5 ont été interverties. À la suite de ces changements, les densités sont jugées statistiquement équivalentes entre modalités (20/03). L'inoculation est alors homogène, l'essai est poursuivi. Pour toutes les modalités (inoculées et non inoculées avec *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43), la levée lors de la CR 1 a été très tardive et hétérogène. En sol non inoculé, à partir du 14/05 et jusqu'en fin de CR 1 (04/06), aucune modalité n'est significativement différente du témoin sol nu (M16, figure 17a). En sol inoculé, en fin de CR 1 (04/06), aucune modalité n'est significativement différente du témoin sol nu (M16) (figure 17b). Malgré une culture d'inoculation satisfaisante, la différence de densité entre le témoin non inoculé (45 %) et le témoin inoculé (50 %) pour la culture d'inoculation est faible. Le test n'est pas validé

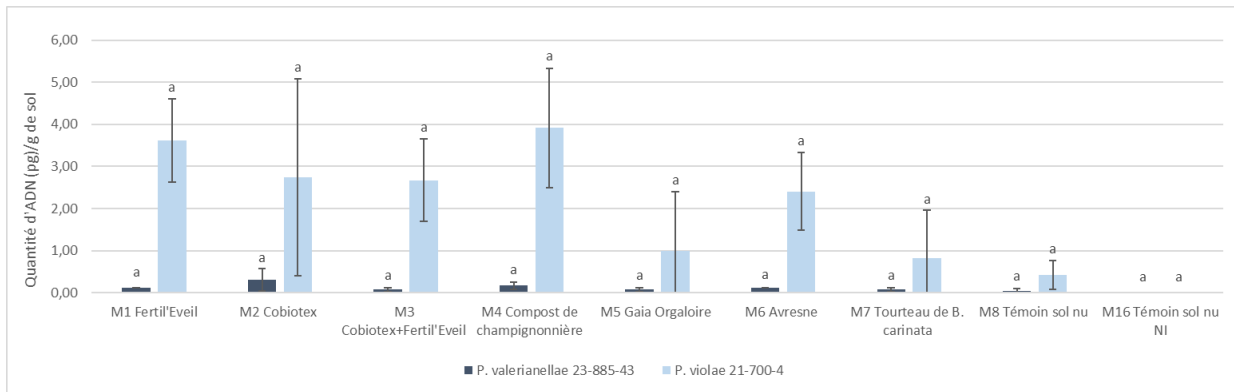


Figure 18. Inoculum en *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 selon la modalité au terme de la culture de révélation 1. Les données sont les moyennes de 3 répétitions +/- écarts types. Les valeurs portant la même lettre sont statistiquement équivalentes (ANOVA par permutation,  $\alpha = 0.05$ ). NI : non inoculé.

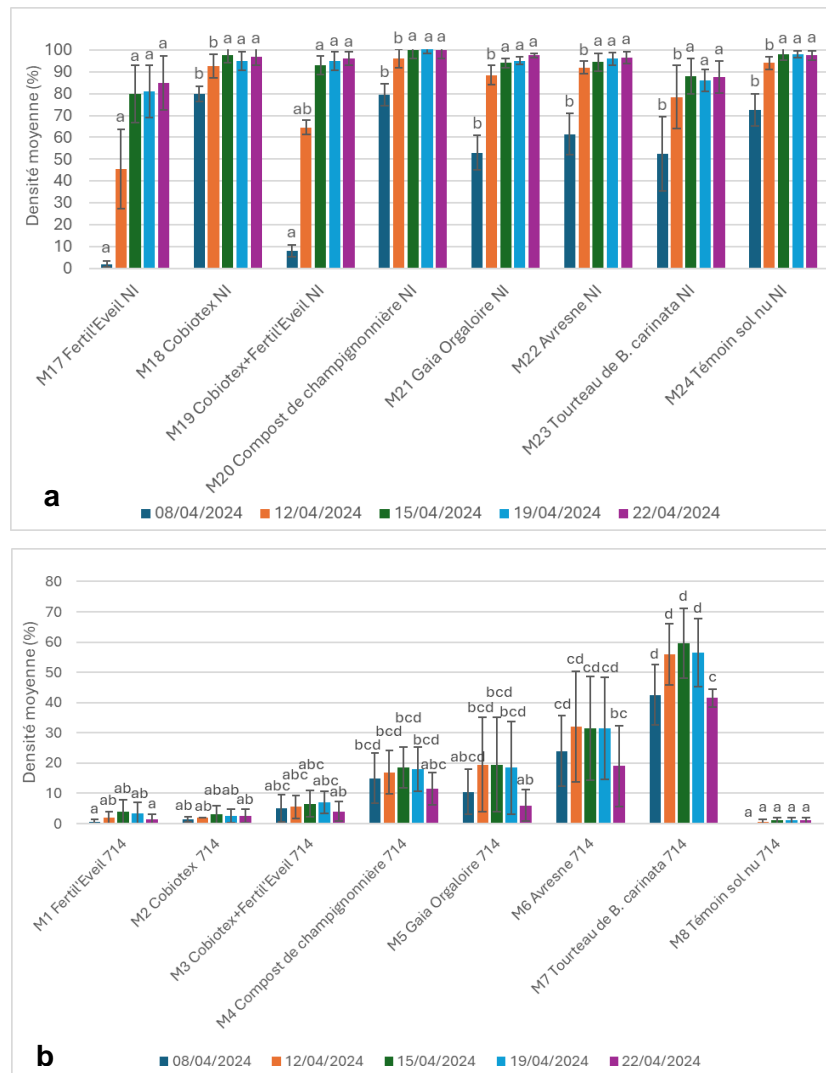


Figure 19. Evolution de la densité de radis en sol non inoculé (a) et inoculé avec *R. solani* 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 1. Les données sont les moyennes de 4 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

dans ces conditions, la pression du pathogène dans le témoin n'étant pas suffisante.

Au terme de la CR 1, les inoculums en *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 sont statistiquement équivalents entre modalités (figure 18). Les résultats de l'analyse de sol de fin de CR 2 n'ont pas été disponibles dans la période du stage.

Les taux d'azote les plus élevés sont enregistrés pour les modalités contenant les composts Fertil'Eveil et Gaia Orgaloire (entre 60 et 70 kgN/ha, annexe VIII). En CR 1, ces deux modalités sont les seules à dépasser le seuil des 60 kgN/ha. Les modalités compost de champignonnière, Avresne, Cobiotech + Fertil'Eveil et tourteau de *B. carinata* présentent un taux maximum entre 40 et 50 kgN/ha. Les taux les plus faibles sont enregistrés pour modalités sol nu et Cobiotech (entre 30 et 40 kgN/ha). Les résultats complets pour la CR 2 n'ont pas été disponibles dans la période du stage et ne seront pas analysés.

### 3.2. Intrants contre *Rhizoctonia solani* sur radis

Lors de la culture d'inoculation, la densité moyenne de radis contaminés par la souche 22 839 21 RR (94.98 %, annexe IX) n'était pas significativement différente de celle des radis non inoculés (94.40 %,  $p = 0.7502$ ). Cette souche est donc considérée non pathogène sur radis et a été abandonnée pour la suite de l'essai. En revanche, la souche *R. solani* 21 714 5 RR a provoqué une importante fonte de semis (50.96 % de pertes) et l'apparition de symptômes nécrotiques, non-observés chez le témoin et les plants inoculés avec la souche 22 839 21 RR (annexe IX). La différence de densité entre les caissettes témoin (NI) et inoculées avec *R. solani* 21 714 RR est significative ( $p = 0.0024$ ). En sol inoculé et en fin de culture d'inoculation (20/03), sont enregistrés un maximum de 75 % de pertes (M8, témoin sol nu) et un minimum de 57 % de pertes (M2, Cobiotech seul), témoignant du succès de l'inoculation (annexe X). Le taux de pression pathogène est homogène entre modalités, excepté entre M8 et M2 (densité significativement supérieure pour M2). Cette hétérogénéité n'a été mise en évidence qu'après le semis de la CR 1 à la suite d'un changement d'analyse statistique et n'a donc pas été corrigée. Elle est cependant sans impact par la suite, les modalités étant toutes équivalentes en sol non inoculé pour les CR 1, 2 et 3. La pression pathogène moyenne se situe au-delà des 30 à 40 % visés en début d'expérience (annexe IX) mais permet néanmoins la poursuite de l'essai.

En CR 1, en sol non inoculé, l'ensemble des modalités est statistiquement équivalent au témoin sol nu (M24, figure 19a) à partir du 15/04. Au 08/04, on constate un retard des modalités M17 (Fertil'Eveil) et M19 (Cobiotech + Fertil'Eveil). Ce retard se constate aussi au 12/04 pour la modalité M17 uniquement. Aucune stimulation ni toxicité ne sont observées. En fin de CR 1, en sol inoculé (figure 19b), les résultats les plus prometteurs sont observés pour les modalités M7 (tourteau de *B. carinata*) et M6 (Avresne). Ces deux modalités enregistrent les plus hautes densités de plants en présence du pathogène, respectivement 41.5 % ( $p = 0.0009$  ;  $F(7) = 47.7381$ ) et 19 % ( $p = 0.0320$  ;  $F(7) = 47.7381$ ) au 22/04 et sont significativement différentes de la condition témoin (M8). En fin de CR 1, les modalités M8 (témoin sol nu), M1 (Fertil'Eveil), M2 (Cobiotech), M3

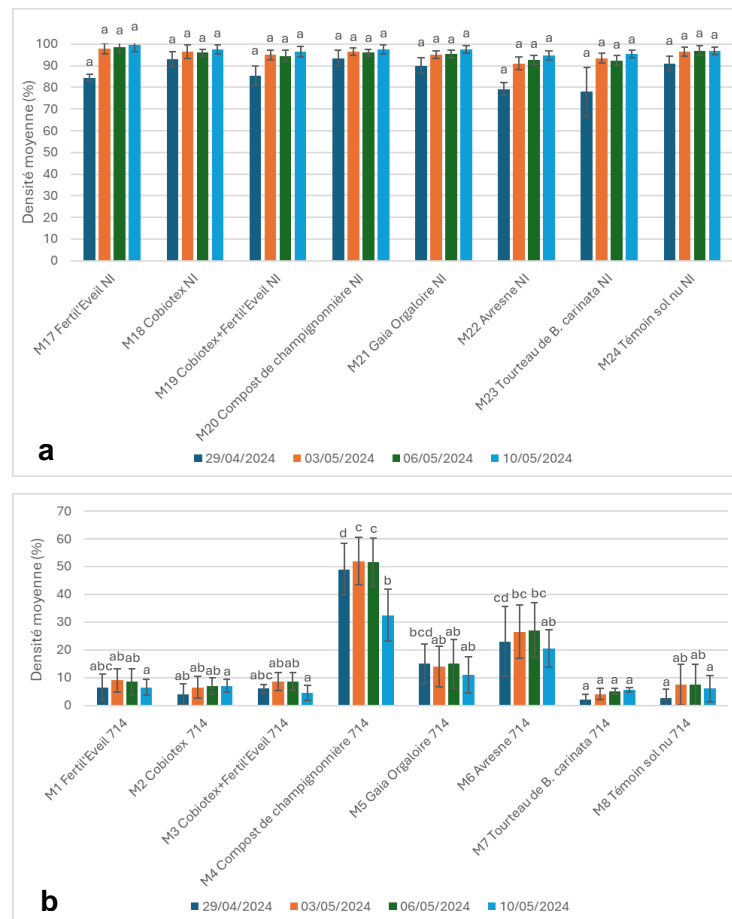


Figure 20. Evolution de la densité de radis en sol non inoculé (a) et inoculé avec *R. solani* 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 2. Les données sont les moyennes de 4 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

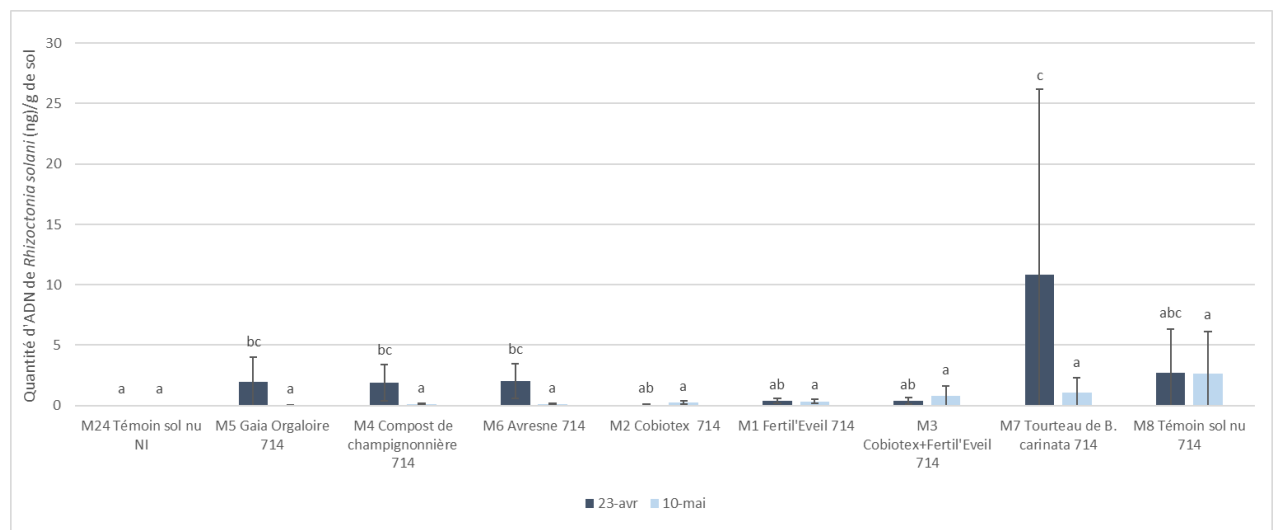


Figure 21. Inoculum en *R. solani* 21 714 5 RR selon la modalité en fin de cultures de révélation 1 (23/04) et 2 (10/05). Les données sont les moyennes de 3 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur LM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). NI : non inoculé ; 714 : inoculé avec *R. solani* 21 714 5 RR.

(Fertil'Eveil + Cobiotech), M4 (compost de champignonnière) et M5 (Gaia Orgaloire) ne sont pas significativement différentes et enregistrent les plus fortes pertes de densité (jusqu'à 99 % pour la modalité M8).

Tout au long de la CR 2, en sol non inoculé, l'ensemble des modalités est statistiquement équivalent (figure 20a). On n'observe un retard de levée moins marqué en début de CR 2 qu'en début de CR 1 pour les modalités contenant du compost Fertil'Eveil (M7 et M19). Aucune stimulation ni phytotoxicité ne sont observées. Au terme de la CR 2, la modalité M4 (compost de champignonnière) enregistre la plus haute densité de plants en présence du pathogène (32,5 %) et est la seule modalité significativement supérieure à la modalité M8 témoin sol nu ( $p = 0.0077$ ;  $F(7) = 29.4196$ ). Les autres modalités sont statistiquement équivalentes au témoin M8 (figure 20b).

En CR 3, en sol non inoculé, l'ensemble des modalités est statistiquement équivalent (annexe XIa). Aucune stimulation ni phytotoxicité ne sont observées. En sol inoculé, seule la modalité compost de champignonnière est de nouveau significativement différente du témoin (annexe XIb) ( $p = 0.0154$ ;  $F(4) = 25.2089$ ) et enregistre une densité de 84 %, soit 40 % de plus que le témoin inoculé (M8).

En fin de CR 1 (23/04), seules les modalités M5 (Gaia Orgaloire, 1.97 ng/g ;  $p = 0.0227$  ;  $F(8) = 4.9812$ ), M4 (compost de champignonnière, 1.88 ng/g ;  $p = 0.0154$  ;  $F(8) = 4.9812$ ), M6 (Avresne, 2.04 ng/g ;  $p = 0.0327$  ;  $F(8) = 4.9812$ ) et particulièrement la modalité M7 (tourteau de *B. carinata*, 10.85 ng/g ;  $p = 0.0001$  ;  $F(8) = 4.9812$ ) présentent un inoculum significativement supérieur à celui de la condition témoin sol nu NI (M24, 0.00 ng/g) (figure 21). Cependant, aucune différence significative n'est mise en évidence entre modalités inoculées et le témoin inoculé (M8, 2.74 ng/g). En fin de CR 2 (10/05), l'ensemble des modalités est statistiquement équivalent. Le pic d'inoculum enregistré en CR 1 pour la modalité M7 n'est pas réobservé en CR 2. Aucune analyse de sol n'a été effectuée pour la CR 3.

Les modalités contenant du Fertil'Eveil présentent les taux d'azote nitrique les plus importants et se maintiennent au-dessus des 40 kgN/ha tout au long de l'essai (annexe XII). Les modalités Gaia Orgaloire et Avresne contiennent en moyenne 30 à 40 kgN/ha et se stabilisent aux environs de 30 kgN/ha jusqu'à la fin de l'essai. Les modalités tourteau de *B. carinata* contiennent en moyenne 40 à 50 kgN/ha et enregistrent un taux d'azote nitrique d'environ 35 kgN/ha en fin d'essai. Les modalités compost de champignonnière se maintiennent entre 20 et 30 kgN/ha tout au long de l'essai. Les modalités Cobiotech et témoin sol nu suivent des évolutions similaires, ce qui est cohérent en regard de la nature de l'intrant et enregistrent les taux d'azote nitrique moyens les plus bas parmi l'ensemble des modalités de cet essai (entre 10 et 25 kgN/ha). En CR 3, les modalités ayant reçu un apport de tourteau de *B. carinata* 15 jours avant semis avec bâchage enregistrent un taux d'azote (environ 120 kgN/ha) représentant le triple de l'apport suffisant pour un cycle de culture de radis. Les modalités contenant du compost Avresne ou du tourteau de *B. carinata* apporté au semis sans bâchage enregistrent en moyenne un taux d'azote nitrique de

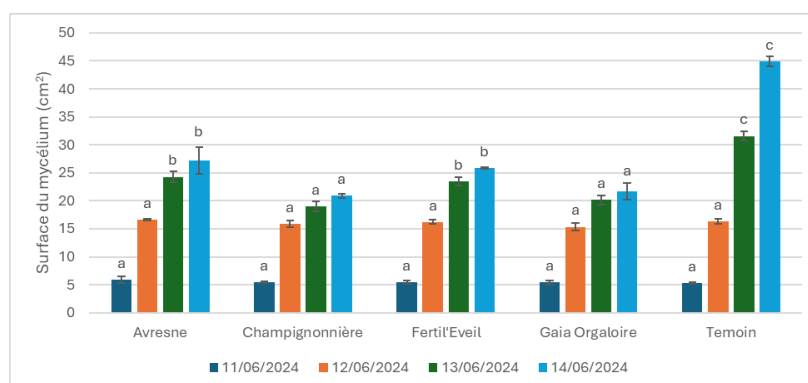


Figure 22. Evolution de la surface du mycélium de *R. solani* 21 714 5 RR en présence de différents composts. Les données sont les moyennes de 3 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur LMM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

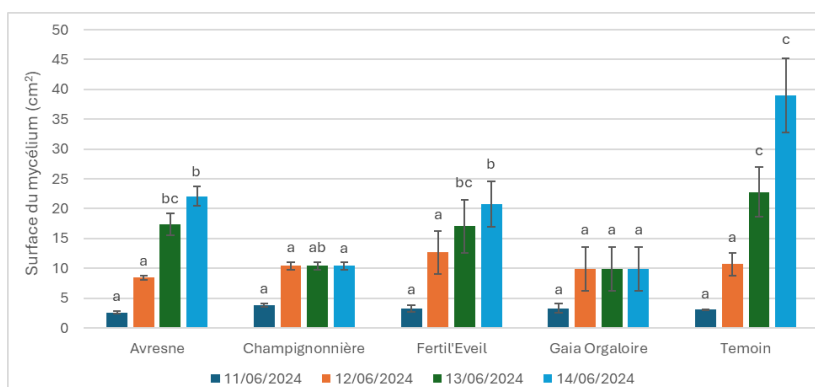


Figure 23. Evolution de la surface du mycélium de *P. violae* 21-700-4 en présence de différents composts. Les données sont les moyennes de 3 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur LMM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

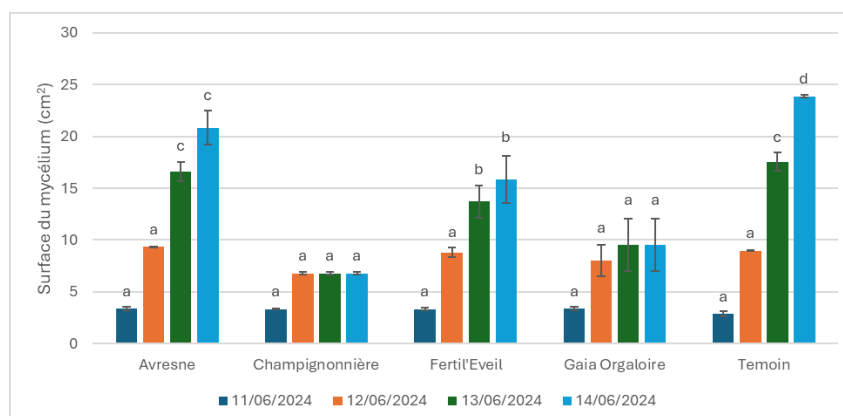


Figure 24. Evolution de la surface du mycélium de *P. valerianellae* 23-885-43 en présence de différents composts. Les données sont les moyennes de 3 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur LMM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

40 kgN/ha. Les modalités contenant du compost de champignonnière et les témoins sans apports se situent respectivement aux alentours de 30 et 20 kgN/ha.

### 3.3. Criblage des intrants *in vitro*

Les résultats obtenus lors de l'essai avec *Rhizoctonia solani* 21 714 5 RR montrent qu'au 11/06 comme au 12/06, l'ensemble des modalités est équivalent au témoin (figure 22). A partir du 13/09 et jusqu'à la fin de l'essai (14/06), la modalité témoin est significativement différente de toutes les autres modalités avec une surface de mycélium moyenne de 44.88 cm<sup>2</sup> à 86 h de suivi (fin d'essai). Les modalités Avresne et Fertil'Eveil sont statistiquement équivalentes sur toute la durée de l'essai et enregistrent respectivement en fin d'essai une réduction de surface de mycélium de 39 % (chi-squared = 612.42, df = 4, p = <.0001) et 42 % (chi-squared = 612.42, df = 4, p = <.0001) par rapport au témoin. Les modalités champignonnière et Gaia Orgaloire sont statistiquement équivalentes sur toute la durée de l'essai et enregistrent respectivement en fin d'essai une réduction de surface de mycélium de 53 % (chi-squared = 612.42, df = 4, p = <.0001) et 51 % cm<sup>2</sup> (chi-squared = 612.42, df = 4, p = <.0001) par rapport au témoin.

Les résultats obtenus lors de l'essai avec *P. violae* 21-700-4 montrent qu'au 11/06 comme au 12/06, l'ensemble des modalités est équivalent au témoin (figure 23). A partir du 13/09, les modalités champignonnière et Gaia Orgaloire sont significativement différentes de la condition témoin. A la fin de l'essai (14/06), la modalité témoin est significativement différente de toutes les autres modalités avec une surface de mycélium moyenne de 39.02 cm<sup>2</sup>. Les modalités Avresne et Fertil'Eveil sont statistiquement équivalentes sur toute la durée de l'essai et enregistrent respectivement en fin d'essai une réduction de surface de mycélium de 43 % (chi-squared = 48.698, df = 4, p = 0.0391) et 47 % (chi-squared = 48.698, df = 4, p = 0.0133) en comparaison avec le témoin. Les modalités champignonnière et Gaia Orgaloire sont statistiquement équivalentes sur toute la durée de l'essai et enregistrent respectivement en fin d'essai une réduction de surface de mycélium de 73 % (chi-squared = 48.698, df = 4, p = <.0001) et de 75 % (chi-squared = 48.698, df = 4, p = <.0001) en comparaison avec le témoin. Elles sont statistiquement différentes des modalités Avresne et Fertil'Eveil à partir du 13/06 et jusqu'à la fin de l'essai. La plus forte réduction de surface de mycélium est donc enregistrée pour la modalité Gaia Orgaloire, la plus faible pour la modalité Avresne.

Les résultats obtenus lors de l'essai avec *P. valerianellae* 23-885-43 montrent qu'au 11/06 comme au 12/06, l'ensemble des modalités est équivalent au témoin (figure 24). En fin d'essai, les modalités Avresne et Fertil'Eveil enregistrent respectivement une réduction de surface de mycélium de 13 % (chi-squared = 327.37, df = 4, p = 0.0309) et 33 % (chi-squared = 327.37, df = 4, p = <.0001). Les modalités champignonnière et Gaia Orgaloire sont statistiquement équivalentes sur toute la durée de l'essai et enregistrent respectivement en fin d'essai une réduction de surface de mycélium de 72 % (chi-squared = 327.37, df = 4, p = <.0001) et de 60 % (chi-squared = 327.37, df = 4, p = <.0001) en comparaison avec le témoin.





## 4. Discussion

### 4.1. Efficacité des intrants contre *Pythium* spp. sur mâche

Aucune modalité ne présente un taux d'azote susceptible de favoriser la fonte de semis causée par *Pythium* spp. ( $> 120 \text{ kgN/ha}$ ) en cultures d'inoculation et de révélation 1 (annexe VIII). Toutes les modalités sous le seuil des  $60 \text{ kgN/ha}$  en début de CR 1 ont reçu un apport azoté suffisant pour couvrir les besoins d'un cycle complet de développement. L'impact de la fertilisation est donc négligé dans la suite de l'analyse. Les résultats obtenus à l'issue de la CR 1 ne permettent pas de conclure quant à l'efficacité ou non des divers intrants testés en raison d'une levée très tardive et hétérogène des jeunes plants de mâche (possiblement liée à la qualité des graines ou aux conditions de culture) et/ou d'une pression pathogène insuffisante au vu des levées similaires entre le témoin non inoculé et inoculé (figure 17). Les inoculums en *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 sont identiques entre modalités testées (figure 18). Les intrants évalués ne semblent pas avoir d'impact sur la pression pathogène dans le sol. Il est cependant possible que la levée ait été trop hétérogène pour que d'éventuelles différences soient visibles. Si aucune MO efficace contre *Pythium* spp. n'a ici été mise en évidence, il est possible que des différences apparaissent au cours de la CR 2. Les résultats des années précédentes n'ayant pas non plus permis de mettre en évidence de MO ayant un effet significatif de préservation de la densité de plants en présence de *Pythium* spp. (Projet SUPERNOMA-2022 ; SUPERNOMA 2023). La méthode d'analyse de l'inoculum du sol employée en 2022 et 2023 (dénombrement des Pythiacées selon leur vitesse de croissance en boîte de Petri) n'était pas suffisamment précise pour conclure quant à un effet significatif de réduction de l'inoculum du sol par les différentes MO testées. Il existe dans la littérature des résultats plus encourageants. Hernández-Lara *et al.* (2021) ont notamment montré qu'un compost produit à partir de déchets de tomates et de poireaux comme matière première initiale, et de la lavande comme additif, a une capacité de suppression élevée contre *Pythium irregulare*.

### 4.2. Efficacité des intrants contre *Rhizoctonia solani*

Aucune des modalités n'a dépassé le seuil critique de  $100 \text{ kgN/ha}$  (annexe XII) en CR 1 et 2 au-delà duquel il est considéré que la fertilisation a favorisé le développement du rhizoctone (taux de fertilisation très supérieur au double de ce que la plante peut consommer sur l'ensemble de son cycle de développement,  $> 80 \text{ kgN/ha}$ ). Seule la modalité Fertil'Eveil dépasse légèrement et de manière ponctuelle le seuil des  $80 \text{ kgN/ha}$  au cours de la CR 2 (29/04,  $85 \text{ kgN/ha}$ ). Bien que l'imprécision de l'appareil de mesure puisse masquer un effet de surfertilisation pour cette modalité à ce moment précis, il sera considéré pour ces deux premières CR que la fertilisation n'a pas eu d'impact sur la pression du pathogène au vu des résultats obtenus en CR 1 pour cette modalité (figure 19). Si taux d'azote élevé est susceptible d'impacter négativement la levée, cela n'a pas été le cas ici. En effet, le retard de levée observé pour les modalités Fertil'Eveil en CR 2



(figure 20a) alors que la minéralisation est importante est aussi observé en CR 1 et de manière plus accentuée (figure 19a) alors que le taux d'azote nitrique se situe seulement aux alentours des 70 kgN/ha (annexe XII). Par ailleurs, chaque modalité ayant reçu un apport de fertilisation azotée suffisant pour couvrir les besoins d'un cycle complet (40 kgN/ha) en CR 1 et 2 (annexe XII), il est considéré qu'aucune modalité n'a souffert de sous-fertilisation durant ces deux cultures. En CR 3, le taux d'azote nitrique enregistré pour les modalités contenant du tourteau de *B. carinata* apporté 15 jours avant semis avec bâchage dépasse les 100 kgN/ha (annexe XII). Si aucun impact sur la levée n'a été constaté, le pathogène a pu être favorisé. Ce dégagement d'azote, plus important que celui enregistré en CR 1, peut s'expliquer par des températures plus élevées au moment du bâchage (annexe I). Aucune fertilisation n'a été effectuée en CR 3 pour les modalités sous le seuil des 40 kgN/ha. Cependant, les taux d'azote nitrique étaient suffisants pour garantir la levée. L'impact d'une sous-fertilisation potentielle est donc négligé.

Les intrants présentant la meilleure capacité de préservation de la densité sont différents à l'issue des cultures de révélation 1 et 2. En fin de CR 1, les modalités M7 (tourteau de *B. carinata*) et M6 (Avresne) sont les plus efficaces dans le maintien de la densité avec respectivement + 40.5 % et + 18 % de densité moyenne (figure 19b) en comparaison avec le contrôle M8 (témoin sol nu inoculé). Les autres modalités sont statistiquement équivalentes au témoin à l'issue de cette première culture. En fin de CR 2, seule la modalité M4 (compost de champignonnière) est statistiquement différente de la modalité M8 avec + 26.5 % de densité moyenne (figure 20b). La capacité de ce compost à maintenir la densité de plants se confirme à l'issue de la CR 3 (annexe XI) où la modalité M4 est de nouveau la seule statistiquement différente du témoin M8 avec + 40 % de densité moyenne enregistrés. Le compost de champignonnière semble efficace dans la préservation de la densité de plants en présence de *R. solani* 21 714 5 RR après un premier cycle de culture. Un certain temps de présence de ce compost dans le sol de culture serait nécessaire à son efficacité. Ce délai pourrait être soit nécessaire à l'installation des microorganismes antagonistes à *R. solani* 21 714 5 RR présents dans le compost dans le sol de culture, soit à la dégradation du compost et à la libération de composés suppressifs. Les pellets de tourteau de *B. carinata*, en accord avec les résultats proposés par Tagele *et al.* (2021) (tableau I), pourraient avoir un effet à court terme (sur un cycle de culture uniquement) quand employés à 2 t/ha. Ceci n'a cependant pas été confirmé à l'issue de la CR 3 (annexe XI), où les deux modalités contenant du tourteau de *B. carinata* (apporté 15 jours avant semis avec bâchage ou au moment du semis sans bâchage) sont statistiquement équivalentes au témoin sol nu inoculé. Le fort dégagement d'azote observé pour la modalité tourteau de *B. carinata* apporté 15 jours avant semis avec bâchage (annexe XII) pourrait expliquer la différence entre les résultats obtenus en CR 1 (figure 19b) et 3 (annexe XIb) pour cet intrant avec ce mode d'apport. Il est également possible que les températures dans la serre, plus élevées en CR 3 qu'en CR 1 (annexe I), aient favorisé la volatilisation des ITC entraînant une baisse de l'efficacité de cet intrant.

Les résultats des analyses de sol apparaissent surprenants au regard des données de densité

Tableau V. Biofumigants ayant augmenté les populations de *Pythium* spp. et/ou de *Rhizoctonia solani* (d'après Tägele *et al.*, 2021).

Pathogène	Espèce de Brassicacée
<i>Pythium</i> spp.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brassica napus</i></li> <li>• <i>Raphanus sativus</i></li> <li>• <i>Brassica juncea</i></li> <li>• <i>Sinapis alba</i></li> </ul>
<i>Rhizoctonia solani</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Brassica juncea</i></li> </ul>

de la CR 1. En effet, les modalités, présentant un taux plus important d'inoculum (figure 21) ont montré les meilleures aptitudes de préservation de la densité (figure 19b) et d'un aspect sain et vigoureux chez les jeunes plants de radis en caissettes. Des phénomènes similaires d'augmentation du taux de phytopathogènes telluriques après BB ont précédemment été rapportés dans la littérature, notamment pour *R. solani* (tableau V). Plusieurs études ont fait état d'un essor sans précédent des champignons phytopathogènes telluriques, d'une infection des racines et d'un déclin de la croissance des plantes après BB. L'augmentation potentielle de la capacité de rétention en eau du sol après BB peut accroître l'accès aux nutriments et réduire le risque d'épuisement de la communauté microbienne dû à un stress induit par une faible humidité. Cependant, certains pathogènes peuvent profiter de l'augmentation de la teneur en eau du sol (Tagele *et al.*, 2021). Un tel phénomène n'avait pas encore été rapporté après utilisation de tourteau de *B. carinata* en tant que biofumigant contre *R. solani* ; au contraire, une efficacité de *B. carinata* contre *R. solani* a précédemment été décrite (tableau I). Une hypothèse possible serait que la présence d'un nombre important d'hôtes potentiels, favorisée par l'ajout de MO, entraînerait la multiplication du pathogène dans le sol, sans que celui-ci ne puisse effectivement infecter les jeunes plants (hôtes trop vigoureux ou présence dans la MO de microorganismes antagonistes empêchant le processus d'infection et non la multiplication du pathogène (*R. solani* est un pathogène facultatif)). Les MO auraient alors un effet plus proche de la biostimulation\* et/ou de la stimulation de défenses naturelles\* des plantes plutôt qu'un réel effet suppressif envers le pathogène. Il est également possible que le bâchage des caissettes, initialement réalisé dans l'objectif de retenir les composés biofumigants, ait eu un effet négatif sur l'efficacité de la BB, réduite lorsque la température passe de 15 à 25 °C. L'efficacité élevée à basse température est due à l'activité lente mais constante de la myrosinase et des ITC libérés dans ces conditions. A des températures élevées, l'hydrolyse des GSL s'accélère et la volatilisation des ITC toxiques augmente (Tagele *et al.*, 2021). En fin de CR 2 (10/05), l'inoculum du sol en *R. solani* est statistiquement équivalent entre toutes les modalités (figure 21), contrastant une nouvelle fois avec les différences observées au niveau des données de densité de la CR 2 (e.g. M4 présente une densité moyenne plus haute et un meilleur aspect des jeunes plants de radis, figure 20b, annexe XIII).

Il est nécessaire de souligner les biais communs aux deux essais en caissettes. Le premier, et le plus important est lié à la MO, variable par nature dans sa composition et donc potentiellement dans son efficacité. La capacité prédictive de ces essais est donc limitée. La vermiculite utilisée pour l'inoculation est de granulométrie, d'absorbance et de couleur aléatoires selon les lots. S'il ne semble pas y avoir eu de problèmes au moment de l'inoculation sur les essais de 2024, il est arrivé que la vermiculite fournie présente une toxicité envers les différents inoculum utilisés (S. Bosseur, communication personnelle). Ce paramètre doit être pris en compte dans l'évaluation de l'homogénéité et de la fiabilité de l'inoculation. Un autre biais concernant les expérimentations en caissettes est l'imprécision du Nitracheck 404 ( $\pm 10$  kgN/ha). Si les besoins en azote des

Tableau VI. Comparatif des résultats des essais d'intrants contre *R. solani* 21 714 5 RR en caissettes sur les trois ans du projet SUPERNOMA (d'après L'Hostis (2023) et Mahamat (2022)). Les mentions d'efficacité renvoient à la capacité de l'intrant à générer une densité de plants significativement plus élevée que celle du témoin sol nu inoculé. Les mentions de toxicité renvoient à un aspect dégradé des plantules, combiné ou non à une perte de densité en comparaison avec le témoin sol nu inoculé.

Intrant	2022	2023	2024
Fertil'Eveil	Efficace en CR 1 et 2 à 82.5 t/ha <i>Toxicité constatée en CR1</i>	Efficace en CR 2 à 20, 40 et 80 t/ha <i>Toxicité constatée à 40 et 80 t/ha en CR 1 et 2</i>	Inefficace en CR 1, 2 et 3 à 20 t/ha
Tourteau de <i>B. carinata</i>	Non testé	Efficace en CR 2 à 6 t/ha <i>Toxicité constatée en CR 1 et 2</i>	Efficace en CR 1 à 2 t/ha
Compost de champignonnière	Efficace en CR 2 à 82.5 t/ha	Efficace en CR 2 à 40 t/ha	Efficace en CR 2 et 3 à 40 t/ha
Avresne	Non testé	Non testé	Efficace en CR 1 à 10 t/ha
Gaia Orgaloire	Non testé	Non testé	Inefficace en CR 1 et 2 à 20 t/ha

cultures étudiées ici sont estimés pour un cycle complet de développement, il est possible que pour certaines modalités dont le taux d'azote était initialement très faible (10 kgN/ha ou moins), la teneur du sol en nitrates ait été insuffisante pour garantir une levée satisfaisante (avant refertilisation). Finalement, pour *Pythium* spp. comme pour *R. solani*, la fiabilité des analyses moléculaires peut être questionnée. Les différences observées dans les densités en présence de *R. solani* n'étant pas retrouvée au niveau de l'inoculum du sol, il se peut que la méthode d'extraction employée par Vegenov ne soit pas suffisamment efficace ou que les conditions de stockage et/ou de traitement des échantillons aient impacté les résultats. Ces détails de protocole n'étant pas rendus disponibles par l'entreprise, la formulation d'hypothèses plus précises sur les raisons de l'absence de différences significatives d'inoculum entre modalités est impossible.

Sur les trois ans du projet SUPERNOMA, le compost de champignonnière a démontré l'efficacité la plus constante contre la fonte de semis provoquée par *R. solani* (tableau VI). C'est également l'intrant qui a été le plus efficace en 2024, avec cependant une latence (absence d'efficacité en CR 1) constatée également en 2022 et 2023. Les pellets de tourteau de *B. carinata* ont démontré une efficacité sur les deux années où ils ont été évalués (tableau VI). Cependant, cette efficacité ne se maintient pas sur deux cultures successives quand le produit est utilisé à 2 t/ha (figure 20b), et un second amendement du produit (CR 3) n'a pas permis de reproduire les résultats obtenus en 2024 en CR 1 (annexe XI). Le Fertil'Eveil, pourtant efficace en 2023 à 20 t/ha sans phytotoxicité observée n'a pas donné de résultats satisfaisants en 2024 à la même dose. La perte d'efficacité de cette MO dans la préservation de la densité de plants pourrait être due à un changement non signalé dans sa composition, lié par exemple aux conditions (durée, température, humidité, luminosité) de stockage. La littérature offre d'autres illustrations de la variabilité d'efficacité de la MO. Bonanomi *et al.* (2020) ont étudié l'effet d'AO à 3, 30, 100 et 300 jours de décomposition sur le pathosystème *Lactuca sativa*-*R. solani*. Ces AO ont montré des effets variables, allant de l'inhibition à la stimulation de la croissance de *L. sativa*. Les AO riches en azote et à forte décomposabilité sont favorables à court terme, tout en se transformant en supprimeurs à long terme. D'autre part, les AO riches en cellulose avec un rapport C/N élevé ont entravé la croissance de *L. sativa* mais ont été plus efficaces dans la protection contre la fonte des semis, bien que cette propriété ait changé de manière significative au cours du temps de décomposition. Les recherches doivent être poursuivies malgré l'aspect variable et incertain de l'efficacité des MO. Si certaines MO, telles que le lombricompost, n'éliminent pas *R. solani* de manière significative et ne permettent l'obtention de rendements commercialisables plus élevés que les pratiques culturales conventionnelles (Neher *et al.*, 2024), certains AO ont montré une efficacité intéressante. *Clonostachys rosea* f. *catenulata* et le thé de lombricompost aéré, utilisés seuls ou en combinaison, permettent une suppression significative de la maladie causée par *R. solani* sur radis (Wylie *et al.*, 2021). Le thé de compost de vigne non-aéré permet d'inhiber la croissance mycélienne de certains isolats de *R. solani* (Mengesha *et al.*, 2017), et les amendements riches en kératine et en chitine sont capables de réduire les dommages liés à ce





pathogène sur betterave sucrière (Andreo-Jimenez *et al.*, 2021). La variabilité d'efficacité observée chez les composts et cependant également applicable aux thés de composts qui en sont dérivés.

### 4.3. Capacité prédictive et pertinence du criblage *in vitro* des intrants

Pour les trois souches testées (*R. solani* 21-714-5 RR, *P. violae* 21-700-4, *P. valerianellae* 23-885-43), les composts évalués *in vitro* comme étant les plus efficaces pour limiter la progression du mycélium pathogène sont le compost de champignonnière et le compost Gaia Orgaloire.

Une efficacité des composts Avresne (- 39 %), Fertil'Eveil (- 42 %) et particulièrement des composts champignonnière (- 53 %) et Gaia Orgaloire (- 51 %) a été constatée dans la réduction de l'expansion du mycélium de *R. solani* 21-714-5 RR en comparaison avec le témoin (figure 21). Lors de la CR 1 (figure 19b), le tourteau de *B. carinata* (non testable *in vitro*) est l'intrant le plus efficace. On retrouve ensuite, comme estimé *in vitro*, un effet significatif sur la densité avec le compost Avresne (en CR 1 uniquement). Cependant, les composts Gaia Orgaloire, champignonnière et Fertil'Eveil, estimés efficaces *in vitro* n'ont aucun effet significatif en caissettes en CR 1. Au terme des CR 2 (figure 20b) et 3 (annexe XI), seul le compost de champignonnière, estimé très efficace *in vitro*, montre un effet significatif sur la densité. Le compost Gaia Orgaloire, estimé d'efficacité équivalente au compost de champignonnière *in vitro*, n'a pas montré d'efficacité sur l'ensemble de l'essai. Au terme de la CR 1, toutes les modalités présentent un inoculum statistiquement équivalent à celui du témoin. Les inoculums des caissettes contenant les intrants Avresne, Fertil'Eveil, compost de champignonnière et Gaia Orgaloire sont statistiquement équivalents (figure 21), ce qui contraste avec les différences de développement observées *in vitro*. Au terme de la CR 2, l'ensemble des modalités, témoin inclus, est de nouveau statistiquement équivalent en termes d'inoculum. Pour *R. solani*, cette méthode de criblage donne des résultats prédictifs insatisfaisants en CR 1. Cette capacité prédictive s'améliore en CR 2 et 3 avec une efficacité réelle en caissettes observée pour le compost de champignonnière, estimé très efficace *in vitro*. Cette méthode a cependant une forte tendance à surévaluer l'efficacité des MO (e.g. compost Gaia Orgaloire estimé aussi efficace que le compost de champignonnière *in vitro* mais inefficace en caissettes). Elle est également inefficace pour estimer la concentration de l'inoculum en *R. solani* dans le sol.

De manière analogue aux résultats obtenus *in vitro* dans le cadre de l'essai d'intrants contre *R. solani* (figure 22), les MO les plus efficaces *in vitro* contre *Pythium* spp. sont les composts Gaia Orgaloire et champignonnière. On retrouve ensuite une efficacité moindre des composts Fertil'Eveil et Avresne : à égalité contre *P. violae* (figure 23) et avec une efficacité significativement inférieure du compost Avresne contre *P. valerianellae* (figure 24). Au terme de la CR 1, aucune modalité n'est significativement différente du témoin en termes de densité et d'inoculum (figure 17b, figure 18). Cette absence de différences entre modalités, pouvant s'expliquer par la levée très tardive et hétérogène observée pour l'ensemble des caissettes



(inoculées ou non) ne permet pas de juger, à l'issue de la CR 1, de la capacité prédictive de la méthode de criblage *in vitro*. Cependant, on peut supposer d'une tendance à la surestimation de l'efficacité des composts similaire à celle observée lors de l'essai avec *R. solani*. Les différences observées *in vitro* n'étant pas retrouvées dans les résultats des analyses moléculaires à l'issue de la CR 1, il est préférable de considérer cette méthode non fiable pour estimer la force de l'inoculum dans le sol.

Il est nécessaire de considérer ces résultats au regard de la méthode de notation. Concernant *R. solani*, pour les modalités champignonnière et Gaia Orgaloire, les mycéliums de champignons issus de l'extrait de compost ont rapidement colonisé la gélose (modalité champignonnière particulièrement) jusqu'à se superposer au mycélium de *R. solani* préexistant qui a alors noirci (annexe XIV). Il est ainsi difficile d'attester du fait que le mycélium de *R. solani* ait continué ou non sa croissance après ce recouvrement. De même, il est impossible d'exclure la possibilité qu'il ait au contraire régressé. Il est choisi ici d'inclure la portion de mycélium noircie dans la surface mesurée afin de limiter la surestimation de l'efficacité du compost. Il est néanmoins possible qu'une surestimation existe et que le mycélium de *R. solani* ait poursuivi sa croissance de manière non détectée, l'abondance du mycélium étranger gênant la visibilité. Concernant *P. violae* et *P. valerianellae*, ce phénomène de colonisation rapide de la gélose et de recouvrement, (sans noircissement) du mycélium préexistant, est également constaté pour les mêmes modalités (champignonnière et Gaia Orgaloire), avec toujours un effet plus accentué pour la modalité champignonnière (figures 23 et 24, annexe XIV). Il est également choisi de considérer que le mycélium testé n'a pas poursuivi sa croissance là où le mycélium étranger avait déjà colonisé la gélose, et n'a pas régressé une fois recouvert pour ces deux pathogènes. Il est cependant aussi possible que les surfaces des mycéliums aient été sur ou sous-estimées.

D'autres biais ont pu impacter les résultats de cet essai. Les milieux étant coulés manuellement et sans distributeur, la quantité de gélose a pu être inégale selon les boîtes de Petri ce qui a pu impacter la croissance des microorganismes. La nature du milieu (PDA, pH acide) est également susceptible de favoriser le développement des champignons au détriment de celui des bactéries. Les composts utilisés présentent des niveaux d'humidité variables, ce qui peut fausser, au moment de la pesée, la quantité réelle de MO mise en suspension et donc la force de l'inoculum. La MO est par définition vivante et variable dans l'espace (localisation du prélèvement dans le compost) et dans le temps, ce qui impacte la répétabilité et la fiabilité des résultats. Un autre biais est la méthode de photographie des boîtes, manuelle et sans trépied. Les variations d'angle de prise de vue ont pu influencer sur la mesure finale effectuée sur imageJ. Il aurait été préférable d'utiliser une photocopieuse pour photographier les boîtes afin d'éliminer ces variations d'angle involontaires. Finalement, une critique majeure peut être portée sur la pertinence de l'utilisation d'une méthode de criblage *in vitro* des MO en vue d'une application en sols de culture non stériles. Les sols maraîchers étant colonisés par de nombreux microorganismes, il est probable qu'il y ait interaction entre les pathogènes étudiés et/ou les microorganismes présents dans la MO avec



ces microorganismes préexistants. Additionnellement, les pathogènes étudiés ici sont placés en conditions optimales de développement (milieu de culture, température, luminosité), très éloignées des conditions réelles de culture. Une MO efficace *in vitro* peut donc s'avérer inefficace en conditions réelles, et inversement. Les essais *in vitro* s'effectuent sur un milieu riche, au pH acide, tandis que les essais en sol maraîcher sont effectués sur un milieu pauvre, au pH élevé. Le manque de corrélation entre les essais en sol maraîcher et les essais *in vitro* peut donc découler plus généralement de l'éloignement des conditions de ces essais. Les effets des AO sur la promotion de la croissance et la protection contre les maladies sont difficilement prévisibles sur la base des caractéristiques chimiques, bien que la teneur en N et certaines régions <sup>13</sup>C CPMAS NMR (alkyl C, methoxyl C, et carbonyl C) aient montré des corrélations significatives. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour identifier les mécanismes à l'origine des effets suppressifs et pour identifier les types d'AO et les périodes d'application optimisant la productivité des plantes et la suppression des maladies dans différents agro-écosystèmes (Bonanomi *et al.*, 2020). La connaissance de ces mécanismes permettra de mettre en évidence des indicateurs représentatifs du potentiel de suppressivité et ainsi permettre un criblage des MO fiable et efficace.

## 5. Conclusions et perspectives

### 5.1. Conclusions

En zone ligérienne, les cultures de mâche et de radis, présentant un fort intérêt économique, sont menacées par des pathogènes telluriques tels que *Pythium* spp. et *R. solani*. Les méthodes actuelles de désinfection des sols, la solarisation et la désinfection vapeur, donnent des résultats insatisfaisants. Dans ce cadre, des alternatives telles que la biofumigation et l'utilisation de composts suppressifs ont été évaluées. A cette fin, des cultures de mâche et de radis ont été mises en place dans des caissettes contenant du sol maraîcher artificiellement contaminé et divers intrants suppressifs ou biofumigants. La qualité de la levée de la mâche en CR 1 n'a pas permis de conclure quant à l'efficacité d'une ou plusieurs MO contre *Pythium* spp. dans la préservation de la densité ou la réduction de l'inoculum du sol (figures 17b et 18). Le compost de champignonnière semble être la MO la plus prometteuse pour la préservation de la densité et de la vigueur des jeunes plants de radis en présence de *R. solani*, avec un effet sur plusieurs cycles de culture malgré une latence observée en CR 1 (figures 19 et 20, annexe XI). Cette efficacité et cette latence ont été constatées sur les trois ans du projet SUPERNOMA (tableau VI). Bien qu'efficace en CR 1, le tourteau de *B. carinata* s'est révélé inefficace en CR 2 ainsi qu'en CR 3 où il a été de ré-amendé de manière identique à l'apport initial effectué en CR 1. Aucune MO n'a significativement augmenté ou diminué l'inoculum du sol durant les CR 1 et 2 (figure 21). En parallèle, une méthode de criblage des MO *in vitro* a été testée. Si elle a effectivement évalué le compost de champignonnière comme étant parmi les plus efficaces contre *R. solani* (figure 22),

Tableau VII. Champignons et oomycètes bénéfiques identifiés, isolés de composts suppressifs, système(s) phytopathogène(s) respectif(s) et mécanisme d'action de l'effet suppressif si connu (d'après Lutz *et al.*, 2020).

Organisme bénéfique	Pathogène	Plante affectée	Mécanisme
<i>Aeromonas media</i>	<i>Pythium ultimum</i>	Cresson	Inconnu
<i>Acidobacteria</i> Gp14	<i>Pythium</i> sp.	Concombre	Inconnu
<i>Enterobacter</i> spp.	<i>Pythium</i> sp.	Concombre	Inconnu
<i>Flavobacterium balustinum</i>	<i>Rhizoctonia</i>	Ecorce (non spécifié)	Inconnu
<i>Lechevalieria</i> sp.	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Nocardiopsis</i> spp.	<i>Rhizocotnia solani</i>	Cresson	Inconnu
<i>Pseudomonas</i> spp.	<i>Pythium</i> sp. <i>Rhizocotnia solani</i>	Concombre Cresson	Inconnu Inconnu
<i>Streptomyces albogriseolus</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Streptomyces aureoverticillatus</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Streptomyces coeruleorubidus</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Streptomyces griseoruber</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Streptomyces lusitanus</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Streptomyces variegatus</i>	<i>Pythium debaryanum</i>	-	Possible synthèse de composés antibiotiques
<i>Cystobasidiomycetes</i>	<i>Pythium</i> sp.	Concombre	Inconnu
<i>Fusarium oxysporum</i> Non-pathogène	<i>Rhizoctonia solani</i>	Carnation	Inconnu
<i>Pythium</i> sp. RB II Non-pathogène	<i>Pythium mamillatum</i> , <i>Pythium pyrilobum</i> , <i>Pythium irregulare</i>	Rooibos	Possible compétition pour les nutriments
<i>Pythium acanthicum</i> Non-pathogène	<i>Pythium mamillatum</i> , <i>Pythium pyrilobum</i> , <i>Pythium irregulare</i>	Rooibos	Possible compétition pour les nutriments
<i>Pythium cederbergense</i> Non-pathogène	<i>Pythium mamillatum</i> , <i>Pythium pyrilobum</i> , <i>Pythium irregulare</i>	Rooibos	Possible compétition pour les nutriments
T34	<i>Rhizoctonia solani</i>	Concombre	Activité chitinase
<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Radis	Inconnu
<i>Verticillium biguttatum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Betterave sucrière Pomme de terre	Inconnu

elle produit trop de faux positifs pour constituer un outil fiable. Sa fiabilité dans le criblage de MO contre *Pythium* spp. n'a pas pu être déterminée en raison de l'hétérogénéité de la levée en CR 1. Il est probable qu'une tendance à la surestimation de l'efficacité des MO soit également retrouvée pour ce pathogène. Lutz *et al.* (2020) ont isolé et identifié à partir de composts suppressifs des champignons et oomycètes bénéfiques notamment efficaces contre *Rhizoctonia solani* et *Pythium* spp. (tableau VII). Il serait intéressant de développer une méthode de criblage des composts basée sur la recherche par qPCR dans l'échantillon de ces organismes dont l'efficacité est avérée. Cette méthode risque néanmoins d'être onéreuse et la présence de microorganismes bénéfiques dans le compost ne garantit pas leur efficacité en conditions réelles de cultures. Additionnellement aux essais menés sur les AO, des couverts végétaux assainissants sont évalués sous GAP artificiellement inoculé avec *R. solani* et en parcelles de production contaminées par *Pythium* spp. . Contre *R. solani*, les couverts évalués sont le Cébélca (sarrasin fourni par RAGT) et le Chlorofiltre® Tonic (mélange par Cérience de 70 % d'avoine rude OCEANE Bio, 20 % de trèfle d'Alexandrie TABOR et de 10 % de phacélie STALA / JULIA). Contre *Pythium* spp., différentes variétés de radis fourragers sont évaluées (Farmer bio, Triangel (RAGT), Terranova (Cérience)). Les performances de ces couverts (biomasse, densité, capacité suppressive de l'inoculum du sol, qualité des cultures suivantes) sont comparées à celles de couverts usuels tels que le sorgho (Sudal) ou le moha. Si ces couverts démontrent un effet significatif de protection des cultures, ils pourraient constituer une alternative moins sujette aux variations d'efficacité que les AO dans la lutte contre ces pathogènes. En effet, une génétique intéressante peut être plus aisément stabilisée que la composition d'une MO.

## 5.2. Nouvelles pistes de lutte contre *Pythium* spp.

L'utilisation de fongicides a de nombreuses conséquences environnementales, notamment le développement de résistances, la pollution et la destruction d'espèces non-cibles. Les producteurs disposent d'options limitées à mesure que les PPP existants sont retirés du marché. Le biocontrôle apparaît comme une alternative prometteuse et est sujet de nombreuses recherches au vu de sa qualité de préservation de l'environnement (Chávez-Ramírez *et al.*, 2023). Les ACB\* pourraient être employés seuls ou combinés à un traitement de semences fongicide avec une inhibition minimale, en fonction de l'ingrédient actif du fongicide (Pimentel *et al.*, 2022). *Lysobacter firmicutimachus* 5-7 a montré une activité de biocontrôle par antibiose contre *Pythium* spp. Un phénomène d'hyperparasitisme a été constaté dans l'interaction de la souche *Kitasatospora* 6-4 avec les hyphes de *Pythium* (Tu *et al.*, 2023). Amaradasa *et al.* (2024) ont montré que l'endophyte bactérien accession ALR1619 (*Pseudomonas* sp.) fournit une protection à court et moyen terme contre la brûlure à *Pythium* sur laitue. *Trichoderma aggressivum* f. sp. *europaeum*, *Trichoderma saturnisporum*, et *Trichoderma longibrachiatum*, ont également montré une activité antagoniste contre *P. ultimum* (Sánchez-Montesinos *et al.*, 2019). L'extrait organique brut et un nouvel alcène (le (Z)-5-amino-5-(1,1,2-trihydroxybuta-1,3-dienyl)oxy)



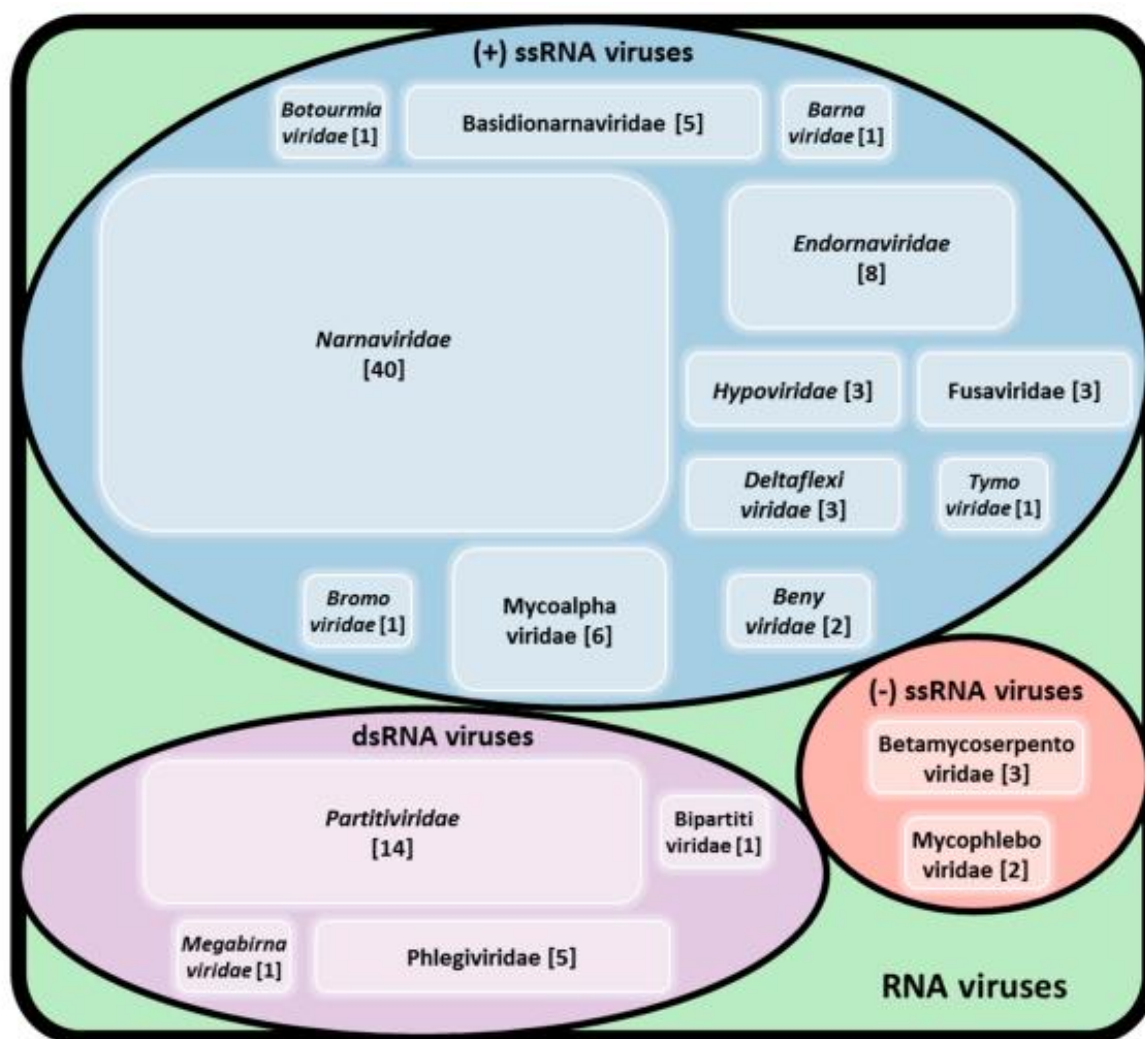
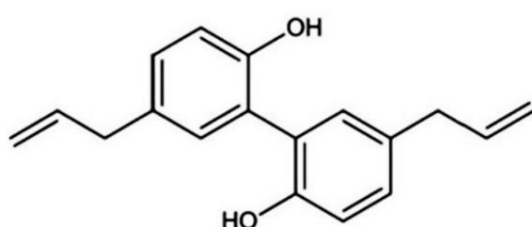
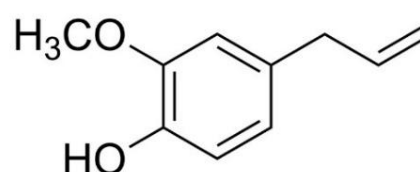


Figure 25. Familles de virus signalés comme infectant *R. solani* (Abdoulaye *et al.*, 2019). Les nombres entre crochets indiquent le nombre de virus par famille. Les nombres entre crochets indiquent le nombre de virus par famille.



Magnolol



Eugénol

Figure 26. Structures chimiques du magnolol (Mo *et al.*, 2021) et de l'eugénol [17].

pentane-6,7,8,9-tétraol) isolé de *Trichoderma erinaceum* ont inhibé de manière significative la croissance mycélienne de *P. ultimum* (Siebatcheu *et al.*, 2023). Chávez-Ramírez *et al.* (2023) ont montré que deux bactéries antagonistes de *R. solani* RhCh-14 et de *P. ultimum* PyFr-14, *Paenibacillus polymyxa* NMA1017 et *Burkholderia cenocepacia* CACua-24 ont inhibé de 70 à 80 % le développement de ces deux pathogènes. Le microbiome du sol joue un rôle crucial dans la lutte contre les maladies telluriques des plantes, cependant on sait encore peu de choses sur la manière de le modifier pour induire ou augmenter la suppression des maladies. Kurm *et al.* (2023) ont montré qu'une combinaison de désinfestation anaérobie du sol, de farine de cheveux et de compost permet d'obtenir une suppression de *P. ultimum*, probablement due à une augmentation de l'abondance et de l'activité microbienne (*Pseudomonas* sp., *Chryseobacterium* sp., *Chitinophagaceae*, *Mortierella* sp., *Trichosporonaceae*). Actuellement, les seuls produits homologués sur mâche pour le traitement des sols contre *Pythium* spp. sont basés sur le biocontrôle : le Triatum-P et -G (Koppert) à base de *Trichoderma harzianum* T-22 et le Rhapsody® (Bayer) à base de *Bacillus subtilis* QST 713 (A. Braud, communication personnelle).

### 5.3. Nouvelles pistes de lutte contre *Rhizoctonia solani*

La piste du biocontrôle est également étudiée dans le cadre de la lutte contre *R. solani*. Les espèces de *Trichoderma* ont été largement étudiées ces dernières années en tant qu'ACB. *T. virens* ZT05 a un effet antagoniste significatif contre *R. solani*, son mécanisme d'action est associé à l'hyperparasitisme et à l'antibiose (Halifu *et al.*, 2020). Malignani *et al.* (2023) ont montré une interaction mycoparasitaire entre *Trichoderma afroharzianum* Th2RI 99 et *R. solani*. Les *Lactobacillus* sp. ont également une activité antifongique contre *R. solani* (Akhtar *et al.*, 2023). Les mycovirus\* hébergés par *R. solani* (figure 25) principalement liés à l'hypovirulence tels que le RsPV2/GD-11 (Abdoulaye *et al.*, 2019) ou agissant potentiellement comme ACB peuvent être criblés afin de lutter contre ce pathogène, aucun cultivar n'étant résistant (Umer *et al.*, 2023). Les biopesticides sont également une piste étudiée. Les filtrats d'*Azotobacter chroococcum* et de *Pseudomonas fluorescens* ont des propriétés antifongiques contre *R. solani*, fournissent une protection élevée et augmentent le pourcentage de germination des graines (Alsudani *et al.*, 2020). Le magnolol, extrait de *Magnolia officinalis* (figure 26) et l'eugénol (extrait de *Syzygium aromaticum*, figure 26, action multicible) possèdent également des activités antifongiques contre *R. solani* et constituent des alternatives possibles aux stratégies de lutte conventionnelles contre ce pathogène (Mo *et al.*, 2021 ; Zhao *et al.*, 2021).

## 6. Bibliographie

### 6.1. Ouvrages

- Agrios, G. N.** (2005). *Plant Pathology*. Amsterdam : Academic. **635**. 4th ed.
- Abdoulaye, A. H., Foda, M. F. and Kotta-Loizou, I.** (2019). Viruses infecting the plant



pathogenic fungus *Rhizoctonia solani*. *Viruses* **11**, 1113.

**ARELPAL** (2021). Appel à projet SUPERNOMA. Région Pays de la Loire (FR), DAPA, **24**, 11-310.

**Ahuja, I., Rohloff, J. and Bones, A. M.** (2010). Defence mechanisms of Brassicaceae: implications for plant-insect interactions and potential for integrated pest management. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 311–348.

**Akber, M. A., Mubeen, M., Sohail, M. A., Khan, S. W., Solanki, M. K., Khalid, R., Abbas, A., Divvela, P. K. and Zhou, L.** (2022). Global distribution, traditional and modern detection, diagnostic, and management approaches of *Rhizoctonia solani* associated with legume crops. *Front Microbiol* **13**, 1091288.

**Akhtar, M., Nosheen, A., Keyani, R., Yasmin, H., Naz, R., Mumtaz, S. and Hassan, M. N.** (2023). Biocontrol of *Rhizoctonia solani* in basmati rice by the application of *Lactobacillus* and *Weissella* spp. *Sci Rep* **13**, 13855.

**Alsudani, A. A. and Raheem Lateef Al-Awsi, G.** (2020). Biocontrol of *Rhizoctonia solani* (Kühn) and *Fusarium solani* (Marti) causing damping-off disease in tomato with *Azotobacter chroococcum* and *Pseudomonas fluorescens*. *Pak J Biol Sci* **23**, 1456–1461.

**Amaradasa, B. S., Mei, C., He, Y., Chretien, R. L., Doss, M., Durham, T. and Lowman, S.** (2024). Biocontrol potential of endophytic *Pseudomonas* strain IALR1619 against two *Pythium* species in cucumber and hydroponic lettuce. *PLoS One* **19**, e0298514.

**Andreo-Jimenez, B., Schilder, M. T., Nijhuis, E. H., Te Beest, D. E., Bloem, J., Visser, J. H. M., van Os, G., Brolsma, K., de Boer, W. and Postma, J.** (2021). Chitin- and keratin-rich soil amendments suppress *Rhizoctonia solani* disease via changes to the soil microbial community. *Appl Environ Microbiol* **87**, e00318-21.

**Bonanomi, G., Zotti, M., Idbella, M., Di Silverio, N., Carrino, L., Cesarano, G., Assaeed, A. M. and Abd-ElGawad, A. M.** (2020). Decomposition and organic amendments chemistry explain contrasting effects on plant growth promotion and suppression of *Rhizoctonia solani* damping off. *PLoS One* **15**, e0230925.

**Chávez-Ramírez, B., Kerber-Díaz, J. C., Acoltzi-Conde, M. C., Ibarra, J. A., Vásquez-Murrieta, M.-S. and Estrada-de Los Santos, P.** (2020). Inhibition of *Rhizoctonia solani* RhCh-14 and *Pythium ultimum* PyFr-14 by *Paenibacillus polymyxa* NMA1017 and *Burkholderia cenocepacia* CACua-24 : a proposal for biocontrol of phytopathogenic fungi. *Microbiol Res* **230**, 126347.

**Fédération des maraichers nantais** (2023). Présentation du maraichage Nantais. CDDM, Pont-Saint-Martin (FR), 26 p. Document powerpoint interne.

**Garcia, V. G., Onco, M. A. P. and Susan, V. R.** (2006). Review. Biology and systematics of the form genus *Rhizoctonia*. *Spanish Journal of Agricultural Research* **4**, 55–79.

**Gaudin, J., Cerceau, V., Lorne, M., Mervel, S., Bosseur, S., et al.** (2018) Alerte au dépérissement hivernal de la mâche. *Phytoma*, **714**, 36-40.



- Gimsing, A. L. and Kirkegaard, J. A.** (2009). Glucosinolates and biofumigation : fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil. *Phytochem Rev* **8**, 299–310.
- Halifu, S., Deng, X., Song, X., Song, R. and Liang, X.** (2020). Inhibitory mechanism of *Trichoderma virens* ZT05 on *Rhizoctonia solani*. *Plants (Basel)* **9**, 912.
- Hernández-Lara, A., Ros, M., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. Á., Moral, R., Andreu-Rodríguez, F. J., Fernández, J. A., Egea-Gilabert, C. and Antonio Pascual, J.** (2021). The influence of feedstocks and additives in 23 added-value composts as a growing media component on *Pythium irregulare* suppressivity. *Waste Manag* **120**, 351–363.
- Kurm, V., Visser, J., Schilder, M., Nijhuis, E., Postma, J. and Korthals, G.** (2023). Soil suppressiveness against *Pythium ultimum* and *Rhizoctonia solani* in two land management systems and eleven soil health treatments. *Microb Ecol* **86**, 1709–1724.
- L'Hostis, A.** (2023). Développement de solutions alternatives de protection et de stimulation des cultures maraîchères nantaises. Master 1 Biologie Végétale, Université d'Angers/Nantes université/L'Institut Agro Rennes-Angers, Angers, 20 p.
- L'Hostis, A., Braud, A., Lorne, M.** (2023). SUPERNOMA-2023. Tests d'intrants contre *Pythium* mâche. CDDM, Pont-Saint-Martin (FR), 14 p. Rapport interne.
- Li, X., Skillman, V., Dung, J. and Frost, K.** (2022). Legacy effects of fumigation on soil bacterial and fungal communities and their response to metam sodium application. *Environ Microbiome* **17**, 59.
- Lutz, S., Thuerig, B., Oberhaensli, T., Mayerhofer, J., Fuchs, J. G., Widmer, F., Freimoser, F. M. and Ahrens, C. H.** (2020). Harnessing the microbiomes of suppressive composts for plant protection: from metagenomes to beneficial microorganisms and reliable diagnostics. *Front Microbiol* **11**, 1810.
- Mahamat, B. B.** (2022). Développement de solutions de protection alternatives des cultures maraîchères nantaises « Utilisations des intrants suppressifs et biofumigants ». Master Gestion de Santé des Plantes, Université d'Angers/Nantes Université/L'Institut Agro Rennes-Angers, Angers, 33 p.
- Mahamat, B. B., Lorne, M., Cerceau, V., Bosseur, S., Faul-Godec, S., Gerard, S.** (2022). Projet SUPERNOMA-2022. Lutte contre *Pythium* en culture de mâche. CDDM, Pont-Saint-Martin (FR), 10 p. Rapport interne.
- Melignani, E., Martin, M. E., Mema, V. Y., Taibo, C. B., Sabio Y García, J. V. and Barrera, V. A.** (2023). Mycoparasitic interaction between *Trichoderma afroharzianum* strain Th2RI99 and *Rhizoctonia solani*. *Rev Argent Microbiol* **55**, 199–200.
- Mengesha, W. K., Gill, W. M., Powell, S. M., Evans, K. J. and Barry, K. M.** (2017). A study of selected factors affecting efficacy of compost tea against several fungal pathogens of potato. *J Appl Microbiol* **123**, 732–747.
- Mo, F., Hu, X., Ding, Y., Li, R., Long, Y., Wu, X. and Li, M.** (2021). Naturally produced magnolol can significantly damage the plasma membrane of *Rhizoctonia solani*. *Pestic Biochem Physiol*





178, 104942.

**Montaut, S., Rollin, P., De Nicola, G. R., Iori, R. and Tatibouët, A.** (2012). Composés bioactifs des Crucifères : un apport bénéfique dans notre quotidien. *Phytothérapie* **10**, 342–349.

**Nakubulwa, S., Kusiima, J., Kadobera, D., Mutyoba, J. N., Ario, A. R. and Zhu, B.-P.** (2018). Acute metem sodium poisoning caused by occupational exposure at a flower farm - Uganda, October 2016. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* **67**, 414–417.

**Neher, D.A., L. Fang, T.R. Weicht** (2017) Ecoenzymes as indicators of compost to suppress *Rhizoctonia solani*. *Compost Science & Utilization*, **25**, 251-261.

**Neher, D. A., Brown, A. R., Andrews, T. D. and Weicht, T. R.** (2024). Anaerobic soil disinfestation and vermicompost to manage bottom rot in organic lettuce. *Plant Dis*.

**Nododus, E.** (2016). Dépérissement de la mâche (*Valerianella locusta*) en région nantaise : étiologie du dépérissement, caractérisation des Pythiacées impliquées et recherche de premières options de protection. Ingénieur horticulture GDV, INRA, Centre Bordeaux-Aquitaine. 61 p.

**Pimentel, M. F., Arnao, E., Warner, A. J., Rocha, L. F., Subedi, A., Elsharif, N., Chilvers, M. I., Matthiesen, R., Robertson, A. E., Bradley, C. A., et al.** (2022). Reduction of *Pythium* damping-off in soybean by biocontrol seed treatment. *Plant Dis* **106**, 2403–2414.

**Pons, C., Risso, S., Koch, L.** (2018). Bulletin technique maraîchage - Fusariose de la salade. Chambre d'agriculture des Alpes-Maritimes, Gattières, **12** p.

**Price, A. J., Charron, C. S., Saxton, A. M. and Sams, C. E.** (2005). Allyl isothiocyanate and carbon dioxide produced during degradation of *Brassica juncea* tissue in different soil conditions. *HortScience* **40**, 1734–1739.

**Ricard, M.** (2020). Protocole de détermination du taux de nitrate des sols par Nitrachek. CDDM, Pont-Saint-Martin (FR), 2 p. Rapport interne.

**Sánchez-Montesinos, B., Diáñez, F., Moreno-Gavira, A., Gea, F. J. and Santos, M.** (2019). Plant growth promotion and biocontrol of *Pythium ultimum* by saline tolerant *Trichoderma* isolates under salinity stress. *Int J Environ Res Public Health* **16**, 2053.

**Siebatcheu, E. C., Wetadieu, D., Youassi Youassi, O., Bedine Boat, M. A., Bedane, K. G., Tchameni, N. S. and Sameza, M. L.** (2023). Secondary metabolites from an endophytic fungus *Trichoderma erinaceum* with antimicrobial activity towards *Pythium ultimum*. *Nat Prod Res* **37**, 657–662.

**Tagele, S. B., Kim, R.-H. and Shin, J.-H.** (2021). Interactions between Brassica biofumigants and soil microbiota: causes and impacts. *J Agric Food Chem* **69**, 11538–11553.

**Tu, C.-K., Wang, P.-H. and Lee, M.-H.** (2023). Endophytic bacterium *Lysobacter firmicutilmachus* Strain 5-7 is a promising biocontrol agent against rice seedling disease caused by *Pythium arrhenomanes* in nursery trays. *Plant Dis* **107**, 1075–1086.

**Umer, M., Mubeen, M., Shakeel, Q., Ali, S., Iftikhar, Y., Bajwa, R. T., Anwar, N., Rao, M. J. and He, Y.** (2023). Mycoviruses : antagonistic potential, fungal pathogenesis, and their interaction with *Rhizoctonia solani*. *Microorganisms* **11**, 2515.



van West, P., Appiah, A. A. and Gow, N. A. R. (2003). Advances in research on oomycete root pathogens. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **62**, 99–113.

Wylie, A. C. and Punja, Z. K. (2021). Assessing aerated vermicompost tea combined with microbial biological control agents for suppression of *Fusarium* and *Rhizoctonia*. *Phytopathology* **111**, 1137–1151.

Zhao, Y., Wang, Q., Wu, X., Jiang, M., Jin, H., Tao, K. and Hou, T. (2021). Unraveling the polypharmacology of a natural antifungal product, eugenol, against *Rhizoctonia solani*. *Pest Manag Sci* **77**, 3469–3483.

## 6.2. Ressources en ligne

### 6.2.1. Références du glossaire

[a] **Wikipédia** (2024). Allélopathie. Consulté le 11/08/2024. <https://fr.wikipedia.org/wiki/All%C3%A9lopathie>

[b] **Wikipédia** (2023). Andain. Consulté le 21/05/2024. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Andain>

[c] **Wikipédia** (2017). Diversité bêta. Consulté le 20/03/2024. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diversit%C3%A9\\_b%C3%AAta](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diversit%C3%A9_b%C3%AAta)

[d] **Turner, M.** (2016). Les biostimulants : définition, mode d'action et marché. *Vegenov*. Consulté de 21/08/2024. <https://blog.vegenov.com/2016/09/les-biostimulants-definition-mode-daction-et-marche/>

[e] **Aquaportail** (2023). Anastomose. Consulté le 27/03/2024. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/158/anastomose>

[f] **Ecophytopic** (2023). Utiliser des stimulateurs de défenses des plantes. Consulté de 21/08/2024. <https://ecophytopic.fr/leviers/proteger/utiliser-des-stimulateurs-de-defenses-des-plantes#:~:text=La%20stimulation%20des%20d%C3%A9fenses%20naturelles,moment%20d'un e%20%C3%A9ventuelle%20agression.>

### 6.2.2. Références de l'ouvrage

[1] **Agreste** (2012). Les légumes frais dans les moyennes et grandes exploitations. Consulté le 05/03/2024. [https://draaf.pays-de-la-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Atlas\\_2012\\_11\\_Legumes\\_cle458efb.pdf](https://draaf.pays-de-la-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Atlas_2012_11_Legumes_cle458efb.pdf)

[2] **Wikipédia** (2024). Loire-Atlantique. Consulté le 12/03/2024. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Loire-Atlantique>

[3] **Insee Analyses Pays de la Loire** (2023). Fruits et légumes : six emplois saisonniers agricoles sur dix au fil des saisons - 116. Consulté le 19/03/2024. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7667080>

[4] **Wikipédia** (2023). *Pythium*. Consulté le 18/03/2024. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pythium>

[5] **Wikipédia** (2024). *Rhizoctonia solani*. Consulté le 13/03/2024. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rhizoctonia\\_solani](https://en.wikipedia.org/wiki/Rhizoctonia_solani)



- [6] **IRIIS phytoprotection** (s.d.). Rhizoctone commun (racines) – Radis. *Consulté le 29/02/2024.*  
<https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Champignon?imageId=2575>
- [7] **Florimond Desprez** (2013). *Rhizoctonia root rot updated.* *Consulté le 13/03/2024.*  
[https://www.florimond-desprez.com/es/wp-content/uploads/sites/6/2015/11/rhizoctonia\\_eng.pdf](https://www.florimond-desprez.com/es/wp-content/uploads/sites/6/2015/11/rhizoctonia_eng.pdf)
- [8] **Wikipédia** (2024). Métham sodium. *Consulté le 17/02/2024.*  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tham\\_sodium](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tham_sodium)
- [9] **Franceinfo** (2023). Métam-sodium : une entreprise agricole jugée à Angers après l'intoxication de 70 personnes avec le pesticide. *Consulté le 04/03/2024.* [https://www.francetvinfo.fr/faits-divers/justice-proces/metam-sodium-une-entreprise-agricole-jugee-a-angers-apres-l-intoxication-de-70-personnes-avec-le-pesticide\\_5840207.html](https://www.francetvinfo.fr/faits-divers/justice-proces/metam-sodium-une-entreprise-agricole-jugee-a-angers-apres-l-intoxication-de-70-personnes-avec-le-pesticide_5840207.html)
- [10] **France Bleu** (2018). Cinq personnes intoxiquées au métam-sodium dans le Finistère. *Consulté le 08/03/2024.*  
<https://www.francebleu.fr/infos/agriculture-peche/cinq-personnes-intoxiques-au-metam-sodium-dans-le-finistere-1540562974>
- [11] **Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire** (2022). Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ?. *Consulté le 05/03/2024.*  
<https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>
- [12] **GECO** (2021). Désinfection du sol par la solarisation en cultures légumières. *Consulté le 04/03/2024.* [https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eeecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fLa\\_Solarisation](https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eeecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fLa_Solarisation)
- [13] **Simon** (s.d.). Automate de désinfection vapeur Steam'R. *Consulté le 05/03/2024.*  
<https://www.machines-simon.com/nos-machines/preparation-des-sols/desinfection/automate-vapeur-steam-r/405-automate-de-desinfection-vapeur-steam-r.html>
- [14] **Agroscope** (s.d.). Méthodes standards. *Consulté le 05/03/2024.*  
<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/production-vegetale/protection-vegetaux/sante-du-sol/methodes-standards.html>
- [15] **CTIFL** (2024). Solarisation sous abri et en plein champ point sur les methodes alternatives le. *Consulté le 12/03/2024.*  
<https://www.ctifl.fr/solarisation-sous-abri-et-en-plein-champ-point-sur-les-methodes-alternatives-le-10>
- [16] **GECO** (2018). Désinfecter le sol à la vapeur. *Consulté le 05/03/2024.*  
[https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eeecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fDesinfection\\_A\\_La\\_Vapeur](https://geco.ecophytopic.fr/concept/-/concept/voir/http%253a%252f%252fwww%252egeco%252eeecophytopic%252efr%252fgeco%252fConcept%252fDesinfection_A_La_Vapeur)
- [17] **Wikipédia** (2023). Eugénol. *Consulté le 26/03/2024.*  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A9nol#/media/Fichier:Eugenol\\_acsv.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A9nol#/media/Fichier:Eugenol_acsv.svg)

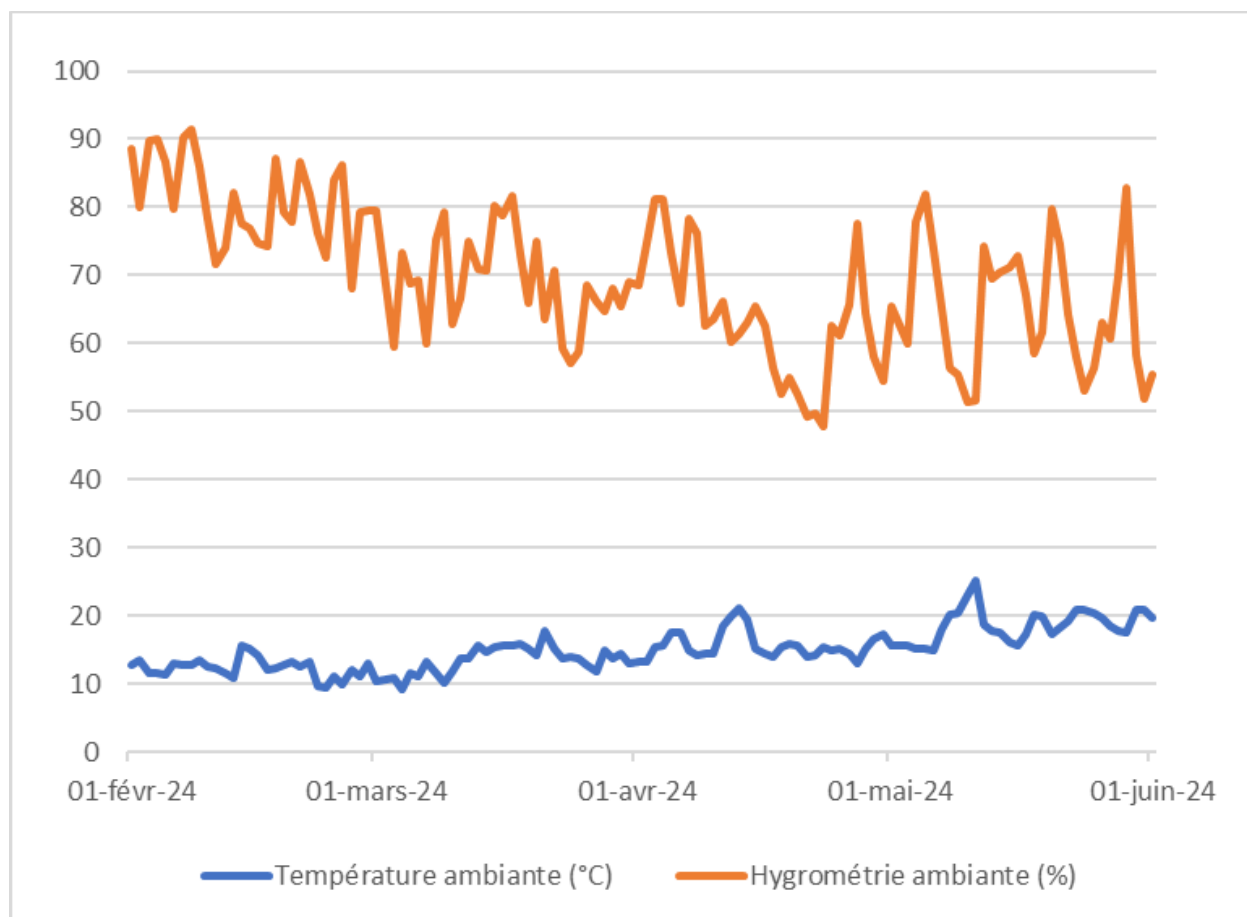


# ANNEXES



## Annexe I. Conditions de culture en serre froide CDDM.

	Référence	Libellé	Valeur	Unité
Aération serre	AA01	Consigne principale des aérations	15,0	°C
Ecran serre	AD01	Consigne d'ombrage par rapport aux Watt/m²	475	W/m²
Ecran serre	AD02	Consigne thermique haute	25,0	°C
Ecran serre	AD03	Consigne thermique basse	5,0	°C
Deshumidification	AE01	Consigne de déshumidification	NON	%
Deshumidification	AE02	Sécurité température déshumidification	15,0	°C



Annexe II. Dispositifs expérimentaux pour les essais en caissettes d'intrants contre *Pythium* spp.  
(a) (AM, 15/08/2024, CDDM) et *Rhizoctonia solani* (b) (A. Braud, 03/2024, CDDM).



Annexe III. Disposition des caissettes en phytotron dans le cadre de l'essai d'intrants contre *Pythium* spp. sur mâche en culture de révélation 1 (CR 1) et en culture de révélation 2 (CR 2).

CR 1									
		ETAGE 2				ETAGE 2			
FOND		M5 R2	M8 R3			M9 R4	M11 R3		
		M1 R3	M4 R4			M13 R4	M14 R4		
		M3 R4	M2 R4			M10 R4	M9 R2		
		M2 R3	M4 R2			M10 R1	M16 R4		
		M6 R1	M5 R1			M15 R2	M15 R3		
ENTREE		M3 R1	/			M15 R1	M15 R4		
		ETAGE 1				ETAGE 1			
FOND		M4 R4	M5 R3			M12 R3	M13 R1		
		M8 R1	M6 R4			M16 R2	M12 R4		
		M7 R1	M7 R4			M14 R2	M10 R3		
		M7 R3	M7 R2			M11 R4	M9 R3		
		M6 R2	M1 R1			M14 R3	M16 R1		
ENTREE		M2 R1	/			M10 R2	M12 R2		
		ETAGE 0				ETAGE 0			
FOND		M5 R4	M2 R2			M13 R3	M14 R1		
		M8 R4	M3 R2			M11 R2	M16 R3		
		M3 R3	M1 R2			M9 R1	M11 R1		
		M6 R3	M4 R1			M12 R1	M13 R2		
ENTREE	MUR GAUCHE	M1 R4	M8 R2	ALLEE		/	/	MUR DROIT	
CR 2									
		ETAGE 2				ETAGE 2			
FOND		M8R3	M1R4			M15R1	M9R4		
		M3R4	M5R2			M14R1	M13R3		
		M4R3	M2R2			M15R3	M10R1		
		M2R4	M7R1			M15R4	M15R2		
		M6R4	M4R1			M13R4	M9R2		
ENTREE		M1R3	/			M16R4	M10R4		
		ETAGE 1				ETAGE 1			
FOND		M4R2	M2R1			M14R3	M11R3		
		M6R2	M1R1			M10R3	M12R3		
		M5R1	M3R1			M9R3	M14R2		
		M6R1	M7R3			M16R2	M12R4		
		M7R4	M5R3			M12R1	M11R1		
ENTREE		M8R1	/			M16R1	M13R1		
		ETAGE 0				ETAGE 0			
FOND		M4R4	M5R4			M11R4	M10R2		
		M8R4	M7R2			M9R1	M11R2		
		M2R3	M6R3			M14R4	M16R3		
		M1R2	M3R2			M12R2	M13R2		
ENTREE	MUR GAUCHE	M8R2	/	ALLEE		/	/	MUR DROIT	

#### Annexe IV. Protocole d'utilisation du Nitracheck 404 (d'après Ricard, 2020).

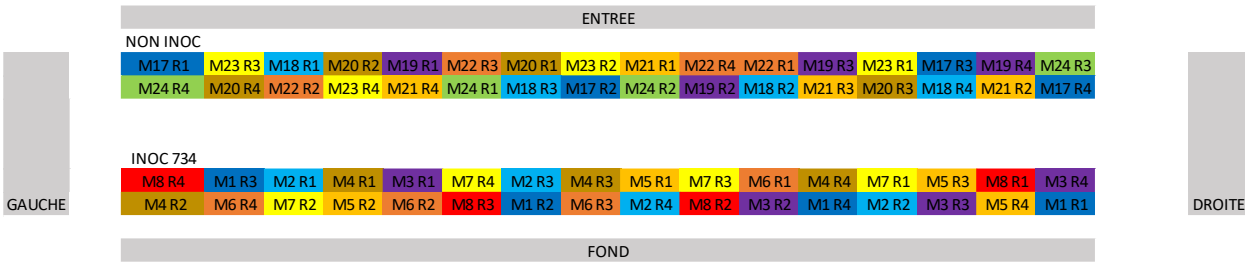
Dans un gobelet propre, peser 100 g de l'échantillon de sol préalablement homogénéisé. Ajouter dans le même contenant 100 g d'eau distillée (exempte d'ions ou autres éléments pouvant influencer sur le résultat de la mesure), fermer le couvercle et agiter vigoureusement pendant quelques secondes. Effectuer une contre filtration de la solution à l'aide d'un papier filtre circulaire plié en quatre. Après quelques minutes de filtration, calibrer le Nitracheck 404 à l'aide d'une bandelette neuve, attendre le « bip » de l'appareil puis plonger l'extrémité de la bandelette dans la solution filtrée jusqu'au second « bip » de l'appareil. Attendre la fin du compte à rebours (1 min) donné par l'appareil en agitant la bandelette pour la faire sécher. Une fois le temps écoulé, placer la bandelette dans la fente de lecture et rabattre le clapet. Le taux d'azote nitrique est donné à l'écran en ppm. Le résultat est converti en kgN/ha par le calcul suivant :

$$\begin{aligned} N - NO_3^- \text{ (kg/ha)} \\ &= \frac{\text{taux d'azote nitrique (ppm)} \times M(N)}{M(NO_3^-) \text{ (g.mol}^{-1}\text{)}} \times \text{profondeur de prélèvement (m)} \\ &\times \rho_{sol} \end{aligned}$$

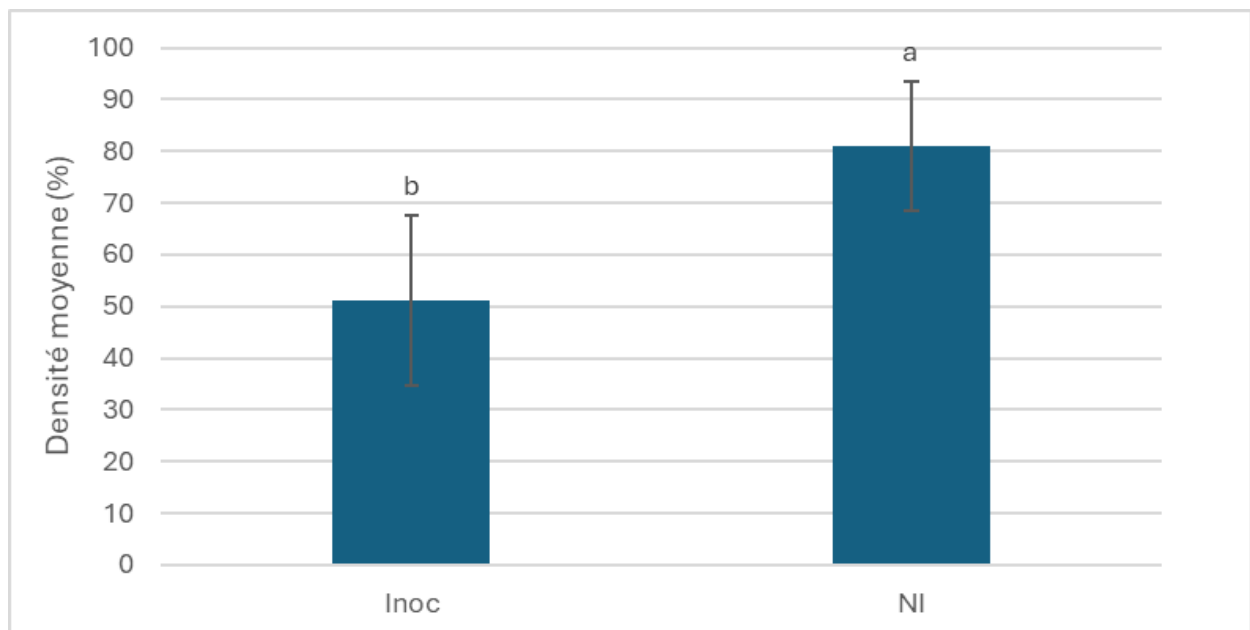
M : masse molaire

$\rho$  : masse volumique du sol.

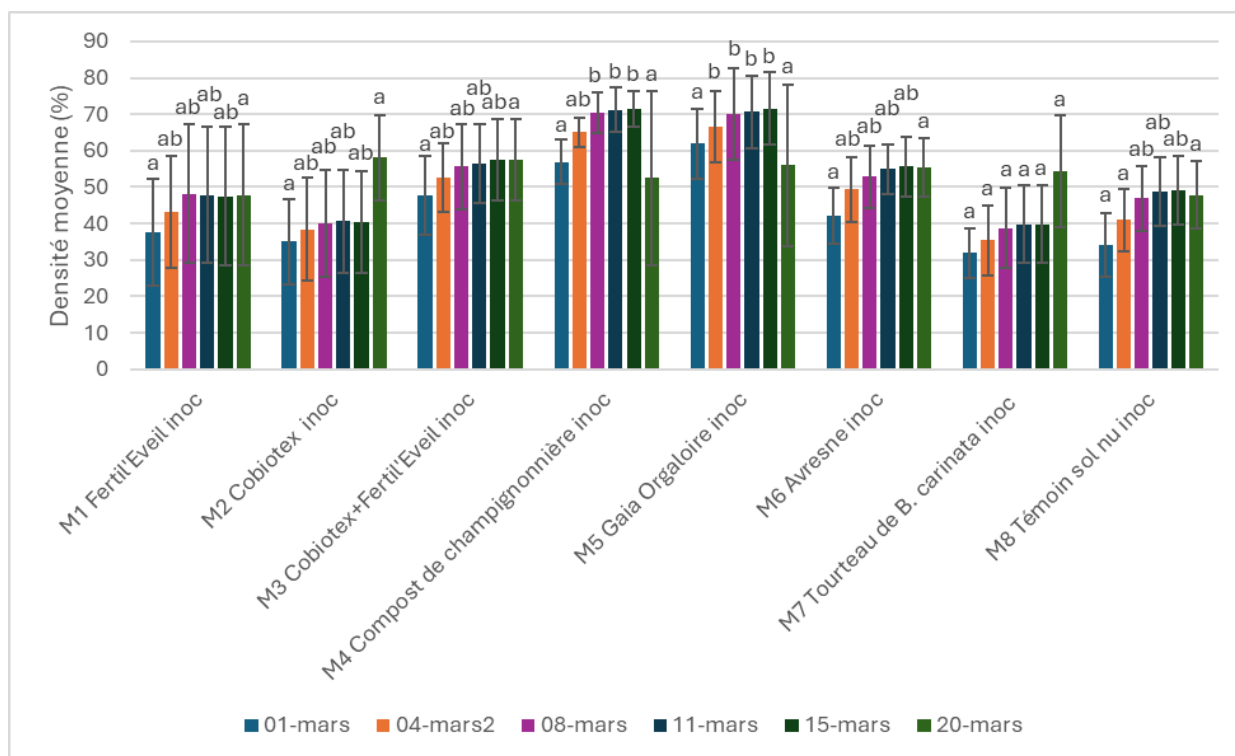
Annexe V. Disposition des caissettes en serre dans le cadre de l'essai d'intrants contre *Rhizoctonia solani* sur radis pour les cultures de révélation 1 et 2.



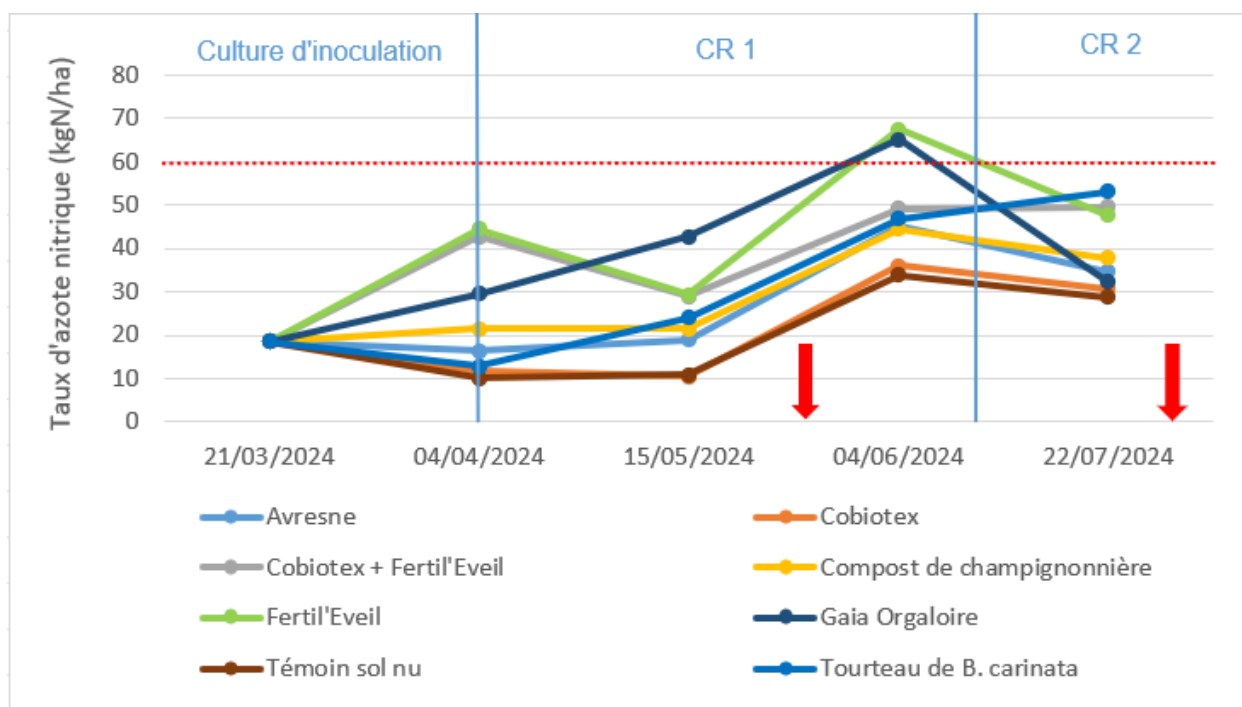
Annexe VI. Densité moyenne des mâches en caissettes en culture d'inoculation en fonction du type d'inoculum. Inoc : caissettes inoculées avec le mélange de *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 ; NI : non inoculé. Les données sont les moyennes de 32 répétitions  $\pm$  écarts types. Les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (Fligner-Policello,  $\alpha = 0.05$ ).



Annexe VII. Densité des mâches en caissettes pour les modalités inoculées avec sol inoculé avec *P. violae* 21-700-4 et *P. valerianellae* 23-885-43 en culture d'inoculation. Les données sont les moyennes de 4 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLMNB, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

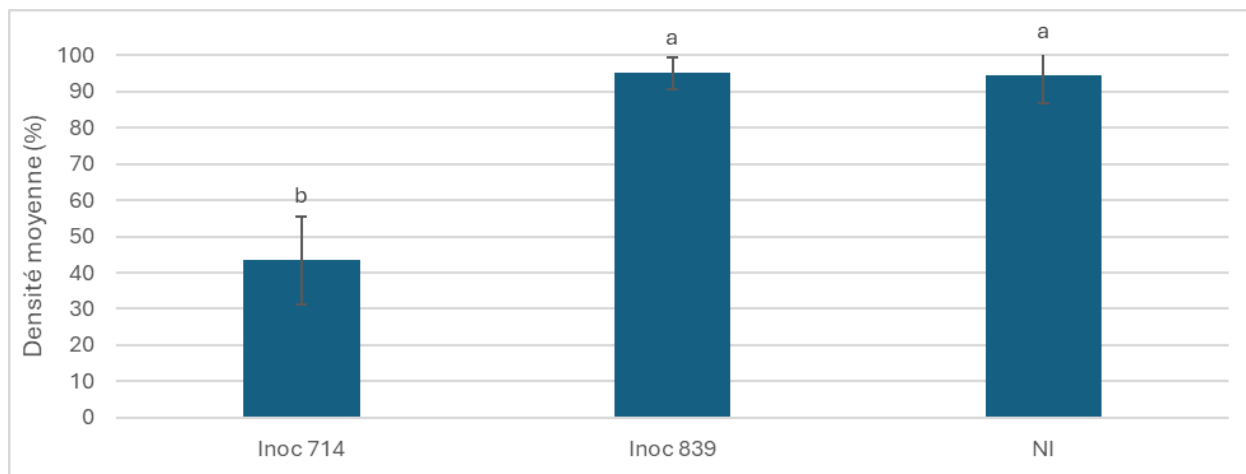


Annexe VIII. Evolution du taux d'azote nitrique par intrant sur l'intégralité de l'essai d'intrants contre *Pythium* spp. sur mâche. Chaque point représente la moyenne entre les taux d'azote nitrique moyens par intrants en sol inoculé et non inoculé. L'appareil de mesure présente une imprécision de  $\pm 10$  kgN/ha. Les flèches rouges marquent les apports de fertilisation azotée. Les pointillés rouges marquent le seuil de fertilisation azotée suffisant pour un cycle complet de culture de mâche.

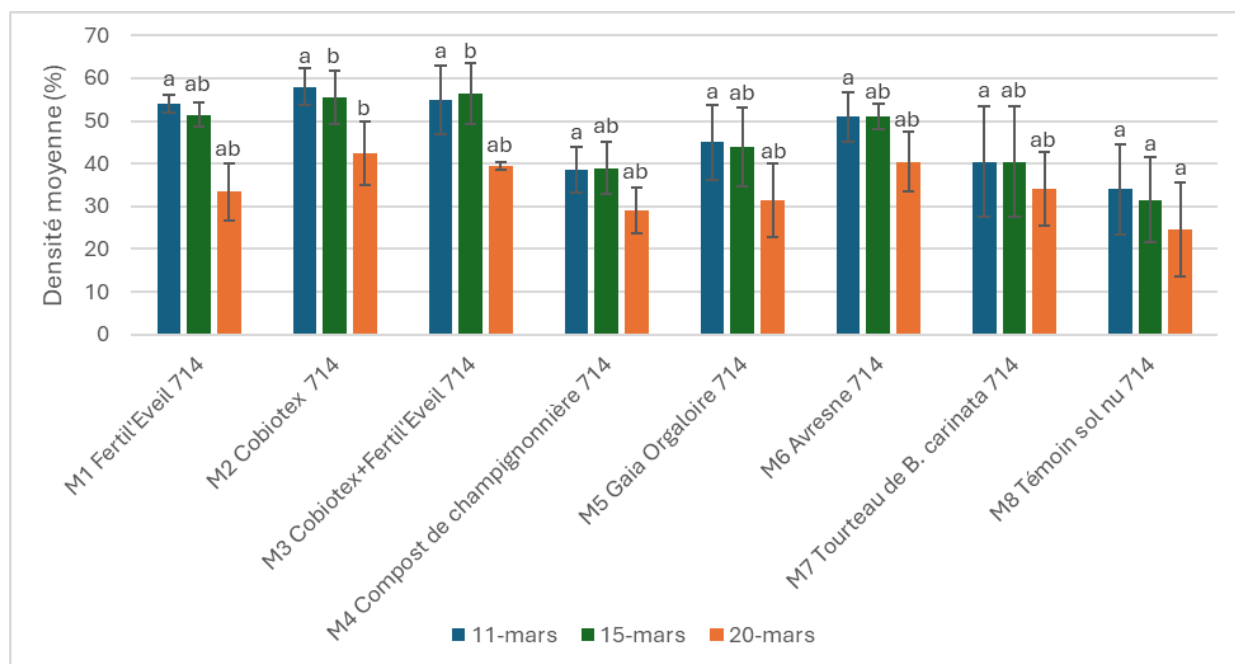




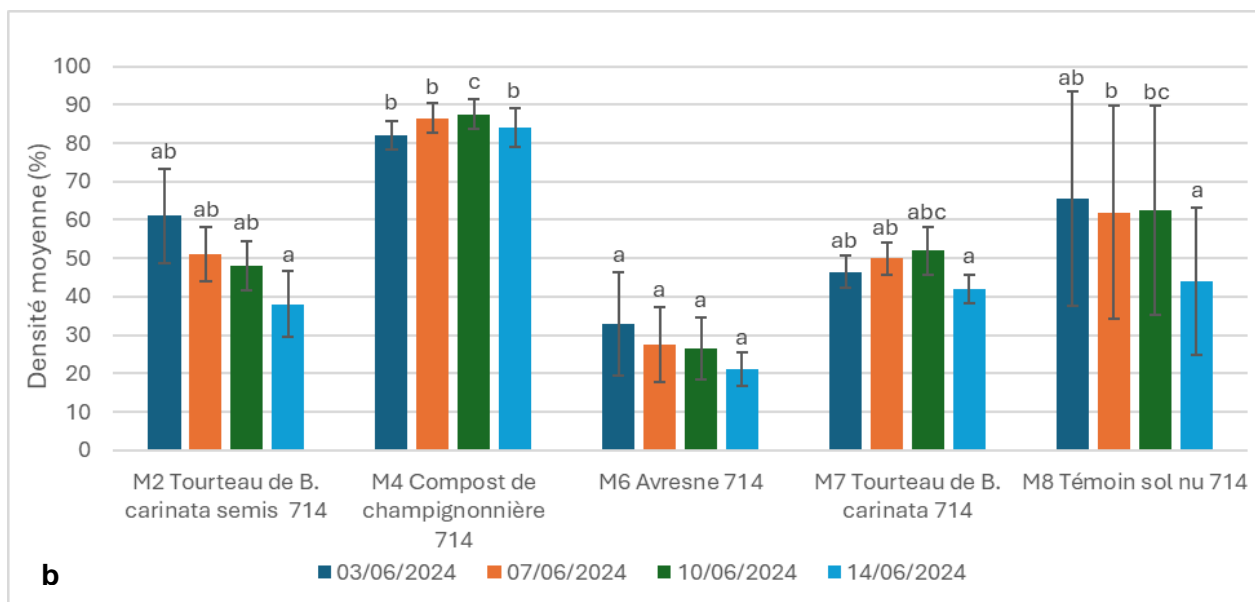
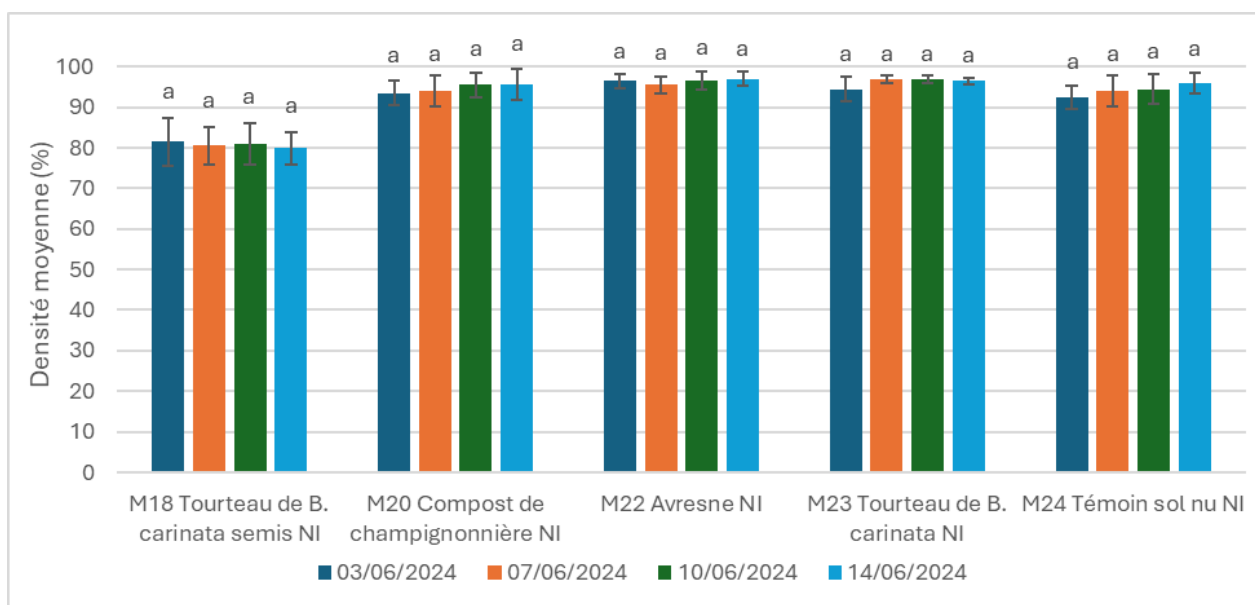
Annexe IX. Densité moyenne des radis en caissettes en culture d'inoculation en fonction du type d'inoculum. Les données sont les moyennes de 32 répétitions  $\pm$  écarts types. Les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (Dunn Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0.05$ ). 22 839 21 RR : *R. solani* 22 839 21 RR ; 21 714 5 RR : *R. solani* 21 714 5 RR ; NI : non inoculé (témoin).



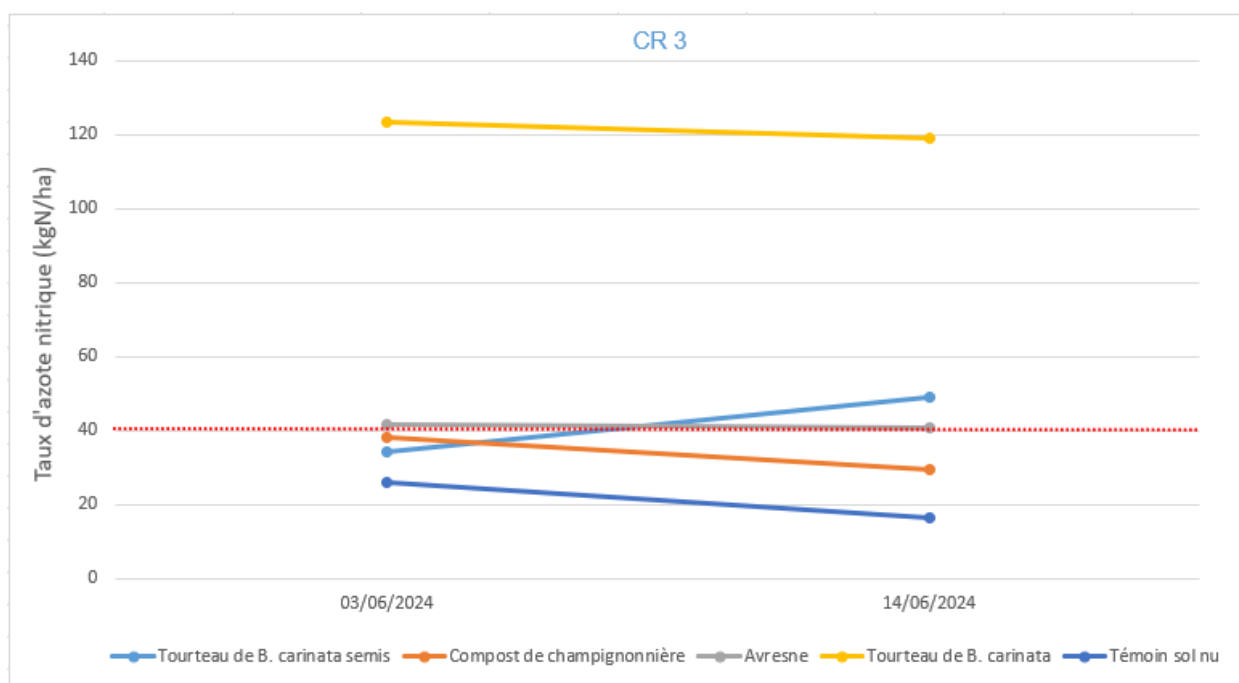
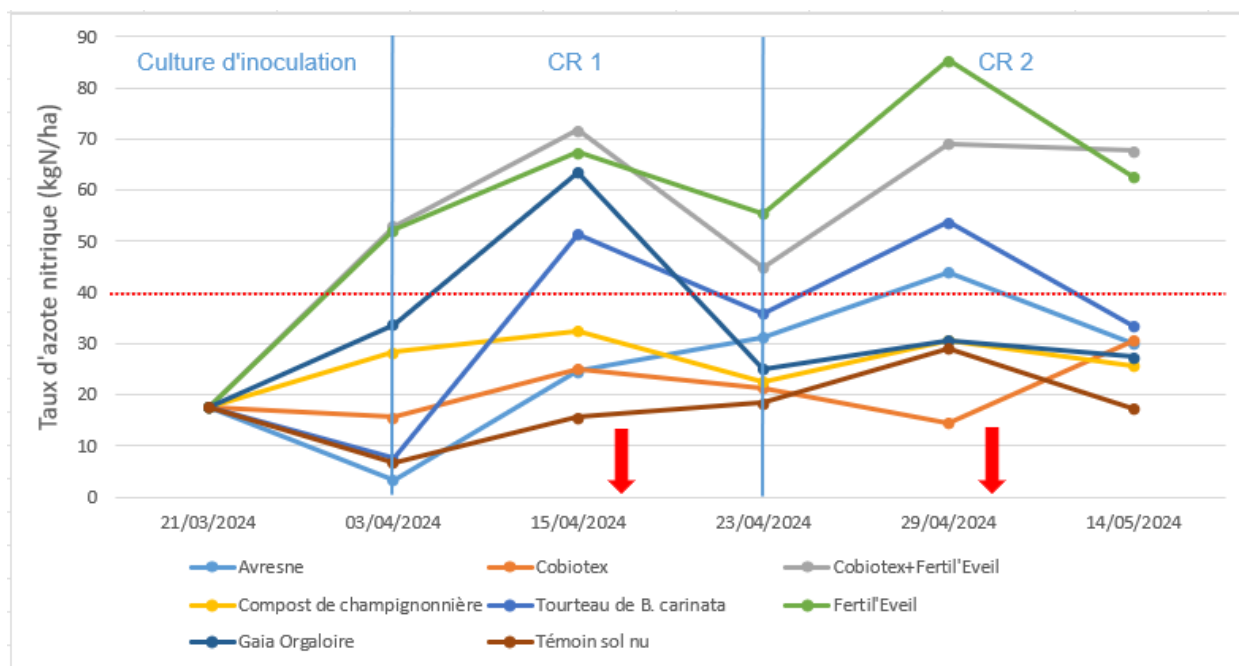
Annexe X. Densité des radis en caissettes pour les modalités inoculées avec *R. solani* 21 714 RR en culture d'inoculation. Les données sont les moyennes de 4 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).



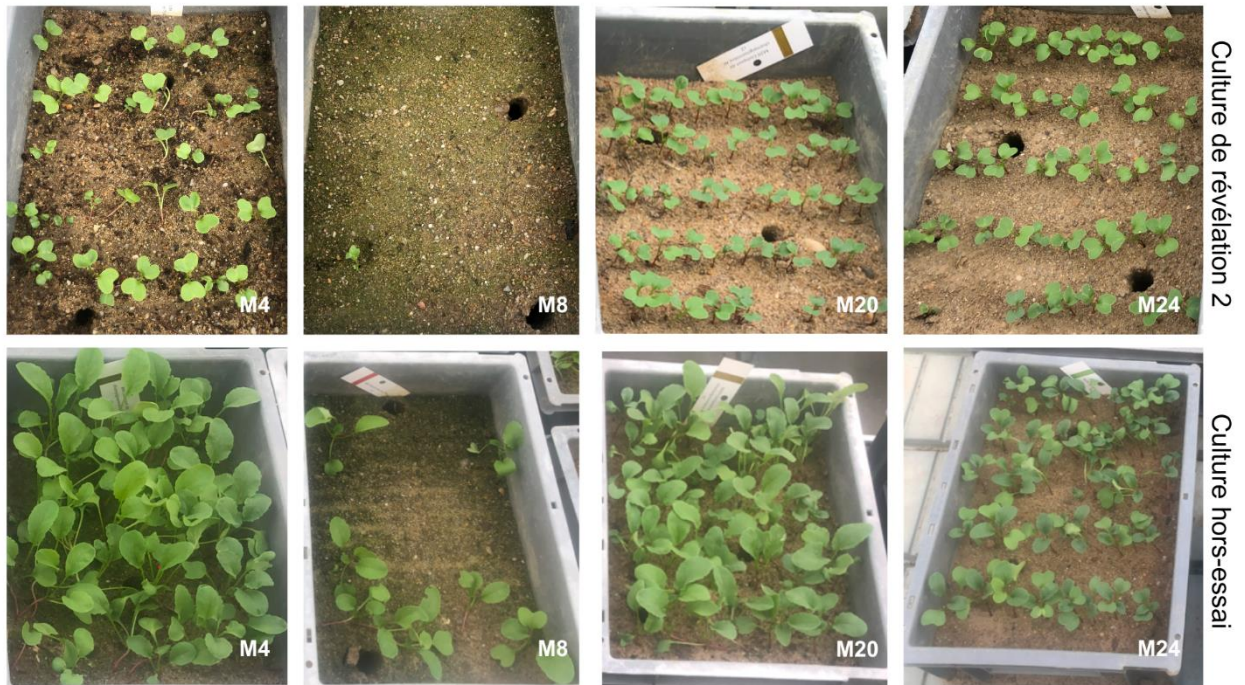
Annexe XI. Evolution de la densité des radis en sol non inoculé (a) et en sol inoculé avec *R. solani* 21 714 5 RR (b) en culture de révélation 3. Les données sont les moyennes de 4 répétitions  $\pm$  écarts types. Pour chaque date, les valeurs portant une lettre différente sont statistiquement différentes (ANOVA sur GLM, test post-hoc de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). M2/M18 : apport de 24 g de pellets de tourteau de *B. carinata* au moment du semis dans les saissettes anciennement M2 (Cobiotex) ; M7/M23 : nouvel apport de 24 g de pellets tourteau de *B. carinata* 15 jours avant semis avec bâchage des caissettes.



Annexe XII. Evolution du taux d'azote nitrique par intrant sur l'intégralité de l'essai d'intrants contre *Rhizoctonia solani* sur radis. Chaque point représente la moyenne entre les taux d'azote nitrique moyens par intrants en sol inoculé et non inoculé. L'appareil de mesure présente une imprécision de  $\pm 10$  kgN/ha. Les flèches rouges marquent les apports de fertilisation azotée. Les pointillés rouges marquent le seuil de fertilisation azotée suffisant pour un cycle complet de culture de radis.

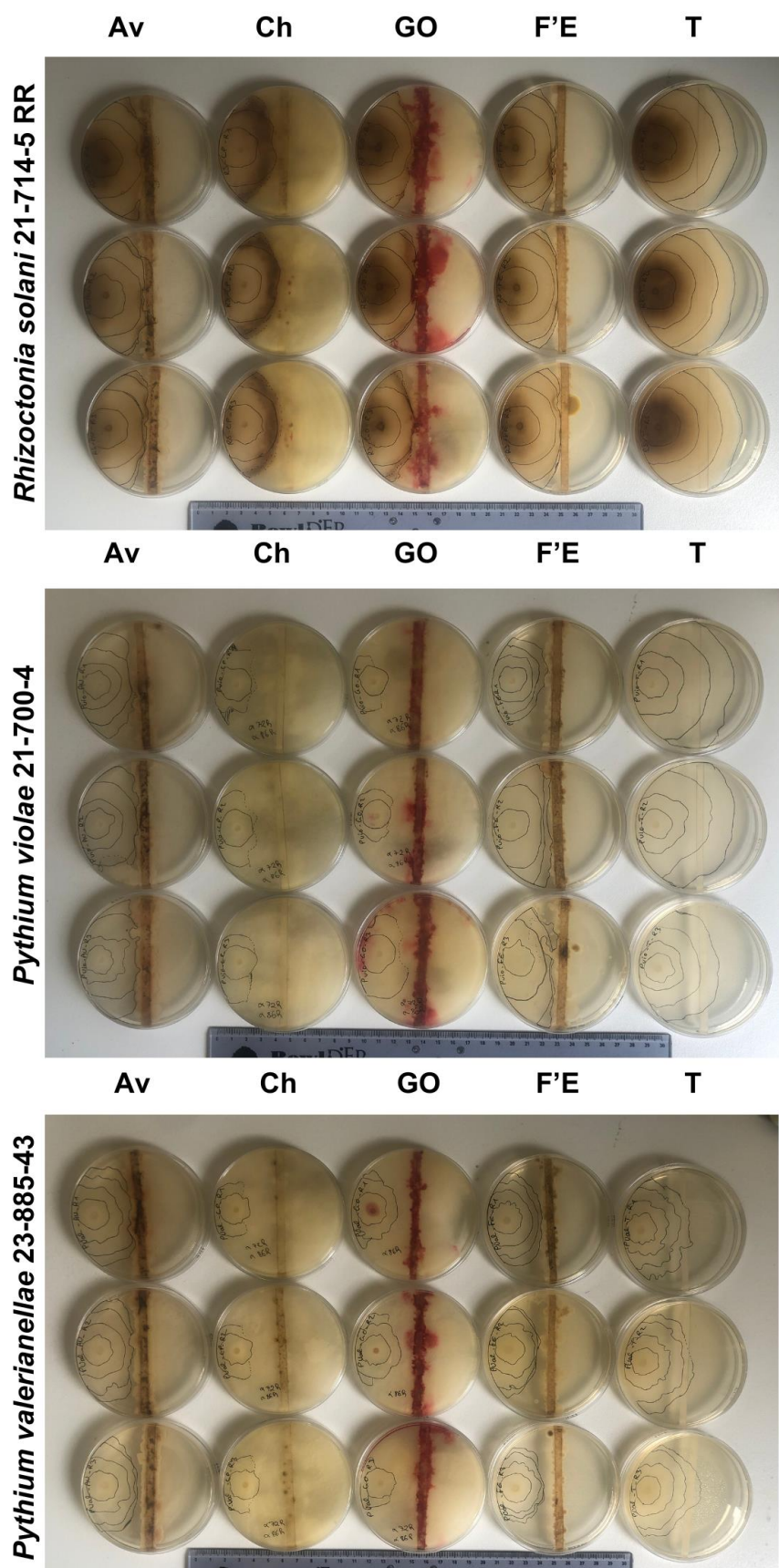






Annexe XIII. Amélioration de l'aspect des jeunes plants de radis en présence de compost de champignonnière en sol inoculé et non inoculé avec *R. solani* 21 714 5 RR (AM, 2024, CDDM).  
M4 : compost de champignonnière en sol inoculé ; M24 : compost de champignonnière en sol non inoculé ; M8 : sol nu inoculé ; M20 : sol nu non inoculé.





Annexe XIV. Aspect des mycéliums de *Rhizoctonia solani* 21-714-5 RR, de *Pythium violae* 21-700-4 et de *Pythium valerianellae* 23-885-43 86 h après mise en culture (AM, 2024, CDDM). Av : Avresne ; Ch : compost de champignonnière ; GO : Gaia Orgaloire ; F'E : Fertil'Eveil ; T : témoin.



<div>  </div> <div></div>		<div>Diplôme : Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Plant Health and Protection (PHP)</div>	
Auteur(s) : <b>Andréa MARTELLI</b> Date de naissance : 15/05/2001		Organisme d'accueil : Comité Départemental de Développement Maraîcher (CDDM)	
Nb pages : 30      Annexe(s) : 14		Adresse : Maison des maraîchers, La Métairie Neuve, Pont-Saint-Martin (44860)	
Année de soutenance : 2024		Maîtres de stage : Armelle BRAUD, Marylou LORNE	
Titre français : Développement de solutions alternatives de protection des cultures maraîchères nantaises			
Titre anglais : Development of alternative solutions for the protection of market garden crops in Nantes			
<p>Résumé : Les cultures maraîchères de la vallée nantaise sont caractérisées par des cycles courts et une faible alternance d'espèces cultivées. Ces conditions sont propices à l'installation de pathogènes telluriques tels que <i>Rhizoctonia solani</i> ou <i>Pythium</i> spp. Les méthodes physiques de désinfection des sols (solarisation, désinfection vapeur) adoptées après l'interdiction du métam-sodium en 2018 (France) sont onéreuses, chronophages et donnent des résultats insatisfaisants. Afin d'assurer le revenu des producteurs tout en respectant les objectifs du plan Ecophyto 2+, des composts sont testés pour évaluer leurs propriétés suppressives et du tourteau de moutarde (<i>Brassica carinata</i>) est testé en tant que biofumigant contre <i>R. solani</i> et <i>Pythium</i> spp. en conditions contrôlées. Une efficacité du compost de champignonnière dans la préservation de la densité de plants de radis en présence de <i>R. solani</i> a été mise en évidence. Les amendements organiques testés n'ont cependant pas réduit l'inoculum des deux pathogènes dans le sol. En parallèle, une méthode de criblage des composts <i>in vitro</i> a été évaluée dans l'objectif de faciliter les essais en conditions contrôlées. Une efficacité supérieure du compost de champignonnière et du compost Gaia Orgaloire ont été observées <i>in vitro</i>, ces résultats diffèrent cependant de ceux obtenus <i>in vivo</i>.</p>			
<p>Abstract: Market gardening in the Nantes valley is characterized by short growing cycles and little alternation of crop species. These conditions are conducive to the establishment of telluric pathogens such as <i>Rhizoctonia solani</i> or <i>Pythium</i> spp. Physical soil disinfection methods (solarization, steam disinfection) adopted after the ban on metam-sodium in 2018 (France) are expensive, time-consuming and give unsatisfactory results. In order to secure growers' income while meeting the objectives of the Ecophyto 2+ plan, composts were tested to assess their suppressive properties, and mustard meal (<i>Brassica carinata</i>) was tested as a biofumigant against <i>R. solani</i> and <i>Pythium</i> spp. under controlled conditions. Mushroom compost was shown to be effective in maintaining radish plant density in the presence of <i>R. solani</i>. However, the organic amendments tested did not reduce the inoculum of either pathogen in the soil. In parallel, an <i>in vitro</i> compost screening method was evaluated with the aim of facilitating trials under controlled conditions. The superior efficacy of mushroom compost and Gaia Orgaloire compost was observed <i>in vitro</i>, although these results differ from those obtained <i>in vivo</i>.</p>			
Mots-clés : <i>biofumigation</i> , <i>composts</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>maraîchage</i> , <i>désinfection des sols</i> . Key Words: <i>biofumigation</i> , <i>composts</i> , <i>Rhizoctonia</i> , <i>Pythium</i> , <i>market gardening</i> , <i>soil disinfection</i> .			