



HAL
open science

Développement d'outil d'aide à la décision pour favoriser l'usage du biocontrôle microbien

Thomas Pressecq

► **To cite this version:**

Thomas Pressecq. Développement d'outil d'aide à la décision pour favoriser l'usage du biocontrôle microbien. Phytopathologie et phytopharmacie. Université d'Avignon, 2023. Français. NNT : 2023AVIG0619 . tel-04563686

HAL Id: tel-04563686

<https://theses.hal.science/tel-04563686v1>

Submitted on 30 Apr 2024

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

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

THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ

École Doctorale
AGROSCIENCES ET SCIENCES (ED 536)

Spécialité / Discipline de doctorat :

Agronomie

Laboratoire INRAE UR 407 Pathologie végétale et UR
Ecodéveloppement

Présentée par
Thomas Pressecq

Développement d'outil d'aide à la
décision pour favoriser l'usage du
biocontrôle microbien

Soutenue publiquement le 12/12/2023 devant le jury composé de :

Mme Elsa Ballini, Maître de Conférences, Institut Agro Montpellier, **Rapportrice**

Mr Ivan Sache, Professeur, AgroParisTech **Rapporteur**

Mme Cécilia Multeau, Partnership and Innovation Officer, INRAE **Examinatrice**

Mme Marie-Hélène Robin, Enseignant-chercheur, EI-Purpan **Examinatrice**

Mr Marc Bardin, Directeur de recherche, INRAE **Directeur de thèse**

Mr Marc Tchamitchian, Directeur de recherche, INRAE **Co-directeur de thèse**

Mme Claire Goillon, Directrice, APREL **Co-encadrante de thèse**

Mr Philippe Nicot, Chargé de recherche, INRAE **Co-encadrant de thèse**

Mme Aurélie Rousselin, Chargée d'expérimentation, APREL **Co-encadrante de thèse**

Résumé

L'utilisation des produits de biocontrôle microbiens en tant que solution alternative aux produits phytosanitaires dans les cultures maraîchères reste limité malgré les incitations législatives et environnementales. Un des freins serait leur manque d'efficacité sur le terrain, un point lié à un manque d'information facilement accessibles sur leurs conditions optimales d'utilisation.

La thèse propose de contribuer au développement un Outil d'Aide à la Décision (OAD) pour répondre à cette carence. Sous forme d'articles, elle rassemble les différents éléments nécessaires à la construction d'un OAD. En premier, la connaissance des besoins des utilisateurs a été identifiée à partir d'une enquête auprès d'acteurs de terrain tels des agriculteurs en maraîchage et des conseillers agricoles dont les retours ont été synthétisés dans une publication. Une revue des publications scientifiques disponibles sur les facteurs d'efficacité des produits de biocontrôle microbiens a été menée dans le but d'analyser la couverture de ces informations et d'alimenter en données un prototype de d'OAD. Ces recherches bibliographiques ont montré l'aspect lacunaire des informations disponibles et les difficultés pour en tirer des recommandations à l'usage des agriculteurs. La troisième partie de la thèse rend compte d'une expérimentation spécifiquement destinée à la détermination des facteurs d'efficacité d'un produit biocontrôle (AQ10) sur une base statistique. Enfin, la dernière partie de la thèse décrit le prototype d'OAD développé en intégrant les attentes des utilisateurs et les données issues de la littérature scientifique, et en proposant une solution novatrice : la collecte de données directement auprès des utilisateurs pour pallier les lacunes des données et préparer l'élaboration des conseils.

Mots clés : Biocontrôle microbiens ; outil d'aide à la décision ; base de données

Abstract

The use of microbial biocontrol products as an alternative to plant protection products in vegetable crops remains limited, despite legislative and environmental incentives. One obstacle is their lack of effectiveness in the field, a point linked to a lack of easily accessible information on their optimal conditions of use.

This thesis proposes to contribute to the development of a Decision Support System (DSS) to address this shortcoming. In the form of articles, it brings together the various elements required to build a DSS. Firstly, knowledge of user needs was built up from a detailed survey of field players such as vegetable growers and agricultural advisors, whose feedback was summarized in the publication. A review of available scientific publications on the efficacy factors of microbial biocontrol products was carried out, with the aim of analysing the coverage of this information and feeding data into a prototype of DSS. This bibliographical research revealed gaps in the available information and the resulting difficulties involved in deriving recommendations for farmers. The third part of the thesis reports on an experiment specifically designed to determine the efficacy factors of a biocontrol product (AQ10) on a statistical basis. Finally, the last part of the thesis describes a prototype of DSS developed by integrating user expectations and data from the scientific literature and proposing an innovative solution: collecting data directly from users to fill data gaps and prepare advice.

Keywords: Microbial biocontrol; decision support system; database

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse. Leur soutien et leurs encouragements ont été essentiels à mon parcours académique, professionnel et personnel et je ne saurais comment leur rendre la pareille.

Tout d'abord, je souhaite remercier chaleureusement mes encadrants, Marc Bardin, Claire Goillon, Philippe Nicot, Aurélie Rousselin et Marc Tchamitchian, pour leur expertise, leur (très) grande patience et leur engagement tout au long de ce travail de recherche. Leurs conseils éclairés et leur mentorat m'ont permis de progresser et de développer mes compétences de chercheur et de devenir meilleur. Je remercie également mes encadrantes et encadrants supplémentaires car c'est également grâce à eux que je suis arrivé ici.

Je tiens à citer Jean-François Bourgeay, qui depuis mon premier jour a été présent avec moi, m'a guidé dans de nombreuses expérimentations et a participé à d'innombrables réflexions sur mon sujet de thèse. Je souhaite également mentionner Dominique Blancard et Jean-Marc Armand qui, par leur confiance et leur transmission de savoir m'ont permis de développer l'idée de DeciControl et de la réaliser.

Enfin, Jonathan Gaudin qui, depuis notre bureau en commun lors de son arrivée jusqu'à notre amitié franche et notre collaboration sur différents thèmes de recherche, fut l'une des personnes les plus importantes pour la réalisation de ma thèse.

Je tiens également à exprimer ma sympathie et ma reconnaissance à Pauline Duval qui, malgré toutes les difficultés, m'a soutenu et a cocréé avec moi DeciControl. Merci à elle.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers toute l'équipe de l'unité Pathologie Végétale et Ecodéveloppement qui m'a entouré pendant cette aventure. Votre collaboration, vos discussions enrichissantes et votre camaraderie ont créé un environnement propice à la recherche et à l'apprentissage. Je remercie particulièrement le secrétariat (Pascale, Claudine et Céline), le PRI, Michel Riqueau, l'unité expérimentale (Joël, Nathalie, Michel et Jérémie), l'atelier (Frédérique, Jérémie et Jean- Marc) ainsi que le plateau de Microscopie (Isabelle et Thierry). Je n'oublie pas l'équipe MISTRAL ainsi que c'est deux cheffes d'équipe Cindy et Christelle. Je remercie également Magalie, Aicha et Hélène pour leur soutien tout au long de ma thèse.

Je tiens également à remercier grandement, mes acolytes non permanents, Tartine, La Beauté, Lodie, Clairette, Le phacochère de la Sorgue, Agent Lia, Thibaldo, Estelle, Margoth, William, Margox, Elise et le Maître Semeur. C'est eux qui m'ont fait tenir dans les moments difficiles et fait briller les moments de joie, ils sont devenus plus que des collègues, des amis et même des proches pour certains d'entre eux.

Je remercie également l'unité Ecodéveloppement dans son ensemble et particulièrement Mireille Navarette, Arnaud Dufils et Verane Sarnette.

L'équipe de L'APREL est également à remercier pour leur accueil, leur confiance et leur soutien tout au long de ce projet, merci particulièrement à Claire, Anthony et Hermine.

Un grand merci aux membres du comité de thèse, Jean-Noël Aubertot, Davide Bellone et Foteini Paschalidou pour avoir examiné et évalué ce travail. Leurs commentaires constructifs ont grandement contribué à l'amélioration de cette thèse.

Je n'oublie pas mes stagiaires, Cathleen, Hugo et Ibrahim, dont le dévouement et la contribution à mon travail de recherche ont été inestimables. Votre engagement a apporté une dimension précieuse à cette recherche sur tous les plans.

Je remercie également le département SPE, le GisPicleg et la société française de Phytopathologie pour m'avoir fait confiance et avoir financé une partie de mon travail de recherche.

À ma famille, je vous suis profondément reconnaissant pour votre amour, votre soutien inconditionnel et vos encouragements constants tout au long de cette aventure académique. Vous avez été ma source d'inspiration et mon étoile sur ce chemin. Merci particulièrement à ma mère Paule Pressecq et à mon père Francis Pressecq pour leur soutien depuis le début et leurs innombrables actions qui m'ont permis de réussir, je leur devais beaucoup mais je leur dois encore plus désormais. Je remercie ma sœur Julie et mon beau-frère Clément qui m'ont apporté soutien, bienveillance et une perspective nouvelle dans mon travail. Je remercie ma tante Anne et mon oncle Pascal qui, par leur expérience de thésarde et d'ingénieur, m'ont évité bien des embûches. Je remercie également Paulette Farisse et Joséphine « Manou » Pressecq pour leur très grande patience et persévérance dans leur aide inexorable. Je remercie également mes oncles et tantes, parrain et marraine qui ont tous participé à cette grande aventure Alain, Brigitte Chantale, Danielle, Jean, Jean-Michel, Sandrine, Serge, Véroniques et Yves.

Enfin, à mes amis et proches, autrement dit ma famille choisie qui a été à mes côtés dans les moments de doute et de joie, je vous adresse un profond et sincère merci. Votre amitié a rendu ce voyage plus riche et mémorable. Je dois citer Rantor, son immense affection fraternelle de plus de 25 ans ne saurait se réduire à quelques mots, donc un simple merci fera office de symbole. Le Mexicain pour être toujours là à mes côtés depuis 27 ans et sans qui ma recherche n'aurait pu aboutir, merci à lui pour ses longues heures passées au téléphone ou sur Discord. Merci à toi, Bertrand, pour notre « bromance » mêlant habilement fusils, micro-organismes et amitié sincère et profonde. Merci au Bucheron pour m'avoir redonné le sourire à maintes reprises. Merci à Alice et Valentin, pour leur soutien et leur hospitalité ainsi que leur bienveillance à mon égard.

Merci à Clément Dezord qui fut une rencontre exceptionnelle : il est devenu un ami et un proche, grâce à l'aventure de la thèse. Nous sommes devenus représentants des doctorants, organisateurs de divers évènements et avant tout confidents l'un de l'autre.

Je tiens enfin à exprimer toute ma gratitude et mon affection à mes amis, souvent conseillers et parfois confidents : Michel Sainte Colombe, Didier « Jumeau » Vidal, Regis Lebastard, Joelle Valette et Laetitia Bouchard. Leur présence à mes côtés fut essentielle pour la réussite de ce voyage initiatique.

Je ne peux exprimer mes remerciements plus en détail à tous mes amis et proches qui m'ont soutenu mais je dois quand même les citer : Aurélia Bernard, Alexandre Barteau, Cécile, Goizeder, Flo, Johan, Maelys de Lachaux Aupetit, Nathalia et Stanislas, Noëlie Lecat, Sébastien Carette, Salman Ali, Rania Tabel, Paul et Noémie Lafouge-Belleville, Vincent-Nan Dang.

J'adresse un message particulier à Djiga Bouchala que j'ai rencontrée au Sitevi et qui est devenue ma compagne et ma fiancée. Elle a su être présente pendant toute la durée de ma thèse malgré les difficultés de l'éloignement et des chemins tortueux de la vie. Merci à elle pour avoir été une étoile pendant ce chemin.

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans la collaboration et le soutien de chacune de ces personnes. Vous avez tous contribué à façonner ma recherche et mon parcours, je vous en suis vraiment reconnaissant.

Merci du fond du cœur.

Cette thèse est dédiée à Louis Pressecq et Jacques Farisse qui m'ont fait tel que je suis et ce que je m'efforcerai d'être pour le reste de ma vie.

« Il est préférable d'affronter une fois dans sa vie un danger que l'on craint que de vivre dans le soin éternel de l'éviter » (MDS, 1795).

« Mais à part ça, tout va très bien [...] » (Ventura et al, 1935).

Table des matières

Les parties correspondant aux articles sont listées sur un fond grisé.

Résumé.....	3
Abstract	4
Remerciements	5
INTRODUCTION	13
1. La protection des plantes à travers l'histoire	13
1.1 Brève histoire de l'agriculture et de la protection des plantes avant la révolution industrielle.....	13
1.2 Exode rural, mécanisation et révolution chimique	16
1.3 Raisonner, innover et remettre en cause.....	17
2. Le biocontrôle microbien : une nouvelle protection contre les maladies en maraîchage.....	19
2.1 Des alternatives aux pesticides	19
2.2 Le cadre scientifique, commercial et réglementaire des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes	21
2.3 Les modes d'action des agents de biocontrôle microbiens, leur principal atout	27
2.4 Le niveau de protection apportée par les agents de biocontrôle	28
3. Comment un Outil d'Aide à la Décision peut-il aider l'utilisateur d'agents de biocontrôle microbiens ?	30
3.1 Définition et état de l'art des OAD en agriculture.....	30
3.2 Application des OAD aux agents de biocontrôle microbiens	31
4. Problématique de la thèse et annonce du plan	32
4.1 Généralités, genèse de la thèse.....	32
4.2 Enquête de terrain auprès des utilisateurs du biocontrôle microbien	33
4.3 Etude des facteurs d'efficacité dans la littérature scientifique.....	33
4.4 L'expérimentation pour approfondir la connaissance des facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle	34
4.5 Prototype d'un outil d'aide à la décision : DeciControl.....	34
Table des figures pour l'Introduction.....	34
CHAPITRE 1 - Enquête de terrain auprès des utilisateurs du biocontrôle microbien.....	35
1. Présentation du premier article	35
2. Résumé en français.....	35

3.	Article.....	36
	Using microbial biocontrol for disease control in French vegetable production: an analysis of the perspectives of farmers and farm advisors	37
	ABSTRACT	37
	INTRODUCTION	38
	MATERIALS AND METHODS	39
	Online questionnaire	39
	In-depth face-to-face interviews.....	41
	Analysis of interview data	41
	RESULTS AND DISCUSSION.....	43
	Characterization of the agricultural context of biocontrol users.....	43
	Characterization of microbial biocontrol use for disease management.....	44
	Users' perspectives on the interest of biocontrol.....	47
	Needs expressed by biocontrol users.	49
	Synthesis of the survey results	49
	CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES.....	50
	Acknowledgments:.....	51
	References.....	51
	List of Figures Chapter 1.....	51
	List of Tables Chapter 1	52
	CHAPITRE 2 - Etude des facteurs d'efficacité dans la littérature scientifique.....	53
1.	Présentation du deuxième article : « Invited Review Article »	53
2.	Résumé en français.....	53
3.	Article.....	54
	Are the efficacy factors of microbial biocontrol agents sufficiently well documented to foster their optimal use by farmers against plant diseases?	55
	Abstract	55
	Introduction	56
	Factors reported to influence the protective efficacy of microbial biocontrol agents.....	57
	Review of scientific information on the efficacy of MBCA strains approved for use in the European Union against plant diseases	60
	Applicability of available scientific information toward guiding farmers in their use of biocontrol products	68
	Considering the crop of application and the target pathogens: a source of further fragmentation of available information.....	72
	Conclusion and perspectives	75
	References.....	77

List of Figures Chapter 2.....	77
List of Tables Chapter 2	77
CHAPITRE 3 - L'expérimentation pour approfondir la connaissance des facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle : Étude de cas d'exploration des facteurs climatiques affectant l'efficacité de l'agent de biocontrôle AQ10 pour contrôler l'oïdium de la tomate.	79
1. Présentation de l'article 3	79
2. Résumé en anglais.	79
3. Article.....	80
Étude de cas : Exploration des facteurs climatiques affectant l'efficacité de l'agent de biocontrôle AQ10 pour contrôler l'oïdium de la tomate.....	81
Introduction	81
Matériels et méthodes.....	85
Production des plants de tomate	85
Préparation de l'inoculum d' <i>Oidium neolycopersici</i>	85
Préparation de la suspension d' <i>Ampelomyces quisqualis</i>	86
Plan expérimental.....	86
Analyses et interprétation des données	90
Résultats et discussions	92
Variables climatiques relevées dans le tunnel durant l'expérimentation	92
Effet du traitement AQ10 sur le développement de l'oïdium sur tomate	96
Effet du traitement AQ10 sur le développement de l'oïdium sur tomate	98
Influence de la pression de maladie sur l'efficacité protectrice du traitement avec AQ10	100
Effet de la température et de l'humidité relative sur l'efficacité de la protection par le traitement avec AQ10	101
Etude des facteurs influençant l'efficacité de protection par des approches de classification	104
Conclusions et perspectives	107
Liste des Figures pour le Chapitre 3	Erreur ! Signet non défini.
Liste des Tableaux pour le Chapitre 3	Erreur ! Signet non défini.
Références.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE 4 - Prototype d'un outil d'aide à la décision : DeciControl.....	109
1. Contexte du développement et problématique associée	109
1.1 La démarche menant à une application prototype.....	109
1.2 Les concepts et les projets précédant la genèse de DeciControl.....	110
2. Le prototype fonctionnel de l'outil	112
2.1 Principe de fonctionnement.....	113
2.2 La base de données	115

2.3	L'outil de collecte de données du terrain.....	116
2.4	Le prototype déployé	118
3.	Bilan, évolutions nécessaires et limites.....	120
3.1	Collecte et synthèse des données	120
3.2	La mise à disposition de l'information	120
3.3	Les problèmes techniques	121
3.4	Les suites de DeciControl.....	121
	Liste des Figures pour le Chapitre 4	122
	Liste des Tableaux pour le Chapitre 4	122
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	123
1.	Synthèse des résultats des quatre chapitres	123
2.	D'autres voies pour améliorer l'usage des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes	124
2.1	L'exemple des productions animales : l'application d'agents de biocontrôle microbiens comme traitement préventif systématique.....	124
2.2	Les mycovirus comme nouveaux agents de biocontrôle microbiens	125
3.	Ce que m'a apporté la thèse et ma petite contribution pour la promotion des agents de biocontrôle	127
	Bibliographie	128
	ANNEXE 1 : Sources bibliographiques analysées dans le Chapitre 2	146
	ANNEXE 2 : Dépôt d'invention de DeciControl auprès de l'agence pour la protection des programmes	169
	ANNEXE 3 : Article Phytoma DeciControl.....	170

INTRODUCTION

1. La protection des plantes à travers l'histoire

1.1 Brève histoire de l'agriculture et de la protection des plantes avant la révolution industrielle

L'agriculture a été une des premières activités humaines favorisant la sédentarité et la création des premières cités. En effet dans l'évolution des sociétés préhistoriques, ce fut le besoin croissant en ressources alimentaires et de protections individuelles (vêtements et habitations) qui poussa les sociétés dites « chasseurs-cueilleurs » à cultiver les plantes pour survivre. L'agriculture était apparue (Larané, 2023). A la suite de ce choix fondamental, des nouveaux enjeux ont surgi (Figure 1). Contrairement à la cueillette, la culture des plantes entraîna des besoins inédits : sélection des semences, semis, et enfin protection des cultures face aux adventices, maladies et ravageurs. Les pathogènes des plantes ont existé longtemps avant le début de l'agriculture. Ainsi, certains types de micro-organismes tels que les moisissures aquatiques oomycètes associées à des algues bleues reconnues comme des agents pathogènes ont évolué dès la période protérozoïque, il y a environ 2,3 à 2,7 milliards d'années (Pirozynski, 1976). L'observation de taches foliaires sur des plantes sauvages fossilisées prouve aussi que les champignons ont attaqué les plantes longtemps avant l'apparition de l'agriculture. Par conséquent, il semble probable que les maladies affectaient les plantes que les premiers hommes utilisaient, bien que leur impact relatif reste inconnu (Howard, 1996). Pour autant, la protection des plantes telle qu'on l'entend aujourd'hui, n'a pu exister qu'après que l'humanité ait atteint un certain niveau de connaissance en botanique et physiologie végétale.

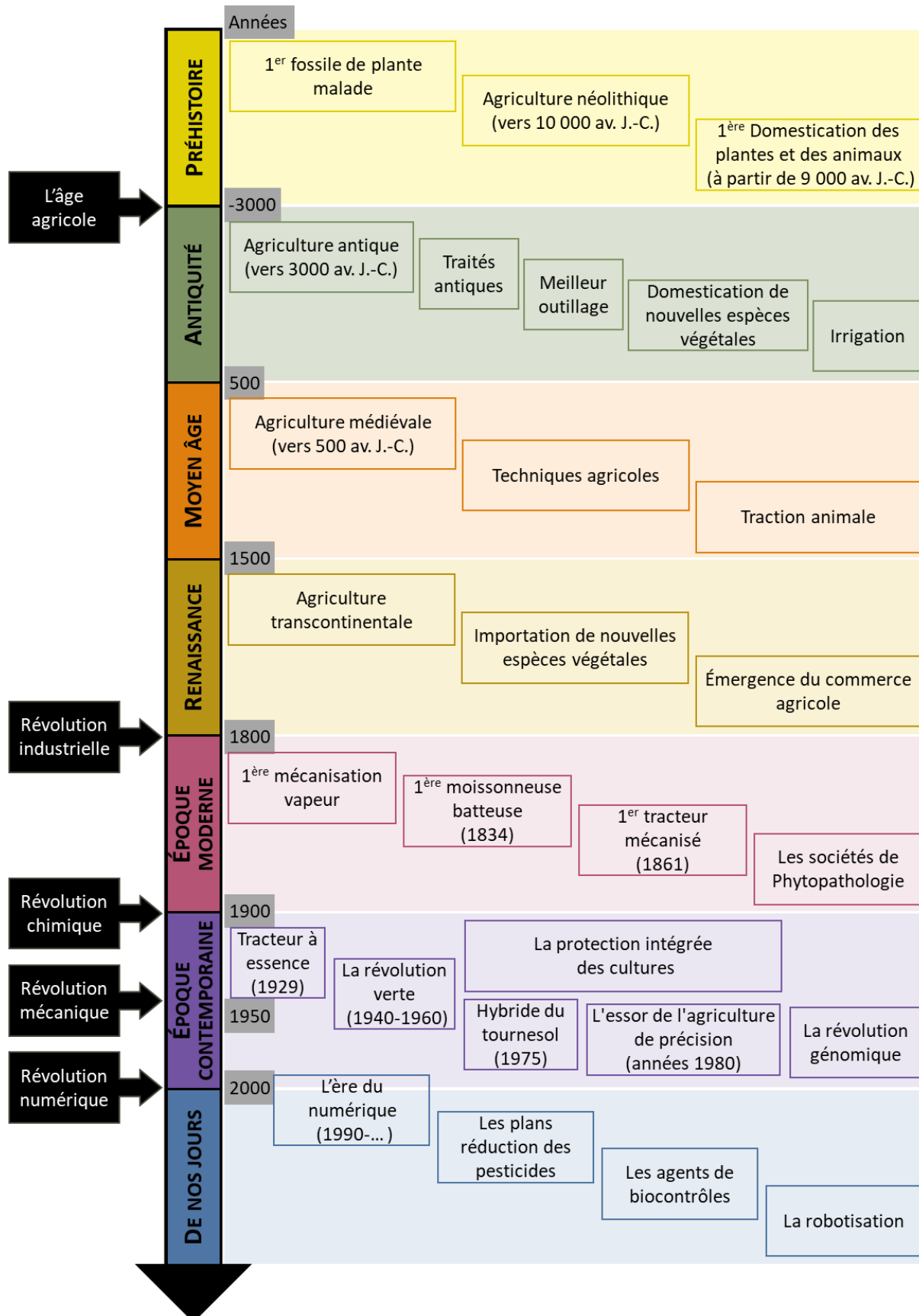


Figure 1 - Synthèse des avancées en protection des plantes à travers l'histoire

Les premières mentions et études sur les maladies des plantes apparaissent pendant l'antiquité notamment via l'apport de Grecs anciens tels que Théophraste et des Romains comme Pline l'Ancien (Amigues, 2010). Théophraste, souvent considéré comme le père de la botanique, a décrit des types de symptômes tels que la brûlure, la pourriture, la gale dans son « *Historia Plantarum* » (Amigues, 2010). L'apparition et l'occurrence de certaines maladies sont même détaillées sur des plantes spécifiques, comme la rouille des céréales. Il était décrit que les attaques furent plus graves dans les zones basses que dans les zones hautes, suggérant un début possible de compréhension de l'impact de facteurs environnementaux sur les maladies des plantes. Sur le continent asiatique, il existe également des traces de connaissances dans ce domaine. C'est le cas par exemple en Chine antique avec l'utilisation d'insectes comme auxiliaires et protecteurs des cultures qui fut retranscrite en 304 avant notre ère par le botaniste Ji Han (263–307) dans son ouvrage « *Nanfang Caomu Zhuang* » (南方草木狀 ; Plantes des régions du sud), qui décrit ce qui semble être un « lâcher d'insectes dans un verger de citronniers » pour les protéger des maladies et des autres insectes à « des périodes à risque comme après de fortes pluies » (Peng, 1983). On voit apparaître, dès l'antiquité dans le bassin méditerranéen, les premiers traités généraux de « bonnes pratiques » et de « retours d'expériences » en direction des professionnels du monde agricole. On peut citer les écrits de Magon Carthaginois, agronome punique du II^{ème} siècle avant notre ère, qui détaillent les méthodes de semis et de protection d'arbres tels que les oliviers et les amandiers (Heurgon, 1976).

Plus tard, c'est le Moyen Âge européen, qui fut une période faste pour l'agriculture, avec plus de productivité, plus de main d'œuvre et une amélioration du niveau de vie de la paysannerie grâce à une stabilité territoriale (Samaran, 1951). La protection des plantes changea ainsi de logique. Alors que la phytopathologie antique s'attachait à expliquer les causes et les conséquences de la maladie, les écrits médiévaux étaient souvent de longues listes de remèdes pour prévenir ou guérir divers symptômes. Parce que les causes réelles des maladies des plantes restaient inconnues et que les observations sur le terrain n'étaient pas habituelles, peu de progrès ont été réalisés dans le développement des méthodes de contrôle des maladies. Ainsi, les remèdes prescrits étaient basés sur la tradition plutôt que sur une approche scientifique encore en construction. Ils appartenaient souvent au domaine de la conjecture plutôt que de la méthode empirique (Orlob, 1971). Cependant, les recueils d'expérience commencent à être collectés et viennent nourrir les traditions et améliorer les pratiques.

La période de la Renaissance européenne à partir du XV^{ème} siècle, qui malgré son nom sera une période avec de nombreuses famines, des instabilités politiques et alimentaires (Frank, 1990), a permis de vrais progrès techniques essentiels pour la protection des plantes. L'introduction de nouvelles espèces venues du Nouveau Monde comme certaines solanacées (Olmstead et al., 2008), cucurbitacées (Chomicki et al., 2020) et poacées (Tenailon and Charcosset, 2011) ont encore permis de diversifier les cultures. Parallèlement à l'implémentation de nouvelles cultures, un autre élément clef fut l'observation au microscope de téleutospores de *Phragmidium mucronatum*, responsables de la rouille des roses en 1667 par Robert Hooke (Ingold et al., 1981). Ce faisant, il a associé pour la première fois un champignon à une maladie de plante.

1.2 Exode rural, mécanisation et révolution chimique

L'ère moderne est une ère de changements, tant démographiques, spatiaux qu'économiques. Ces grands bouleversements sociétaux touchent particulièrement l'agriculture et donc la protection des cultures. Les révolutions scientifiques (chimie, microbiologie et physiologie) du XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles (Balny, 2017; Swynghedauw, 2006) et l'imposition du mode de production capitaliste ont permis un essor de la population mondiale renforçant l'importance d'une protection des plantes efficace pour assurer le rendement. Les travaux pionniers de G.T. Tozzetti et de H. A. de Bary ont été également cruciaux pour l'adoption du concept de causalité entre les années 1700 et 1900 (Trigiano, 2016). Au terme de cette période, une nouvelle science émergea, la pathologie végétale avec notamment la création des sociétés de pathologie végétale dans plusieurs pays (Howard, 1996 ; Trigiano, 2016). On note la création des sociétés allemande en 1894, britannique en 1905 et française en 1914. Cette période de grands changements coexiste avec les prémices de la révolution industrielle. C'est ce progrès technique, puis l'émergence du capitalisme et de la mécanisation qui va modifier les façons de produire et de penser des producteurs agricoles : ils vont produire pour vendre et non plus vendre le surplus de leur production vivrière (Alary, 2016). La protection des cultures se rationalise afin de subvenir de manière pérenne aux besoins de nourriture croissants des villes qui se remplissent. Désormais, une minorité doit nourrir une majorité occupée ailleurs notamment dans l'industrie et le secteur tertiaire (Mendras, 1960). A partir du XX^{ème} siècle, ce défi a été relevé grâce à l'emploi d'engrais de synthèse et de nouvelles substances chimiques insecticides, fongicides et herbicides. L'utilisation fut massive car seule la protection totale et complète de la production agricole comptait. La publicité (Figure 2 et Figure 3) fut abondamment utilisée pour convaincre le monde agricole de l'intérêt de ces nouvelles pratiques (Alix, 2009). Il s'agissait alors de « nourrir le monde », sans se préoccuper d'étudier les impacts sur la santé humaine et les écosystèmes de manière approfondie. Ce contexte s'explique par les deux conflits mondiaux ainsi que par la très forte natalité qui oblige cette accélération (Castonguay, 2010).



Figure 2 - Affiche de promotion des pesticides :
Insecticide USA

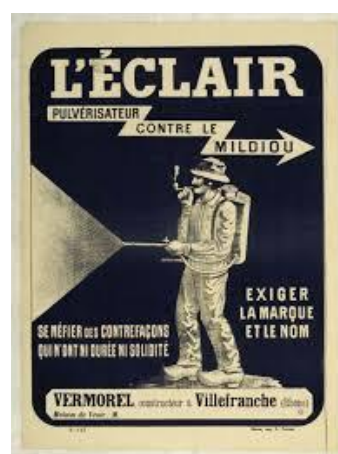


Figure 3 - Affiche de promotion de Vermorel anti-mildiou
France 1930

Après le deuxième conflit mondial, cette transformation s'accélère avec la reconstruction de l'appareil productif et le retour de l'innovation dans le domaine civil. Les molécules phares pour la lutte chimique contre les bioagresseurs des cultures étaient les dithiocarbamates et les phtalimides (toxiques et écotoxiques) (Engels, 2007), puis les benzimidazoles et les triazoles. Ces produits, bien qu'efficaces, étaient à la fois dangereux pour les manipulateurs (peu ou pas formés) et pour le consommateur ainsi que pour les autres organismes vivants de l'environnement. Malgré ses défauts aujourd'hui bien documentés, ce paradigme productiviste a apporté l'opulence alimentaire et a soutenu la croissance démographique (Flamant, 2010). Pour reprendre le titre de l'ouvrage de Michel Debatisse « La révolution silencieuse dans les campagnes », l'agriculture française et européenne en général n'était désormais non plus guidée par la tradition mais par le progrès technique. La création de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) en 1946 et le renforcement des statuts et des rôles des coopératives agricoles en 1947 (Valiorgue *et al*, 2020) a permis de faire appliquer ce paradigme et d'accompagner les agriculteurs sur le territoire, lui-même en pleine rationalisation via le remembrement et la mécanisation (Philippe et Polombo, 2009). Ainsi, comme le souligne l'approche historique de Morton et Saud (2008), le consensus scientifique sur la dangerosité des pesticides était partagé mais considéré comme plus faible que les bénéfices apportés à la protection des plantes.

1.3 Raisonner, innover et remettre en cause

C'est après la période appelée en France les Trente Glorieuses (1945-1973) que la prise de conscience écologique a remis en cause ces types de productions (Bonny, 1994). Des contestations du modèle productiviste, antérieures à la montée de l'environnementalisme, existaient déjà comme notamment l'ouvrage « Silent Spring » de Rachel Carson en 1962 proposant d'appeler les pesticides chimiques « biocides » à cause de leurs actions sur le monde du vivant (Griswold, 2012). Le changement dans la perception de la protection des plantes s'est donc fait très graduellement. On note dans les années 70, la création de l'Environmental Protection Agency aux USA, suivie, 2 ans plus tard, de l'interdiction du dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) aux USA et dans de nombreux autres pays. C'est le début de l'interdiction de certaines substances les plus dangereuses présentant les risques les plus élevés. Une volonté de réduction des intrants et d'abolition progressive des pesticides chimiques a progressé au niveau mondial. Les premiers effets sont l'interdiction de certains insecticides et herbicides pour des raisons de santé et de pollution de l'environnement (Lechenet *et al.*, 2014). Aux USA, c'est le cas du chlordécone, insecticide interdit dès 1975, mais seulement en 1990 en France, qui lança les premiers mouvements de contestation sur la dangerosité des pesticides et le manque d'alternatives (Biswas and Ghosh, 2014). Cette réduction des solutions disponibles pour la gestion des bioagresseurs des cultures a en partie été contrebalancée par la mise à disposition de solutions et de modèles de production alternatifs (Leroux, 2015). Grâce aux pressions croissantes de la société sur ces sujets, l'investissement dans la recherche agronomique a permis de faire émerger des nouveaux types de protection des cultures, plus durables, évitant l'apparition de résistances et respectant mieux l'équilibre complexe qui régit le monde vivant.

Dès les années 50, avec la création de l'Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB ou en Anglais IOBC pour International Organisation of Biological Control), le monde scientifique développe et

imagine de nouvelles façons de protéger les plantes. On peut citer les travaux de J. Franz et E. Billioti de lutte contre les lépidoptères grâce à leurs ennemis naturels, dès 1956. L'OILB continue d'être un acteur majeur de la lutte biologique au cours du vingtième siècle, et finira par être reconnue et plébiscitée par les plus grandes instances internationales à la fin des années 80 (IOBC, 2006). Dans les années 1980, la recherche agronomique a continué à développer de nouveaux modèles de protection dont l'objectif n'était plus d'éradiquer un ravageur ou une maladie mais plutôt de « faire avec », de minimiser ses dommages et ses dégâts afin de pérenniser la production. On parla de seuil de nuisibilité notamment. L'ensemble de ces nouveaux concepts se nommera a posteriori la « protection intégrée » (Ehler, 2006) et est aujourd'hui la base de toutes les réflexions en protection des plantes.

La protection intégrée (ou lutte intégrée) se définit d'après la charte des Nations Unies comme la « conception de la protection des cultures dont l'application fait intervenir un ensemble de méthodes satisfaisant les exigences à la fois écologiques, économiques et toxicologiques en réservant la priorité à la mise en œuvre délibérée des éléments naturels de limitation et en respectant les seuils de tolérance ». L'Union Européenne précise également que : « L'application rationnelle d'une combinaison de mesures biologiques, biotechnologiques, chimiques, physiques, culturelles ou intéressant la sélection des végétaux dans laquelle l'emploi de produits chimiques phytopharmaceutiques est limité au strict nécessaire pour maintenir la présence des organismes nuisibles en dessous du seuil à partir duquel apparaissent des dommages ou une perte économiquement inacceptable » (Directive 2009/128/EC). La protection intégrée rompt donc avec le paradigme du vingtième siècle, et l'objectif est à présent de produire de manière durable et raisonnée et non plus seulement produire plus. Ces définitions impliquent un changement profond de logique dans le sens où l'on cherche à éviter et à atténuer plutôt qu'à éradiquer, confirmant l'échec du modèle productiviste (Guichard et al., 2017).

La protection des plantes a suivi un cheminement complexe et sinueux s'adaptant à la fois aux nouvelles réglementations issues des attentes des consommateurs tout en continuant d'assurer son but principal : garantir une production alimentaire pour l'ensemble de la population. Depuis les années 1980, beaucoup de progrès ont été faits concernant la lutte contre les ravageurs, notamment les insectes avec l'utilisation de solutions novatrices comme celle à base de *Bacillus thuringiensis* (Bravo et al., 2011), les auxiliaires de cultures dont les *Macrolophus pygmaeus*, prédateurs naturels de nombreux ravageurs (Messelink et al., 2014) comme les aleurodes ou *Tuta absoluta* (Urbaneja et al., 2012), ou encore les phéromones de confusion sexuelle (Witzgall et al., 2010). Ces solutions sont désormais bien implantées dans les pratiques agricoles et ont permis de réduire l'utilisation des insecticides. Cependant, la lutte contre les maladies des plantes reste encore sur la voie du changement et de l'amélioration. En effet, les alternatives aux fongicides sont plus rares et moins efficaces et peinent encore à être acceptées par le monde agricole. Parmi toutes les filières, c'est dans le maraîchage que la volonté de réduction des pesticides est la plus présente, sans doute parce que ses produits sont en grande partie consommés frais, avec peu ou pas de transformation.

2. Le biocontrôle microbien : une nouvelle protection contre les maladies en maraîchage

2.1 Des alternatives aux pesticides

Le contrôle des maladies est nécessaire pour assurer une production adéquate et la qualité des produits dans tout type de production agricole. Cependant, pour de nombreuses cultures (plantes ornementales, mais aussi fruits et légumes), le consommateur s'attend à un niveau élevé de qualité visuelle (voire un « *zéro défaut* »), en particulier lorsque le produit ne subit pas de transformation importante avant sa consommation (Porat et al., 2018)). En maraîchage, les agriculteurs ont encore recours à la lutte chimique pour la gestion des maladies sur ces cultures pour assurer leurs productions. Des alternatives sont de plus en plus disponibles et peuvent contribuer à l'élaboration de stratégies de lutte plus durables. Ces solutions sont encouragées et encadrées dans des plans de réduction de l'utilisation de pesticides chimiques comme les plans Ecophyto avec des degrés de réussite variables (Guichard et al., 2017). Les plans Ecophyto encouragent les méthodes de protection alternatives via de nombreux leviers comme la résistance génétique, les rotations culturales et l'utilisation de produits de traitement autres que les pesticides chimiques. L'ensemble de ces produits alternatifs se regroupent sous les noms de « biopesticides » (Samada and Tambunan, 2020) ou encore d'agents de « biocontrôle » (Fauvergue et al., 2022) (Figure 4). Compte tenu des préoccupations croissantes concernant les effets secondaires négatifs des pesticides chimiques dans de nombreux pays, les agents de biocontrôle sont promus comme favorables pour la santé publique et l'environnement (van Lenteren et al., 2018). Leur utilisation est présentée comme ayant de nombreux avantages, particulièrement pour le maraîchage. On estime que 40% de l'utilisation des solutions de biocontrôle à l'échelle mondiale concerne la protection des légumes (Marrone, 2019), majoritairement contre les ravageurs. La commercialisation des cultures maraîchères bénéficie également de nombreux labels de qualité ou d'écotags qui permettent au consommateur d'identifier celles produites sans aucun pesticides chimiques de synthèse, ou avec un nombre limité. Ces actions incitent d'autant plus à l'utilisation de ce biocontrôle par les producteurs souhaitant atteindre un marché plus large (Chen et al., 2018, Nguyen et Le, 2020, Thøgersen et al., 2019). Enfin, l'Union Européenne a mis en place des procédures d'analyses pour vérifier et contrôler la réduction de la présence de pesticides dans l'alimentation ainsi que la réduction de leur utilisation de manière globale (EFSA et al. 2021, https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en). En France, la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt adoptée par le parlement (09/2014) définit dans le « Code rural et de la pêche maritime » (Livre II, Titre V, Article L. 253-6) les agents de biocontrôle comme des « Agents et produits utilisant des mécanismes naturels dans le cadre de la lutte intégrée contre les ennemis des cultures ». Toujours en France, quatre types de produits de biocontrôle sont définis : substances naturelles, macro-organismes, substances allélochimiques et micro-organismes. Parmi ces quatre types de produits de biocontrôle commerciaux décrits par l'association internationale des fabricants de biocontrôle (IBMA, 2022), deux peuvent être mis à la disposition des agriculteurs pour être utilisés contre les maladies des cultures maraîchères : les agents de biocontrôle microbiens et les substances naturelles. C'est sur les agents de biocontrôle microbiens que ce manuscrit est centré.

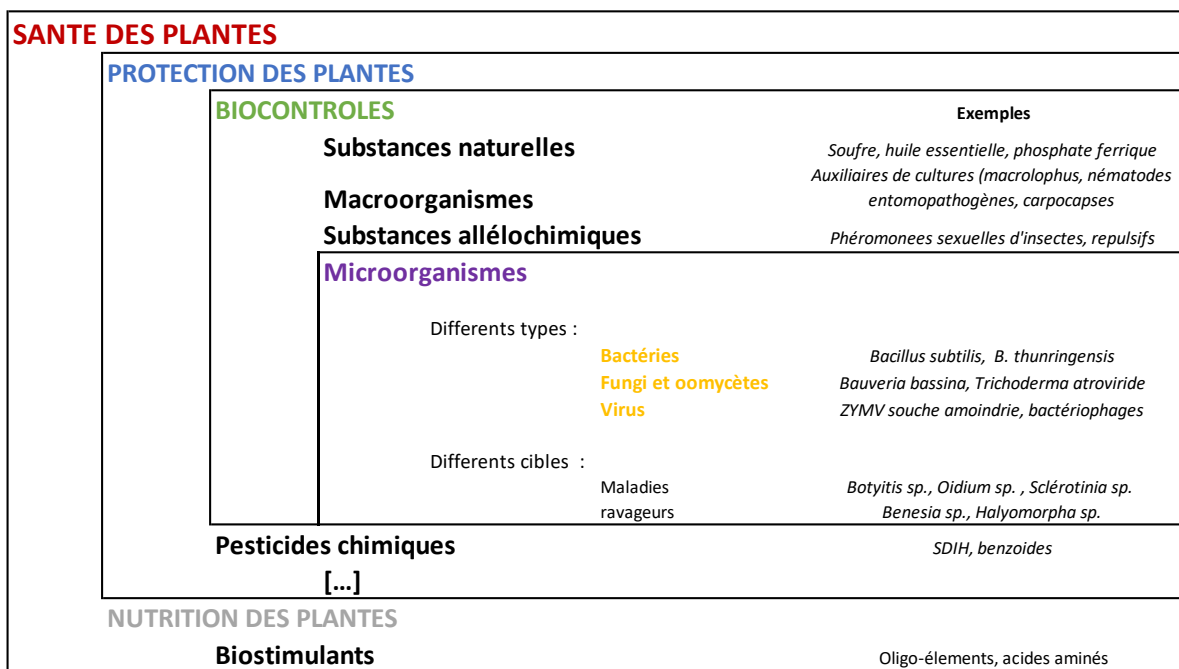


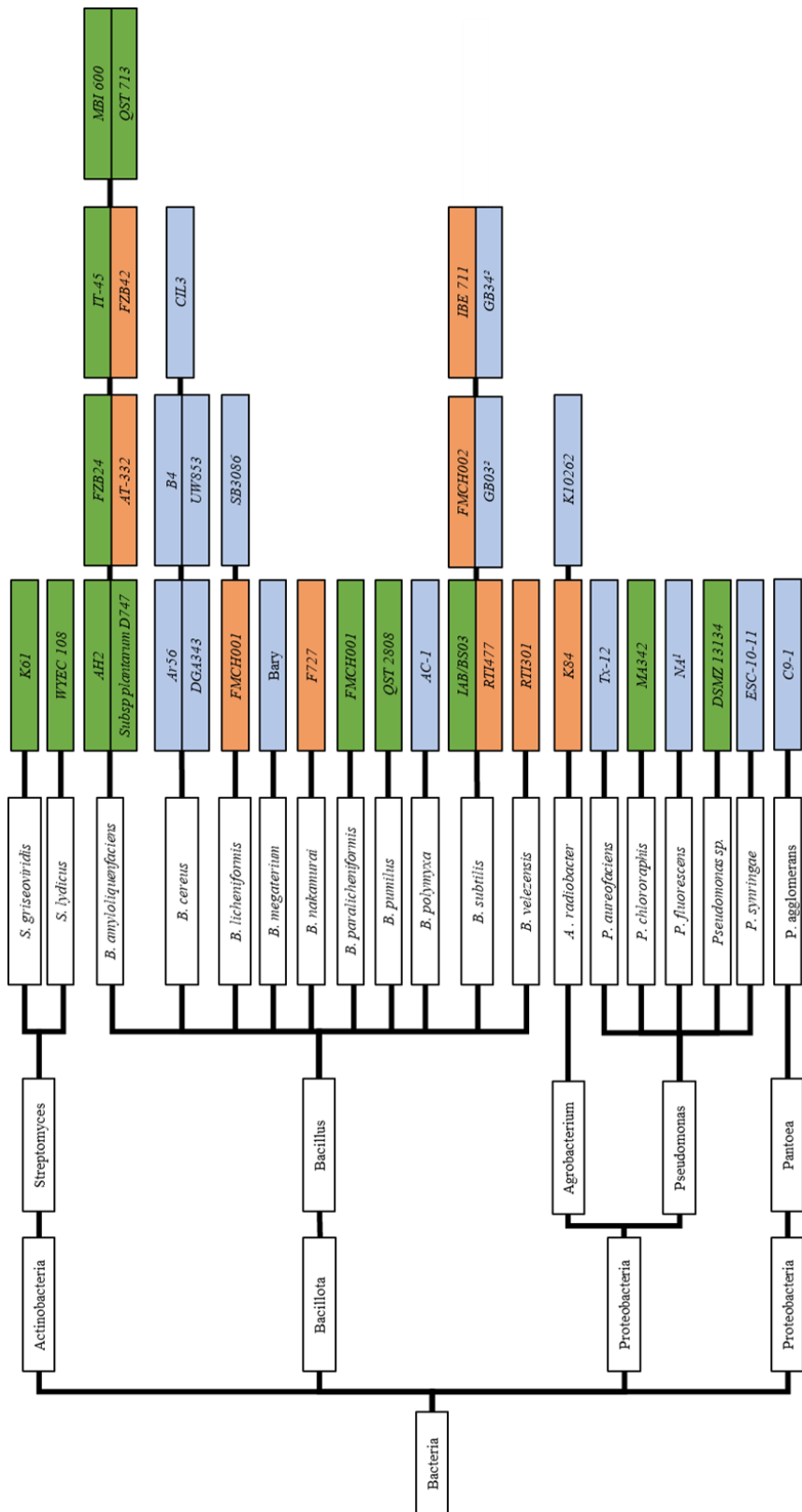
Figure 4 - Positionnement simplifié des agents de biocontrôle microbiens au sein de la santé des plantes

Les produits de biocontrôle microbiens sont des préparations dont la substance active peut contenir des microorganismes viables et/ou non viables, selon une définition proposée conjointement par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et l'Organisation mondiale de la Santé (FAO and OMS, 2021). Ils peuvent aussi contenir des métabolites sécrétés pendant la phase de production industrielle des micro-organismes, ainsi que des matières provenant du milieu de croissance. Dans la plupart des pays, leur commercialisation est réglementée par un processus d'enregistrement officiel, de la même manière que les pesticides chimiques de synthèse. Pour les pays membres de l'union européenne, leur réglementation est régie par le règlement CE n°1107/2009, entré en vigueur en juin 2011, qui s'applique à toute substance de synthèse ou naturelle qui détruit la cible ou qui agit sur les processus vitaux de la plante, à l'exception des engrais. La réglementation en vigueur passe d'abord par l'inscription du principe actif (micro-organisme viable ou non viable) au niveau européen (Helepciuc and Todor, 2022) puis par le dépôt d'une demande d'autorisation de mise sur le marché au niveau de chaque état membre de l'union européenne. Au niveau français, c'est l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) qui est chargée de donner un avis sur la mise sur le marché de ces produits phytopharmaceutiques.

Pour contextualiser la protection des cultures contre les maladies à l'aide d'agents de biocontrôle microbiens, plusieurs points doivent être abordés. Tout d'abord, nous présenterons l'offre de produits de biocontrôle contre les maladies des cultures maraîchères. Puis, leur mode d'action sera abordé, ainsi que leur niveau de protection. Enfin, leurs limites actuelles en agriculture seront présentées, particulièrement en maraîchage.

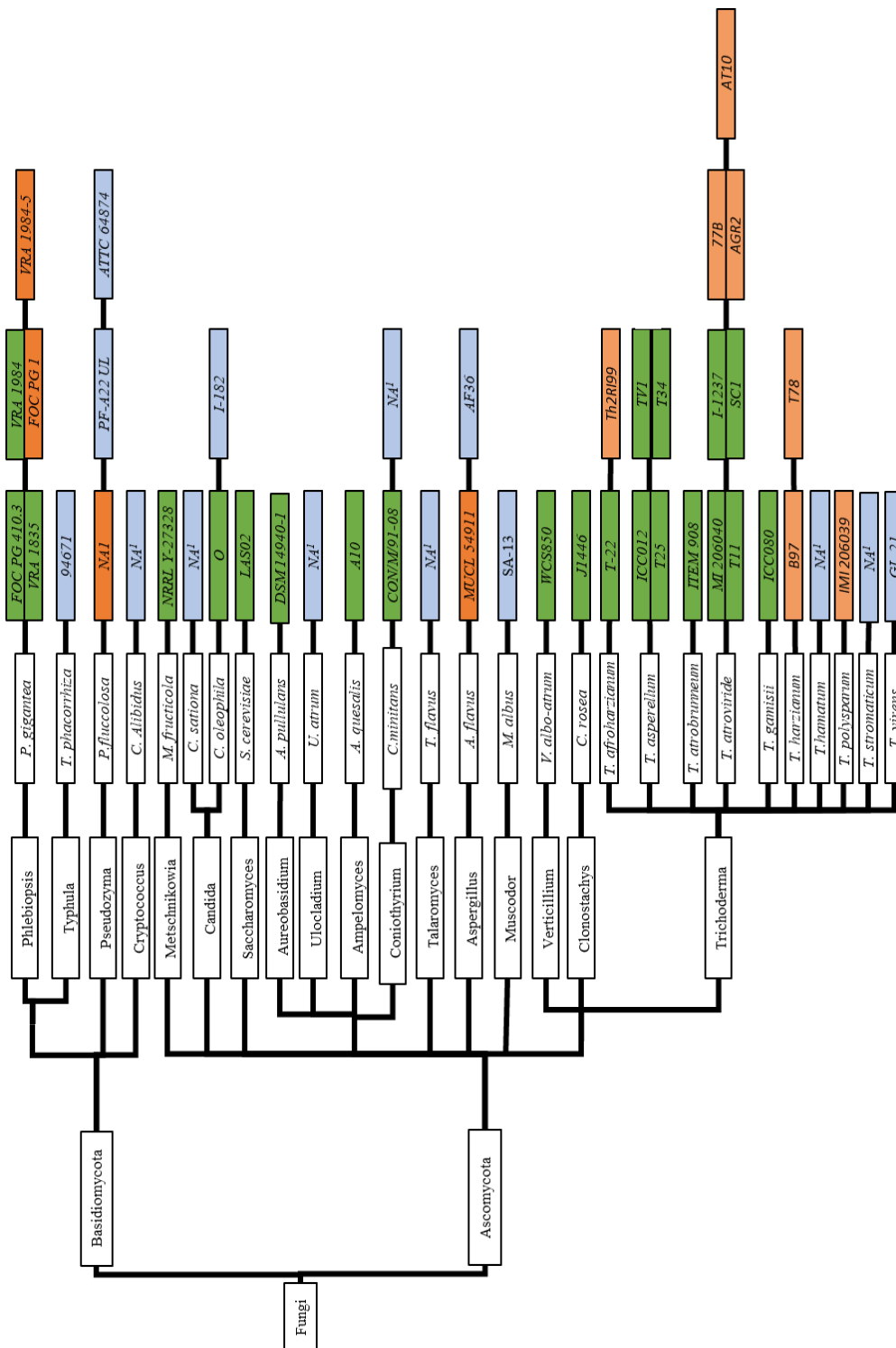
2.2 Le cadre scientifique, commercial et réglementaire des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes

Les agents de biocontrôle sont l'objet de recherches scientifiques qui ont abouti à une large gamme de produits aujourd'hui disponibles à travers le monde (Collinge et al., 2022). En 2023, il existe 32 substances actives à base de microorganismes bénéficiant d'une autorisation de mise sur le marché en France et 41 substances inscrites au niveau européen (<https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/active-substances>) pour la gestion des maladies des plantes avec une dizaine supplémentaire en cours d'évaluation pour les années suivantes. Du fait de situations réglementaires propres dans d'autres pays, le nombre de produits autorisés peut être différent. Par exemple aux USA, un nombre plus élevé de produits est autorisé, potentiellement en lien avec une réglementation plus souple (Frederiks and Wesseler, 2019). Cette souplesse se retrouve dans d'autres pays anglo-saxons (Ehlers et al., 2020) et également dans certains pays sud-américains (Cotes, 2011) où les procédures d'homologation sont plus rapides et plus simples que dans l'Union Européenne. Un panel des souches autorisées en Europe et des plus utilisées à travers le monde est présenté sur les Figures 5, 6 et 7. Ces figures sont issues de la compilation de diverses bases de données européennes (https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en) et mondiales (<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/bpdb/index.htm>).



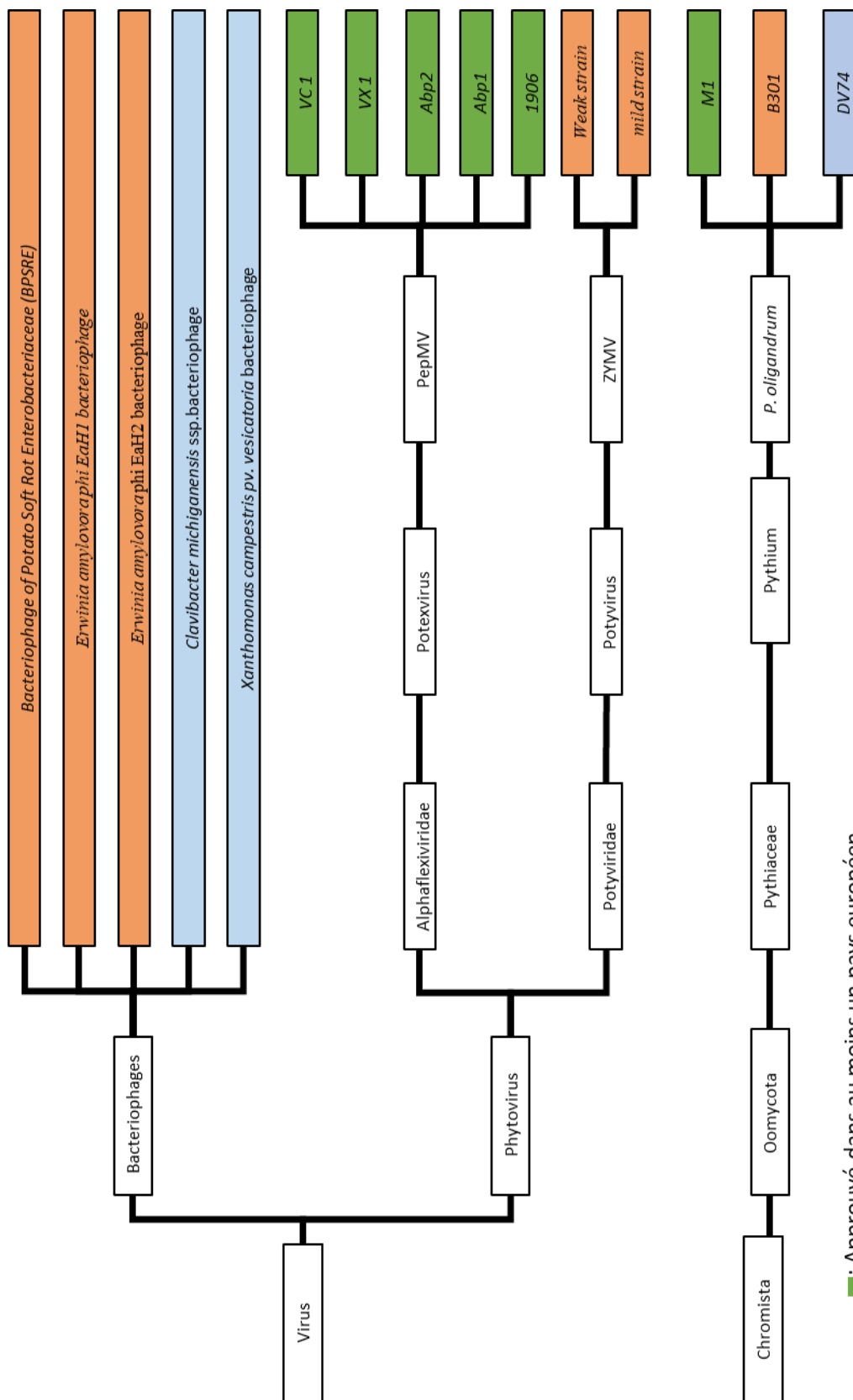
- : Approuvé dans au moins un pays européen
- : Listé dans la base de données européenne mais non approuvé en Europe
- : Exemple de agents de biocontrôle microbiens approuvé comme produit dans d'autres pays
- 1 : Pas de mention de souche pour l'autorisation

Figure 5 - Représentation des bactéries utilisées comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde



- : Approuvé dans au moins un pays européen
- : Listé dans la base de données européenne mais non approuvé en Europe
- : Exemple de agents de biocontrôle microbiens approuvé comme produit dans d'autres pays
- 1 : Pas de mention de souche pour l'autorisation

Figure 6 - Représentation des champignons utilisés comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde



- : Approuvé dans au moins un pays européen
- : Listé dans la base de données européenne mais non approuvé en Europe
- : Exemple de agents de biocontrôle microbiens approuvé comme produit dans d'autres pays
- 1 : Pas de mention de souche pour l'autorisation

Figure 7 - Représentation des Virus et oomycètes utilisés comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde

Parmi les substances actives à base de micro-organismes utilisées en Europe, la majorité sont des champignons (47) et oomycètes (3) et, de manière moins fréquente, des bactéries (37) et des virus (11). La répartition des micro-organismes sur lesquels sont basés les substances actives des produits montre une grande présence du genre *Trichoderma* avec 21 représentants répartis en 3 espèces majeures *atroviride*, *asperellum* et *afro-harzianum* et du genre *Bacillus* avec 19 substances actives principalement des espèces *amyloliquefaciens*, *subtilis* et *cereus*.

En France, la Direction générale de l'Alimentation (DGAL) définit les usages des produits phytosanitaires c'est-à-dire la combinaison d'une culture végétale (ou d'un ensemble de cultures), d'un mode d'application du produit et d'un agent phytopathogène cible (ou d'un groupe de cibles). Au total, 811 usages existent actuellement couvrant 35 groupements de cultures avec 205 agents ou groupes d'agents pathogènes causant des maladies. Les agents de biocontrôle microbiens ne couvrent que 104 usages sur 26 groupements de culture contre 108 agents pathogènes ou maladies. Cependant, le fait qu'un produit de biocontrôle soit autorisé sur plusieurs cultures végétales plutôt que sur une culture unique, permet aux solutions de biocontrôle d'être utilisables sur la majorité des cultures légumières. En effet, la réglementation française regroupe certaines cultures végétales entre elles. Par exemple, tous les produits de biocontrôle autorisés sur tomate le sont automatiquement sur aubergine car ces deux espèces végétales sont systématiquement associées dans le groupement de culture « Tomate-Aubergine ». La plupart de ces produits sont autorisés pour être appliqués sur les parties aériennes des plantes dans les champs ou après la récolte, mais plusieurs peuvent être utilisés pour le traitement des semences et quelques-uns sont autorisés pour le traitement du sol ou des substrats de cultures.

Les restrictions sur les pesticides chimiques ont stimulé l'augmentation de l'offre des alternatives comme les agents de biocontrôle (Aulagnier and Goulet, 2017 ; Donley, 2019). En France, par exemple, l'offre des produits de biocontrôle microbiens est partielle mais tend à augmenter d'année en année (Figure 8). Cependant, la couverture des cibles par les produits de biocontrôle reste en nombre limité, représentant environ la moitié des bioagresseurs, malgré la politique de regroupement pour les pathogènes ciblés.

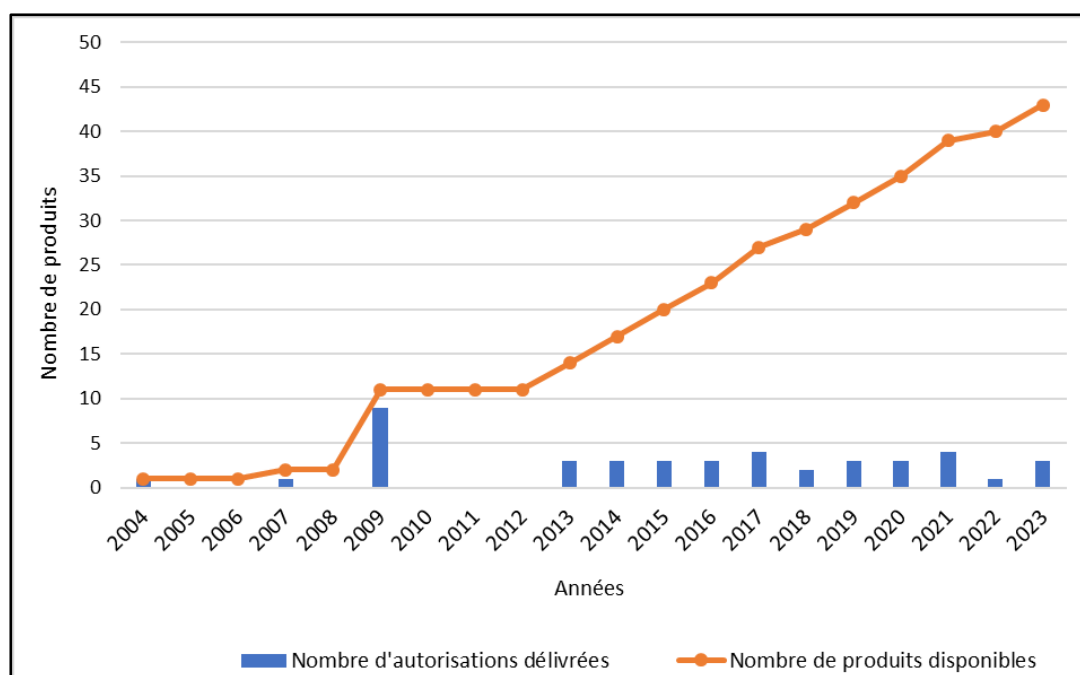


Figure 8 - Nombre de souches microbiennes approuvées en Europe et de produits bénéficiant d'une autorisation d'une mise sur le marché en France de 2004 à 2023

D'un point de vue économique, le marché des produits de biocontrôle est toujours en croissance, se hissant maintenant à près de 13 % du marché de la protection des plantes contre 8 % en 2018 (IBMA, 2023). Depuis 5 ans, le marché progresse d'environ 10% par an. La capitalisation s'estime à environ 278 M€ en 2022, soit une augmentation de 64% depuis 2018. Ces chiffres dissimulent une très grande variabilité du marché entre les différents types de biocontrôle. En effet, les substances naturelles (dont le soufre) représentent encore 71 % des ventes de produits de biocontrôle en France, progressant de 26 % par rapport aux micro-organismes et médiateurs chimiques qui stagnent depuis 2019 (Figure 9). Le marché est également dominé par les produits ciblant des insectes et mollusques, avec 38 et 29 % du marché total des agents de biocontrôle respectivement, ceux visant des champignons ne représentant que 13 %.

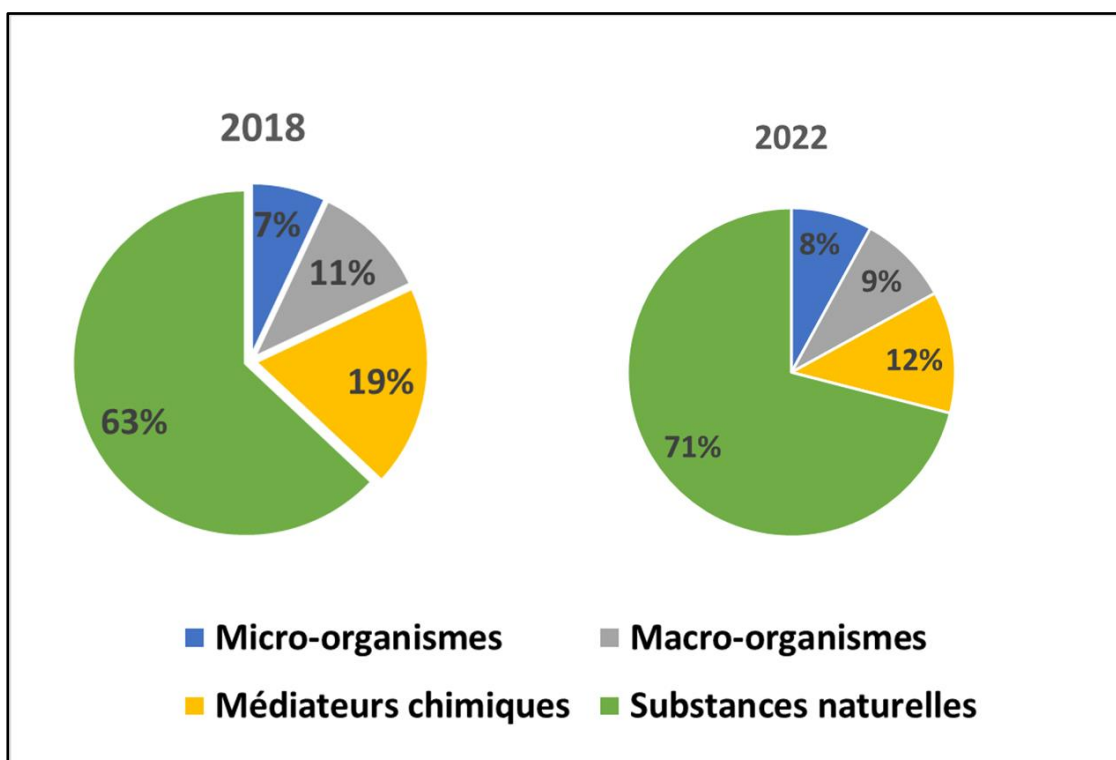


Figure 9 - Part de marché des différents types de produits de biocontrôle en 2018 et 2022

Les produits de biocontrôle utilisés pour le contrôle des maladies des plantes ne représentent que 19,5% de parts du marché des produits de biocontrôle. Le marché peut encore progresser puisqu'uniquelement 63 % des exploitations indiquent utiliser des agents de biocontrôle contre les ravageurs et les maladies des plantes (Hänggi, 2022). En maraîchage, 53 % des exploitations recourent à au moins un agent de biocontrôle quand elles sont en agriculture biologique (AB) et 33,3 % quand elles sont en agriculture conventionnelle (Eckert, 2023). Selon une enquête du CTIFL (Eckert, 2023), plus de 80 % des usages en maraîchage reposent sur seulement cinq substances actives d'agent de biocontrôle sur un total de onze recensées. Ces cinq substances actives sont le phosphate ferrique (33 % des usages), le soufre (21,7 %),

Bacillus thuringiensis (17,6%), l'huile essentielle d'orange douce (7,5 %), et *Coniothyrium minitans* (5,9 %). On remarque encore une fois le faible poids des micro-organismes contre les maladies dans la part de marché. En effet, seul *C. minitans* est utilisable contre une maladie, la pourriture blanche causée par *Sclerotinia sclerotiorum*.

2.3 Les modes d'action des agents de biocontrôle microbiens, leur principal atout

Il existe de nombreuses études détaillant les différents modes d'action des agents de biocontrôle microbiens (Köhl et al. 2019 ; Singh et al., 2020 ; De Silva et al., 2019, Aguilar-Veloz et al., 2020, Ab Rahman et al., 2018, Rao et al., 2019). Malgré des revues complètes sur le sujet, il est essentiel de revenir sur certains éléments majeurs de leurs mécanismes d'action. Il existe deux types de modes d'action principaux : direct ou indirect (Figure 10). Les modes d'action directs peuvent impliquer des composés antimicrobiens comme par exemple la fengycine produite par des bactéries du genre *Bacillus* (He et al., 2021) ou des composés de types esters produits par des champignons du genre *Aureobasidium* (Kang et al., 2022). Il s'agit alors d'une interaction entre un organisme (ici un agent pathogène) et les substances métaboliques produites par un autre (ici l'agent de biocontrôle). On nomme cette interaction l'antibiose. Les autres modes d'action directs regroupent la compétition pour l'espace et les nutriments (Boulahouat et al., 2023) et le parasitisme (Guzmán-Guzmán et al., 2023). Les agents de biocontrôle agissent aussi de manière indirecte par différents moyens souvent en parallèle des actions directes. Ces mécanismes d'action indirecte peuvent impliquer de l'induction de défenses chez la plante via différentes voies métaboliques. On peut citer les voies liées à l'acide jasmonique (Ebrahimi-Zarandi et al., 2022 ; Hase et al., 2008) et celles liées à l'éthylène (Dong et al., 2022). Il est à noter que souvent les agents de biocontrôle vont être capables d'utiliser une combinaison de ces mécanismes d'action. Les genres *Trichoderma* et *Bacillus* possèdent par exemple des modes d'action multiples notamment des réponses localisées ou systémiques de la plante, du parasitisme et de l'antibiose (Guzmán-Guzmán et al., 2023). Les études des mécanismes d'action des agents de biocontrôle microbiens soulignent leur complexité ainsi qu'une connaissance encore limitée des conditions de leur mobilisation par les micro-organismes appliqués en conditions de culture (Turc et al., 2022).

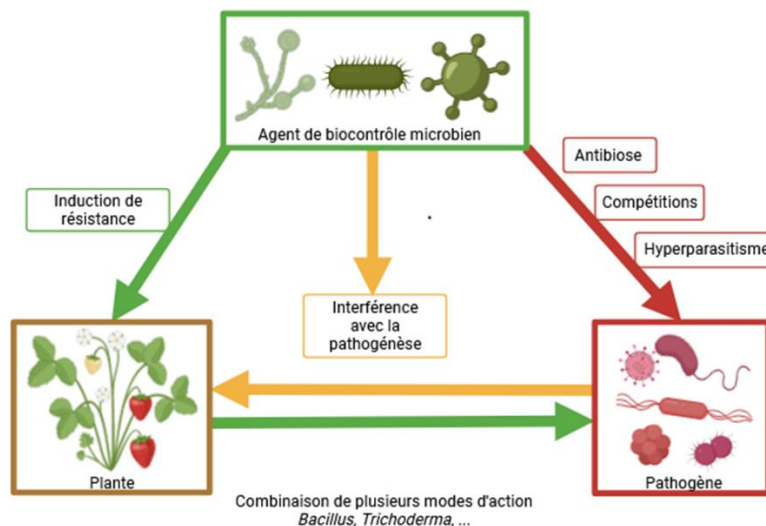


Figure 10 - Schéma des mécanismes d'action possibles des agents de biocontrôle microbiens

2.4 Le niveau de protection apporté par les agents de biocontrôle

2.4.1 Les notions d'efficacité

L'évaluation de l'efficacité des agents de biocontrôle sur le terrain se fait généralement par comparaison avec celle des pesticides chimiques et les agriculteurs s'attendent à ce qu'elle soit équivalente en termes de prévention et de réduction des symptômes (Marian and Shimizu, 2019). La notion d'efficacité d'un agent de biocontrôle est rattachée à sa capacité à réduire ou à éviter l'apparition de symptômes dommageables pour le rendement. Il y a une abondance d'articles scientifiques mettant en évidence une efficacité protectrice élevée des agents de biocontrôle quand les essais sont réalisés en conditions contrôlées, et un plus petit nombre d'articles mettant en évidence une protection efficace sur le terrain (Marian and Shimizu, 2019 ; Nicot et al., 2012 ; Ojiambo and Scherm, 2006). Différents facteurs peuvent influencer le niveau de protection apportée par les produits de biocontrôle sur le terrain, comme par exemple les facteurs climatiques, les facteurs liés aux pathogènes cibles et ceux liés aux pratiques culturales (Puopolo, 2022).

En maraîchage, l'efficacité de protection se mesure dans deux cas : l'agent pathogène réduit le rendement de production ou l'agent pathogène réduit le potentiel de commercialisation. Dans ces deux cas, l'efficacité de protection d'un traitement de biocontrôle est donc la différence entre deux situations, c'est-à-dire la situation où le traitement a eu lieu, et la situation où le traitement n'a pas été effectué. Or, le point de comparaison choisi est crucial pour caractériser l'efficacité. En effet, d'un point de vue expérimental, il convient de comparer l'efficacité à un témoin non traité pour connaître l'effet de protection par rapport à l'absence de traitement. D'un autre côté, d'un point de vue orienté terrain et utilisateur, cette mesure se fait plutôt par comparaison aux protections chimiques ou alternatives comme le cuivre et le soufre. De plus, l'efficacité de protection d'un traitement ne peut être comparée d'une situation à l'autre. Ainsi une protection contre des bioagresseurs différents n'est pas réellement comparable, encore moins sur des cultures différentes. Il est acceptable de perdre 1 salade sur 100 mais pas 1 pied de tomate sur 100. Par ailleurs, l'effet protecteur d'un traitement ponctuel ne peut pas être comparé à une méthode de protection qui recourt à des traitements multiples ou à un produit diffusé en

continu, tel qu'une lampe au soufre pour la lutte contre les oïdiums. Un traitement peut également avoir une forte efficacité à court terme mais nécessiter d'être répété plusieurs fois pour assurer une protection dans la durée. Enfin, c'est l'aspect de coût, souvent occulté par les études qui reste au centre des préoccupations des utilisateurs. Le coût de traitement s'évalue tant en liquidité (prix du produit, des fluides, coût horaire) qu'en charge mentale (adaptations de planning, formation, réflexion). Il convient aussi d'estimer le coût qui pourrait résulter d'une absence de traitement.

2.4.2 Les facteurs régissant l'efficacité protectrice

Les facteurs d'efficacité font référence aux facteurs qui peuvent survenir avant, pendant ou après l'application d'un produit au champ, et qui pourraient exercer une influence sur l'étendue de la protection qu'il fournit à la culture. Les facteurs d'efficacité touchent tous les aspects de l'efficacité d'un produit, c'est à dire la réduction de l'incidence de la maladie ciblée, l'évitement des dommages à la plante et la garantie de rendement de la culture. Les facteurs d'efficacité sont nombreux et souvent regroupés par thématiques sans qu'il y ait de consensus clair sur leurs noms et leur délimitation. On considère que les conditions environnementales rencontrées sur le terrain, les pratiques agricoles, l'écologie de l'agent phytopathogène ciblé incluant l'épidémiologie de la maladie qu'il provoque, ainsi que les propriétés biologiques ou biochimiques et la qualité de l'agent de biocontrôle sont parmi les principaux facteurs qui peuvent avoir un impact sur l'efficacité de la protection (Aguilar-Veloz et al., 2020 ; Bardin and Pugliese, 2020). L'étude détaillée des facteurs d'efficacité fait l'objet d'un développement spécifique dans le chapitre 2 de ce manuscrit. L'identification des facteurs clés d'efficacité et de leurs effets, seuls ou en interaction, est une étape essentielle pour assurer l'intégration des agents de biocontrôle dans des systèmes agricoles complexes et améliorer ainsi leur fiabilité. Par exemple, en appliquant le traitement à la température préconisée ou au bon stade de croissance on peut maximiser son efficacité et assurer la meilleure protection pour les cultures. Il faut également considérer l'effet négatif des facteurs d'efficacité : décider de ne pas traiter quand les conditions ne sont pas favorables permet d'éviter des pertes financières et en temps ce qui par ricochet augmente la rentabilité qui fait aussi partie de l'efficacité des agents de biocontrôle. Ainsi, il est clair que prendre en compte les facteurs d'efficacité est un moyen évident d'améliorer l'usage des agents de biocontrôle microbiens.

2.4.3 La limite : une protection souvent jugée trop faible par les utilisateurs

Malgré la promotion faite par les institutions publiques et le monde scientifique au sujet des agents de biocontrôle microbiens (Boro et al., 2022 ; Pertot et al., 2017) leur utilisation reste limitée dans le cadre de la protection contre les maladies des plantes. Certes, les agents de biocontrôle commercialisés au cours des dernières décennies ont montré des succès, mais il y a eu aussi des succès partiels ainsi que des échecs et un manque de viabilité économique. La perception des utilisateurs finaux quant à leur efficacité protectrice et leur capacité à remplacer les pesticides chimiques semble mitigée (Schaffner et al., 2021). La raison généralement citée est un manque de maîtrise des facteurs qui influencent l'efficacité, entraînant des résultats qui ne sont pas à la hauteur des attentes des utilisateurs (Lahlali et al., 2022). Face à cette situation il est donc nécessaire de se demander comment améliorer l'efficacité de l'utilisation des agents de biocontrôle microbiens. Une piste envisagée pour cette tâche pourrait être le développement d'un outil d'aide à la décision (OAD).

3. Comment un Outil d'Aide à la Décision peut-il aider l'utilisateur d'agents de biocontrôle microbiens ?

3.1 Définition et état de l'art des OAD en agriculture

Un OAD rassemble des techniques permettant à un utilisateur de choisir la ou les actions à mener parmi un éventail de possibilités. Les OAD, ou en anglais « Decision Support System » (DSS), sont utilisés dans tous les domaines où une décision raisonnée plus ou moins rapide est nécessaire impliquant des actions aux conséquences à court, moyen ou long terme (Schärlig, 1999). Il existe plusieurs types d'outil très différents tant dans leur conception que dans leurs objectifs ou leur utilisation. Selon Mir et al. (2015), on distingue généralement des OAD axés sur :

- la communication ; ils permettent à plusieurs personnes de travailler sur une même tâche de manière plus efficace et optimisée ;
- les documents ; ils utilisent des informations non structurées dans une variété de formats électroniques pour la manipulation, la recherche et l'extraction d'information ;
- les données ; ils mettent l'accent sur l'accès et la manipulation de données ;
- les modèles ; ils permettent d'accéder à des modèles sous-jacents et de les manipuler en utilisant les données et les paramètres fournis par les utilisateurs et les concepteurs. Il s'agit souvent d'une évolution d'un OAD axé sur les données ;
- les connaissances ; ils stockent des faits, des règles, des procédures et des structures à des fins de résolution de problèmes d'expertise via des règles de décision.

Ces trois derniers types d'OAD se sont rapidement déployés en agriculture, d'abord comme recueils de savoirs et de retours d'expériences puis rapidement comme guide pratique permettant d'améliorer les pratiques au-delà de l'expérience seule de l'utilisateur (Mir et al., 2015). C'est avec le développement de l'informatique et de la micro-électronique dans les années 1980 que « l'agriculture de précision » est apparue (Figure 1), servant de base pour les futurs OAD agricoles (Heuvel, 1996). Ainsi avec l'ère d'internet, les OAD ont émergé comme des nouveaux leviers pour soutenir les agriculteurs dans leurs pratiques, que ce soit pour l'assolement, la fertilisation, l'irrigation et bien sûr la protection des plantes (Zhai et al., 2020). Après une première période d'euphorie au début des années 2000, les OAD agricoles ont connu une phase de crise et beaucoup d'outils ont été abandonnés (Matthews et al., 2008). Les limites citées sont multiples, mais celle qui est considérée comme la plus importante est le fait que les OAD ont été considérés uniquement comme des « vecteurs à court terme de transfert de connaissances et non comme un moyen d'influencer les pratiques à long terme » (Matthews et al., 2008). Ainsi, une fois les connaissances acquises, l'utilisateur n'avait que peu d'intérêt à continuer d'utiliser l'outil. Les premiers OAD de l'ère du numérique n'ont pas réussi leur implantation durable au sein du monde agricole mais leur dynamique d'usage s'est enracinée (Matthews et al., 2008). Par exemple, des OAD servant à accompagner l'irrigation ont été commercialisés dans les années 2000 (Ara et al., 2021). Ces OAD proposaient des procédures de prise de décision associées aux prévisions météorologiques qui ont été

largement mise en place par les agriculteurs. Ces connaissances et ces pratiques ont perduré malgré la disparition des entreprises qui avaient initialement commercialisé les OAD (Ara et al., 2021). Après les périodes de développement puis de retrait de nombreux OAD, c'est l'avènement des téléphones mobiles dit « Smartphone » qui relance l'engouement pour ces outils d'aide à la décision. Associé à la connexion réseau permanente des utilisateurs, à l'internet des objets et à l'analyse de données à grande échelle, de nouvelles possibilités ont émergé sur des principes de bases plus anciens comme la construction de modèle prédictif (Rupnik et al., 2019). Ainsi ces outils de nouvelle génération promettent de guider l'utilisateur dans des pratiques vertueuses, en optimisant ses réflexions grâce à l'utilisation systématique d'outils d'analyse plus complexes souvent automatiques, en grande partie basés sur l'intelligence artificielle et l'accès à de grands jeux de données accessibles en ligne (Khan et al., 2022). On peut citer l'exemple de modèles prédictifs utilisant des modèles mathématiques de type bootstrap ou des modèles plus mécanistes basés sur des données validées en conditions contrôlées, puis modélisées et mises en pratique dans des situations commerciales (Rupnik et al., 2019 ; Shirsath et al., 2017).

L'utilisation d'OAD de nouvelle génération, connectés à internet a déjà fait ses preuves pour guider les agriculteurs dans le domaine de l'irrigation (Bonfante et al., 2019) et de la fertilisation (Savvas, 2021 ; Singh et al., 2022). Des OAD connectés ont également été développés pour prédire les risques d'infection des cultures par différents agents pathogènes. C'est le cas par exemple d'un OAD déployé en Italie pour prédire les risques de mildiou, d'oïdium et de pourriture grise sur vigne (Bregaglio et al., 2022). Certains OAD permettent également à l'agriculteur de positionner l'application de pesticides aux périodes de risque d'infection des cultures, grâce à la prise en compte de données météorologiques et épidémiologiques. C'est le cas par exemple d'outils développés pour optimiser la lutte chimique contre le mildiou de la pomme de terre en Russie et diverses maladies fongiques importantes du blé en Allemagne (Kuznetsova et al., 2021 ; Prah et al., 2022).

3.2 Application des OAD aux agents de biocontrôle microbiens

3.2.1 Les outils existants

Alors que des OAD sont disponibles depuis longtemps pour la gestion de la lutte biologique contre les ravageurs à l'aide d'arthropodes bénéfiques (Damos, 2015 ; Moerkens et al., 2021), il existe très peu d'OAD spécifiques aux agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes.

Le plus ancien, à ma connaissance, concerne l'utilisation d'un outil de prédiction météorologique et de conseils d'application pour un produit à base de *Trichoderma* contre la pourriture grise du concombre sous abri (Shtienberg and Elad, 1997). Cet outil, bien que novateur et intégrant des connaissances précises sur l'agent pathogène cible (*Botrytis cinerea*), ne prenait pas pleinement en compte l'influence des facteurs d'efficacité de l'agent de biocontrôle microbien mais conseillait de recourir à la lutte chimique dès que le risque épidémiologique était élevé.

Plus récemment, des modèles de prédiction des risques de pourriture grise sur vigne fondés sur les propriétés biologiques de *B. cinerea* (González-Domínguez et al. 2015) ont servi de base pour le développement d'OAD spécifiques à différents agents de biocontrôle microbiens. Ils permettent au viticulteur de choisir le meilleur moment pour appliquer un agent de biocontrôle selon la température et l'humidité relative de l'air, et le niveau d'infestation de la vigne (González-Domínguez et al. 2018). Aucun autre exemple n'a pu être identifié, malgré l'importance potentielle attribuée à ce type d'outil (Giles et al., 2017 ; Shtienberg, 2013).

3.2.2 Les éléments clés pour la conception d'un OAD

L'avenir des outils d'aide à la décision dans le domaine du biocontrôle est très prometteur. Une publication de Rossi et al, (2019) identifie « les clefs de réussite » pour qu'un tel outil puisse promouvoir et favoriser les alternatives aux pesticides.

Tout d'abord, un OAD ayant ces objectifs devra considérer l'utilisation d'un agent de biocontrôle dans une situation de protection intégrée. De plus, il est nécessaire de comprendre la totalité du contexte global (plante, agent de biocontrôle, pratiques culturales, environnement) pour utiliser au mieux un agent de biocontrôle. Pour favoriser son adoption, un OAD doit idéalement être coconstruit, étalonné et validé par ses futurs utilisateurs, garantissant ainsi sa fiabilité et son ancrage. De plus, il doit être ouvert et transparent, dans l'origine de ses données et la construction de ses modèles pour assurer sa véracité et son impartialité. Enfin, il doit être régulièrement mis à jour pour maintenir son efficacité. Pour finir l'outil doit être un soutien dans la prise de décision sans remplacer ni les conseillers, ni les agriculteurs, et apporter des avantages concrets à ses utilisateurs (Rossi et al., 2019).

4. Problématique de la thèse et annonce du plan

4.1 Généralités, genèse de la thèse

Face aux défis actuels liés à la sécurité alimentaire, à la résilience des cultures, à la préservation de la biodiversité et à la réduction de l'impact environnemental des pratiques agricoles, une question cruciale se pose : « Comment optimiser l'utilisation des produits de biocontrôle microbiens en agriculture maraîchère pour promouvoir une gestion durable des agents pathogènes tout en garantissant les rendements et la qualité de la production ? ». L'hypothèse de travail de la thèse présentée ici est qu'une réponse possible à cette question est le développement d'outils d'aide à la décision. Le cheminement de la thèse a été de mettre en place les éléments nécessaires à la création d'un tel outil. Cette démarche s'inscrit dans une stratégie globale du laboratoire où la thèse s'est déroulée, l'équipe d'accueil travaillant depuis plus de 30 ans sur la protection des plantes à l'aide d'agents de biocontrôle microbiens, que ce soit dans le développement de nouveaux agents, dans l'étude et l'amélioration des agents actuels ou encore par des réflexions sur les limites et les freins actuels à l'utilisation de la lutte biologique.

Cette problématique centrale nécessite une approche multidisciplinaire, intégrant des considérations biologiques, écologiques, agronomiques et socio-économiques, afin de développer une solution innovante et pratique pour l'agriculture de demain. Ainsi dans l'encadrement de la thèse, l'Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière (APREL) permet d'ancrer la démarche au plus près du terrain et de tenir compte du point de vue du monde agricole. L'unité Pathologie végétale apporte l'expertise et les connaissances sur les agents de biocontrôle et particulièrement les facteurs d'efficacité. Enfin, l'unité Ecodéveloppement promeut une approche plus globale, à la fois agronomique et socio-économique de la thèse.

Cette thèse vise à apporter des réponses substantielles en explorant les multiples facettes de l'utilisation des produits de biocontrôle microbiens en maraîchage, tout en identifiant les opportunités et les défis qui se posent dans la quête d'une agriculture plus durable et résiliente. Sa présentation est structurée à partir d'articles publiés ou en cours de publication, comme détaillé dans les paragraphes suivants.

4.2 Enquête de terrain auprès des utilisateurs du biocontrôle microbien

Les pratiques culturales spécifiques pour ce type de biocontrôle sont encore peu documentées, notamment en maraîchage. Le but de cette étude est d'établir ce dont les utilisateurs ont besoin pour utiliser davantage les agents de biocontrôle microbiens et identifier ce qu'un OAD devra intégrer pour satisfaire ces besoins. A cette fin, une enquête de terrain a été réalisée sur une population de conseillers agricoles et d'agriculteurs travaillant en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique pour identifier les utilisations les plus fréquentes, les motivations des acteurs de la filière, ainsi que les avantages et les défauts perçus lors de l'utilisation des agents de biocontrôle microbiens. Des informations ont également été recueillies auprès des participants sur leurs besoins/priorités en termes d'utilisation pratique des agents de biocontrôle contre les maladies et sur leur intérêt pour le développement d'un OAD qui leur permettrait d'optimiser l'utilisation d'agents de biocontrôle. L'article de cette étude, soumis à la revue *Crop Protection*, est présenté dans le premier chapitre de la thèse.

4.3 Etude des facteurs d'efficacité dans la littérature scientifique

Les objectifs de cette partie sont (i) de répertorier les principaux facteurs biologiques, physiques et agronomiques qui peuvent influencer l'efficacité des agents de biocontrôle microbiens après leur application sur une culture et (ii) à partir d'une étude la plus exhaustive possible de la littérature scientifique, de centraliser dans une base de données toutes les informations disponibles à ce sujet. Dans le cadre d'accords de confidentialité passés avec certaines firmes, des données provenant d'essais réalisés par ces firmes ont été ajoutés à la base de données. Ce travail fait l'objet d'un article invité à soumettre à la revue *Crop Protection*.

4.4 L'expérimentation pour approfondir la connaissance des facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle

Le but de ce chapitre est de produire des données sur les facteurs d'efficacité d'un agent de biocontrôle et d'évaluer l'intérêt des données produites pour créer des règles de décisions. A cette fin, une expérimentation en tunnel non chauffé a été menée avec l'agent de biocontrôle *Ampelomyces quisqualis*, hyperparasite des oïdiums, pour déterminer l'impact de facteurs microclimatiques (température et humidité relative de l'air) sur l'efficacité de la protection de la tomate contre *Oidium neolycopersici*.

4.5 Prototype d'un outil d'aide à la décision : DeciControl

Enfin, dans une dernière partie, les étapes de création d'un prototype d'outil d'aide à la décision ont été retranscrites. La mise en place de ce prototype, les premiers résultats, les retours d'expériences et les perspectives de son développement sont abordés et discutés dans cette partie.

Table des figures pour l'Introduction

Figure 1 - Synthèse des avancées en protection des plantes à travers l'histoire.....	14
Figure 2 - Affiche de promotion des pesticides : Insecticide USA	16
Figure 3 - Affiche de promotion de Vermorel anti-mildiou France 1930.....	16
Figure 4 - Positionnement simplifié des agents de biocontrôle microbien au sein de la santé des plantes	20
Figure 5 - Représentation des bactéries utilisées comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde.....	22
Figure 6 - Représentation des champignons utilisés comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde.....	23
Figure 7 - Représentation des Virus et oomycètes utilisés comme agents de biocontrôle contre les maladies des plantes en Europe et dans le monde.....	24
Figure 8 - Nombre de souches microbiennes approuvées en Europe et de produits bénéficiant d'une autorisation d'une mise sur le marché en France de 2004 à 2023	26
Figure 9 - Part de marché des différents types de produits de biocontrôle en 2018 et 2022	26
Figure 10 - Schéma des mécanismes d'action possibles des agents de biocontrôle microbiens.....	28

CHAPITRE 1 - Enquête de terrain auprès des utilisateurs du biocontrôle microbien

1. Présentation du premier article

Ce premier article retranscrit la construction et les résultats de l'enquête menée dans le cadre de la thèse pour connaître les pratiques d'utilisation des agents de biocontrôle microbiens en maraîchage dans le Sud-Est d'un point de vue des utilisateurs (agriculteurs et conseillers). Il a été auditionné par la Déléguée Informatique et Libertés (DIL) de INRAE et inscrit au registre le 14/0/4/2020 comme conforme à la réglementation INRAE concernant Règlement général sur la protection des données RGPD. L'enquête a été réalisée en 2 étapes : un questionnaire en ligne (disponible en archive [ici](#)) puis un entretien face à face sur le lieu de travail. Plus de 90h d'entretiens enregistrés sont conservées dans le cadre d'utilisation de la recherche uniquement. Les résultats de ce travail furent très importants pour la suite de nos recherches puisque représentant les points de vue et les besoins du terrain. Cette partie de la thèse a été grandement impactée par la pandémie de Covid-19 et les confinements successifs, mais malgré tout, elle a été menée à son terme. Ce travail a été valorisé par deux publications dans des revues techniques, la publication d'un chapitre d'ouvrage et la soumission d'un article pour publication dans la revue Crop Protection.

2. Résumé en français

Les produits de biocontrôle microbiens sont de plus en plus disponibles en tant que solutions alternatives à la lutte chimique pour la gestion des maladies en maraîchage. Cependant, leur utilisation est encore limitée. Une étude a été menée pour analyser cette situation et identifier les besoins et les limites rencontrés par les utilisateurs d'agents de biocontrôle, dans le but de proposer des pistes d'amélioration. Une enquête a donc été menée auprès de maraîchers et de conseillers agricoles français. Dans un premier temps, des questionnaires en ligne ont été diffusés à plus de 500 professionnels, avec des questions sur leur utilisation des produits de biocontrôle, les maladies ciblées et l'efficacité perçue. Dans un second temps, des entretiens en face à face ont été réalisés avec 42 des 217 répondants, afin d'obtenir des informations techniques approfondies sur les succès et les difficultés rencontrés par les utilisateurs dans la mise en œuvre du biocontrôle. Les réponses aux questionnaires en ligne ont montré que seuls quelques produits de biocontrôle étaient connus et utilisés et que leur efficacité était perçue comme faible par les utilisateurs. Ce diagnostic a été confirmé par les entretiens en face à face. Si les utilisateurs se sont

montrés conscients des avantages de l'application de produits de biocontrôle pour lutter contre les maladies des plantes, ils ont également indiqué que l'instabilité de leur efficacité, ainsi que les difficultés liées à l'utilisation du biocontrôle parallèlement à d'autres pratiques culturales, suscitaient un intérêt discutable. Plus de 85 % des utilisateurs ont exprimé le besoin de repères techniques supplémentaires sur l'efficacité des produits de biocontrôle commercialisés et de lignes directrices pratiques aidant à choisir les produits les plus adéquats pour des situations spécifiques et à obtenir des informations sur la manière la plus efficace d'utiliser les solutions de biocontrôle. Des propositions sont faites pour répondre aux besoins des utilisateurs et favoriser une utilisation plus large des agents microbiens de biocontrôle dans les cultures légumières.

Mots-clés : Agent de lutte biologique ; Facteur d'efficacité ; Motivation ; Pratiques agricoles

3. Article

Using microbial biocontrol for disease control in French vegetable production: an analysis of the perspectives of farmers and farm advisors

Thomas Pressecq^{1,2,3}, Philippe C. Nicot¹, Jean François Bourgeay¹, Aurélie Rousselin³, Claire Goillon³, Marc Bardin¹ and Marc Tchamitchian²

1: INRAE, Pathologie Végétale, 84140, Montfavet, France

thomas.pressecq@inrae.fr, philippe.nicot@inrae.fr, jean-françois.bourgeay@inrae.fr and marc.bardin@inrae.fr

2: INRAE, Pathologie Végétale, 84140, Montfavet, France

marc.tchamitchian@inrae.fr

3 : Association Provençale de Recherche & d'Expérimentation Légumière – APREL, 13210, Saint-Rémy-de-Provence, France

Rousselin@aprel.fr and Goillon@aprel.fr

ABSTRACT

Microbial biocontrol products are increasingly available as alternative solutions to chemical control for the management of vegetable diseases. However, their use is still limited. A study was carried out to analyse this situation and identify the needs and limits encountered by users of biocontrol agents, with the goal of suggesting potential ways of improvement. A survey of French vegetable farmers and farm advisors was therefore conducted. First, online questionnaires were disseminated to more than 500 professionals, with queries on their use of biocontrol products, targeted diseases, and perceived efficacy. In a second step, face-to-face interviews were performed with 42 of the 217 respondents, to obtain in-depth technical information about successes and difficulties encountered by users in the implementation of biocontrol. The answers to the online questionnaires highlighted that only few biocontrol products were known and used, and their efficacy was perceived as low by users. This diagnosis was confirmed by the face-to-face interviews. While users showed awareness of the benefits of applying biocontrol products to manage plant diseases, they also reported that unstable efficacy, together with difficulties in using biocontrol along with other cultural practices, resulted in questionable interest. More than 85 % of the users expressed the need for additional technical benchmarks on the efficacy of marketed biocontrol products and for practical guidelines helping to choose the most adequate products for specific situations and to obtain information about the most efficient way to use biocontrol solution. Propositions are made to address the needs of users and to foster a wider use of microbial biocontrol agents in vegetable crops.

Keywords: Biological control agent; Efficacy factor; Motivation; Farming practices

INTRODUCTION

With an increasing global world population, plant protection remains crucial for food production. Meanwhile, fewer and fewer chemical pesticides are authorized for use in vegetable production because of public health and environmental concerns in many countries (FAO and OMS, 2021; Lamichhane et al., 2016). Alternatives to chemical control are increasingly implemented in integrated pest management strategies (IPM), including biocontrol and measures such as prophylaxis, crop rotation and the use of resistant varieties. Among biocontrol solutions, those based on microbial biocontrol agents are considered highly promising for disease management and could become a pillar of IPM systems (Collinge et al., 2022; Syed Ab Rahman et al., 2018; Tripathi et al., 2020). Although biocontrol solutions have been regarded as insufficiently available to cover the needs of farmers (Lamichhane et al., 2017), they are becoming increasingly accessible (Fauvergue et al., 2022; IBMA, 2022a), and incentives have been put in place in many countries to foster their development and their adoption by farmers (Rani et al. 2021). At the time of submission of this paper, 41 microbial agents known for their effect against microbial plant pathogens were listed as approved active substances (as individual strains or mixtures of strains) in the EU Pesticides database (<http://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/>, consulted 30 June 2023) and could be registered as commercial products in member states of the European Union. Among those microbial biocontrol agents, 32 have been formulated as a product and commercialized for use on vegetable crops in France (<https://ephy.anses.fr/>, consulted 30 June 2023).

However, it cannot be assumed that the availability of products necessarily translates into large use of such biocontrol solutions by farmers. It was reported recently that many countries lag behind in the implementation of microbial biocontrol agents, with a possible lack of confidence of farmers in the effectiveness of those solutions (Marian and Shimizu, 2019). Market research and knowledge on the rationale for farmers to use biocontrol products are considered as key to fostering successful implementation and to guiding local governments to design more efficient inciting strategies (Moser et al., 2008). Questions on drivers and constraints to the adoption of IPM strategies have been increasingly addressed from various points of view (Lamichhane et al., 2015; Lefebvre et al., 2015; Lamichhane et al., 2016; Creissen et al., 2019; Deguine et al., 2021, Creissen et al., 2021). In contrast, issues focused on disease-targeting biocontrol agents have remained largely under-documented, although disease management has long been considered as a weak link for IPM in a number of crops (Nicot and Bardin, 2012; van Lenteren and Nicot, 2020). One study including disease-targeting biocontrol products was conducted in three countries in 2004 (in Trentino province, Italy), 2006 (in the Sharon plain, Israel) and 2007 (in North Rhine-Westphalia state, Germany) to analyse the attitudes of farmers towards the use of biocontrol agents in IPM strawberry production. However, the quantitative survey conducted in the study showed that the most known biocontrol agents (predators, pheromones and nematodes in Italy and Germany; predators and bioinsecticides in Israel) were all targeting invertebrate pests (Moser et al., 2008). In all three regions, a large majority of growers placed confidence in these biocontrol agents, although they were widely considered to be more sensitive to weather conditions than chemical control

and to have slower and weaker effects. However, it was not specified if these reported viewpoints also pertained to biocontrol agents targeting strawberry diseases, nor to what extent available products were deployed by farmers for disease management. Furthermore, it cannot be assumed that the attitudes of farmers would have been similar in other regions nor that they would have remained unchanged until today.

More recently, surveys have also been conducted by the biocontrol industry. For example, a large survey was carried out in France in 2018 for the International Biocontrol Manufacturers Association (IBMA) to gather opinions and expectations of farmers for biocontrol on different types of crops. A publicly available presentation of this study showed that biocontrol use varied widely depending on the crops, amounting to 84 %, 65 %, 57 % and 43 % of respondents of the survey, respectively, for vegetables, fruits, grapevine and arable crops (Momus, 2019). Perceived advantages and shortcomings of biocontrol use were also reported. However, no specific information was presented on the attitudes of farmers towards the use of biocontrol for disease management. As vegetable farmers have long relied on biocontrol for the management of invertebrate pests but not for that of diseases (van Lenteren and Nicot, 2020), they may have distinct perspectives on the use of biocontrol against plant pathogens. The present study was conducted to characterize this use and the attitudes of farmers and farm advisors towards the implementation of microbial biocontrol solutions against diseases. For this, a survey was designed to (1) identify possible specificities in the profiles of biocontrol users, (2) characterize the extent and context of use of available products, including the rationale of users, and (3) characterize the perception of users on the efficacy of the products.

MATERIALS AND METHODS

To collect the points of view of users, the survey was designed as a two-step approach, implementing elicitation techniques as a means of getting more relevant information. The first step consisted of an online questionnaire targeting a wide audience of users, to get a broad picture of the situation. The second step consisted of face-to-face interviews focused on a smaller group of users, to obtain more precise information on the same topics as recommended by DeFranzo (2014). This mixed method is considered to be more efficient because it provides complementary results for the same issues (Harris and Brown, 2010).

The survey was focused on farmers, because they are the end-users of the biocontrol solutions, and on farm advisors, because of their prescriptive role on plant control methods, and because of the broad perspective they acquire while providing counsel in multiple farms. Both farmers and farm advisors will be referred to as “users” in this study.

Online questionnaire

To foster a large rate of response, the online questionnaire was designed to take into account published suggestions concerning the time needed to respond and the complexity of questions (Bogen, 1996; Gideon, 2012). The questionnaire was limited to eight questions, which could be answered in less than

five minutes. To avoid any ambiguity on the scientific purpose of the survey, the context of the study was briefly described in the opening of the questionnaire, and it was specified that no commercial interests were involved.

The questionnaire was created using Google Form software, because of its accessibility on smartphones and its ergonomic appearance for farmers and advisors. All the process of creation and dissemination was carried out in accordance with the French and European laws for personal data collection and use (CNIL, 2023).

The questions were organized in four sections (Figure 1). The first section included filter questions, with two purposes. One purpose was to facilitate the experience of the respondents by guiding them through the shortest possible path of questions specifically adapted to their situation. The other purpose was to focus on respondents with actual previous experience with microbial biocontrol against diseases. The second section focused on context information, including the age of the users and the location of their activity. For farmers specifically, the surface of the farm and its type of production system were also asked to determine if they were in organic or conventional production and if they produced in heated greenhouses, plastic tunnels, or open fields. To elaborate the profiles of farm advisors, they were asked to indicate the type of employing institution (publicly or privately funded) and the numbers of farmers they advised. The third section aimed at characterizing which biocontrol products were used, on what crops and against which diseases. In the fourth section, the respondents were invited to provide an overall rating (on a scale from 0 to 3) about their perception of microbial biocontrol efficacy.

Finally, a closing page thanked the respondents and informed them that they may eventually be contacted later for a face-to-face interview.

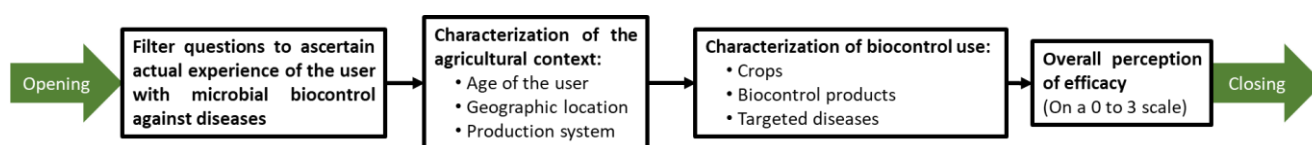


Figure 1 - Structure of the online questionnaire (each box represents a section)

The questionnaire was widely disseminated between May and September 2020 through the national network “DEPHY” (Lapierre, 2018), which gathers farmers and farm advisors in the framework of the French National Action Plan “Ecophyto” established in compliance with article 4 of the EU directive 2009/128/EC (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0128>) (Lamichhane et al., 2019). In addition, the questionnaire was disseminated to potential respondents in the South of France, through the Provençal Association of Research and Experimentation on Vegetable crops (APREL). In total, it was estimated that the questionnaire reached more than 500 professionals. The responses to the questionnaire were compiled and analysed to compare the agricultural context of the respondents with that of the average French vegetable farmers and advisors, documented through published data (Agence Bio, 2022). Comparisons were made on the age of the users, their geographic location, and their production system (organic or conventional, heated, or unheated greenhouse or unprotected crop, etc.). To characterize biocontrol use, statistics were compiled on which products were applied on which crops and against which diseases. The data on the perception of biocontrol efficacy were assembled as a frequency distribution for each class of the rating scale. Finally, all these results were

exploited to select users for in-depth face-to-face interviews and to construct the interview guideline.

In-depth face-to-face interviews

The interview guideline was built on a semi-directive structure to promote the experience-based knowledge elicitation of the respondents. This construction is considered to be the most appropriate to encourage interviewees to express their opinions and describe their practices with their own words, in a non-judgmental environment (Edwards and Holland, 2013; Keller and Conradin, 2019; Kuehne, 2016).

The guideline structure (Figure 2) started with a presentation of the survey and its objectives. Then, priming questions on the agricultural context of the respondent (e.g., crops, surface, type of production, advising strategy) were addressed to establish a relaxed atmosphere before discussing specific questions on plant protection issues and implementation of biocontrol.

The first specific questions were adapted to each interviewee according to their previous answers to the online questionnaire. They addressed the occurrence of diseases and the products used for their control. Then, a series of 6 issues were raised to characterize biocontrol use and the perception of its efficacy, and finally to prompt the interviewees to express their views on elements that could foster biocontrol use (Figure 2). To compare perceptions of efficacy nonparametric test, Kruskal-Wallis’s test was used to compare mean between farmers and farm advisors.

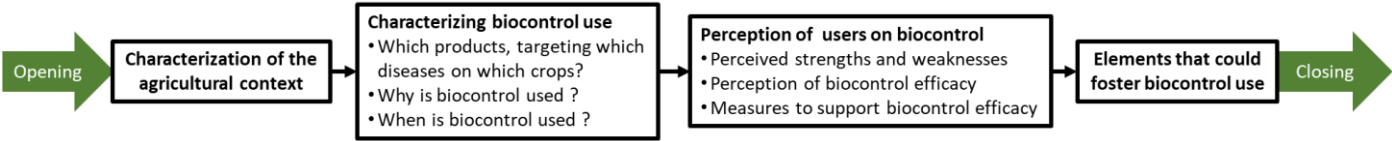


Figure 2 - Structure of the interview guideline

A single interviewer conducted the face-to-face interviews to avoid possible biases mentioned in the literature (Eisinga et al., 2012). To secure the quality of the data and foster reactivity during the interviews, all exchanges were recorded (with permission of the interviewees) and they were transcribed and anonymized afterwards. No written notes were taken during the interviews. They were performed between September 2020 and June 2021.

Analysis of interview data

The first step consisted in coding and organizing the transcribed text from the 30-to-120-minute interview recordings, based on a data-driven and structural-coding approach recommended by DeCuir-Gunby et al. (2011). For this, the information was summarized into tags, each representing a chunk of data on a specific issue. For example, various answers conveying doubts on the efficacy of biocontrol solutions were pooled together into a tag labelled “doubt on efficacy”. The list of the tags used in the analysis is presented in Table 1. Analyses were based on tag frequency calculation for every issue (Goldsmith 2021).

Table 1 - Tags used for the analysis of interview data and frequencies of citation among respondents.

Topics	Questions	Tags	Frequency of citation among respondents (%)	
			Farmers	Advisors
Characterization of biocontrol use	Why	Previous experience with biocontrol against insect pests	90.0	90.1
		Consumer concerns (and new market opportunities)	70.0	9.1
		Regulatory restrictions (Ban of pesticides)	65.0	86.4
		Environmental concerns	60.0	13.6
		Health concerns	50.0	0.0
	When	Preventive	90.0	95.5
	Curative	25.0	13.6	
	Last chance	20.0	4.5	
Perception of users on biocontrol	Strengths	Good supply chain	75.0	63.6
		Reduced restricted-entry period	65.0	45.4
	Weaknesses	Interference with other practices (treatments, work schedules, ...)	45.2	0.0
		Short expiration date and shelf life	26.2	0.0
		Price and costs	25.0	45.5
		Clogging of nozzles of irrigation system	16.7	0.0
	Efficacy	Low, not sufficient	80.0	81.8
		Unpredictable	65.0	54.5
		Difficult to evaluate	80.0	59.1
		Doubts on viability of biocontrol agent	0.0	19.0
Lack of efficacy benchmarks		45.0	86.3	
Way to improve efficacy	Combination with other practices	25.0	36.4	
	Adjuvants	15.0	18.2	
	Take environmental factors into account	15.0	27.8	
Elements that could foster biocontrol use	Needs	Guidelines for deployment	85.0	86.4
		More efficacy benchmarks	95.0	95.5
		List of available products	50.0	62.6
		More information about efficacy factors	35.0	31.8

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of the agricultural context of biocontrol users

The online questionnaire gathered 217 responses from farmers and advisors. Among these participants, 160 indicated applying microbial biocontrol products against plants diseases on their crops or providing guidance for their use. The 57 other respondents, who did not use biological control against diseases, were mostly in arable crop production (44 respondents), but also in production of vegetables (7), perennial fruits (4) and grape vine (2). The users of microbial biocontrol were predominantly in vegetable production (69 users, including 40 farm advisors and 29 farmers). Responses were also obtained from users in grape vine production (43), and in the production of perennial fruit crops (42 users) and arable crops (6 users). The analysis reported here will be based on responses concerning vegetable crops, the focus of the present study. A great majority of the 69 respondents using microbial biocontrol on vegetable crops (84.1 %) was located in Provence, one of the key vegetable production areas of France. Among those, 20 vegetable farmers and 22 advisors were chosen to participate in face-to-face interviews for the second step of the survey.

Profiles of farmers

According to the responses to online questionnaires, the vegetable farmers using biocontrol against plant diseases were younger than the average French farmer (46.7 vs 51.4 years old) (Agreste, 2022; MSA, 2017), a situation that is compatible with the hypothesis that biocontrol use, like innovation adoption, may be more attractive to younger farmers (Pineau et al., 2015). Nearly half of them (51.7 %) were in organic production systems, a proportion that strongly contrasted with published information about organic farmers at national (13.4 %; Agence Bio 2022) and regional levels (24.8 % in the Provence-Alpes-Côte d'Azur region; DRAF 2022).

A large majority of the vegetable farmers (93.1 %) grew crops in protected conditions (with possibly some additional outdoor crops). Unheated and heated greenhouses were present in 69.0 % and 48.8 % of the farms, respectively. The farm area ranged from 0.3 to 20 ha, with an average size of 8.2 ± 6.1 ha (standard error), a median size of 6.0 ha and 1st and last deciles of 2.0 and 15.2 ha, respectively. The vegetables most produced were tomato (65.6 % of the respondents), salads (48.3 %), zucchini (31.0 %), strawberry (27.9 %) and cucumber (20.6 %). While a majority of the respondents grew several crops, 41.4 % of them had monocropping systems (mostly tomato or strawberry, in soilless condition).

Profiles of farm advisors

From the answers to online questionnaires, the advisors were 42.9 years old on average and 86.4 % of them operated in the southeast of France. They counselled an average of 14.7 ± 4.1 farmers on 6.6 ± 2.3 different crops. Most of them (83.5 %) counselled both organic and conventional farmers, mostly on the same major crops (tomato, salads, zucchini, and strawberry). The vast majority of advisors (77.3 %) belonged to public extension services (Chambers of agriculture or farmers' associations), and some are linked to the DEPHY network that gathers French farmers and farm advisors committed to reducing pesticide use and favour the adoption of biocontrol solutions, which might have encouraged them to

answer the survey.

Characterization of microbial biocontrol use for disease management.

Which products targeting which diseases on which crops?

Among the 32 microbial biocontrol products authorized in France for disease control on vegetable crops at the time of the survey, only 21 were mentioned in the responses to the online questionnaire. Seven of them represented 88 % of the recommendations mentioned by advisors and 65 % of the uses cited by farmers (Figure 3). The most cited products included preparations based on strains of *Bacillus*, *Clonostachys*, *Coniothyrium*, *Saccharomyces* and *Trichoderma*. Among the least used products, some were only recently introduced on the market or commercialized by companies with possibly low development or marketing budgets. The hypothesis of a deficit of user awareness for recent products was substantiated in face-to-face interviews, with more than half of available commercial products being unknown to the respondents.

On average, an advisor recommended 3.7 ± 2.3 microbial biocontrol products and a farmer used 2.2 ± 1.9 products, with large differences in citation frequencies depending on the biocontrol product (Figure 3). The answers to the survey of farmers and farm advisors were globally similar for all the mentioned microbial products. This may reflect the fact that most farmers and farm advisors who participated in the present survey were engaged in a network (DEPHY network) that greatly promotes information sharing. It also supports, for vegetable production, a previously reported observation that biocontrol use by farmers may be highly influenced by recommendations of advisors (Pineau et al., 2015). This situation also resonates with research conducted in various countries around the world on drivers and constraints of IPM adoption, highlighting the importance of networks of farmers and advisors to adopt and implement new practices (Asprooth et al., 2023; Jabbar et al., 2022; Koutsouris and Zarokosta, 2022).

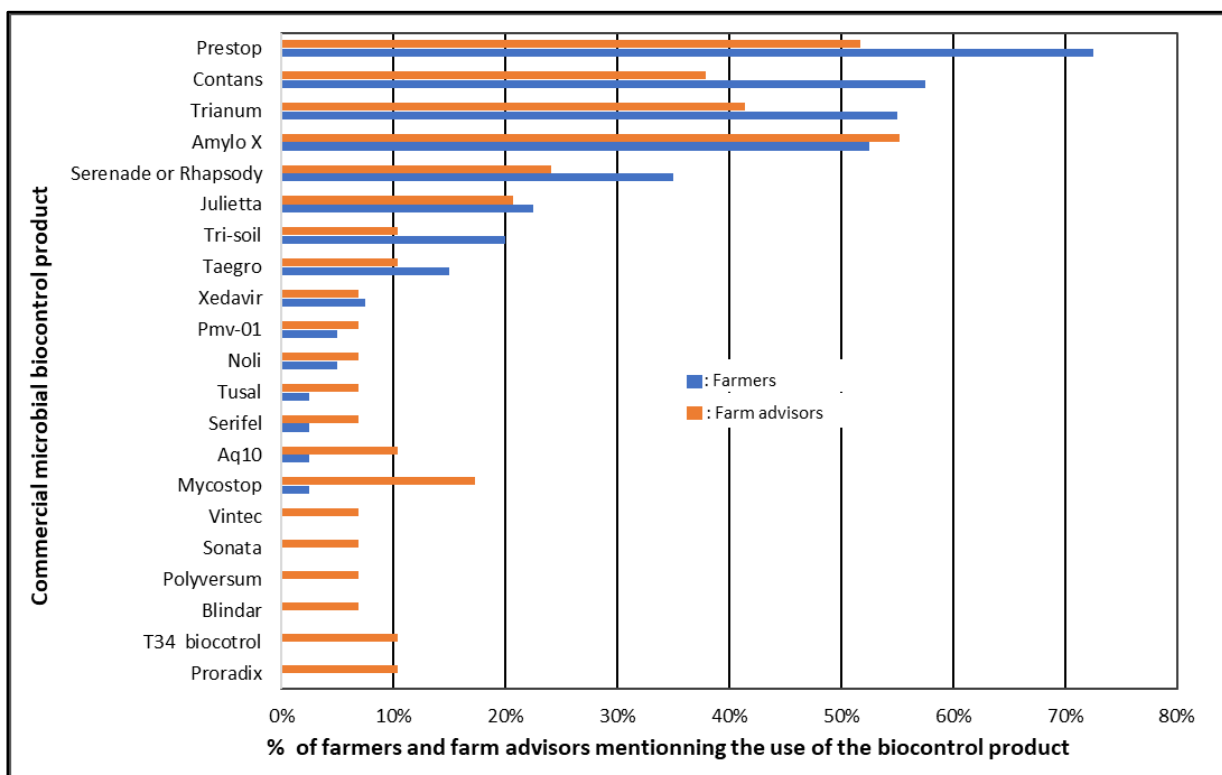


Figure 3 - Frequency of recommendation by farm advisors (■) and of use by farmers (■) of 21 microbial *biocontrol products* against vegetables diseases.

These biocontrol products were used and prescribed primarily for disease management on salads (47.5 %) tomato (30.2 %) and strawberry (12.2 %). The targeted pathogens were essentially *Botrytis cinerea* (grey mould on tomato and strawberry, collar rot on salads), *Sclerotinia sclerotiorum* (white mould on salads) and pathogens causing wilts and root diseases (*Fusarium oxysporum*, *Pythium spp*, *Pyrenochaeta lycopersici*, etc. on various vegetable crops) (Figure 4). Other targets included pathogens causing leaf mould on tomato (*Passalora fulva*), downy mildews or late blight on tomato (*Phytophthora infestans*) and bacterial diseases. In addition, unspecified soilborne pathogens were also targeted through microbial preparations registered as biocontrol products but mostly used for their growth promotion properties. Such uses were mentioned by 27.3 % of advisors and 35.0 % of farmers. The responses of vegetable farmers and farm advisors to the online questionnaire were overall similar, with an unexplained exception for wilts and root diseases.

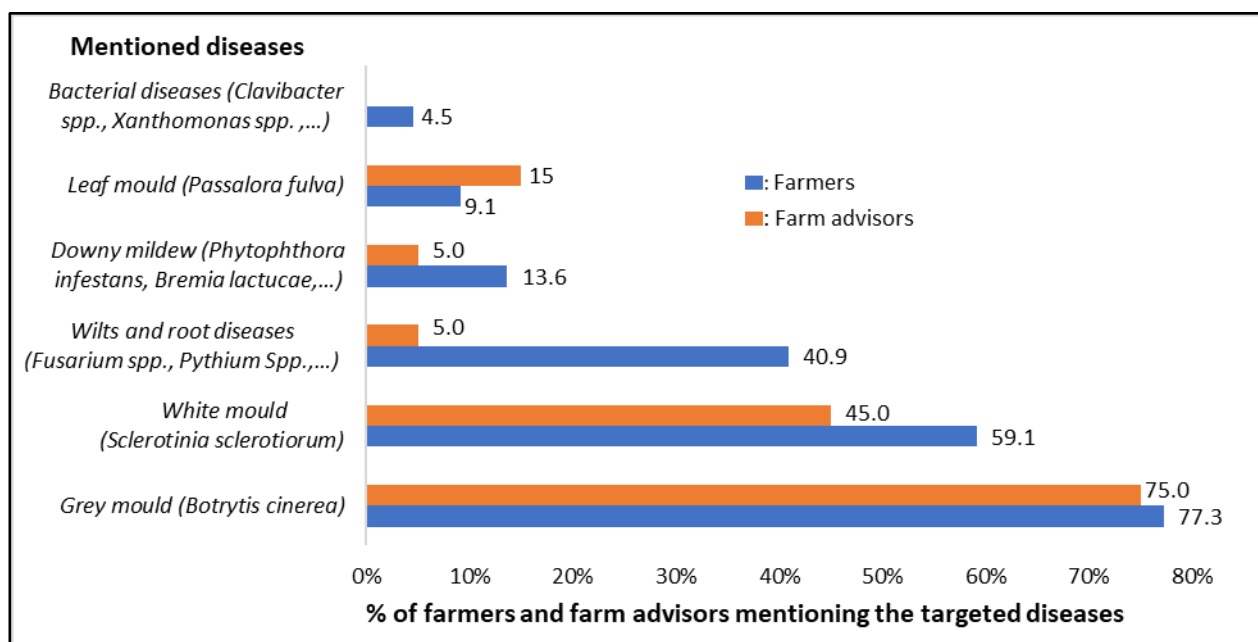


Figure 4 - Frequency of vegetable diseases targeted with biocontrol solutions according to advisors (■) and farmers (■).

Through the in-depth interviews, more detailed practices were documented. The advisors and farmers cited a total of 145 authorized uses (a “use” being defined here as one product targeting one pathogen or disease on a specific crop), of which 46.6 % were on salads, 31.1 % on tomato and 13.1 % on strawberry. These figures matched quite closely the frequencies of use documented from the online questionnaires. The remaining 9.2 % of uses cited in the in-depth interviews were for products registered on other crops or for an overall soil treatment, rather than against a specific pathogen or disease. Overall, the three most commonly cited uses were a *Clonostachys*-based product (Prestop) against grey mould on tomato, a *Coniothyrium*-based product (Contans) against white mould on salads and a *Trichoderma*-based product (Tri-soil) against white mould on salads, representing respectively 13.8 %, 12.4 % and 10.3 % of

all uses. A preparation of *Bacillus amyloliquefaciens* (Amylo X), authorized in France in 2017 against grey mould in salads and tomato (<https://ephy.anses.fr/ppp/amylo-x-wg>, consulted 31 July 2023) represented already 8.3 % and 6.9 % of all uses.

What triggered users to deploy biological control against vegetable diseases?

During the in-depth interviews, almost all farmers (90.0 %) indicated that they initially considered using microbial biocontrol against diseases because of previous positive experience with biological control against insect pests (Table 1). On average, their first use of microbial biocontrol against diseases was 4.3 ± 1.7 years before the interview which corresponds to the year 2016. Among the four main reasons mentioned by farmers, 70.0 % declared using biocontrol because of concerns of their customers about possible residues of chemical pesticides on the vegetables, both for organic and for conventional markets (Table 1). Many of them (55.0 % of interviewed farmers) further indicated that their products had gained access to new “zero residue” markets, including for export, following their adoption of biocontrol against diseases. Such opportunities may be specific to vegetable farmers, or they may have arisen only recently, as they were not reported in previous surveys (Monus, 2019; Moser et al., 2008). Another widely cited rationale for farmers to implement biocontrol against diseases was the advent of regulatory restrictions on chemical pesticides that they formerly relied on (65.0 % of farmers; Table 1). The two other main motivations were considerations related to environmental issues (60.0 % of farmers) and concerns for their health and that of their relatives and employees (50.0 % of farmers). In contrast with the market opportunities discussed above, these three latter points appeared to be shared by professionals in a wide range of cropping systems, as they were raised with very similar frequencies (65 %, 61 % and 47 %, respectively) by the French farmers surveyed in 2018 for IBMA (Monus, 2019).

The motivations mentioned by interviewed farm advisors differed substantially from those of farmers. They essentially consisted of the regulatory restrictions on chemical pesticides (86.4 % of advisors), with only 13.6 % mentioning considerations for the environment (Table 1). Advisors clearly focused on production issues, rather than market considerations, with only 9.1 % mentioning consumer concerns about pesticide residues and new market opportunities for farmers. Another statement that did not emerge as a major point from the survey, concerns the role of societal recognition as an incentive to adopt microbial biocontrol products. For example, a study by Busse et al (2021) on the perceptions of farmers towards insect-friendly farming practices, emphasized the importance of such recognition as a key factor in motivating farmers to embrace innovative practices.

When was microbial biocontrol implemented?

Biocontrol products were essentially applied preventatively when the risk of disease outbreak was high or at the very first stages of disease development (mentioned by 90.0 % of farmers and 95.5 % of advisors; Table 1), in accordance with recommendations from advisory services. Curative use of biocontrol was also occasionally attempted, but with protective results considered as poor. For example, 25.0 % of the farmers and 13.6 % of the advisors indicated trying curative biocontrol solutions. Those curative applications were mostly against leaf mould (*P. fulva*), grey mould (*B. cinerea*) or powdery mildew on tomato or strawberry, with low efficacy. An extreme form of curative application of biocontrol was also mentioned by 20.0 % of the farmers and 4.5 % of the advisors (Table 1), who declared that they had

occasionally resorted to biocontrol as a last chance when all other control solutions had failed. These respondents further indicated that the strategy resulted in poor protection of the crops. It is not clear if these viewpoints are recent or specifically pertain to disease management by vegetable farmers, as the issues were not reported in previous surveys (Monus, 2019; Moser et al., 2008).

Users' perspectives on the interest of biocontrol

During the face-to-face interviews, the respondents mentioned various advantages and disadvantages of biocontrol but most of them eventually expressed specific concerns about some aspects of efficacy. Several users also described their attempts to improve it.

Perceived advantages and disadvantages

Several of the strong positive points mentioned about biocontrol in the interviews have already been described above, as they were also cited as motivation triggers for the utilisation of microbial biocontrol solutions. This is the case, for example, of the perception that microbial biocontrol is a useful means to fulfil market demands for low or no chemical pesticide residue in produce (mentioned by 70 % of the farmers), or to comply with regulatory rules that require reducing the use of chemical pesticides (mentioned by 65.0 % of the farmers). In addition, an advantage identified by many respondents (65.0 % of interviewed farmers and 45.4 % of advisors) was the fact that treatments with microbial biocontrol products often benefit from substantially reduced restricted-entry intervals, and shorter delays before harvest, in comparison with other plant protection products. This viewpoint was not reported in earlier surveys, although this regulatory situation may also apply for biocontrol products used for the management of insect pests and may be beneficial for biocontrol on crops that are less labour-intensive than vegetables. Finally, a large majority of users interviewed in the present study (75.0 % of farmers and 63.6 % of advisors) expressed satisfaction with the supply chain of microbial biocontrol products. In the survey conducted in 2018 for IBMA, 16 % of farmers had pointed to difficulties in procuring biocontrol products from their suppliers (Monus, 2019).

Disadvantages were also mentioned. Among those, the most significant concerns were related to efficacy, with 80.0 % of interviewed farmers and 81.8 % of advisors deploring the low level of achieved protection. Due to its importance, this specific point will be discussed in more details in the next section. The high cost of commercial products is often reported as a major obstacle to adoption of biocontrol solutions (Fauvergue et al., 2022). In the study conducted for IBMA, it was reported as the number one obstacle, cited by 44 % of surveyed farmers (Monus, 2019). Surprisingly, in the present study this economic concern was mentioned by only 25.0 % of interviewed vegetable farmers. However, other disadvantages were pointed out, essentially in relation to perceived complex utilisation of the biocontrol products. Nearly half of the farmers (45.2 %) indicated that their use of microbial biocontrol solutions could be higher if the mode of application was better adapted to their farming practices. The products' generally brief shelf life was considered as a significant shortcoming by 26.2 % of farmers. Finally, a difficulty reported by 16.7 % of the farmers was the clogging of nozzles when using certain biocontrol products through the irrigation system.

An overall negative perception of biocontrol efficacy

Concerns with the protective efficacy of microbial biocontrol products were first uncovered in the responses to the online questionnaire, where participants were asked to rate it on a scale from 0 to 3. Farmers and advisors had very similar perceptions with average indices of 1.7 ± 0.7 (standard error) and 1.6 ± 0.6 , respectively (p -value = 0.83, Kruskal-Wallis's test) None of the 69 participants gave the minimum rating of 0 but only 5 gave the maximum rating of 3. During the face-to-face interviews, it was further specified that this rather negative opinion resulted in part from the perceived unpredictability of successful protection. More than half of the interviewees (65.0 % of farmers and 54.5 % of advisors) indicated that they experienced occurrences of continued disease development following biocontrol treatments. Even in absence of disease development after a treatment, users frequently questioned the protective role of biocontrol products (80.0 % of farmers and 59.1 % of advisors), expressing the belief that the pathogen would have failed to attack the crop even in absence of a treatment. This deficit of trust in the efficacy of biocontrol products against diseases appears stronger among users surveyed in the present study than among those surveyed for IBMA in 2018. In the earlier survey, only 37 % of farmers indicated the lack of efficacy as a shortcoming that hindered their adoption of biocontrol (Monus, 2019). The negative opinion observed in the present study may have been reinforced (i) by the difficulty for users to evaluate objectively the protective effect of products in commercial situations in absence of formal untreated controls, or (ii) by doubts about the viability of the microbial preparation when it was applied to the crop (expressed by 19.0 % of the advisors). Likewise, most advisors (86.3 %) declared to be reluctant to recommend products without having access to several independent technical benchmarks from trusted institutions such as local or national extension services that may carry out efficacy trials. It was further proposed that negative feedback about deficits of efficacy tend to be more widely shared than positive feedback within farmer networks. In absence of a clear understanding of the reasons for episodes of poor protection, the blame may be put on the product while ignoring other possible factors such as inadequate conditions of deployment.

Despite this general opinion, some microbial biocontrol products were widely adopted and integrated into vegetable protection schemes, as shown by Figure 4. For example, all interviewed salad producers reported using systematically a *Coniothyrium*-based product to reduce soilborne inoculum of *S. sclerotiorum*, because of the availability of guidelines and efficacy benchmarks generated by local advisory services. This product was also considered to be easily applied, during planting stage.

Measures taken by users to consolidate biocontrol efficacy.

Among the respondents to the interview, 30 % of the farmers and 45.5 % of the advisors declared deploying or recommending at least one measure to promote biocontrol efficacy. Three main types of measures were cited (Table 1). The most common was the combination of microbial biocontrol with other disease management practices such as solarization, prophylactic measures and chemical control (25.0 % of farmers and 36.4 % of advisors). The second one was the use of adjuvants to improve the spread and persistence of the products on the crop canopy (15.0 % of farmers and 18.2 % of advisors). The third measure consisted in taking environmental factors into account when applying the biocontrol products. Nevertheless, only 15.0 % of interviewed farmers and 27.8 % of advisors indicated being aware of and trying to take into consideration the importance of environmental factors (mainly air temperature and humidity) for the successful use of microbial biocontrol products. Furthermore, they reported struggling

to put these intentions into practice, due to a lack of information on optimal conditions for each product or to the absence of the necessary equipment to monitor those factors.

Needs expressed by biocontrol users.

During face-to-face interviews, users systematically contrasted the complexity of biocontrol implementation with the facility of use of chemical control. For a large majority of interviewed farmers (85.0 %) comprehensive guidelines and hands-on training would be necessary to overcome this shortcoming. Farm advisors widely concurred (86.4 %) with this view and considered that tangible data about efficacy factors would be crucial to elaborate appropriate guidelines and training. Both farmers and advisors almost unanimously (95.2 % on average) stated that the availability of efficacy benchmarks would strongly foster the use of microbial biocontrol products. Many of them (50 % of farmers and 63.6 % of advisors) further voiced the need for easily accessible and frequently updated information about authorized uses of biocontrol products on their specific crops, so they can have a wider choice of solutions for the construction of their disease management strategies. Substantial interest was also conveyed (35.0 % of farmers and 31.8 % of advisors) for a platform that would facilitate the sharing of feedback on the use of biocontrol. The emphasis on the value of locally trusted data finds resonance in a recent study from the USA, where "Regional IPM Centers" emerged as pivotal sources for reliable information including numeric tools, driving the evolution of farming practices (Lane et al., 2023). Additionally, some greenhouse farmers, among those who were equipped with computer-controlled climate management systems, suggested that microbial biocontrol solutions would need to be integrated into decision support systems using those technologies. Those suggestions echo publications about the importance of DSS development and integration for IPM adoption in farming (Carlos and Val, 2022).

Finally, a substantial fraction of the farmers (41.3 %) stated that they did not always thoroughly follow the recommendations provided on the labels of the biocontrol products for preparation or application. This may seem somewhat paradoxical, as some of the recommendations concern issues pertaining to the efficacy of the products. This is the case for two examples cited by farmers, the recommended resting time of the tank-mix before its use on a crop (which may foster the revival of microorganisms and boost their activity on the plant) or the avoidance of periods of the day when the temperature may be deleterious to the microorganisms. This points to possible paths for improving labels, by clarifying the rationale for key recommendations and emphasizing their importance. It also suggests a possible need for these issues to be emphasized by advisors and by any tools devised to help farmers with the deployment of biocontrol solutions.

Synthesis of the survey results

Among the five key advantages of microbial biocontrol perceived by users (summarized in Figure 5) the most frequently cited were associated with complying to regulatory issues or satisfying market demands. These advantages were also considered by users as determinant incentives for the adoption of biocontrol solutions in a context of dwindling access to the chemical pesticides they were accustomed to relied on. Disadvantages were strongly focused on technical issues pertaining to the implementation of microbial

biocontrol, with a lesser importance given to economic issues (such as the cost of the products and their shelf life). The most prominent concerns were the complexity and unpredictability of achieving adequate protective efficacy (generally perceived as low) and the insufficient availability of benchmarks from trusted sources for many products. To improve their confidence and achieve better effectiveness in managing plant diseases with microbial biocontrol products, the users consistently expressed substantial needs for more information, as summarized in Figure 5.

Our study of French vegetable farmers and farm advisors also revealed that limited knowledge of biocontrol products, along with concerns about their efficacy and compatibility with existing practices, remain significant barriers to wider adoption. The perceived instability of biocontrol efficacy and difficulties in integrating these agents with cultural practices were also reported by users, raising questions about their overall interest. The survey participants expressed a strong need for additional technical benchmarks to ascertain the efficacy of marketed biocontrol products and for practical guidelines to help them select suitable products for specific situations and optimize their application. By identifying these needs, the study aimed to contribute to promoting sustainable and eco-friendly disease management practices in vegetable crops, ultimately reducing reliance on chemical pesticides, and supporting a more resilient agricultural system.

Perception of microbial biocontrol deployment according to our survey

Perceived key advantages

1. Contributes to fulfil market demands for low/no chemical pesticide residues in produce
2. Allows compliance with regulatory issues on reducing the use of chemicals
3. May entail reduced restricted-entry intervals in treated crops and shorter delays before harvest for treatments, compared to chemical pesticides
4. Respects environmental and public health concerns
5. Availability of products for the management of several major diseases, and adequate supply logistics

Perceived key disadvantages

1. Generally low and uncertain protective efficacy
2. Insufficient technical benchmarks from trusted sources
3. Complex implementation and modes of application occasionally ill-adapted to farming practices
4. High cost of products and short shelf life
5. Lack of products for the management of many key recurrent or emerging diseases

Essential needs expressed by users

- Guidelines and training to optimize the implementation of microbial biocontrol of diseases
- Easy access to efficacy benchmarks and frequently updated information about authorized uses of biocontrol products
- A platform to facilitate experience sharing among biocontrol users

Figure 5 - Key advantages and disadvantages of microbial biocontrol for disease management, and essential user needs reported in the survey (ordered from the most to the least frequently mentioned by the respondents).

CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

Although many of our observations align with prior research conducted in France and internationally on farmers' perceptions toward the use of biocontrol agents (Monus, 2019; Moser et al., 2008), the present study brings to light distinctive aspects concerning the use of microbial biocontrol agents against vegetable diseases. Notably, growers face common concerns when implementing biocontrol measures,

grappling with the selection of optimal products and the quest for sufficient efficacy. Our face-to-face interviews highlighted the challenges that users encounter during the implementation of biocontrol. While participants recognized the potential benefits of employing biocontrol agents, they also raised issues about the variable efficacy of these agents and their compatibility with existing agricultural practices. This echoes the findings of Lamichhane et al. (2017) regarding critical priorities for successful biocontrol strategies in arable crops in Europe, which align closely with our observations in the realm of vegetable crops.

To address the needs of users and promote wider adoption of microbial biocontrol agents in vegetable crops, we propose several strategies. First, the development of standardized efficacy benchmarks for biocontrol products should enable users to make informed decisions about the suitability of these agents for their pest management needs based on sourced data. Secondly, providing practical guidelines and support materials that facilitate the selection and optimal application of biocontrol products can enhance their implementation on farms with both technical and socioeconomic approaches to promote biocontrol solutions. And third, create a tool to gather all those data together and make them easily accessible for all users. In fact, in coming years, it may be expected that benchmarks on the efficacy of those products will become increasingly available, with the dissemination of results from trials carried out by technical institutes or extension services, for example in the framework of the DEPHY network. These data, together with an expanding body of published scientific literature on the complex factors that impact the efficacy of microbial biocontrol agents, may also contribute to the elaboration of guidelines for users. Further work is being carried out in our group to gather these data into a database and translate them into simple decision rules that can be integrated into user-friendly decision support systems (DSS) for use in the field. In addition to this, the DSS will integrate the feedback from farmers and advisors to share peer experiences with users (Pressecq et al., 2022).

Acknowledgments:

We wish to thank all the participants in the survey (farmers and advisors) and all who contributed to its dissemination to a wide audience (including APREL members, staff members of French Chambers of Agriculture and farmers’ labour unions). We also thank the French Region Sud PACA, the Project Cap0Phyto and INRAE for funding the PhD thesis of T. Pressecq, which made the present study possible.

References

All references of chapter 1 are placed in the global references section.

List of Figures Chapter 1

Figure 1 - Structure of the online questionnaire (each box represents a section)	40
Figure 2 - Structure of the interview guideline	41
Figure 3 - Frequency of recommendation by farm advisors (■) and of use by farmers (■) of 21 microbial biocontrol products against vegetables diseases.....	45

Figure 4 - Frequency of vegetable diseases targeted with biocontrol solutions according to advisors (■) and farmers (■).45

Figure 5 - Key advantages and disadvantages of microbial biocontrol for disease management, and essential user needs reported in the survey (ordered from the most to the least frequently mentioned by the respondents).50

List of Tables Chapter 1

Table 1 - Tags used for the analysis of interview data and frequencies of citation among respondents39

CHAPITRE 2 - Etude des facteurs d'efficacité dans la littérature scientifique

1. Présentation du deuxième article : « Invited Review Article »

Ce deuxième article se concentre sur la revue bibliographique qui a été menée sur les 3 années de thèse et qui a permis l'élaboration d'une base de données sur les agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes et leurs facteurs d'efficacité. Cette base de données rassemble plus de 2000 documents sur les micro-organismes utilisés comme biocontrôle et a permis de mettre en évidence un manque de données spécifiques sur les facteurs d'efficacité et une hétérogénéité de répartition de l'information entre les micro-organismes étudiés. Leur applicabilité par des utilisateurs a également été discutée. Les publications relatives aux facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle microbiens de la revue de la littérature sont référencées en annexe 1.

2. Résumé en français

Les agents microbiens de biocontrôle sont des outils prometteurs pour réduire l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture. En raison de leurs caractéristiques d'organismes vivants, leur déploiement plus complexe que l'application de produits chimiques peut entraîner une variabilité de leur efficacité sur le terrain, ce qui entrave leur adoption. La prise en compte de cette complexité rendrait leur utilisation plus fiable. Mais ces données sur les facteurs d'efficacité sont-elles suffisantes pour favoriser leur utilisation optimale par les agriculteurs contre les maladies des plantes ?

Pour répondre à cette question, une revue de la littérature a été mise en place pour rassembler les facteurs biotiques et abiotiques qui peuvent moduler l'efficacité protectrice des agents microbiens de biocontrôle, y compris les propriétés biologiques des agents de biocontrôle, celles des pathogènes des plantes, et les caractéristiques des systèmes de culture. Cette revue se concentre uniquement sur les publications scientifiques concernant les souches d'agents de biocontrôle autorisées en Europe.

Une analyse de la base de données révèle que les informations publiées sont plutôt rares pour presque tous les agents de biocontrôle. Le manque de données est particulièrement frappant pour l'utilisation des agents de biocontrôle en conditions de terrain. L'analyse des souches de *Bacillus* et de *Trichoderma* a révélé que même pour ces deux genres d'agents de biocontrôle les plus étudiés, les informations sont très fragmentaires. Les facteurs d'efficacité n'ont été évalués que sur quelques cultures contre quelques-uns de leurs pathogènes potentiels. En outre, seule une petite partie des informations disponibles est pertinente pour l'utilisation de ces souches dans une situation commerciale. Cela souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur les facteurs d'efficacité afin de pouvoir utiliser ces données pour améliorer l'efficacité des agents de biocontrôle sur le terrain.

3. Article

Are the efficacy factors of microbial biocontrol agents sufficiently well documented to foster their optimal use by farmers against plant diseases?

Thomas Pressecq^{1, 2, 3}, Philippe C. Nicot¹, Jean François Bourgeay¹, Aurélie Rousselin³, Claire Goillon³, Marc Bardin¹ and Marc Tchamitchian²

1: INRAE, Pathologie Végétale, 84140, Montfavet, France

thomas.pressecq@inrae.fr, philippe.nicot@inrae.fr, jean-françois.bourgeay@inrae.fr and marc.bardin@inrae.fr

2: INRAE, Pathologie Végétale, 84140, Montfavet, France

marc.tchamitchian@inrae.fr

3 : Association Provençale de Recherche & d'Expérimentation Légumière – APREL, 13210, Saint-Rémy-de-Provence, France

Rousselin@aprel.fr and Goillon@aprel.fr

Abstract

Microbial biocontrol agents are promising tools for reducing the use of chemicals in agriculture. Due to their characteristics as living organisms, their deployment is more complex than the application of chemicals and could result in the variability of their efficacy in the field, thus hindering their adoption. Taking this complexity into account would make their use more reliable. But does that information about efficacy factors sufficiently well documented to foster their optimal use by farmers against plant diseases. To answer such question, a literature review has been set up to collect the biotic and abiotic factors that can modulate the protective efficacy of microbial biocontrol agents, including the biological properties of biocontrol agents, those of plant pathogens, and the characteristics of cropping systems. This review only focus on scientific publication about strains of biocontrol agents authorized in Europe.

An analysis of the database reveals that published information is rather low for almost all the biocontrol agents. The shortage of data is particularly striking for the use of biocontrol agents in field conditions. A focus on strains of *Bacillus* and *Trichoderma* revealed that even for those two most studied genera of biocontrol agents, information is highly patchy. Efficacy factors have been assessed only on a few crops against a few of their potential pathogens. Furthermore, only a small part of the available information is relevant for use of those strains in a commercial situation. This highlights the need for further research into efficacy factors to be able to use those data to improve the efficacy of biocontrol agents in the field.

Introduction

Plant diseases are a major concern in agricultural production, leading to significant economic losses and environmental impacts. The use of synthetic pesticides has been a common strategy to control plant diseases, but their negative effects on human health and the environment have raised concerns (Lamichhane et al., 2016). In recent years, more and more alternatives have been promoted, including the use of biological control, to implement environmentally friendly and sustainable approaches to plant health management (Goulet et al., 2023; Lamichhane et al., 2017). Many biocontrol solutions have been specifically developed for disease management, which was once considered as the weak link of integrated pest management (IPM) due to its strong dependence on synthetic pesticides (Buitenhuis et al., 2023; Fauvergue et al., 2022; IBMA, 2022b; Nicot and Bardin, 2012; van Lenteren and Nicot, 2020). Over the last 20 years, increasing numbers of microbial biocontrol agents (MBCAs) have been authorized for use in many countries against various diseases in most types of production, as well as for the control of post-harvest diseases (Bardin and Nicot, 2022; Boro et al., 2022; Droby et al., 2016; Nicot et al., 2022, 2020; van Lenteren et al., 2018).

However, the actual deployment of biocontrol solutions by farmers faces a number of challenges, and a range of research actions have been advocated in Europe and elsewhere to enhance their adoption and integration in IPM schemes (Bertrand et al., 2022; Droby et al., 2016; Lamichhane et al., 2017; Marian and Shimizu, 2019; Moser et al., 2008; Nicot et al., 2011). Among possible obstacles to the adoption of disease biocontrol presented in these studies, issues related to field efficacy appeared to play a key role in shaping the attitude of farmers. The importance of such issues was also particularly striking in a recent survey conducted in France, showing that 80 % of interviewed vegetable farmers expressed mistrust in the protective efficacy of biocontrol products, which was considered to be low in comparison with that of chemical control (Presseq et al, 2023; voir Chapitre 1 – article soumis). Many of the farmers (65 %) indicated that they had experienced occurrences of continued disease development following biocontrol treatments, although 30 % of interviewed farmers and 45 % of advisors implemented various measures to consolidate the efficacy of biocontrol. Overall, there was a broad consensus (85 % of interviewed farmers and 86 % of advisors) on the needs for (and current lack of) information on the factors governing biocontrol effectiveness, and for guidelines and practical training to help users implement biocontrol products in the best possible way to enhance protection (Presseq et al, 2023; voir Chapitre 1 – article soumis).

Much research has been dedicated to approaches that could be used to enhance the efficacy and reliability of MBCAs for use against soilborne and airborne diseases, as well as for the management of post-harvest diseases (Droby et al., 2016; Nicot et al., 2011; Spadaro and Gullino, 2005). Several recent reviews have highlighted the expanding body of scientific literature on biological control of plant diseases using microorganisms, and on the understanding of their modes of actions (Bardin and Pugliese, 2020; Droby et al., 2016; Köhl et al., 2019; Marian and Shimizu, 2019; Turc et al., 2022). Information is also increasingly available on the effect of various factors on the protective efficacy of MBCAs (Bardin and Nicot, 2022; Bardin and Pugliese, 2020; Droby et al., 2016; Nicot et al., 2022; Spadaro and Gullino, 2005).

Understanding these factors, as well as the modes of action of biocontrol agents, may be essential in guiding the development of strategies to improve efficacy. It could also help farmers to deploy biocontrol products best suited to the conditions prevailing in their fields, or to modulate their cropping practices to create the most favorable conditions for a specific biocontrol agent. Nevertheless, scientific reviews on factors affecting the protective efficacy of biocontrol agents are scarce and they do not provide a focus on commercialized strains that are available for farmers to use. Thus, it is unclear to what extent the scientific knowledge currently available can be mobilized to develop user guidelines that would help farmers improve the efficiency of biocontrol product applications.

This review paper will examine the factors reported in the scientific literature to influence the protective efficacy of microbial biocontrol agents, with a focus on information available for specific strains that are approved for use in the European Union (EU) as active substances in biocontrol products against plant diseases. It will then assess the applicability of this information to optimize the use of the biocontrol products by farmers. Finally, it will address the prospects and needs for future research in this field.

Factors reported to influence the protective efficacy of microbial biocontrol agents

A broad range of factors have been shown to influence the protection provided to a plant by a microbial biocontrol agent against a disease (Figure 1). They include environmental conditions encountered in the field as well as cropping practices, but also factors related to properties of the biocontrol agent or those of the targeted pathogen (Aguilar-Veloz et al., 2020; Bardin and Nicot, 2022; Bardin and Pugliese, 2020).

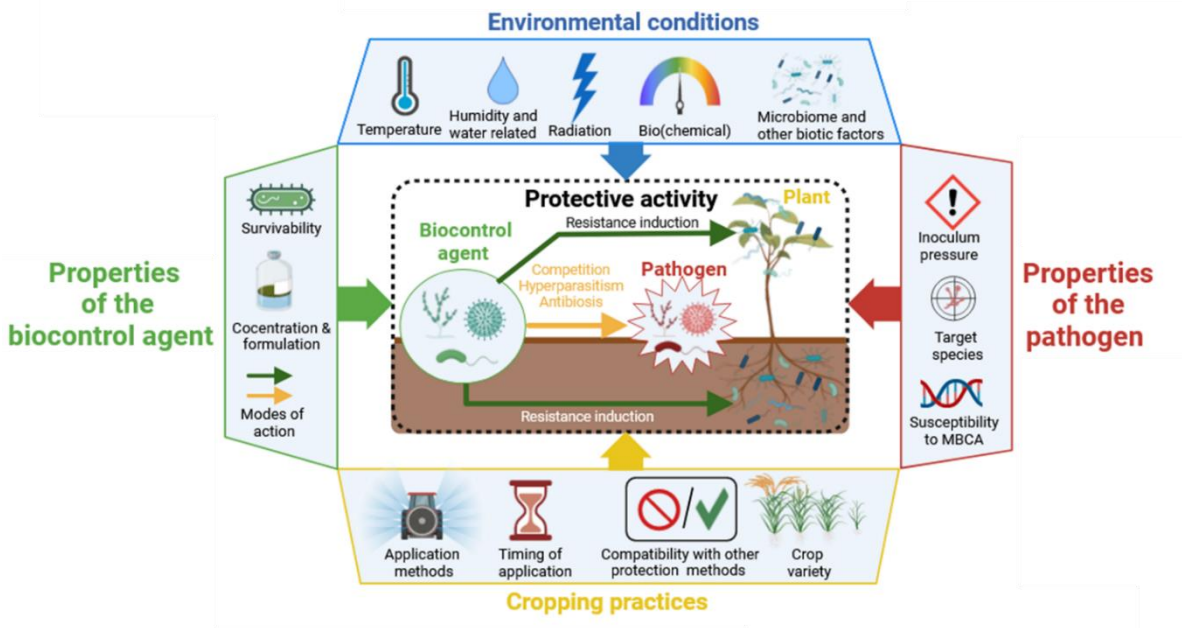


Figure 1 - Factors that may influence the protective efficacy of microbial biocontrol agents against diseases.

Environmental conditions

The high sensitivity of microbial agents to stressful environmental conditions is often cited as a common obstacle to reliable protective efficacy of biological control (Bardin and Pugliese, 2020; Droby et al., 2016; Köhl et al., 2019; Marian and Shimizu, 2019; Turc et al., 2022).

Most studies on this subject have investigated abiotic factors, such as temperature, water availability and relative humidity, radiation, pH and the (bio)chemical properties of the substrates where the MBCA is introduced. Temperature is probably the most studied factor of efficacy. Its possible effect may be illustrated with *Bacillus subtilis*, which was reported to exhibit enhanced biocontrol activity against fungal pathogens when exposed to temperatures within an optimal range of 25-30°C (Cawoy et al., 2014). Conversely, lower, or higher temperatures outside this range can diminish its protective efficacy. Relative humidity is also often cited as an important factor. The biocontrol agent *Candida oleophila* spp, for example, has shown enhanced survivability efficacy against postharvest diseases such as botrytis cinerea at higher relative humidity levels (Lahlali et al., 2008). Another frequently studied efficacy factor is the pH of the substrate (soil or plant surface) where the biocontrol agent is applied. Different MBCA strains may exhibit varying tolerances to pH levels, affecting their efficacy against target pathogens. It was shown for example that the effectiveness of *Trichoderma asperellum* in suppressing *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* was significantly influenced by soil pH (Wu et al., 2017). Acidic soil conditions were most favorable. Nutrient availability in the substrate where the biocontrol agent is applied is also considered as an important potential factor. Limited nutrient availability can hamper the growth and activity of the microbial agents, affecting their ability to compete with or antagonize pathogens. The biocontrol agent *Pseudomonas fluorescens*, for example, has shown enhanced suppression of pathogens when provided with optimal nutrient sources *in vitro* (Kloepper and Ryu, 2006). In certain conditions, nutrient limitations can foster the effect of MBCAs. This is the case with ferric ions when the production of siderophores by a biocontrol agent plays a key role in its protective effect, as was shown for *Trichoderma asperleum* T-34 against *Fusarium* wilt of tomato (Segarra et al., 2010). Other environmental factors such as ultraviolet (UV) radiation can also affect the efficacy of biocontrol agents. Various studies have shown that UV-B and UV-C radiation can decrease the viability and efficacy of biocontrol agents such as *Trichoderma* spp. or *Bacillus* spp. For example, UV-B radiation negatively affects the biocontrol efficacy of *B. velezensis* (Wang et al. 2018).

Within the literature, some reports also focus on **biotic factors**, and much research work is increasingly dedicated to the various possible effects of the holobiont on plant health (Lyu et al., 2021). The presence of beneficial microorganisms in the rhizosphere or phyllosphere of the crop can influence the effectiveness of biocontrol agents. Interactions between the biocontrol agent and other microorganisms in the same ecological niche can have both positive and negative effects. For example, the presence of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) was shown to enhance the efficacy of the biocontrol agent *Bacillus subtilis* by stimulating its growth and biocontrol activity (Massart et al., 2015; Sare et al., 2021).

Cropping practices

Several cropping practices have been reported to affect the protective efficacy of biocontrol agents. The most frequently cited are the choice of the variety planted by the farmer, but also the method and timing of application of the biocontrol agent, and other possible plant protection interventions applied to the crop, that may interact with the biocontrol agent.

Different **crop varieties** may differ in their aptitude to be protected by a biocontrol agent. For example, *Bacillus amyloliquefaciens* has demonstrated differential protective efficacy against various strains of the bacterial pathogen *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* depending on the crop cultivar (Biondi et al. 2021).

The **timing and method of application** of the biocontrol treatments often play a crucial role in the efficacy of microbial biocontrol agents against plant diseases. For instance, in an experiment in greenhouse on pepper plant, applying *Pythium oligandrum* 3 days before inoculation of *Verticillium dahlia* increase the efficacy. The preventive efficacy is 68 % when applying before in comparison of 59 % of efficacy 3 days after inoculation (Rekanovic et al., 2007). For application methods, a study was conducted to evaluate seed treatment and foliar treatment combination with *Bacillus subtilis* MBI 600 against Rice sheath blight disease (ShB), caused by *Rhizoctonia solan*, it was shown that foliar treatment after seed treatment reduce diseases severity by another 5 %. (Vijay krishna kumar et al., 2012)

Other pest management measures taken by the farmer can interfere with the protective efficacy of MBCAs. The most likely interference is with the application of chemical pesticides. Interactions may be detrimental if pesticide residues from previous treatments have harmful effects on the viability and activity of microbial agents, compromising their biocontrol potential (Ons et al., 2020). They may also be beneficial if the microbial biocontrol agent is not sensitive to the pesticide. In fact, certain MBCAs are commercialized in conjunction with fungicides. This is the case for example with the commercial product “Ballad” which contains a preparation of *Bacillus pumilus* QST2808 together with the fungicide fludioxonil (Terre Inovia, 2021). Thus, understanding the compatibility and potential interactions between biocontrol agents and pesticides is crucial for successful integrated pest management.

Properties of the biocontrol agents

Biocontrol strains, even when they belong to the same species, may differ in their biological properties, including those related to their protective efficacy. For instance, two strains of *Conothyrium minitans*, one of which is registered as the active substance of the commercial product “Contans”, were shown to differ significantly in their growth rate and in the optimal temperature for their growth (Jing et al. 2015). Thus, information about a given biocontrol strain may not be applicable to another strain of the same species. This further implies that, to be useful for farmers, relevant data need to be specifically acquired for each strain that is commercialized.

Among possible factors of efficacy pertaining to the properties of the biocontrol agents, four are among the most often mentioned. One is the **concentration of living cells** present in the preparation used for a

treatment (Malgioglio et al. 2022). Studies on this factor classically rely on dose-response experiments to evaluate the variation of efficacy (Francés et al., 2006). The **formulation** of a biocontrol preparation may play a key role in shaping its protective efficacy. It was demonstrated, for example, that consortium of *Pseudomonas aeruginosa* DRB1 and *Trichoderma harzianum* CBF2 formulated in pesta granules could greatly improve diseases reduction of Fusarium wilt of banana in comparison of other formulation like talc powder and alginate beads or liquid or (Wong et al., 2019). Although such data may be crucial for the understanding of biocontrol efficacy, publicly available scientific reports on these aspects are scarce, because formulations tend to be developed by companies and considered confidential. The stress tolerance and **survivability** of the microbial strain may greatly also influence the protective efficacy of biocontrol (Bennett et al., 2003). Studies on this topic may be carried out *in planta*, or in the soil, to evaluate the resilience of an MBCA after its application. This is illustrated by a report by Bennet et al (2003) highlighting the capacity of *Coniothyrium minitans* and *Bacillus subtilis* MBI 600 to survive after their application in different soils that had been either sterilised, pasteurised or left non-sterile. Finely, it was established that the **modes of action** of a biocontrol agent shape up their protective efficacy and that many MBCAs may act through several different mechanisms (Turc et al., 2022). Nevertheless, it is rarely known if the microorganisms systematically deploy all possible mechanisms of action simultaneously, or if they are deployed under the regulation of specific triggers.

Properties of the pathogen

As commonly observed for the use of chemical pesticides, it was shown that differences may exist in populations of plant pathogens in term of their **susceptibility to the effect of biocontrol agents**, with a potential to influence drastically the protective efficacy of biocontrol (Bardin et al., 2015; Bardin and Siegwart, 2022; Hewedy et al., 2020). For example, varying levels of effectiveness observed for the biocontrol agent *Streptomyces lydicus* against different strains of *Fusarium virguliforme* were attributed to differential susceptibility of the pathogen (Covert et al., 2007). Another factor linked to the pathogen is how the **inoculum pressure** influences the biocontrol activity. Thus, it was shown for instance that the ability of *B. subtilis cot1* to reduce damping-off symptoms was negatively correlated with the density of oospore of *Pythium ultimum* present in soil. (Berger et al., 1996)

Review of scientific information on the efficacy of MBCA strains approved for use in the European Union against plant diseases

As of June 2023, 41 microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens (Table 1). To collect peer-reviewed scientific publications on each of these strains, search queries were carried out in the Web of Science™. They were complemented by queries in Google Scholar, which allows searching on the full text of many articles, in addition to titles,

abstracts and key words. Publications in non-peer-reviewed journals or in technical bulletins were excluded.

In a first step, all peer-reviewed articles published on each of those strains were collected, using the name of the species together with that of the strain in the search equations. In cases where taxonomic changes had occurred, all known former species names were also included in the equation, possibly complemented with known names of commercial products. This was the case for example for strain T-22 of *Trichoderma afroharzianum*, which was originally described as *T. harzianum* (Cai and Druzhinina, 2021) or for strain QST713 of *Bacillus velezensis*, which was initially described as *B. subtilis* and later referred to as *B. amyloliquefaciens* (Dunlap, 2019). This latter strain will be referred to as “*B. amyloliquefaciens* QST 713” in the present review, to avoid confusion with the information posted on the EU pesticides data base. The inventory was finalized in June 2023, yielding a total of 802 publications (Table 1). A great majority of collected publications involved strains in species of *Trichoderma* and *Bacillus* (263 and 255 publications respectively) and the numbers varied broadly depending on the strain, with a maximum of 135 for the most studied one (Table 1). Overall, the articles on approved MBCAs strains represented a small fraction, ranging from 0.1 to 18.2 % of studies published on the different species of MBCAs, suggesting that much of published work may be on strains that have not been commercialized, or that strain names were not always clearly indicated in the publications.

Table 1- Scientific peer-reviewed publications on microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.

Strains are presented in alphabetical order.

Microbial biocontrol strain ^a	Number of publications on the strain	% among all publications on the species ^b
<i>Ampelomyces quisqualis</i> AQ10	26	19.0
<i>Aureobasidium pullulans</i> DSM 14940 and DSM 14941	18	0.8
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> (formerly <i>B. subtilis</i>) QST 713	133	3.5
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> AH2	2	< 0.1
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> FZB24	31	0.7
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> IT-45	9	0.2
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> MBI 600	34	0.8
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> subsp. <i>Plantarum</i> D747	20	0.4
<i>Bacillus pumilus</i> QST 2808	22	6.5
<i>Bacillus subtilis</i> IAB/BS03	4	< 0.1
<i>Candida oleophila</i> O	20	9.7
<i>Clonostachys rosea</i> (<i>Gliocladium catenulatum</i>) J1446	42	7.8
<i>Coniothyrium minitans</i> CON/M/91-08 (DSM 9660)	20	5.7
<i>Metschnikowia fructicola</i> NRRL Y-27328	7	8.0
Mild Pepino Mosaic Virus VC1	3	NA
Mild Pepino Mosaic Virus VX1	3	NA

Microbial biocontrol strain ^a	Number of publications on the strain	% among all publications on the species ^b
Pepino mosaic virus CH2 isolate 1906	5	NA
Pepino mosaic virus Chilean strain, mild isolate Abp2	1	NA
Pepino mosaic virus European strain, mild isolate Abp1	1	NA
<i>Phlebiopsis gigantea</i> FOC PG 410.3	1	< 0.1
<i>Phlebiopsis gigantea</i> VRA 1835	2	< 0.1
<i>Phlebiopsis gigantea</i> VRA 1984	1	< 0.1
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> MA342	16	1.7
<i>Pseudomonas</i> sp. DSMZ 13134	28	NA
<i>Pythium oligandrum</i> M1	39	12.8
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> LASO2	1	< 0.1
<i>Streptomyces</i> K61 (formerly <i>S. griseoviridis</i>)	31	29.2
<i>Streptomyces lydicus</i> WYEC 108	26	17.2
<i>Trichoderma afroharzianum</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) T-22	115	3.6
<i>Trichoderma asperellum</i> T34	35	5.8
<i>Trichoderma asperellum</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) ICC012	10	0.3
<i>Trichoderma asperellum</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) T25	4	< 0.1
<i>Trichoderma asperellum</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) TV1	7	< 0.1
<i>Trichoderma atrobrunneum</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) ITEM 908	8	0.2
<i>Trichoderma atroviride</i> I-1237	8	1.5
<i>Trichoderma atroviride</i> SC1	27	5.0
<i>Trichoderma atroviride</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) IMI 206040	21	0.6
<i>Trichoderma atroviride</i> (formerly <i>T. harzianum</i>) T11	17	0.5
<i>Trichoderma gamsii</i> (formerly <i>T. viride</i>) ICC080	12	1.9
<i>Verticillium albo-atrum</i> (formerly <i>V. 62uropa</i>) WCS850	3	0.6
Zucchini yellow mosaic virus weak strain	1	NA

a: Names are indicated as they appeared in the European pesticides database (https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en; consulted in June 2023). Strains approved together are shown on the same line.

b: NA= not applicable.

In a second step, the collected publications were examined for the presence of qualitative or quantitative information on factors that may influence the protective efficacy of the biocontrol strains. Only 296 of these 808 publications comprised the sought-after information and were retained for further analysis. The list of the 296 publications is provided in Supplementary data (annex 1). Their distribution among biocontrol strains was highly heterogeneous (Figure 2). Information was fully lacking for 13 of the 41 strains. For the 28 remaining strains, it was most abundant for those in the two major genera *Bacillus* and *Trichoderma*, amounting to more than 71 % of the total publications. This notably high proportion may be related to the high relative abundance of strains of these two genera in natural environments (Mukherjee et al., 2013; Saxena et al., 2020) and their long history of being known as biocontrol agents (Dutta et al., 2022; Puopolo, 2022; Shafi et al., 2017; Woo et al., 2023).

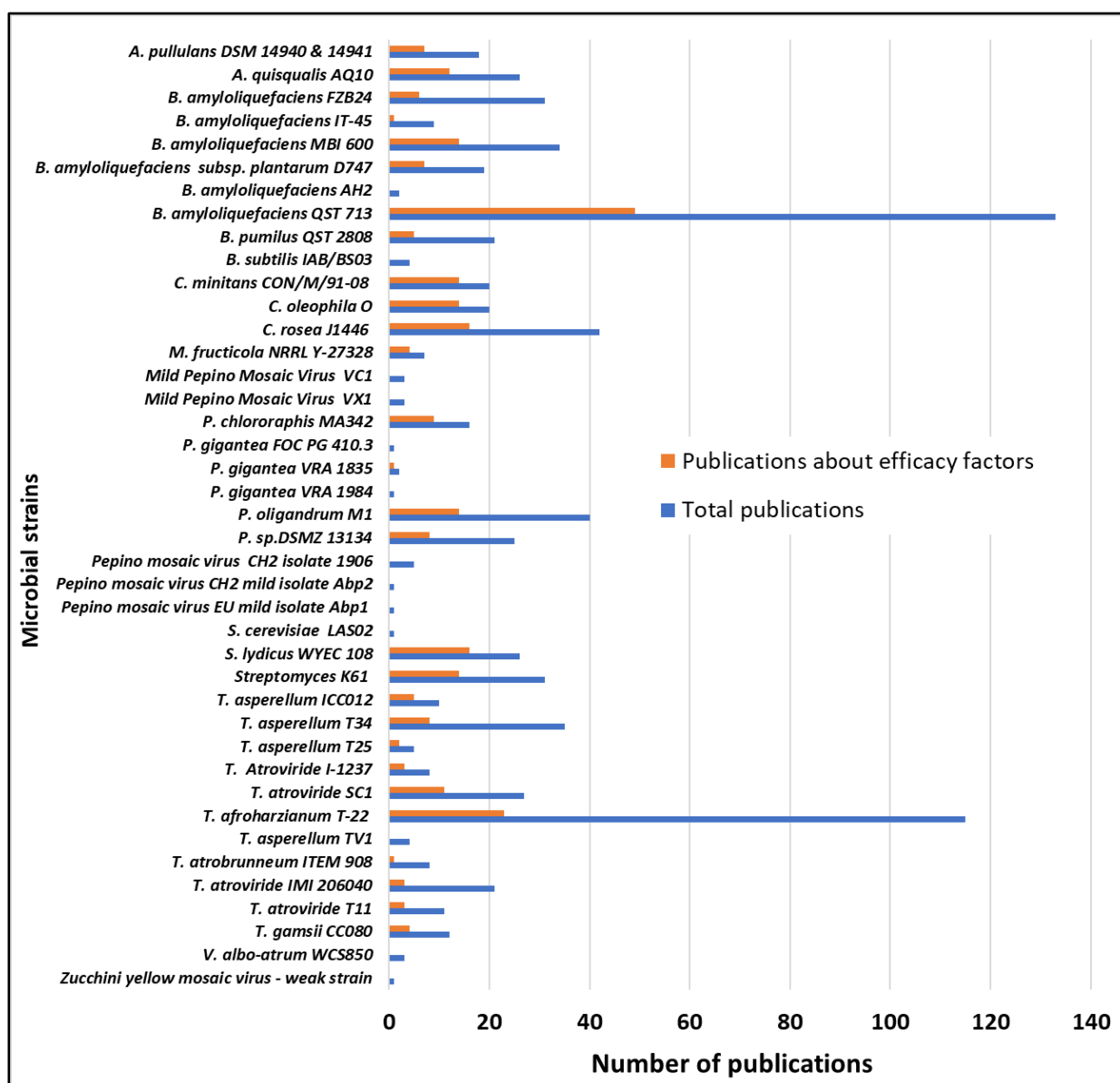


Figure 2 - Publications on factors of efficacy of 41 microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.

Strains are presented in alphabetical order (refer to Table 1 for the full names of species)

In a third step, an in-depth analysis of publications was carried out on the information available on factors of efficacy. While certain publications concerned the effect of one single factor on one specific MBCA strain, it was common that they included results for different factors, possibly comparing their effects on several MBCA strains. This was the case for example for a report on biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries, which presented results on the effect of timing of application, temperature and relative humidity on the protective efficacy of six commercial biocontrol products (Fedele et al., 2020). To facilitate quantitative analyses in the present review, the data from each publication were thus entered in a database that compiled individual “information bits”, each describing the effect of a single factor on the protective efficacy of a single MBCA strain. The above-mentioned publication on biocontrol of *B. cinerea* on grapes, for example, led to 15 information bit entries in the database. Overall, this analysis led

to the identification and coding of 381 information bits.

Four main categories of efficacy factors were distinguished as described above (cropping practices, properties of the biocontrol agent, environmental conditions and properties of the target pathogen or disease), each divided into sub-categories to accommodate related individual factors. Based on the type and abundance of information found in published studies, the final number of sub-categories used to compile the available data on MBCA strains approved in the EU (Figure 3) represented only a fraction of the various possible efficacy factors presented in Figure 1. For example, no information could be found on the effect of biotic environmental conditions, or of the (bio)chemical environment on the protective efficacy of strains approved in the EU.

Cropping practices	Timing of application	Application methods	Compatibility with chemical pesticides	Compatibility with other protection methods	Crop variety
Environnemental conditions	Temperature	Relative humidity	Others (pH, radiation, ...)		
Properties of the biocontrol agent	Survivability	Concentration and formulation			
Properties of the pathogen	Susceptibility to biocontrol agent	Inoculum pressure			

Figure 3 - Groups and sub-groups of efficacy factors used to compile the information provided in publications on the protective efficacy of MBCA strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.

Furthermore, the availability of information differed greatly among those categories and sub-categories of factors that were documented. It was most abundant for the effect of cropping practices on the protective efficacy of biocontrol strains, comprising more than 55 % of the 381 inventoried information bits, and most scarce for the effect of the properties of the targeted plant pathogen (Figure 4). Furthermore, the distribution of information among biocontrol strains was very heterogeneous and highlighted knowledge gaps for many of the strains (Figure 5). Information was available in the four categories of factors for only 7 of the strains, and it was missing for 21, 6, 5 and 2 of the strains, respectively, on the effect of properties of the pathogen, on environmental conditions, on properties of the biocontrol agent and on cropping practices. While 61 information bits were inventoried for the best documented strain (*B. amyloliquefaciens* QST 713), only one or two were available for five of the strains (Figure 5).

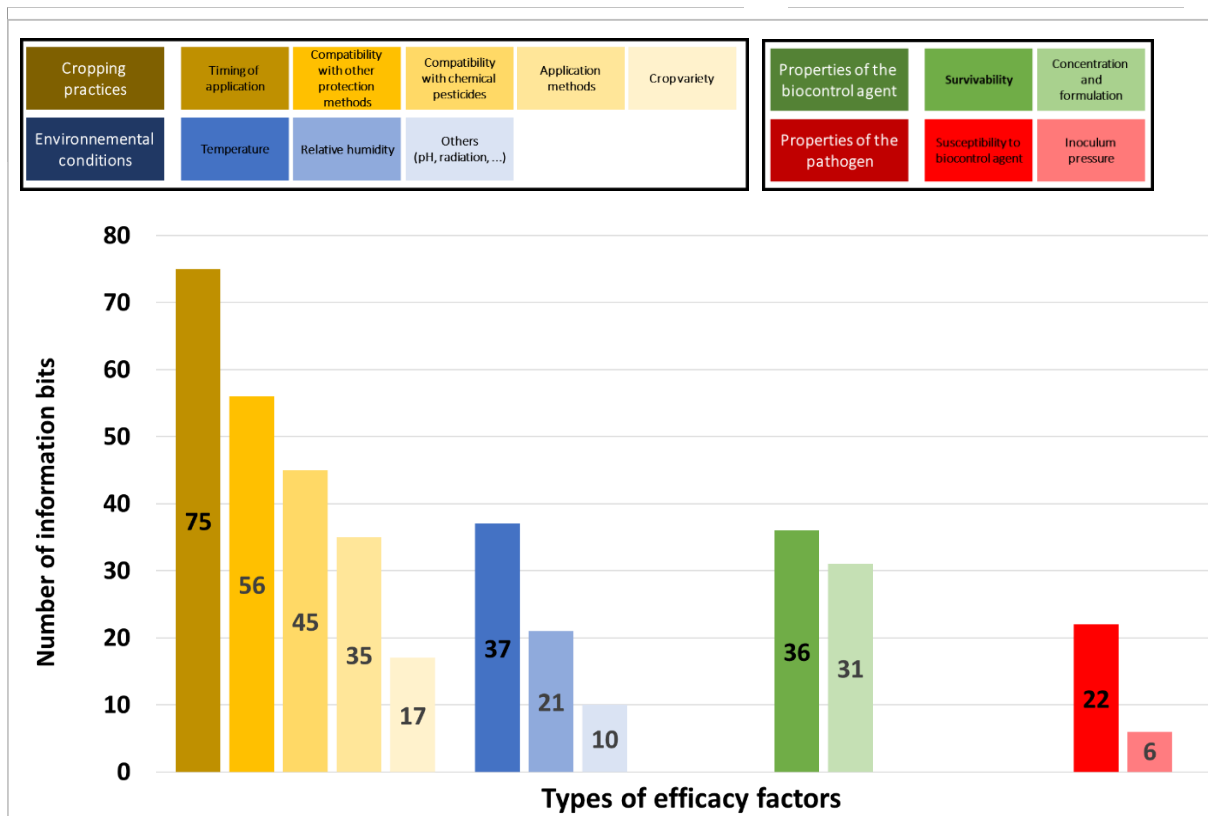


Figure 4 - Numbers of inventoried information bits on factors of efficacy of microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.

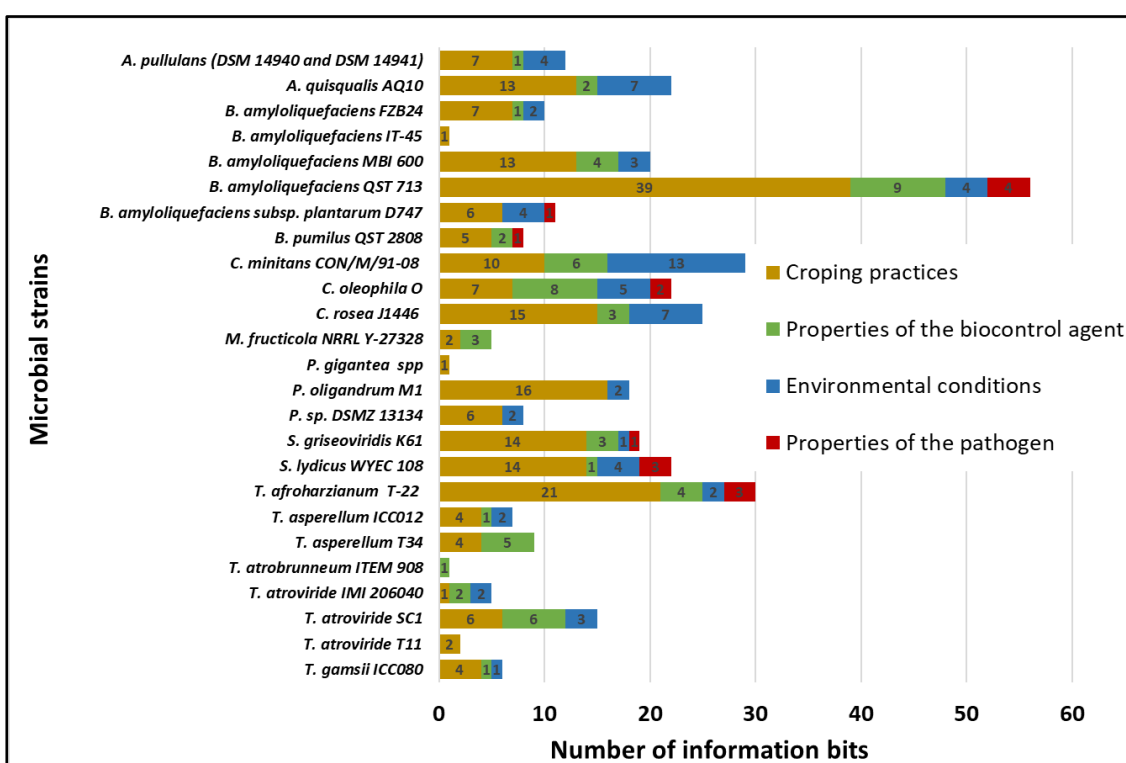
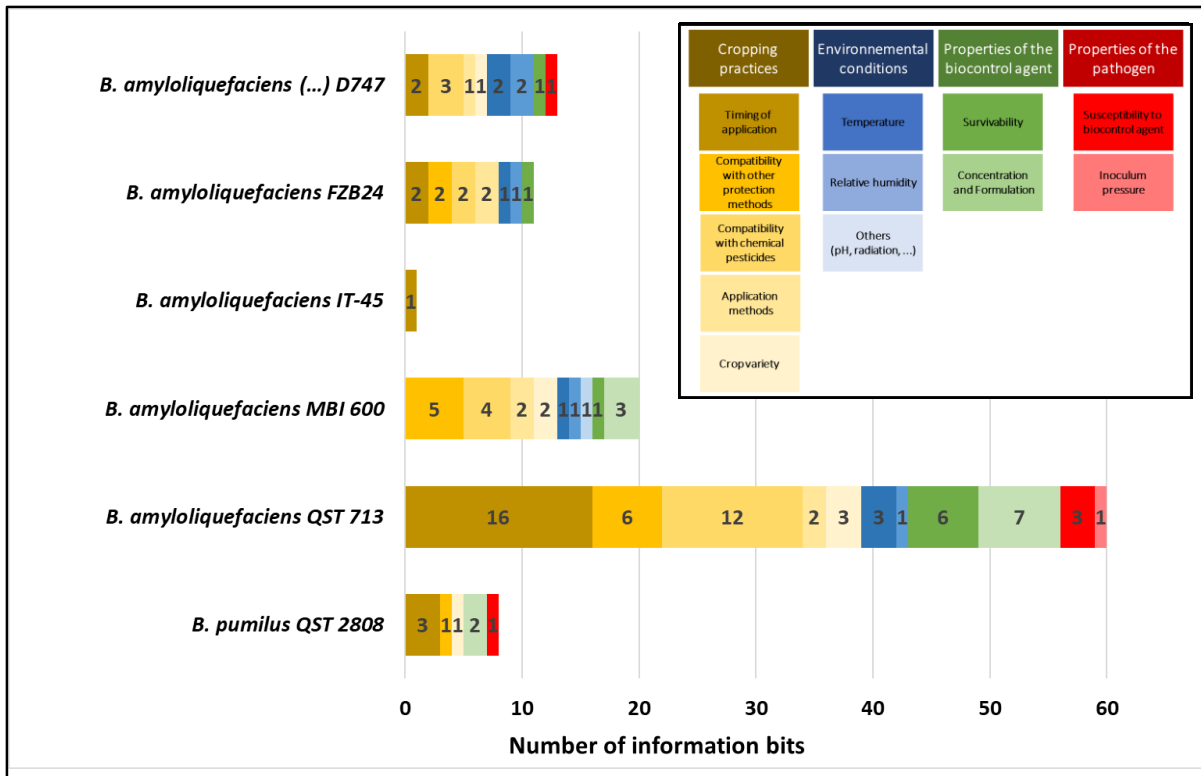


Figure 5 - Distribution of information bits about efficacy factors among microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens. Strains are presented in alphabetical order (refer to Table 1 for the full names of species)

Even when information on a strain was available for one category of factors, it was often limited to a few of all possible individual factors. This is exemplified in Figure 6 for strains of *Bacillus* sp. and *Trichoderma* sp. For both genera, knowledge gaps were heterogeneously distributed among strains and categories of factors. Two strains (*B. amyloliquefaciens* QST713 and *T. afroharzianum* T22) concentrated a high proportion of all available information and were well documented. For other strains, data in the category “Cropping practices” were most frequently present on the effect of the timing of application and mostly missing for the effect of crop variety (Figure 6). In the category “Properties of the biocontrol agent”, data were mostly available on the survivability of the microorganism, while in the category “Environmental conditions”, most information was focused on the effect of temperature, as well as on that of relative humidity in the case of *Bacillus* sp. The most poorly documented factor was “Properties of the pathogen” (three of the strains of *Bacillus* and one of *Trichoderma*), with information mostly focused on the susceptibility of the pathogen to the biocontrol agent (Figure 6).

A. Strains of *Bacillus* sp.



B. Strains of *Trichoderma* sp.

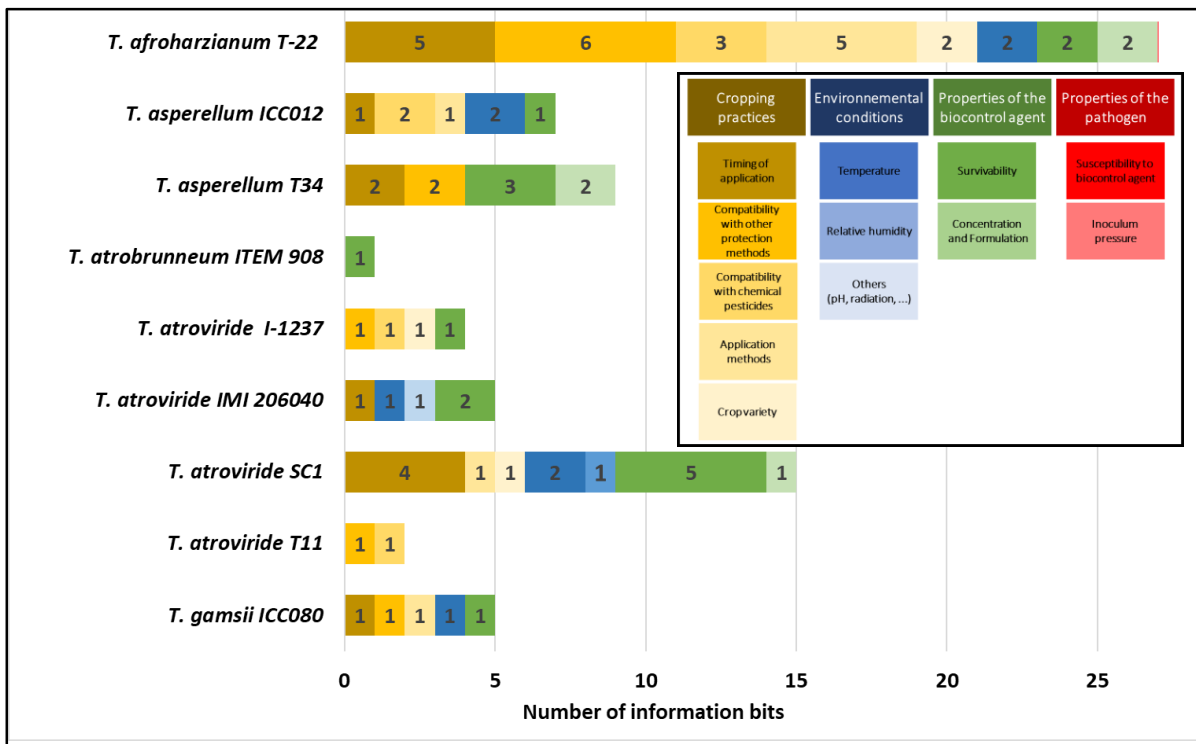


Figure 6 - Distribution of information bits on factors influencing the protective efficacy of strains of *Bacillus* sp. (A) and *Trichoderma* sp. (B).

Strains are presented in alphabetical order (refer to Table 1 for the full names of species)

Applicability of available scientific information toward guiding farmers in their use of biocontrol products

Turning published scientific research into practical management advice is a challenge that requires careful consideration of available information (Bullock and Bullock, 2000). Regardless of its academic interest, the applicability of knowledge for the construction of farmer guidelines may vary depending on the specific scientific objectives and experimental approach of the studies. For example, results from experiments conducted *in vitro* on a nutrient medium at different constant temperatures may provide valuable insight in the potential effect of temperature on the antagonism of a biocontrol agent against a target pathogen. However, the information may not be sufficient to make direct inferences on its actual effect in field conditions, where temperatures will fluctuate and the context of use of biocontrol will generally be much more complex, possibly affecting the production and release of antagonistic compounds by the biocontrol agent.

All information bits inventoried in the present review were thus examined for their level of applicability toward the formulation of concrete advice for farmers. An information bit was considered as directly applicable if it could be put in practice by farmers or farm advisors without requiring contextualization or integration with supplementary research data. It usually concerned results from research carried out on plants (rather than *in vitro*) in conditions sufficiently representative of commercial situations, and specifically evaluating the effect of a factor on the protective efficacy of the biocontrol agent. Examples of information bits and their applicability assessment are presented in Table 2 for *B. amyloliquefaciens* QST 713, the strain for which the highest amount of information was documented in the present review.

Table 2 - Examples of applicability assessments for information bits inventoried on efficacy factors of *Bacillus amyloliquefaciens* QST 713.

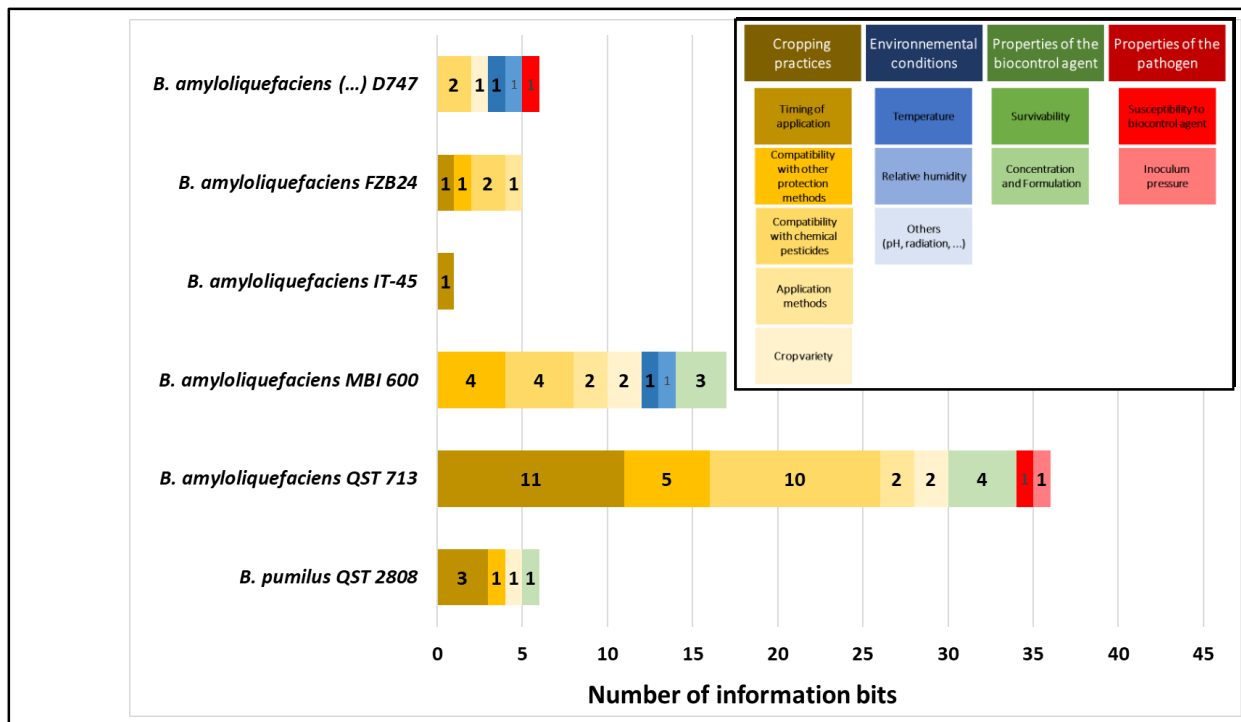
Factor of efficacy	Direct applicability	Target pathogen	Crop / substrate	Experimental context	Information bit: effect of the factor on biocontrol efficacy	Reference
Timing of application	yes	<i>Didymella bryoniae</i>	Cucumber	<i>in planta</i> (greenhouse)	Only treatment 1 day before pathogen inoculation reduced disease incidence on fruit (by 50 %)	(Punja et al. 2019)
	no	<i>Botrytis cinerea</i>	Begonia	detached leaf disks (growth chamber)	No difference between 24h before, simultaneously and 24h after inoculation (65-60 % disease reduction)	(Piermann et al. 2023)
Compatibility with other protection methods	yes	<i>Microdochium</i>	Annual bluegrass	<i>in planta</i> (field trial)	Addition of rolling did not increase efficacy (50 % disease reduction)	(Mattox et al. 2018)
	no	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. <i>radicis cucumerinum</i>	Agar medium	<i>in vitro</i> (Petri plates)	Combination with vermicompost tea provided no added inhibition of pathogen growth	(Wylie and Punja 2021)

Factor of efficacy	Direct applicability	Target pathogen	Crop / substrate	Experimental context	Information bit: effect of the factor on biocontrol efficacy	Reference
Compatibility with chemical pesticides	yes	<i>Podosphaera aphanis</i> f.sp. <i>fragariae</i>	Strawberry	<i>in planta</i> (greenhouse)	Not affected by fungicides (sulphur, penconazole, azoxystrobin, polyoxin, kresoxim methyl and tetraconazole)	Fiamingo et al. 2007
	/	/	/	/	/	/
Application methods	yes	<i>Blumeria graminis</i> f.sp. <i>tritici</i>	Winter wheat	<i>in planta</i> (field trial)	No efficacy increases with the adjuvant Silwet® Gold (30 % disease reduction)	(Matzen et al. 2019)
	/	/	/	/	/	/
Variety	yes	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>actinidiae</i>	Kiwi	<i>in planta</i> (greenhouse)	No protection on <i>A. deliciosa</i> and 40 % on <i>A. chinensis</i>	(Biondi et al. 2021)
	/	/	/	/	/	/
Survivability	/	/	/	/	/	/
	no	/	Tomato	<i>in planta</i> (greenhouse)	The strain can survive up to 4 weeks on the surface of tomato fruits	(Punja et al. 2016)
Concentration and formulation	yes	<i>Septoria glycines</i>	Soybean	<i>in planta</i> (field trial)	Increasing dose from 1L/ha to 4L/ha reduced disease incidence by 50 % but not severity	(Mantecón 2008)
	no	mixture of 3 damping off fungi	Zucchini	potted seedlings (growth chamber)	82 % of protection at concentration of 6×10^7 CFU mL ⁻¹ but only 32 % at 2×10^7 UFC mL ⁻¹	(Solano-Báez et al. 2021)
Temperature	yes	<i>Penicillium</i> sp. and <i>Rhizopus stolonifer</i>	Tomato	harvested fruit (commercial storage room)	Rot incidence on treated fruits reduced by 45 % at 13 °C; 38 % at 21 °C	(Punja et al. 2016)
	no	<i>Botrytis cinerea</i>	Grapes	detached berries (growth chamber)	Efficacy best at 25 °C; reduced by 20 % at 20°C & 30 °C; by 40 % at 15°C	(Fedele et al. 2020)
Relative humidity	/	/	/	/	/	/
	no	<i>Botrytis cinerea</i>	Grapes	detached berries (growth chamber)	HR levels (100, 90, 80, 60 %) give various levels of protective efficacy (0, 40, 40, 100 %)	(Fedele et al. 2020)
Susceptibility to biocontrol agent	yes	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>actinidiae</i>	Kiwi	<i>in planta</i> (greenhouse)	Same inhibition between PSA strain (biovar 1, strain NCPPB 3739, biovar 3, strains CRA-FRU 3.1 and DISTAL 9312)	(Biondi et al. 2021)
	no	<i>Rhizoctonia</i> spp	Agar medium	<i>in vitro</i> (Petri plates)	131 <i>Rhizoctonia</i> isolates have diverse levels of susceptibility to biocontrol agent	(Muzhinji et al. 2018)
Inoculum pressure	yes	<i>Puccinia striiformis</i>	Winter wheat	<i>in planta</i> (field trial)	60 % efficacy under moderate disease pressure; <30 % under high pressure	(Reiss and Jorgensen 2017)
	/	/	/	/	/	/

Focusing on directly applicable data notably decreased (by more than 36 % on average) the volume of information available for each biocontrol strain. Furthermore, this loss was not similar across all factors of efficacy. It was low for factors linked to cropping practices, and particularly high for factors linked to environmental conditions and to properties of the biocontrol agents, as shown in Figure 7 for strains of *Bacillus* and *Trichoderma*. Most studies on the effect of cropping practices were carried out in the field

or under similar conditions. In contrast, the majority of studies on the effect of temperature or relative humidity on biocontrol were carried out under highly controlled constant conditions, possibly on seedlings or detached organs. In most cases, conducting studies at field level, or in conditions representative of the fluctuations and complexity of the field situations, would represent a major experimental challenge and mobilize costly resources. It can also be hypothesized that such investigations in commercial contexts, as well as studies on the properties of the biocontrol agents, better meet the needs of companies marketing the biocontrol agents, who do not necessarily publish their results in peer-reviewed journals, than the scientific objectives of academic research groups.

A. Strains of Bacillus sp.



B. Strains of Trichoderma sp.

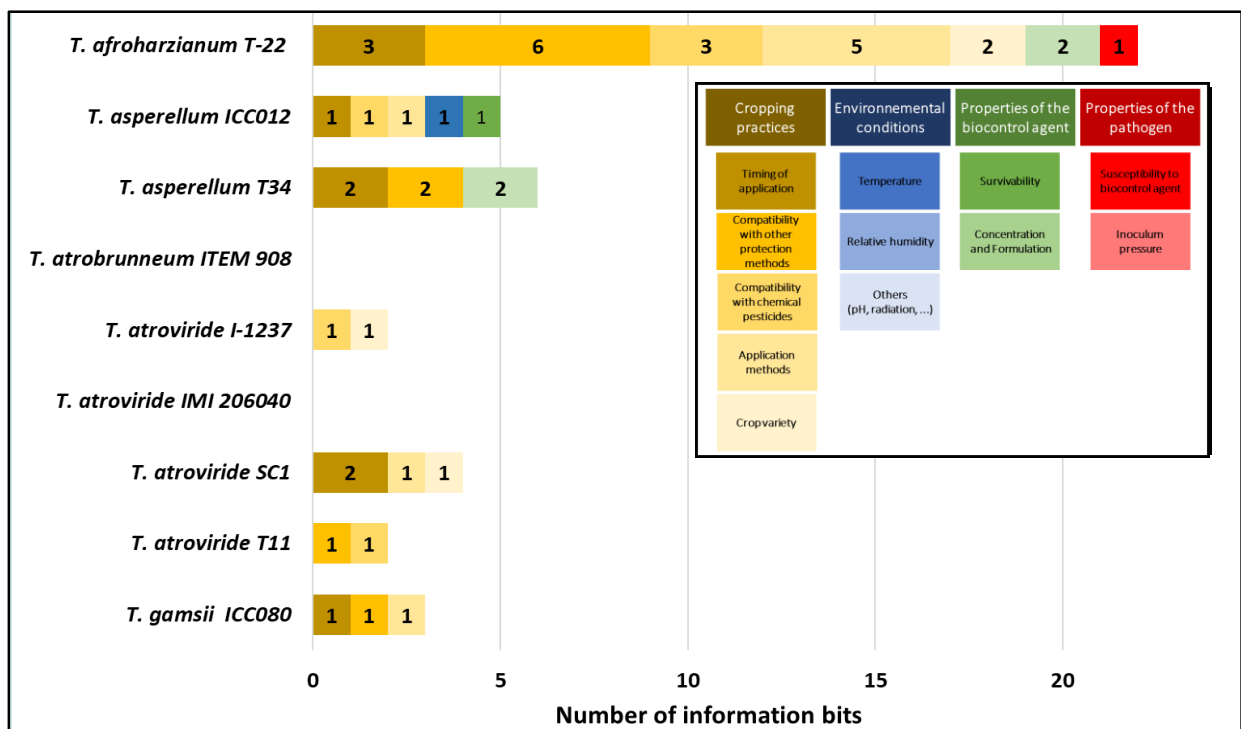


Figure 7 - Distribution of directly applicable information bits on factors influencing the protective efficacy of strains of *Bacillus* sp. (A) and *Trichoderma* sp. (B).

Strains are presented in alphabetical order (refer to Table 1 for the full names of species)

Considering the crop of application and the target pathogens: a source of further fragmentation of available information

Several MBCAs have been evaluated for their protective effect on different crops against various plant pathogens. In most cases it was shown that the efficacy of a strain can be quite different, depending on the crop to which it is applied and the targeted pathogen. This may be because the modes of action mobilized by a biocontrol agent and the virulence factors of the pathogen are often specific to host-pathogen interactions. Thus, it may not be assumed that factors of efficacy would affect identically a biocontrol agent in a variety of pathosystems.

Consequently, it is important to carefully evaluate and select the appropriate MBCA strain for each crop and pathogen combination to ensure effective disease control. Considering specific crops and pathogens in the analysis of published data on factors of efficacy may result in tremendous fragmentation of available information, as illustrated in Table 3 for *B. amyloliquefaciens* QST 713 and *T. afroharzianum*T22, two of the best documented MBCA strains. This fragmentation further accentuates the number of knowledge gaps. In fact, most of the time, published information has been restricted to the effect of a factor on a single crop - disease combination, possibly because of issues with the novelty of reports drives the success of publication in peer-reviewed scientific journals.

Table 3 - Distribution of information bits on the efficacy of MBCAs according to the pathosystems

A: case of *Bacillus amyloliquefaciens* QST 713

Group	Pathosystems		Numbers of information bits		References
	Crop	Pathogen	directly applicable	not directly applicable	
Arable crops	Canola	<i>Plasmodiophora brassicae</i>		1	(Peng et al., 2014)
	Oats	<i>Blumeria graminis</i>	3		(Matzen et al., 2019)
	Rice	<i>Rhizoctonia solani</i>		1	(Sison, 2014)
	Spring barley	<i>Blumeria graminis</i>	3		(Matzen et al., 2019)
	Soybean	<i>Phakopsora pachyrhizi</i>	2		(Twizeyimana and Hartman 2019 ; Dorighello et al. 2020)
		<i>Septoria glycines</i>	1		(Mantecon, 2008)
		<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>		1	(Zeng et al., 2012)
	Triticale	<i>Blumeria graminis</i>	3		(Matzen et al., 2019)
Wheat	<i>Blumeria graminis</i>	3		(Matzen et al., 2019)	

Group	Pathosystems		Numbers of information bits		References	
	Crop	Pathogen	directly applicable	not directly applicable		
		<i>Puccinia striiformis</i>	3		(Reiss and Jorgensen, 2017)	
Ornamentals	Begonia	<i>Botrytis cinerea</i>		2	(Piermann et al., 2023)	
		<i>Fusarium foetens</i>		1	(Tian and Zheng, 2013)	
	Bluegrass	<i>Microdochium nivale</i>	1		(Mattox et al., 2018)	
	Cornus sericea	<i>Phytophthora ramorum</i>	1		(Bailey et al., 2012)	
	<i>Gaultheria shallon</i>	<i>Phytophthora ramorum</i>	1		(Bailey et al., 2012)	
	<i>Ranunculus asiaticus</i>	<i>Pseudomonas viridiflava</i>	1		(Fascella et al., 2015)	
	<i>Rhododendron</i>	<i>Phytophthora ramorum</i>	1		(Bailey et al., 2012)	
Perennial fruit crops and grapes	Acid lime	<i>Xanthomonas citri subsp. citri</i>	1		(Ibrahim et al., 2016)	
	Apple	<i>Botryosphaeria dothidea & Colletotrichum acutatum</i>	1		(Everett et al., 2007)	
		<i>Venturia inaequalis</i>	1		(Ayer et al., 2021)	
	Apricots and Peaches	<i>Monilinia spp</i>	1		(De Curtis et al., 2019)	
	Cherry and Plum	<i>Monilinia laxa</i>	1		Rungjindamai et al. 2014	
	Grapes	<i>Botrytis cinerea</i>			3	(Fedele et al., 2020)
			1	1	(Rotolo et al., 2018)	
				1	(Calvo et al., 202)	
	Kiwi	<i>Pseudomonas syringae pv. actinidiae</i>	1	1	(Biondi et al., 2021)	
	Mango	Postharvest rot pathogens ^a	1		(Gava et al., 2019)	
	Pear	<i>Erwinia amylovora</i>	1		(Schoofs et al., 2015)	
Orange	<i>Penicillium digitatum</i>	1		(Forner et al., 2013)		
	<i>Xanthomonas citri</i>	1		(Ramos et al., 2022)		
Vegetables	<i>Agaricus bisporus</i>	<i>Trichoderma aggressivum f. europaeum</i>	1		(Potočnik et al., 2018)	
	Bean	<i>Xanthomonas axonopodis pv. Phaseoli</i>	1		(Belete et al., 2021)	
	Cucumber	<i>Podosphaera xanthii</i>	1		Ni and Punja 2021	
			1		(Punja et al., 2019)	
		<i>Pythium aphanidermatum</i>	1		(Punja et al., 2019)	
		<i>Fusarium oxysporum</i>	1		(Punja et al., 2019)	
		<i>Didymella bryoniae</i>	1		(Punja et al., 2019)	
	Lettuce	<i>Pseudomonas spp.</i>	1		(Orel, 2020)	
Storage decay pathogens ^b			1	(Ozer and Bayraktar, 2015)		

Group	Pathosystems		Numbers of information bits		References
	Crop	Pathogen	directly applicable	not directly applicable	
	Pepper	Damping off pathogens ^c	1		(Jo et al., 2014;
		<i>Leveillula taurica</i>	1		(Hong et al., 2014)
		<i>Xanthomonas euvesicatoria</i>	1		(Sevic et al., 2019)
	Potato	<i>Alternaria solani</i>	1		(Stridh et al., 2022)
		<i>Fusarium spp</i>	1		(Yikilmazsoy and Tosun, 2021)
		<i>Rhizoctonia spp</i>		1	(Muzhinji et al., 2018)
	Radish	<i>Rhizoctonia solani</i>		1	(Wylie and Punja, 2021)
	Strawberry	<i>Botrytis cinerea</i>	1		(Menzel et al. 2016)
		<i>Podosphaera aphanis</i>	2		(Fiamingo et al., 2007)
	Tomato	<i>Corynespora cassiicola</i>	1		(Pernezny et al. 2005)
		<i>Penicillium spp; Rhizopus stolonifer</i>		2	(Punja et al., 2016)
		<i>Xanthomonas euvesicatoria</i>	1		Roberts et al. 2008;
		<i>Xanthomonas sp.</i>	1		(Abbasi and Weselowski, 2015)
	Watermelon	<i>Didymella bryoniae</i>	1		(Keinath, 2016)
Zucchini	Damping off pathogens ^d		2	(Solano-Báez et al., 2021)	
	<i>Podosphaera xanthii</i>	1		(Gilardi et al., 2012)	

B: case of *Trichoderma afroharzianum* T-22

Group	Pathosystems		Numbers of information bits		References
	Crop	Pathogen	directly applicable	not directly applicable	
Arable crops	Barley	<i>Bipolaris sorokiniana</i>	1		Aada and Hack 2013
	Chickpea	<i>Pythium ultimum</i>	2		Leisso et al. 2009
	Corn	<i>Fusarium verticillioides</i>	1		Ferrigo et al. 2014
	Soybean	<i>Phakopsora pachyrhizi</i>	1		Twizeyimana and Hartman 2019
	Wheat	<i>Fusarium sp.</i>		1	Inch 2010
Perennial fruit crops and grapes	Apple	<i>Penicillium expansum</i>	2		Batta 2004
Vegetables	Cucumber	Root rot pathogens ^e	2		Yücel et al. 2009
	Ginger	<i>Fusarium oxysporum f.sp. zingiberi</i>	1	1	Mersha and Ibarra-Bautista 2022

Group	Pathosystems		Numbers of information bits		References	
	Crop	Pathogen	directly applicable	not directly applicable		
	Gooseberry	<i>Sphaerotheca mors uvae</i>	1		Picton and Hummer 2003	
	Lettuce	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	1		Çolak Ateş 2019	
	Radish	<i>Rhizoctonia solani</i>	1		Khadka and Miller 2021	
	Strawberry	<i>Botrytis cinerea</i>			1	Albano et al. 2009
					3	Hjeljord et al. 2000
			1			Kovach et al. 2000
		<i>Mucor piriformis</i>			3	Hjeljord et al. 2000
Tomato	<i>Fusarium oxysporum f. sp. Lycopersici</i>	1			Yiğit and Dikilitaş 2007	
Blueberry	<i>Botrytis cinerea</i>	1			Abbey et al. 2022	
Ornamentals	Bentgrass	<i>Claviceps homoeocarpa</i>	1			Lo et al. 1997
		<i>Pythium sp.</i>	1			Lo et al. 1997
		<i>Rhizoctonia solani</i>	1			Lo et al. 1997
	<i>Cornus florida</i>	<i>Phytophthora cinnamomi</i>	1			Brown et al. 2019
	Cyclamen	<i>Fusarium sp.</i>	1			Elmer and McGovern 2004
	Red clover	<i>Calonectria pauciramosa</i>			1	Vitale et al. 2012
	Turfgrass	<i>Microdochium sp.</i>	1			Mattox et al. 2018

a: *Colletotrichum* spp, *Fusicoccum aesculi* Corda, *Neofusicoccum parvum* and *Lasiodiplodia theobroma*

b: Unspecified decay pathogens

c: *Pythium ultimum* & *Rhizoctonia solani*

d: *Phytophthora capsici*; *Rhizoctonia solani*; *Fusarium oxysporum*

e: *Rhizoctonia solani*, *Fusarium solani*

Conclusion and perspectives

The use of microbial biocontrol agents (MBCA) to manage plant diseases has gained attention in recent years as an alternative to conventional chemical methods. In this review, we have identified 41 MBCAs that are currently used in Europe, with *Trichoderma* and *Bacillus* species being the most commonly listed. Our hypothesis is that there is a substantial amount of knowledge available on the efficacy, safety, and practical applications of MBCA. However, our review reveals that while microbial biocontrol agents have gained popularity and use, the information specifically available on factors of efficacy of registered biocontrol strains is limited. In fact, on average there are fewer than 20 publications per strain providing concrete information about efficacy factors. The categorization of those efficacy factors into four groups (crop practices, pathogen factors, environmental conditions, and biocontrol agent factors) highlighted the heterogeneity of information among and inside them in terms of quality and quantity. The

information further fragmented into levels of applicability, resulting in even fewer data available for each MBCA. This situation revealed the limitation of using such data to guide farmers and advisors. Further reduction of information (nearly 40 %) resulted from an analysis of the direct applicability of the data to formulate advice for the farmers. In addition, we observed that different pathogen-crop systems are represented, which again leads to, a very limited number of studies for each system.

Altogether, information is fully lacking for most biocontrol strains on a great majority of all possible factors that may influence their efficacy on specific crop-pathogen combinations. Thus, this analysis clearly demonstrated that tremendous amounts of additional data will be needed to foster the adoption of MBCAs by farmers as part of their integrated pathogen management strategies.

Several avenues may be considered to address this challenge. One would be to increase the number of research projects dedicated to identifying key efficacy factors of commercial biocontrol strains. Most of the data currently published on microbial biocontrol are not about commercial strains and not about efficacy factors. Efforts must be made to produce new scientific data on already commercialized strains, to complement the information generated by biocontrol companies. In addition, clear strain identification in the abstract or key word is also crucial, to avoid that potential knowledge would be left behind when searching for efficacy data for a specific strain. For the same purpose, uniformization of factor names and definitions could greatly improve the search of information in the publications. It will be faster and easier and give the opportunities of more scientific to identify gap of knowledge and searching into least studied factors.

Besides, incentives also need to be made to foster the publication of “negative data” about the protective efficacy. Reports documenting situations that lead to an absence of protection may be equally useful as those on successful biocontrol, to provide guidance to farmers. Another way to address the challenge could be to improve the quantity of searchable published data through a standardization of methods for evaluating MBCA efficacy factors.

The present analysis may also have raised questions about the role of public research on those topics. Is it in the mission of public research to provide knowledge on factors of efficacy of commercialized MBCA strains, or does it belong to private companies and extension services? In fact, companies produce a lot of specific data about their own microbial strains alongside with procedures of registrations. However, those data are for the most part confidential and focused on efficacy trials and studies of the mechanisms of action, rather than on efficacy factors. Indeed, their goal is to provide evidence on the efficacy of their product for the registration dossier, rather than to explain how to use or improve their product. But, alongside with the registration procedure, it could be requested for companies to test at least the most common factors in standardized experimentations for their newly develop products. It seems possible for biocontrol companies to test for instance the effect of temperature on the protective efficacy or survivability of the strain on plant leaves to fulfil the interrogation of the future potential users. Even more so that those data are most likely already generated but remain confidential and unpublished.

Another pool of publication could be found in technical publications. Even if their interest is indisputable

for further research for promoting biocontrol uses, their accessibility (not English and no standardized methods) raised a lot of problematics to integrate their knowledge.

During this review, the global lack of data on MBCA efficacy and the difficulties to find and categorize them revealed the huge challenge for farmers and other stakeholders to make informed decisions about the use of MBCAs in their daily agricultural practices. During the analysis process of the publications, a data base was created to gather and analyze all publications. This was later used for developing a tool for the dissemination of knowledge about efficacy factors (Pressecq et al., 2022). The findings of our review can help to guide future research on MBCAs, and ultimately lead to more effective and sustainable management of plant diseases in Europe.

References

All references of chapter 2 are placed in the global references section.

List of Figures Chapter 2

Figure 1 - Factors that may influence the protective efficacy of microbial biocontrol agents against diseases.	57
Figure 2 - Publications on factors of efficacy of 41 microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.....	63
Figure 3 - Groups and sub-groups of efficacy factors used to compile the information provided in publications on the protective efficacy of MBCA strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.	64
Figure 4 - Numbers of inventoried information bits on factors of efficacy of microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.....	65
Figure 5 - Distribution of information bits about efficacy factors among microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.	66
Figure 6 - Distribution of information bits on factors influencing the protective efficacy of strains of <i>Bacillus</i> sp. (A) and <i>Trichoderma</i> sp. (B).	67
Figure 7 - Distribution of directly applicable information bits on factors influencing the protective efficacy of strains of <i>Bacillus</i> sp. (A) and <i>Trichoderma</i> sp. (B).	71

List of Tables Chapter 2

Table 1- Scientific peer-reviewed publications on microbial strains approved for use in the EU as active substances in biocontrol products against plant pathogens.....	61
Table 2 - Examples of applicability assessments for information bits inventoried on efficacy factors of <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> QST 713.	68
Table 3 - Distribution of information bits on the efficacy of MBCAs according to the pathosystems.....	72

CHAPITRE 3 - L'expérimentation pour approfondir la connaissance des facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle : Étude de cas d'exploration des facteurs climatiques affectant l'efficacité de l'agent de biocontrôle AQ10 pour contrôler l'oïdium de la tomate.

1. Présentation de l'article 3 du troisième article

Ce chapitre retrace un essai visant à produire des données sur les facteurs d'efficacité d'un agent de biocontrôle connu depuis plus de 30 ans mais dont l'utilisation reste limitée en maraîchage. Il valorise 2 stages antérieurs à la thèse et un stage de fin d'étude de Master 2 (financé par le GIS Picleg). J'ai géré et encadré ce dernier stage de bout en bout, depuis le processus de recrutement jusqu'à la validation de son mémoire. Cette expérimentation a eu lieu pendant la période de pandémie CoViD-19 de juin 2020 à aout 2020 et n'a été possible que grâce à la participation et au soutien de l'équipe Mycologie et de l'unité expérimentale compte tenu de la très grande quantité de plantes et de travaux (notamment de comptage) que cette expérimentation a nécessité. Les analyses statistiques ont amené à la participation d'experts en intelligence artificielle pour tenter d'obtenir des résultats plus probants. Cependant la très grande variabilité des données et leur nombres restreint a fortement limité les possibilités.

2. Résumé en anglais.

The case study examines the climatic factors that influence the efficacy of the biocontrol agent AQ10 in controlling powdery mildew on tomatoes. Powdery mildew is a common fungal disease that affects tomato growth and reduces yields. AQ10 is a biopesticide used to control this disease. The study was carried out in a tomato greenhouse, and the researchers analyzed how variable climatic conditions, such as temperature, humidity, could affect the efficacy of AQ10. The results showed that efficacy is highly variable among climatic conditions less than 30 % to more than 90 % of disease reduction with no clear correlations. The highest efficacy was achieved with 24 °C and 86 % of relative humidity. This study highlights the importance of taking climatic factors into account when using biocontrol agents such as

AQ10 in plant disease management. Climatic conditions can vary considerably from one region to another, meaning that the efficacy of a biopesticide can be influenced by the local microclimate. Understanding these factors is essential to optimize the use of biocontrol agents and improve sustainable crop management, reducing dependence on chemicals.

3. Article

Étude de cas : Exploration des facteurs climatiques affectant l'efficacité de l'agent de biocontrôle AQ10 pour contrôler l'oïdium de la tomate.

Introduction

L'utilisation de solutions de biocontrôle pour la gestion des maladies des plantes doit encore surmonter de nombreux défis afin d'en assurer un usage efficace et stable (voir chapitre 1). Une solution envisagée pour optimiser leur utilisation au champ serait d'établir des règles de décision, basées sur des connaissances scientifiques et techniques fiables, à destination des agriculteurs. La mise en place de ces règles de décision se heurte à un manque de connaissances sur deux aspects majeurs. Tout d'abord les propriétés biologiques et l'écologie des agents de biocontrôle microbiens, sur leur interaction avec les agents phytopathogènes cibles ainsi que sur les systèmes de cultures (voir chapitre 2). En effet, les études traitant des facteurs modulant l'efficacité protectrice de ces micro-organismes contre les maladies des plantes sont finalement peu nombreuses et distribuées sur différents pathosystèmes. En outre, quand elles existent, ces études sont pour la plupart réalisées en conditions contrôlées, loin des conditions commerciales d'utilisation de ces produits. La conception d'outils d'aide à la décision pour optimiser leur utilisation en pratique nécessite donc l'acquisition de nouvelles données sur les facteurs qui modulent l'efficacité protectrice des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes.

Dans ce cadre, une expérimentation en conditions de production de la tomate en sol sous abri froid a été mise en place pour identifier les conditions favorisant l'efficacité de protection de la tomate par l'agent de biocontrôle *Ampelomyces quisqualis* contre l'agent responsable de l'oïdium, *Oidium neolycopersici*. Le champignon *A. quisqualis* est un hyperparasite d'espèces de champignon responsables de l'oïdium sur différentes espèces végétales (Caffi et al., 2022). Son mycélium pénètre dans les hyphes, les conidiophores et les chasmothèces immatures des oïdiums et y forme des pycnides réduisant ainsi la capacité de sporulation sexuée et asexuée du champignon parasité (Carbo et al., 2021; Sztejnberg et al., 1989). Depuis la première expérience de Yarwood (1932), différentes souches d'*A. quisqualis* ont été utilisées pour contrôler les oïdiums (Jarvis and Slingsby, 1977; Philipp and Crüger, 1979). Une souche d'*A. quisqualis* a été isolée en Israël sur la plante sauvage *Catha edulis* (plante psychotrope Yéménite de la famille des Celastraceae dont le nom commun est Kath) et testée avec succès sur concombre, carotte et

mangue pour contrôler les oïdiums en plein champ (Sztejnberg et al., 1989). Cette souche a été formulée et commercialisée dans différents pays sous le nom « AQ10® ». L'effet de ce produit de biocontrôle a été étudié sur différentes cultures d'importance économique comme la vigne (Caffi et al., 2022), les cucurbitacées (Elad et al., 1998), les rosacées (Pasini et al., 1997) et les solanacées (Kumar et al., 2008). Le produit AQ10 est homologué sur différentes cultures en France (fraisier, tomate-aubergine, poivron les cucurbitacées à peau comestibles et non comestibles ainsi que le rosier ; voir <https://ephy.anses.fr/ppp/aq-10>). Son utilisation apporte une efficacité de protection contrastée contre les oïdiums, allant de moins de 10 % à plus de 90 % selon les cultures et les dispositifs expérimentaux utilisées (Daoust and Hofstein, 1996; Giotis et al., 2012; Hofstein et al., 1996; Kiss, 2003; Shishkoff and McGrath, 2002). Les raisons de cette variabilité restent incertaines mais les facteurs liés au microclimat sont majoritairement cités comme étant déterminants pour obtenir une efficacité satisfaisante de cet agent de biocontrôle.

Différentes études ont par exemple mis en évidence un effet de l'humidité relative sur l'efficacité de protection du produit AQ10 contre des agents responsables des oïdiums sur différentes espèces végétales (Tableau 1). Par exemple, d'après Romero et al. (2007), une humidité relative comprise entre 75 % et 80 % réduit l'efficacité de protection du melon contre *Podosphaera xanthii* par rapport à une humidité relative supérieur à 90 % (62 % vs 90 % d'efficacité de protection, respectivement). Ces tendances sont corroborées par des données obtenues in vitro (Tableau 2) qui montrent que plus l'humidité relative est forte, plus la capacité parasitaire d'*A. quisqualis* sur différentes espèces d'oïdium est élevée (Falk and Gadoury, 1995; Philipp and Crüger, 1979; Verhaar et al., 1999). Parallèlement, des études in vitro ont confirmé l'importance de l'humidité relative pour l'expression du mode d'action d'AQ10, c'est-à-dire le parasitisme (tableau 2). De plus, les travaux de Dik et al. (1998) réalisés en conditions contrôlées mais plus réalistes suggèrent qu'une humidité relative fluctuante sur une journée (comprise entre 30 % et 90 %) peut entraîner un échec de la protection. Des essais sur différentes cultures dans des conditions d'humidité relative fluctuantes (tunnels) confirment ce résultat (Brand et al., 2009 ; Giotis et al., 2012; Romero et al., 2007). D'après Giotis (2012), l'échec de la protection du concombre contre *P. xanthii* s'explique par une humidité relative inférieure à 80 % au moment de l'application du produit de biocontrôle et durant les heures suivant cette application.

L'effet de la température sur l'efficacité de la protection engendrée par l'utilisation d'AQ10 a également été étudié (Tableau 3). Par exemple, Brand et al. (2009) montrent que la meilleure efficacité de protection du piment contre *Leveillula taurica* est obtenue à une température constante de 25°C (90 % de protection) comparée à une protection de 35-40 % de protection entre 15 ou 20°C). Une protection stable (autour de 50 %) est obtenue sur courgette contre *P. Xanthii* quelles que soient les conditions de température testées entre 18 et 30°C (Gilardi et al., 2017). Lorsque les températures sont fluctuantes (e.g. écart entre jour et nuit), la protection apportée par AQ10 contre l'oïdium du poivron est réduite à 25-30 % (Brand et al., 2009). Parallèlement des études in vitro ont permis de préciser les conditions optimales de développement du champignon en fonction de la température de l'air (Tableau 4). Les études de Sztejnberg et al. (1990) et (Nguyen et al., 2018) suggèrent ainsi que l'optimum de germination des spores d'*A. quisqualis* est obtenu in vitro autour de 20°C.

Tableau 1 - Effet du produit de biocontrôle AQ10® (*Ampelomyces quisqualis*) sur la réduction de la sévérité de l'oïdium sur les plantes en fonction de l'humidité relative de l'air.

Espèce végétale	Agent responsable de l'oïdium	Condition de l'expérience	Nombre de traitements ; cadence en jours	Humidité relative (HR %)	Réduction de la sévérité de la maladie (%) ^a	Reference
Melon	<i>Podosphaera fusca</i> (syn: <i>P. xanthii</i>)	Chambre climatique	1	HR constante : 90-95 % 75-80 %	90 * 62 *	(Romero et al., 2007)
Courgette	<i>P. xanthii</i>	Chambre climatique	3 ; 7 jours	HR constante : 60-70 %	25*	(Gilardi et al., 2012)
Poivron	<i>Leveillula taurica</i>	Chambre climatique	12 ;14 jours	HR constante : 80-90 %	20*	(Brand et al., 2009)
Concombre	<i>P. xanthii</i>	Chambre climatique	4 ; 7 jours	HR fluctuante : 30-90 % (moyennes jours-nuits)	10	(Dik et al., 1998)
Melon	<i>P. fusca</i> (syn: <i>P. xanthii</i>)	Serre (tunnel)	2 ;10 jours	HR fluctuante : 35-90 %	19 *	(Romero et al., 2007)
Concombre	<i>P. xanthii</i>	Serre (tunnel)	6 ; 7 jours	HR fluctuante : 35-79 % (moyennes jours-nuits)	≈5	(Giotis et al., 2012)
Poivron	<i>L. taurica</i>	Serre (tunnel)	3 ; 14 jours	HR fluctuante : 30-50 % (13h) / 85-90 % (11h)	30*	(Brand et al., 2009)

^a : les données suivies d'une * indiquent, selon les auteurs, une réduction significative de la sévérité de la maladie.

Tableau 2- Effet de la température sur la germination des spores du champignon *Ampelomyces quisqualis* (souche AQ10®)

Type d'essai	Conditions de températures testées	Effet sur la germination des spores d'A. quisqualis	Reference
<i>In vitro</i>	5°C	0 %	(Sztejnberg, Galper et al. 1990)
	10°C	0 %	
	15°C	60 %	
	20°C	90 %	
	25°C	50 %	
	30°C	7 %	
<i>In vitro</i>	15°C	62 %	(Nguyen et al., 2018)
	20°C	76 %	
	25°C	82 %	
	30°C	19 %	
	35°C	0 %	

Tableau 3 - Effet du produit de biocontrôle AQ10® (*Ampelomyces quisqualis*) sur la réduction de la sévérité de l'oïdium sur plantes en fonction de la température de l'air.

Espèce végétale	Agent responsable de l'oïdium	Condition de l'expérience	Nombre de traitement ; cadence en jours	Température (°C)	Réduction estimée de la sévérité de la maladie (%) b	Reference
Poivron	<i>L. taurica</i>	Chambre climatique	12 ; 14 jours	Température constante : 15°C 20°C 25°C	≈40 %* ≈35 %* ≈90 %*	(Brand et al., 2009)
Courgette	<i>P. xanthii</i>	Chambre climatique	2 ; 7 jours	Température constante : 18-22°C 22-26°C 26-30°C	54 %* 48 %* 54 %*	(Gilardi et al., 2017)
Poivron	<i>L. taurica</i>	Serre expérimentale	3 ; 14 jours	Température fluctuante : 20-28 C (13h) 10-15°C (11h)	≈30 %*	(Brand et al., 2009)
Poivron	<i>L. taurica</i>	Serre commerciale	3 ; 14 jours	Température fluctuante Jour : 16-32°C Nuit : 13-19°C	≈25 %*	(Brand et al., 2009)

^a : dans cette étude, l'agent de biocontrôle AQ10 a été testé en association avec l'adjuvant adQoil.

^b : les données suivies d'une * indiquent, selon les auteurs, une réduction significative de la sévérité de la maladie.

Tableau 4 - Effet de l'humidité relative sur la capacité parasitaire du champignon *Ampelomyces quisqualis*. Les souches d'*A. quisqualis* testées dans chacune des études ont été isolées par les auteurs des articles

Espèce végétale et agent pathogène	Conditions testées	Effet sur l'agent pathogène	Reference
Concombre, <i>Sphaerotheca fuliginea</i> (syn. : <i>P. xanthii</i>)	100 % HR	60% des colonies d'oïdium parasitées	(Philipp and Crüger, 1979)
	<80 % HR	Pas de colonie d'oïdium parasitées	
Rose, <i>S. pannosa</i> (syn : <i>P. pannosa</i>)	100 % HR	90 % des colonies d'oïdium parasitées	(Verhaar, Kerssies, et Hijwegen 1999)
	90 % HR	70 % des colonies d'oïdium parasitées	
	70 % HR	<35 % des colonies d'oïdium parasitées	
Vigne, <i>Uncinula necator</i>	2 conditions testées : Sèche Humide (vaporisation d'eau sur la plante)	Pas de parasitisme 67-100 % des colonies d'oïdium parasitées	(Falk and Gadoury, 1995)

L'ensemble de ces études ne reflètent que les données disponibles (in vitro ou in planta, en conditions contrôlées ou naturelles), elles ne permettent pas d'établir avec précision les conditions microclimatiques optimales d'utilisation du champignon hyperparasite *A. quisqualis*. De plus, aucune de ces données ne concerne le pathosystème *O. neolycopersici* sur tomate.

Au cours de la présente étude, nous nous sommes posé les questions suivantes :

1. Quel niveau d'efficacité présente un traitement avec AQ10 pour protéger la tomate contre l'oïdium ?
2. Les facteurs microclimatiques (température et humidité relative de l'air) modulent-ils l'efficacité de cette protection ?
3. Les connaissances produites par cette expérimentation permettent-elles d'établir des règles de décision simples pour une utilisation optimale du produit en se basant sur les données climatiques locales ?

Pour répondre à ces questions, nous avons mis en place une expérience en condition de production quasi-commerciale de la tomate en sol sous tunnel froid.

Matériels et méthodes

Production des plants de tomate

Les expériences ont été menées sur des plants de tomates de la variété Monalbo (INRAE, Pathologie Végétale), sensible à *O. neolycopersici*. Les graines de tomate ont été semées dans du terreau de la gamme Klasmann TS3 et ont été arrosées avec une solution nutritive adaptée (16N-25P-5K+2Mg+Oligo éléments) corrigée pour ajuster le pH à 5. Puis, 7 jours après semis, les plantules produites ont été repiquées dans des pots individuels et placées en serre pendant 8 semaines, où elles ont été arrosées avec la solution nutritive. Les plantes de 9 semaines ont ensuite été plantées en pleine terre dans un tunnel froid (16m x 8m) pour une acclimatation de 3 semaines. Durant toute la durée de l'essai, les plantes ont été fertirriguées au goutte à goutte avec une solution nutritive (Soluveg 16-25-5+2Mg).

Préparation de l'inoculum d'*Oidium neolycopersici*

Le champignon ascomycète phytopathogène *Oidium neolycopersici* étant un parasite obligatoire (ne pouvant survivre sans son hôte), la souche utilisée dans cette étude est conservée sur des plants de tomate dans une chambre climatique dont les conditions de température et d'humidité relative sont contrôlées (température = 22°C, humidité relative = 90 %, photopériode = 14h). Pour inoculer les plantes de tomate dans le tunnel, une suspension de spores asexuées (conidies) du champignon a été réalisée comme suit : de jeunes folioles couvertes de symptômes d'oïdium ont été prélevées, placées dans une bouteille de Schott contenant de l'eau permutée et agitées afin d'en détacher les spores. La concentration de la suspension de spores (sp) ainsi obtenue a été évaluée sous un microscope (x100) à l'aide d'une cellule de Malassez puis ajustée à la concentration de 5.10^3 sp/ml avec de l'eau.

Préparation de la suspension d'*Ampelomyces quisqualis*

Le produit formulé AQ10 utilisé dans cette étude a été fourni par la société Biogard (Italie) et il contient 5.10^9 spores d'*Ampelomyces quisqualis*/g sous la forme de granulés dispersibles dans l'eau. La dose d'AQ10 qui a été utilisée correspond à la dose recommandée par le fabricant, à savoir 70g/ha. Un volume de traitement de 1000 l/ha a été appliqué sur la culture. Par conséquent une dose de 70mg/l a été utilisée avec un volume pulvérisé de 40 ml par plante correspondant à la saturation par plante afin d'assurer une homogénéité de traitement.

Plan expérimental

Un tunnel de 128 m² comprenant 240 plants de tomates organisés en 3 double-rangs et 2 rangs simples de 30 plantes (densité de plantation de 1,9 plantes/m²) a été mis en place sur le site INRAE de Montfavet (unité Pathologie Végétale) le 14 mai 2020. Trente-six parcelles élémentaires de 4 plantes ont été définies aléatoirement dans le tunnel, et les plantes restantes ont été utilisées comme séparations entre les parcelles (Figure 1). Sur chaque parcelle élémentaire de 4 plantes, 2 plantes (plantes 1 et 2) ont été inoculées par pulvérisation foliaire avec la suspension dosée de spores d'*O. neolycopersici* et 2 plantes (plantes 3 et 4) ont été inoculées avec un mélange des suspensions dosées d'*O. neolycopersici* et du produit de biocontrôle AQ10 simultanément dans le même pulvérisateur. Chaque plante a été inoculée et traitée à l'aide d'un pulvérisateur manuel. Au moment du traitement, un rideau en plastique étanche a été disposé entre les 4 plantes pour éviter les risques de dérive du produit de biocontrôle vers les plantes non traitées. Les inoculations et traitements ont été réalisés sur 3 jours (3, 4 et 5 juin 2020) et chaque jour à 3 périodes de la journée, 7h, 13h et 19h, dans le but de diversifier les conditions climatiques rencontrées par l'agent pathogène et l'agent de biocontrôle. Chaque combinaison [jour x heure de traitement] est répétée 4 fois dans le dispositif expérimental (4 parcelles élémentaires). Chaque combinaison représente donc une condition climatique particulière.

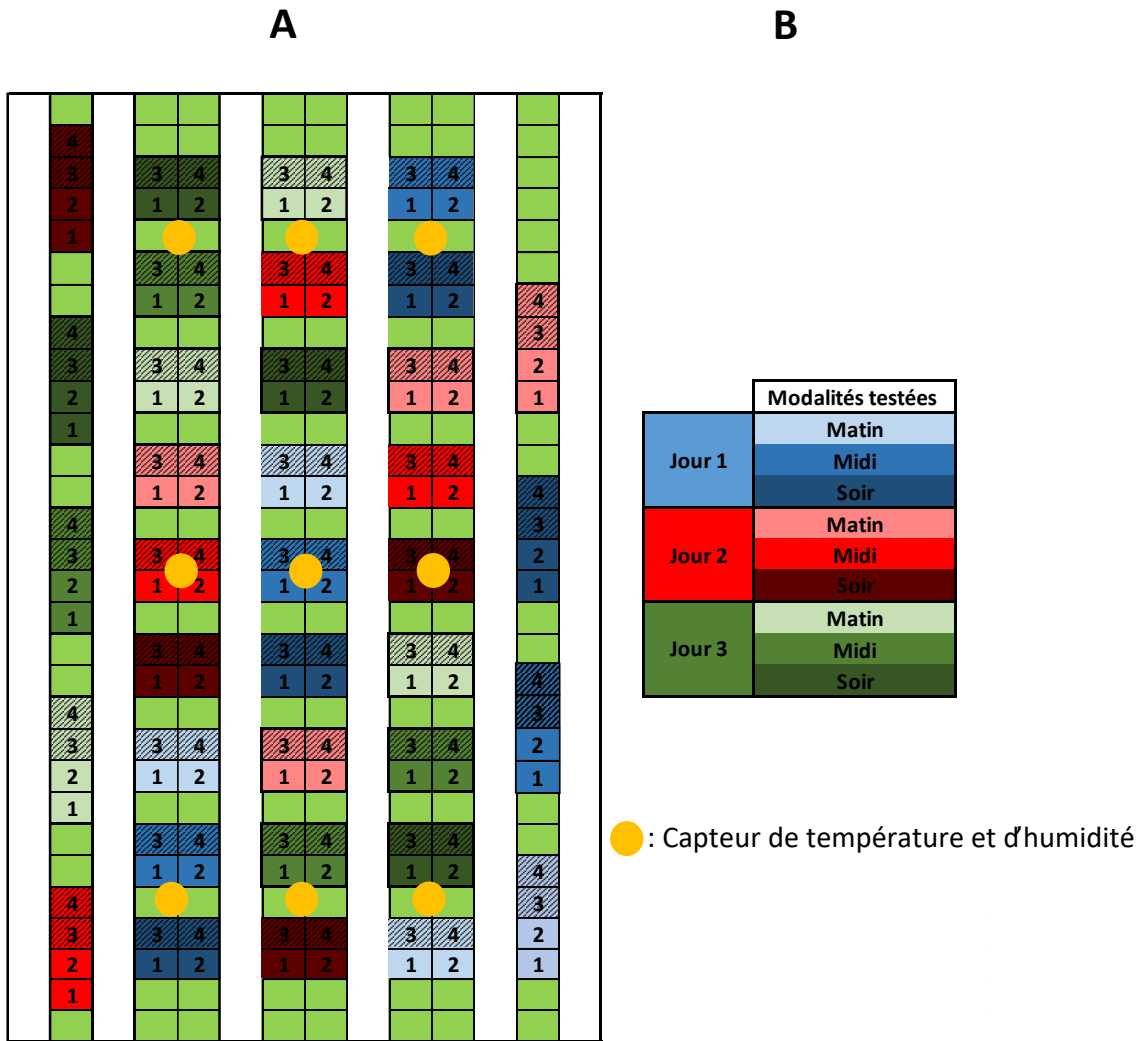


Figure 1 - Disposition des parcelles élémentaires de 4 plantes dans le tunnel d'expérimentation (A) et différentes modalités testées (B)

Chaque carré vert sans chiffre présenté en A correspond à un plant de tomate non inoculé et non traité. Chaque carré d'une autre couleur correspond à une plante de tomate inoculée avec *O. neolycopersici*. Chaque carré hachuré correspond à une plante de tomate inoculée avec *O. neolycopersici* et traitée avec AQ10. Les différentes couleurs correspondent aux moments des inoculations et des traitements présentés en B

Quantification du développement de l'oïdium sur les plantes

La quantification du développement de l'agent pathogène a été effectuée par comptage du nombre de colonies d'oïdium sur l'ensemble des folioles composant la feuille de tomate (Figure 2). Trois comptages non destructifs ont été réalisés sur deux feuilles par plante à 14, 21 et 28 jours après inoculation de l'agent pathogène (JAI). A 14 JAI, le comptage des colonies d'oïdium a été réalisé sur les quatre plantes des parcelles élémentaires, impliquant au total 288 notations sur l'ensemble des parcelles élémentaires. A 21 et 28 JAI, le comptage des colonies d'oïdium a été réalisé sur deux plantes par parcelle élémentaire (les plantes 1 et 3), impliquant 144 notations au total sur l'ensemble du dispositif.

En parallèle, le nombre de spores produites par *O. neolycopersici* a été quantifié à 21 et 28 JAI sur une feuille pour chacune de deux plantes de chaque parcelle élémentaire (les plantes 1 et 3). Pour se faire, les feuilles ont été prélevées, disposées dans un tube et placées à 4°C jusqu'à leur utilisation. Après avoir

ajouté 20mL d'eau dans les tubes, le comptage des spores a été réalisé sur cellules de Malassez sous le microscope (x100).

Une prise de photo de chaque feuille a été réalisée pour mesurer la surface foliaire (en cm²) à l'aide du logiciel ImageJ. La sévérité de la maladie a été exprimée en nombre de colonies d'oïdium par cm² de feuille. La capacité de sporulation du champignon pathogène a été exprimée en nombre de spores du champignon produites par cm² de feuille.



Figure 2 - Foliole de tomate attequée par l'oïdium. Chaque tache blanche représente une colonie d'oïdium.

Mesure de l'efficacité de protection de la tomate contre l'oïdium par AQ10

A partir de la sévérité de la maladie exprimée en nombre de colonies d'oïdium par cm² de feuille, le pourcentage de protection du traitement AQ10 a été calculé par parcelle élémentaire aux trois dates de notation (14, 21 et 28 jours après inoculation) selon la formule suivante :

$$\% \text{ Protection} = \left(1 - \frac{\text{Nombre de colonies d'oïdium/cm}^2 \text{ pour une plante traitée avec AQ10}}{\text{Nombre de colonies d'oïdium/cm}^2 \text{ pour une plante non traitée}} \right) \times 100$$

A partir du nombre de spores produites par le champignon pathogène exprimé en nombre de spores d'oïdium par cm² de feuille, un pourcentage d'inhibition de la sporulation (I_{sp}) induit par le traitement AQ10 a été établi par parcelle élémentaire aux deux dates de notation (21 et 28 jours après inoculation), selon la formule suivante :

$$\% I_{sp} = \left(1 - \frac{\text{Nombre de spores d'oïdium/cm}^2 \text{ pour une plante traitée avec AQ10}}{\text{Nombre de spores d'oïdium/cm}^2 \text{ pour une plante non traitée}} \right) \times 100$$

Données climatiques

Pendant toute la durée de l'expérience, la température et l'humidité relative de l'air ont été enregistrées à l'aide de 9 capteurs placés à l'intérieur du tunnel (WS1-PRO UBIBOT) selon le dispositif présenté en Figure 1. La prise de mesure a été effectuée toutes les 10 minutes. Pour réaliser les analyses, les valeurs de température et d'humidité relative issues des 9 capteurs ont été moyennées en une seule valeur. Le déficit de pression de vapeur (VPD pour Vapor Pressure Deficit) a également été calculé. La VPD est la différence entre la quantité d'humidité dans l'air et la quantité d'humidité que l'air peut contenir lorsqu'il est saturé. Appliqué à la physiologie végétale cela rend compte de la différence de pression de vapeur entre l'intérieur de la feuille (saturé) et l'extérieur de la feuille. L'intérieur de la feuille étant plus humide

que l'extérieur, la plante va équilibrer l'humidité par la transpiration via les stomates. Dans notre cas on estime que la température de l'air est équivalente à la température du feuillage, ce qui est une approximation. Dans la pratique, la VPD peut servir à maximiser la production des plantes car elle a un impact significatif sur la croissance et le développement des plantes, y compris les tomates (Lu et al. 2015). La VPD est donc une variable permettant de mieux rendre compte de la réalité biologique de la plante (évapotranspiration) prenant en compte à la fois la température et l'humidité relative. Cependant, son intérêt dans l'étude de la relation pathogène-plante-biocontrôle reste encore incertain. Encore peu d'études utilisent la VPD plutôt que l'humidité relative comme indicateur pour les risques épidémiologiques ou encore les conditions optimums de développement de l'agent de biocontrôle bien que les résultats soient plus précis et permettent d'établir les conditions optimales d'utilisation pour les agents de biocontrôle (O'Neill et al., 1996). Encore très récemment des études paraissent pour étudier l'effet de la VPD sur des agents de biocontrôle très utilisés (Tut et al., 2023) soulignant le manque de connaissances de l'influence de ce facteur crucial pour l'efficacité des agents de biocontrôle. Ainsi malgré l'intérêt d'utiliser la VPD, il a été décidé de continuer à utiliser conjointement avec l'humidité relative puisque c'est uniquement cette variable qui est citée dans la littérature pour cet agent de biocontrôle.

La formule de calcul de VPD est la suivante (Allen et al., 1998 ; Noh and Lee, 2022) :

$$VPD = SVP - AVP$$

Où SVP est calculée à partir de la formule suivante :

$$SVP = 610.78 \times e^{(T^{\circ}C / (T^{\circ}C + 237.3) \times 17.27)}$$

Et AVP, pression actuelle de la vapeur d'eau dans l'air est obtenu à partir de la mesure d'humidité relative (HR) : $AVP = HR \times SVP / 100$.

$$VPD = 0,6078 \times e^{\frac{17,27 \times T^{\circ}C}{T^{\circ}C + 237,3}} \times \frac{1 - HR}{100}$$

Différentes variables climatiques ont été calculées à partir de ces données enregistrées par les capteurs :

- Température (T), humidité relative (HR) et déficit de pression de vapeur (VPD) au moment du traitement des plantes avec l'agent de biocontrôle AQ10. La durée du traitement de l'ensemble des parcelles élémentaires étant de 20 minutes, la moyenne des 3 valeurs encadrant le traitement a été calculée. Ces variables sont notées T_0 , HR_0 et VPD_0 .
- Moyenne horaire de T, HR et VPD pour chaque heure entre le moment du traitement des plantes avec AQ10 et 8h après le traitement. Ces variables correspondent à la moyenne de 6 valeurs (1 toutes les 10 minutes) issues des capteurs dans les tunnels. Ces variables sont notées T_{pt1} , T_{pt2} , ... T_{pt8} ...avec pt signifiant post-traitement et 1, 2... jusqu'à 8 indiquant le nombre d'heures après le traitement. Les mêmes principes de notations sont utilisés pour l'humidité relative (HR_{pt1} à HR_{pt8}) et la différence de pression de vapeur (VPD_{pt1} à VPD_{pt8}).
- Variation de T, HR et VPD sur un pas de temps d'une heure pendant les 8h après le traitement. Cette valeur correspond à la différence entre la valeur à un temps H+1 et la valeur à un temps H0 pour chacune des variables (T, HR et VPD). Ces variables sont notées T_{v1} , T_{v2} , ... T_{v8} ...avec v signifiant variation et 1, 2... jusqu'à 8 indiquant le nombre d'heures après le traitement. Les mêmes principes de notations sont utilisés pour l'humidité relative (HR_{v1} à HR_{v8}) et le déficit de pression de vapeur (VPD_{v1} à VPD_{v8}).

Analyses et interprétation des données

Pour chaque plante, trois notations de symptômes d'oïdium ont été réalisées. Sur l'ensemble du dispositif, trois feuilles de tomate ont été détruites par des ravageurs sur les 288 feuilles analysées (144 plantes x 2 feuilles par plante). Ces données manquantes ont été remplacées à l'aide de la méthode de maximisation de vraisemblance (FactomineR, 2008). Le jeu de données finales contenait donc, pour la notation réalisée à 14 JAI, 288 valeurs issues de 144 plantes (notation sur 2 feuilles par plante) réparties sur les 36 parcelles élémentaires (notation sur 4 plantes par parcelle élémentaire). Pour les deux notations réalisées à 21 et 28 JAI, la quantification des symptômes d'oïdium a été réalisée sur 2 plantes par parcelle élémentaire, soit 72 plantes. Le jeu de données finales contenait donc 144 valeurs issues des 72 plantes (notation sur 2 feuilles par plante) réparties sur les 36 parcelles élémentaires.

Effet du traitement sur la sévérité de la maladie et la réduction de sporulation

Un test statistique de Shapiro-Wilk a été effectué pour vérifier l'hypothèse d'une distribution normale des données (nombre de colonies/cm², % de protection et % I_{sp}). Dans le cas d'une distribution normale des données, des analyses de variance (ANOVA) à un ou deux facteurs ont été effectuées, en utilisant un seuil de significativité de 5 %. Dans le cas d'une distribution non normale des données, des tests non paramétriques ne nécessitant pas la normalité de la distribution ont été réalisés, comme le test de Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952).

L'effet du traitement des plantes (présence ou absence de l'agent de biocontrôle AQ10) sur la sévérité de la maladie pour chaque date de notation (14, 21 et 28 JAI) et sur la capacité de sporulation du champignon pathogène a été testé. Dans le cas d'un effet significatif du traitement, une comparaison de moyenne a été réalisée (test post-hoc de Newman et Keuls, p = 0,05).

Impact des différentes variables mesurées ou calculées sur l'efficacité protectrice du traitement

La mesure de sévérité de la maladie sur les plantes témoins non traitées (en nombre de colonies/cm²) a été considérée comme un marqueur de la pression parasitaire présente dans le dispositif expérimental à chaque moment (jour x heure) d'application de l'agent de biocontrôle AQ10.

L'effet du moment du traitement (jour et heure) sur la sévérité de la maladie (nombre de colonies/cm² sur plantes témoins) et sur l'efficacité de la protection du traitement (nombre de colonies/cm² sur plantes traitées, % de protection) a été testé à l'aide d'ANOVA à 1 facteur.

Des analyses de corrélations entre la sévérité de la maladie sur les plantes témoins et les variables mesurant l'efficacité de la protection (nombre de colonies/cm² sur plantes traitées, % de protection) ont été réalisées à l'aide des tests de corrélation de Pearson (utilisable théoriquement pour les données respectant les impératifs de normalité, indépendance et linéarité) et des tests de Spearman (test non-paramétrique plus adapté pour de faibles effectifs et ne respectant pas la normalité). Des analyses de corrélations entre les différentes variables climatiques calculées (T₀, T_{pt1} à T_{pt8}, T_{v1} à T_{v8}, HR₀, HR_{pt1} à HR_{pt8}, HR_{v1} à HR_{v8}, VPD₀, VPD_{pt1} à VPD_{pt8}, VPD_{v1} à VPD_{v8}) et la variable mesurant l'efficacité de la protection (% de protection) ont été réalisées.

protection) ont également été réalisées à l'aide des deux types de test de corrélation. De plus, des modèles de régression linéaire ont été employés afin de déterminer l'impact de la sévérité de la maladie (nombre de colonies/cm² estimée sur les plantes témoins non traitées) et les différentes variables climatiques calculées (T_0 , T_{pt1} à T_{pt8} , T_{v1} à T_{v8} , HR_0 , HR_{pt1} à HR_{pt8} , HR_{v1} à HR_{v8} , VPD_0 , VPD_{pt1} à VPD_{pt8} , VPD_{v1} à VPD_{v8}) sur les variables mesurant l'efficacité du traitement (nombre de colonies/cm² sur plantes traitées, % de protection).

Etablissement de règles de décision pour obtenir une efficacité optimale

Pour établir des règles de décision afin d'obtenir la meilleure efficacité protectrice possible de l'agent de biocontrôle AQ10 contre l'oïdium, deux méthodes statistiques, de clustering, ont été utilisées (Rokach and Maimon, 2005) :

- en constituant des groupes selon le niveau d'efficacité protectrice. Pour chaque parcelle élémentaire de 4 plantes (2 témoins et 2 traitées), trois groupes ont été constitués selon le niveau de protection mesuré à 14 JAI (en respectant l'équidistribution soit 1/3 par classe entre 0 et 100 d'efficacité) : bonne efficacité (> 65 % de protection), efficacité moyenne (entre 35 % et 65 % de protection) et mauvaise efficacité (< 35 % de protection). Pour chaque groupe, les valeurs moyennes des variables climatiques (T_0 , T_{pt1} à T_{pt8} , T_{v1} à T_{v8} , HR_0 , HR_{pt1} à HR_{pt8} , HR_{v1} à HR_{v8} , VPD_0 , VPD_{pt1} à VPD_{pt8} , VPD_{v1} à VPD_{v8}) ont été calculées. Pour tester l'hypothèse qu'il existe un effet d'une variable climatique sur l'efficacité de protection, des analyses de variance ont été réalisées. Dans le cas d'un effet significatif, une comparaison de moyenne a été réalisée (test post-hoc de Newman et Keuls, $p = 0,05$).
- en utilisant l'apprentissage automatique pour étudier les liens non linéaires entre les variables climatiques, la sévérité de la maladie et l'efficacité de la protection. La méthode utilisée est la Classification Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC). Elle permet de quantifier l'influence des variables climatiques (T_0 , T_{pt1} à T_{pt8} , T_{v1} à T_{v8} , HR_0 , HR_{pt1} à HR_{pt8} , HR_{v1} à HR_{v8} , VPD_0 , VPD_{pt1} à VPD_{pt8} , VPD_{v1} à VPD_v) sur l'efficacité de la protection (% de protection) (Granato et al., 2018). L'HCPC est une combinaison de l'analyse en composantes principales (ACP), de la classification ascendante hiérarchique (CAH) et du partitionnement en k-moyennes. Cette approche permet d'identifier des groupes (i.e. clusters) présentant des similarités dans leurs variables (STHDA, 2017). Cette méthode a été choisie en raison du grand nombre de variables explicatives par rapport au nombre de données disponibles. La méthode HCPC se décompose en 3 étapes : (i) l'analyse en composantes principales et la sélection du nombre de dimensions retenues, (ii) la classification hiérarchique qui partitionne les données en X clusters à l'aide de l'algorithme K-means, et enfin (iii) le choix du nombre optimal de clusters.

Pour l'étape d'analyse en composantes principales (ACP) et de choix des dimensions, une sélection du nombre de dimensions est effectuée pour maximiser le pourcentage de l'information du jeu de données et minimiser la perte d'inertie. Les parcelles élémentaires ont été projetées sur les axes factoriels de l'ACP selon leurs variables.

La classification hiérarchique génère un dendrogramme qui répartit les parcelles élémentaires pour chaque plante traitée avec AQ10 en fonction de leur similarité sur l'ensemble de leur variables

climatiques et % de protection. Au sein de ce dendrogramme, chaque embranchement représente un regroupement de plantes ayant des similarités.

Ensuite la méthode des K-means est utilisée pour diviser le jeu de données en groupes les plus homogènes possibles en se basant sur les centres mobiles, c'est-à-dire une répartition des individus qui minimise les différences au sein des groupes construits. (Husson et al, 2010). Cette approche permet de classer les plantes en groupes pertinents, mettant en évidence des similarités telles qu'une température de traitement similaire associée à une efficacité élevée. Ainsi, cette méthode permet de regrouper les plantes ayant des similarités en termes d'efficacité de protection, de variables climatiques et de sévérité de la maladie sur le témoin.

Résultats et discussions

Variables climatiques relevées dans le tunnel durant l'expérimentation

Pendant les 28 jours de l'expérience (du 3/06/2020 au 30/06/2020), les températures minimales et maximales dans le tunnel ont été enregistrées respectivement à 13°C et 36,1°C (Figure 3). Les températures maximales sont atteintes entre 14h et 17h tandis que les températures minimales surviennent entre 3h et 5h. En moyenne, les températures diurnes étaient de $27,4 \pm 1,1^\circ\text{C}$ et les températures nocturnes de $19,1 \pm 0,7^\circ\text{C}$. Les différences de températures et d'humidité entre les 9 capteurs ne sont pas significatives (ANOVA ; $p = 0,98329$) justifiant l'utilisation de la moyenne des 9 capteurs.

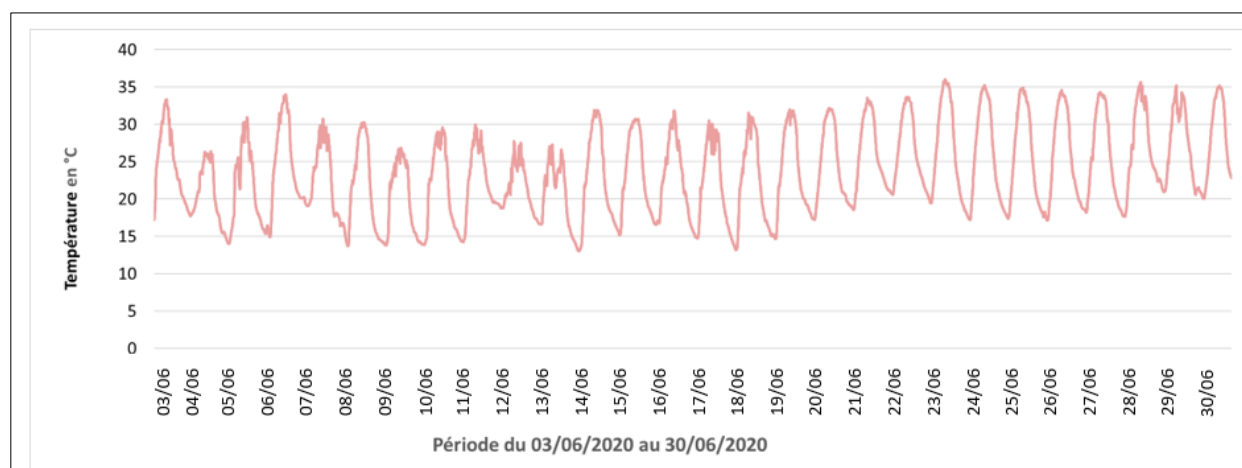


Figure 3- Température de l'air mesurée dans le tunnel durant les 28 jours de l'expérimentation. Cette courbe représente la moyenne des 9 capteurs placés dans le tunnel.

Les valeurs d'humidité relative dans le tunnel varient entre 27,7 % et 95,8 % avec des minimums enregistrés entre 13h et 17h et des maximums entre 6h et 8h (Figure 4). En moyenne, l'humidité relative est de $52,2 \pm 4,0 \%$ pendant la journée et de $81,2 \pm 2,4 \%$ la nuit. Concernant les valeurs de VPD (Figure 5), elles montrent une tendance inverse aux valeurs d'humidité relative, avec des valeurs proches de 0 KPa le matin de 5h à 7h correspondant à une humidité saturante et des valeurs maximales autour de 2

Kpa entre 13h et 17h. De plus il est à noter qu'à partir de 2 kPa de VPD, il y a un effet sur la fermeture stomatique, donc un effet sur la transpiration des plantes. Au contraire, avec une VPD proche de zéro, il y a phénomène de guttation, c'est-à-dire d'eau libre sur les feuilles.

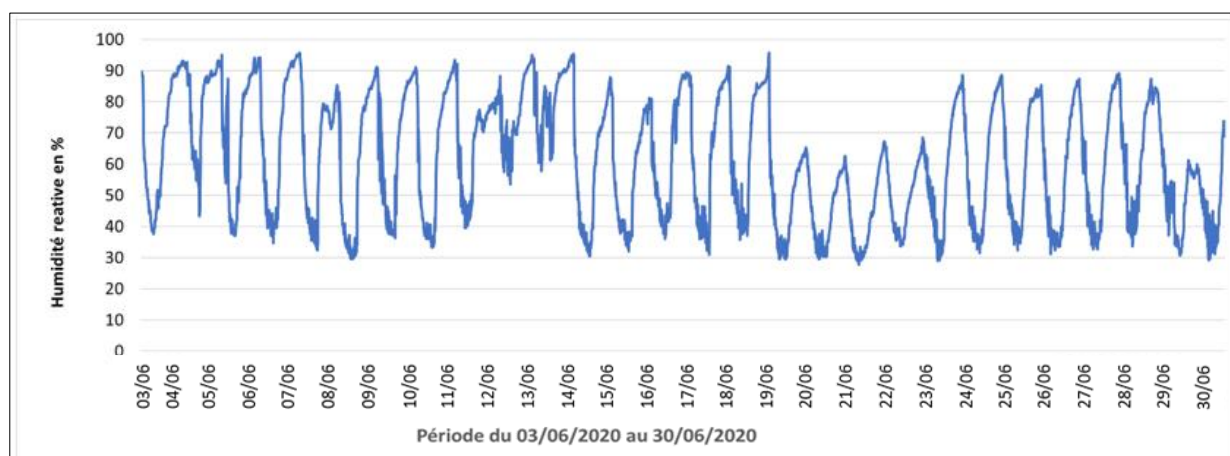


Figure 4 - Humidité relative de l'air mesurée dans le tunnel durant les 28 jours de l'expérimentation. Cette courbe représente la moyenne des 9 capteurs placés dans le tunnel.

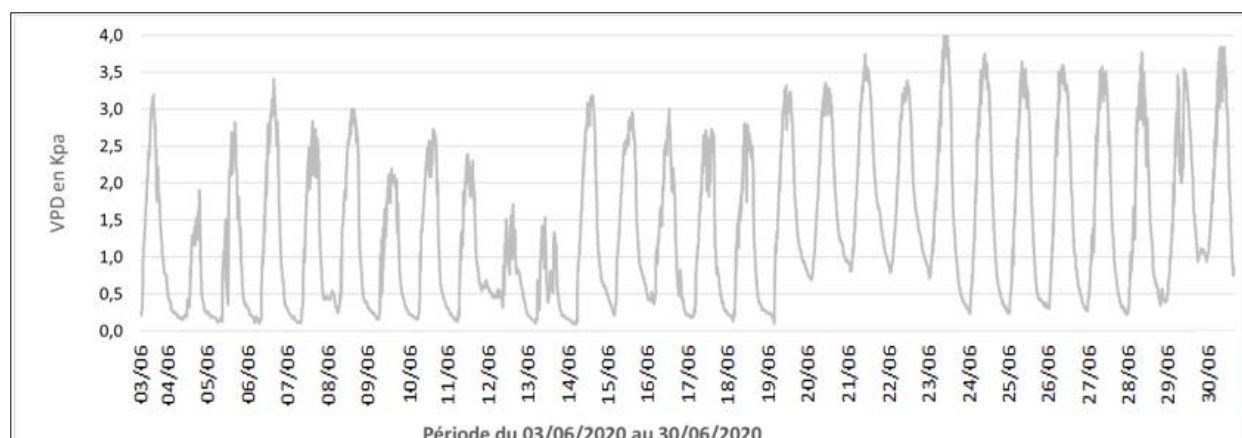


Figure 5 - Déficit de pression saturante de l'aire (VPD) mesurée dans le tunnel durant les 28 jours de l'expérimentation. Cette courbe représente la moyenne des 9 capteurs placés dans le tunnel

Les traitements avec l'agent de biocontrôle AQ10 et les inoculations avec *O. neolycopersici* ont été réalisés à différentes heures de la journée pendant une période de trois jours consécutifs afin d'augmenter les chances d'avoir des conditions climatiques variables. Les figures 6, 7 et 8 présentent les données climatiques enregistrées à 7h, 13h et 19h durant les 28 jours de l'expérimentation.

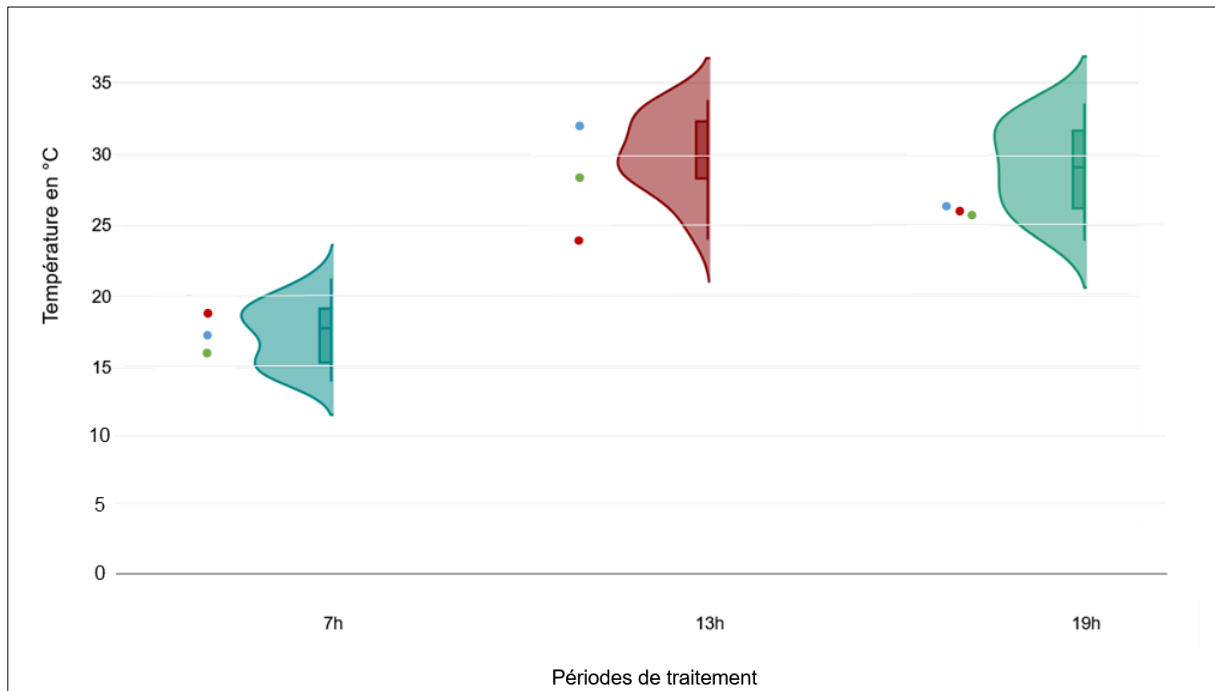


Figure 6 - Répartition des températures mesurées à 7h, 13h et 19h durant toute l'expérimentation.

Les points rouges, bleus et verts représentent les valeurs enregistrées pendant les 3 jours d'inoculation et de traitement des plantes.

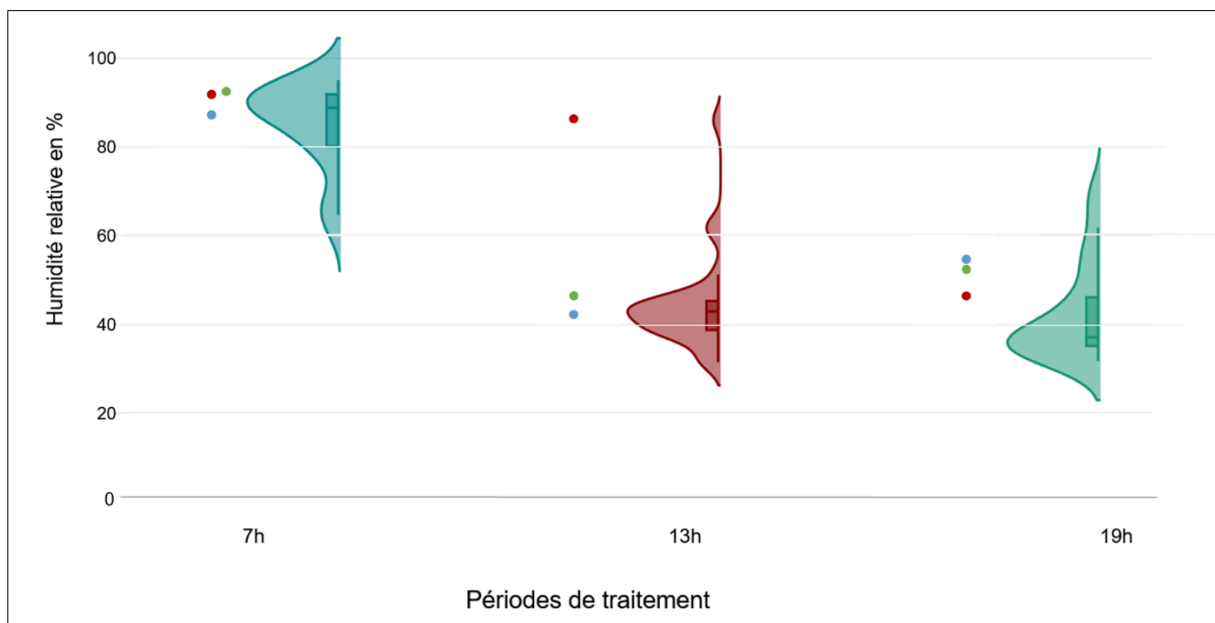


Figure 7- Répartition des valeurs d'humidités relatives mesurées à 7h, 13h et 19h durant toute l'expérimentation.

Répartition des valeurs d'humidités relatives mesurées à 7h, 13h et 19h durant toute l'expérimentation Les points rouges, bleus et verts représentent les valeurs enregistrées pendant les 3 jours d'inoculation et de traitement des plantes.

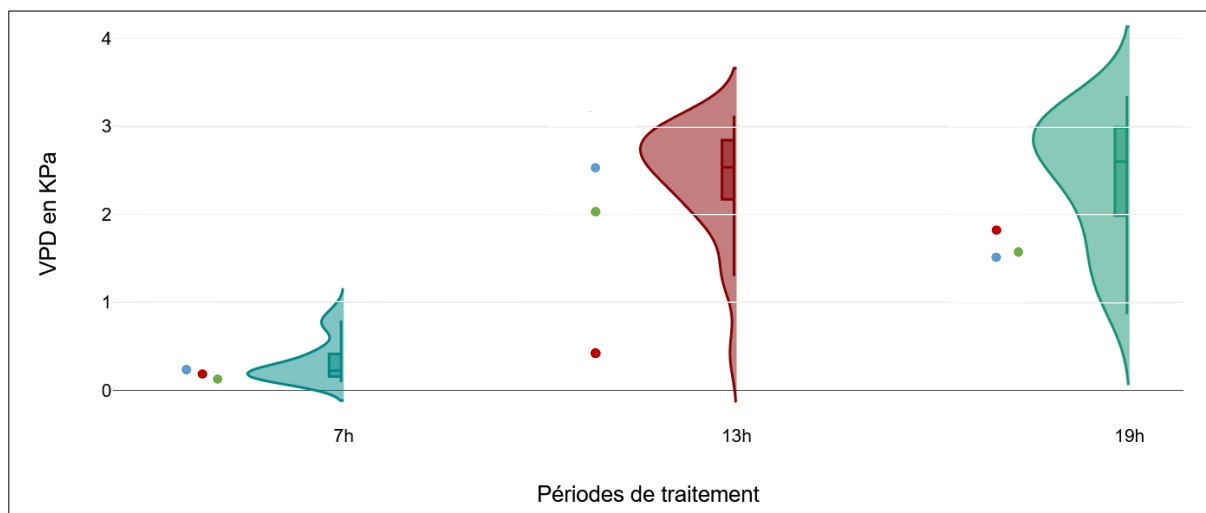


Figure 8 - Répartition des valeurs de VPD calculées à 7h, 13h et 19h durant toute l'expérimentation.

Les points rouges, bleus et verts représentent les valeurs calculées pendant les 3 jours d'inoculation et de traitement des plantes

Sur ces figures, les points de couleur indiquent les conditions climatiques rencontrées (température, humidité relative et déficit en vapeur d'eau) aux heures d'inoculation de l'agent pathogène et de traitement avec l'agent de biocontrôle durant les 3 jours d'expérimentation (3/06/2020 au 5/06/2020) qui sont reprises dans le Tableau 5. Durant ces 3 jours, les conditions climatiques sont proches, à l'exception du deuxième jour à 13h, où l'humidité relative était plus élevée (+ 35 %) et la température plus basse (-3°C) que la moyenne sur les 28 jours. Ces conditions climatiques contrastées sont dues notamment à une période pluvieuse qui a démarré le soir du premier jour vers 20h, avec 1,8 mm de précipitations, et qui a persisté le deuxième jour avec 42,7 mm de précipitations, maintenant ainsi une forte humidité combinée à une température plus modérée dans le tunnel.

Tableau 5 - Valeurs de température et d'humidité relative relevées dans le tunnel expérimental et valeurs de VPD calculées au moment des différents moments d'inoculation de l'agent pathogène *O. neolycopersici* et de traitement avec AQ10.

Heure ^a	Date	Température (T_0 en °C) ^b	Humidité relative (HR_0 en %) ^c	VPD ₀ en kPA ^d
7h	3/06/2020	17,2 (±0,2)	89,7(±0,4)	0,21
	4/06/2020	18,2 (±0,1)	91,8 (±0,1)	0,17
	5/06/2020	16,0 (±0,1)	92,2 (±0,4)	0,14
13h	3/06/2020	32,0(±0,6)	41,6(±0,8)	2,78
	4/06/2020	24,0(±0,2)	86,1(±0,3)	0,42
	5/06/2020	28,0 (±0,4)	46,1 (±0,1)	2,04
19h	3/06/2020	26,3 (±0,6)	54,8(±0,6)	1,48
	4/06/2020	26,0 (±0,7)	46,0(±0,4)	1,81
	5/06/2020	25,6 (±0,9)	52,4 (±1,0)	1,57

a : les inoculations et traitements ont été réalisées sur un créneau d'environ 20 minutes

b : les valeurs de températures correspondent à la moyenne de 3 valeurs (une par tranche de 10 minutes) obtenues durant le traitement

c : les valeurs d'humidité relative correspondent à la moyenne de 3 valeurs (une par tranche de 10 minutes) obtenues durant le traitement

d : les valeurs de VPD correspondent à la moyenne de 3 valeurs (une par tranche de 10 minutes) calculées durant le traitement

Effet du traitement AQ10 sur le développement de l'oïdium sur tomate

Le test de Shapiro-Wilk rejette l'hypothèse de normalité des données de sévérité de la maladie (colonies d'oïdium /cm², $p < 0,001$). Ces données présentent une distribution asymétrique positive (Skewness = 0,49). Cependant, l'analyse des résidus indique une homogénéité de variance, suggérant que des tests paramétriques peuvent être utilisés pour analyser ces données (Hmamouchi, 2021). Des tests paramétriques ont donc été principalement utilisés dans la suite du document. Dans certains cas, des tests non paramétriques ont été réalisés afin de conforter les analyses statistiques paramétriques.

Une première analyse ANOVA ($p = 0,003$) suivi d'un test de comparaison de moyenne de Newman-Keuls, indique que le développement de la maladie est plus important pour les inoculations effectuées le matin par rapport à celle effectuées le midi et le soir. Une deuxième analyse ANOVA effectuée pour évaluer l'effet de la période d'inoculation sur la sévérité de la maladie mesurée à 14 jours après inoculation sur le témoin non traité révèle un effet significatif de la période de traitement sur la sévérité de la maladie (ANOVA, $p = 0,001$; Figure 9). L'analyse statistique ne révèle pas d'effet de la période d'inoculation sur la sévérité de la maladie sur plantes non traitées obtenue à 21 et 28 jours après inoculation (ANOVA, $p > 0,05$).

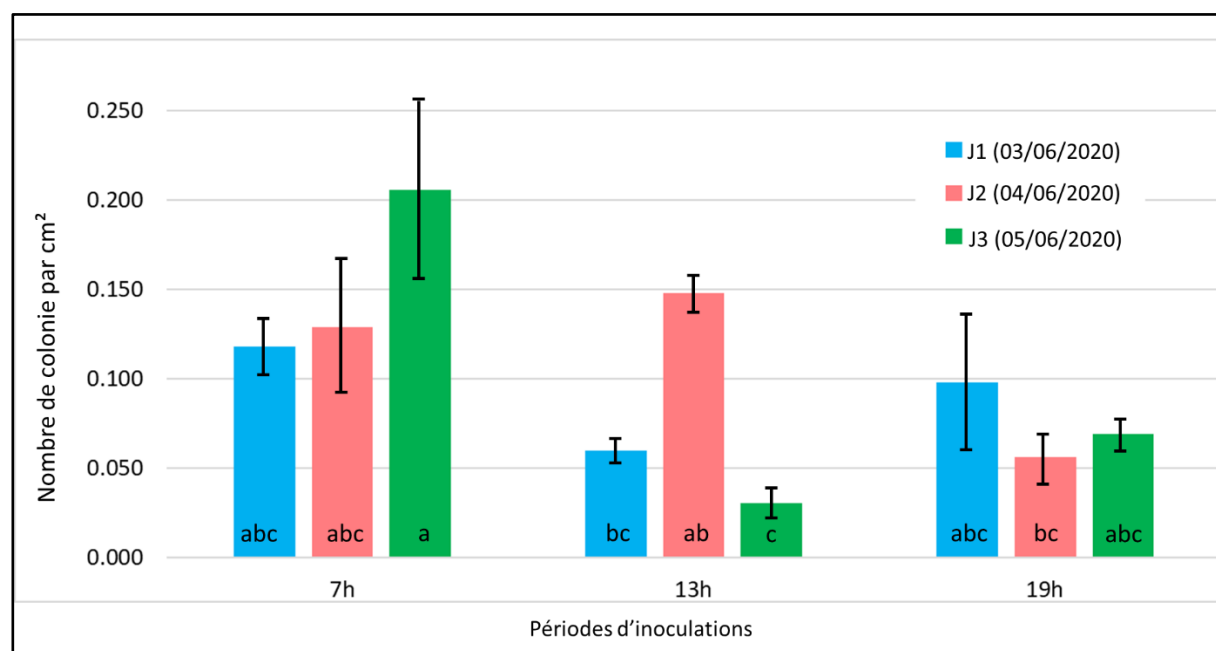


Figure 9 - Sévérité de la maladie mesurée 14 jours après inoculation (en nombre de colonies par cm² de feuille) selon les périodes d'inoculations de l'agent pathogène *O. neolycopersici* à 7h, 13h et 19h sur 3 jours.

Les histogrammes bleus, rouges et verts représentent les valeurs moyennes de sévérité de la maladie des plantes de tomate témoins non traitées du 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} jour. Chaque histogramme représente la moyenne de 4 plantes. Les lettres différentes pour chaque notation indiquent une différence significative entre les périodes d'inoculations (test de comparaison de moyenne de Newman-Keuls, $p < 0,05$).

D'après les tests de Pearson, la sévérité de la maladie sur les plantes non traitées est négativement corrélée avec les variables liées aux températures moyennes mais positivement corrélée avec les variables liées à l'humidité relative de l'air au moment du traitement et l'heure suivant l'inoculation et du traitement. (Tableau 6). Après 1h, les corrélations sont faibles (inférieur à 0,5 ou -0,5) et non

significative. D'après Akoglu (2018), des valeurs de coefficient de corrélation de Pearson ($r_{pearson}$) comprises entre 0,4 et 0,6 indiquent un lien modéré entre deux variables qui est difficilement interprétable. Dans notre cas, les relations qui lient les variables climatiques à la sévérité de la maladie sont, pour le moment du traitement et l'heure suivant l'inoculation et du traitement supérieur à 0,6. Cependant la puissance du test est faible (0,1246 selon la méthode asymptotique de Fisher) à cause du faible nombre de variable (inférieur à 30) ce qui limite les interprétations.

Ces résultats suggèrent que plus la température est élevée au moment de l'inoculation (dans une gamme de température comprise entre 16 et 32°C, tableau 5) moins le développement de l'oïdium est important. De même, les températures moyennes les plus élevées, mesurées une heure après l'inoculation, sont défavorables au développement de la maladie. Les mêmes tendances peuvent être proposées pour l'humidité relative. On note également que la corrélation est positive pour l'humidité relative ce qui indique que plus l'humidité relative est élevée plus la maladie se développe. Ainsi, selon des études sur ce pathogène, le développement des conidies d'*O. neolycopersici* est optimal entre 20 et 25°C et diminue progressivement pour devenir quasi nul lorsque la température excède 35°C. De plus, un niveau d'humidité relative élevé est bénéfique au pathogène, bien qu'à saturation, son développement diminue légèrement (Jacob et al. 2008 ; Elad et al. 2009 ; Mieslerová et Lebeda 2010).

Les valeurs des coefficients de corrélation ($r_{pearson}$) calculées entre les variables climatiques obtenues au-delà de 2h après l'inoculation (T_{pt3} à T_{pt8} , T_{v3} à T_{v8} , HR_{pt3} à HR_{pt8} , HR_{v3} à HR_{v8} , VPD_{pt3} à VPD_{pt8} , VPD_{v3} à VPD_{v8}) et la sévérité de la maladie sont inférieures à 0,4 et non significatifs (données non présentées). Ce résultat suggère que les conditions climatiques rencontrées dans le tunnel après 2h suivant l'inoculation de l'agent pathogène ont un effet très réduit sur le développement de la maladie.

Tableau 6- Matrices de corrélation de Pearson entre les variables climatiques et la sévérité de la maladies (colonies/cm²). Les résultats en gras sont statistiquement significatifs.

		<i>r_{pearson}</i> (p-value) Sévérité de la maladie sur plantes non traitées
Moyenne au moment de l'inoculation et du traitement	T_0	-0,79 (0,01)
	HR_0	0,88 (0,001)
	VPD_0	0,84 (0,004)
Moyenne 1h après traitement	T_1	-0,76 (0,021)
	HR_1	0,85 (0,003)
	VPD_1	-0,79 (0,015)
Moyenne 2h après traitement	T_2	-0,45 (0,222)
	HR_2	0,58 (0,101)
	VPD_2	-0,57 (0,114)
Moyenne 3h après traitement	T_3	0,14 (0,716)
	HR_3	0,26(0,494)
	VPD_3	-0,34 (0,066)

		<i>r_{pearson} (p-value)</i> <i>Sévérité de la maladie sur plantes non traitées</i>
Variation 1h après traitement	<i>TV₁</i>	0,42 (0,256)
	<i>HRV₁</i>	-0,38 (0,301)
	<i>VPDV₁</i>	0,29 (0,445)
Variation 2h après traitement	<i>TV₁</i>	0,81 (0,007)
	<i>HRV₁</i>	-0,53(0,146)
	<i>VPDV₁</i>	0,58 (<0,102)

Le développement de la maladie semble donc favorisé par des traitements effectués avec une humidité relative important supérieur à 80 %. Le rôle de la température reste incertain. Ces résultats suggèrent également que d'autres facteurs influencent l'efficacité de la protection. Par exemple, des études ont mis en évidence que le niveau de CO₂ et les radiations lumineuses pouvaient fortement impacter le développement de cet agent pathogène (Mieslerová et al., 2022).

Effet du traitement AQ10 sur le développement de l'oïdium sur tomate

Sur l'ensemble des plantes témoins inoculées mais non traitées, 2 plantes situées sur la même parcelle élémentaire ne présentaient pas de symptômes d'oïdium lors des notations effectuées à 14 et 21 JAI. Les 4 plantes de cette parcelle (plantes traitées et non traitées) n'ont donc pas été considérées dans les analyses réalisées pour ces deux notations. La totalité des plantes témoins présentaient des symptômes à 28 JAI donc l'ensemble des parcelles a été utilisé pour analyser les résultats des notations réalisées à 28JAI.

Sur l'ensemble du tunnel, les plantes ayant subi un traitement avec AQ10 sont significativement moins attaquées par l'oïdium que les plantes non traitées (Figure 10) pour la notation réalisée à 14JAI (ANOVA, $p = 0,001$) et à 21 jours (ANOVA, $p = 0,048$). Aucune différence entre les plantes traitées et non traitées n'est observée pour la notation réalisée à 28 JAI (ANOVA, $p = 0,28$). Le taux de protection moyen est de 56 % (± 22 %) à 14 jours, de 38 % (± 28 %) à 21 jours après inoculation et inférieur à 0 % à 28 jours après inoculation. On observe donc une baisse de l'efficacité après 14 jours, suggérant que le traitement bien que réduisant la sévérité de la maladie jusqu'à 3 semaines après traitement ne permet pas le contrôle de la maladie au-delà de 21 jours.

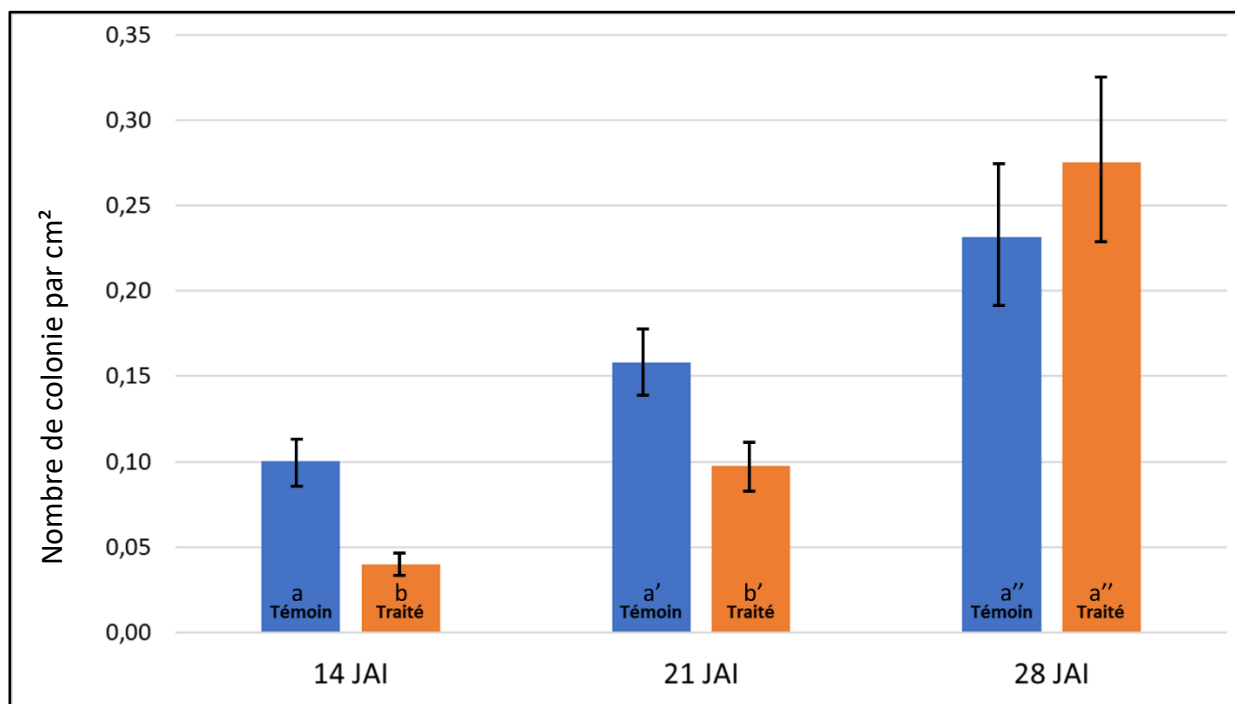


Figure 10 - Sévérite de la maladie (en nombre de colonies par cm² de feuille) mesurée 14, 21 et 28 jours après l'inoculation de l'agent pathogène *O. neolycopersici*.

Les histogrammes bleus représentent les valeurs moyennes de sévérité de la maladie des plantes de tomate non traitées. Les histogrammes orange représentent les valeurs moyennes de sévérité de la maladie des plantes de tomate traitées avec AQ10. Chaque histogramme représente la moyenne de 70 plantes. Les lettres différentes pour chaque notation indiquent une différence significative entre les modalités traitées et non traitées pour chaque date de notation (test de comparaison de moyenne de Newman-Keuls, $p < 0,05$).

La production de spores du champignon *O. neolycopersici* sur les feuilles de tomate, mesurée 21 jours après inoculation, est significativement réduite par le traitement avec AQ10 passant de 67,8 spores par cm² à 35,2 spores/cm² (ANOVA, $p = 0,003$, Figure 11). La réduction de la sporulation de l'oïdium par le traitement est de 55 %, suggérant que le champignon hyperparasite *A. quisqualis* réduit la capacité de production des spores du champignon *O. neolycopersici* sur les feuilles de tomate. La réduction de sporulation est corrélée avec l'efficacité de protection à 21 jours ($r_{\text{Pearson}} = 0,48$, $P < 0,001$).

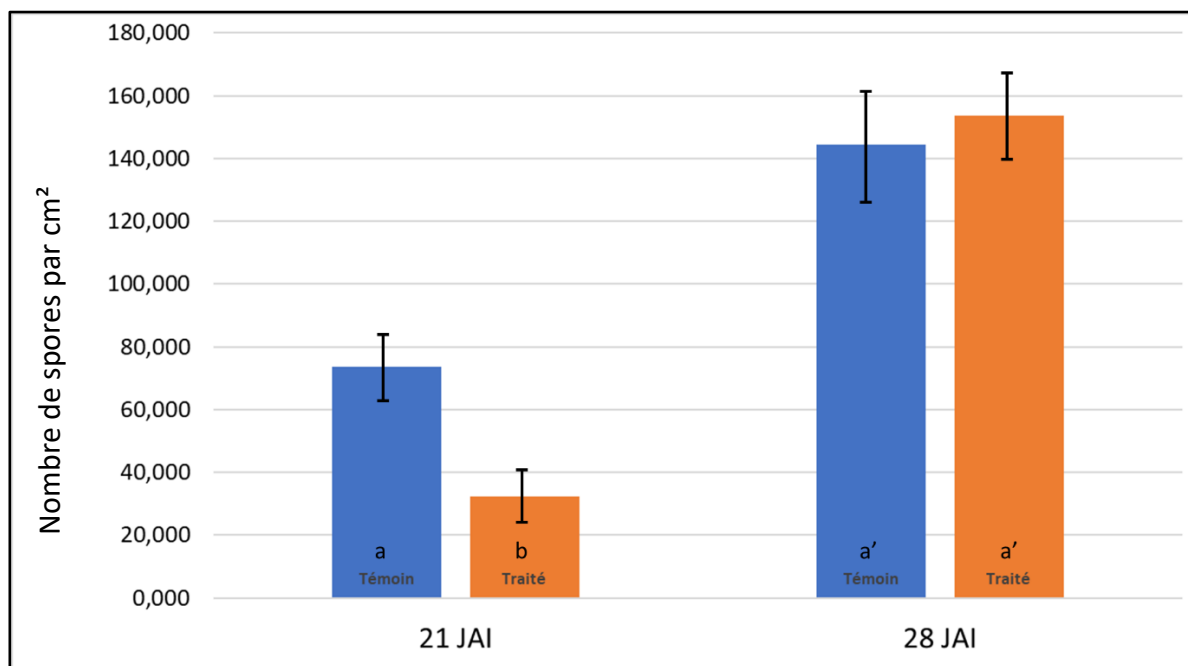


Figure 11 - Réduction du nombre de spores du champignon *A. quisqualis* (en nombre de spores par cm² de feuille) à 21 et 28 jours après l'inoculation de l'agent pathogène *O. neolycopersici*.

Les histogrammes bleus représentent les valeurs moyennes de sévérité de la maladie des plantes de tomate non traitées. Les histogrammes orange représentent les valeurs moyennes de sévérité de la maladie des plantes de tomate traitées avec AQ10. Chaque histogramme représente la moyenne de 70 plantes. Les lettres différentes pour chaque notation indiquent une différence significative entre les modalités traitées et non traitées pour chaque date de notation (test de comparaison de moyenne de Newman-Keuls, $p < 0,05$).

Un traitement unique avec l'agent de biocontrôle AQ10 appliqué en pulvérisation foliaire sur la tomate sous serre réduit donc significativement la sévérité de la maladie et réduit également la capacité de sporulation du champignon phytopathogène à 21 jours mais pas à 28 jours.

Influence de la pression de maladie sur l'efficacité protectrice du traitement avec AQ10

Un lien statistique linéaire entre la sévérité de la maladie sur les plantes témoins non traitées et la sévérité de la maladie sur les plantes traitées avec AQ10 ($r_{\text{Pearson}} = 0,584$, $p = 0,001$) est observé (Figure 12), suggérant un lien entre la pression de maladie et l'efficacité du traitement. La corrélation est plus forte en retirant les données obtenues lors du traitement effectué le 2^{ème} jour à 13h, où une efficacité importante (proche de 100 %) a été observée ($r_{\text{Pearson}} = 0,734$, $p < 0,001$). Pour rappel, ce traitement a été réalisé dans des conditions climatiques exceptionnelles (Tableau 4). Ainsi selon le modèle de régression linéaire, 34 % de la variabilité de la sévérité de la maladie sur les plantes traitées est expliquée par la sévérité de la maladie sur les plantes témoins.

Un lien statistique linéaire entre la sévérité de la maladie sur les plantes témoins non traitées et la protection de la tomate apportée par AQ10 ($r_{\text{Pearson}} = 0,463$, $p < 0,001$) est également observé. Selon ce modèle de régression linéaire, 21 % de la variabilité de la protection est expliquée par la sévérité de la maladie sur les plantes témoins. Ces résultats suggèrent que la pression de maladie influence partiellement la protection apportée par le traitement AQ10.

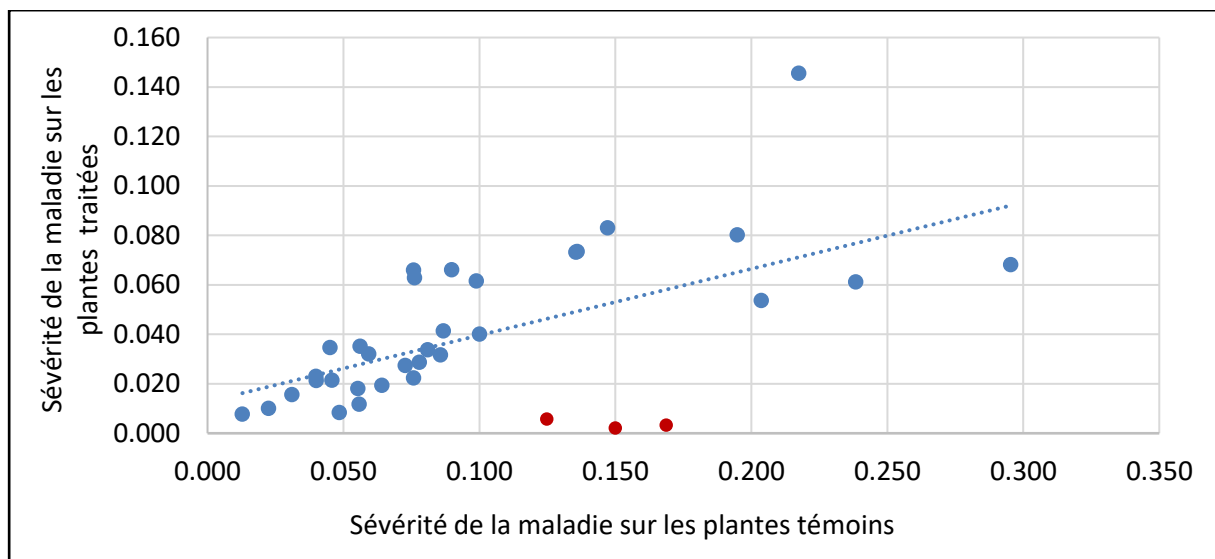


Figure 12 - Répartition de la sévérité de la maladie sur les plantes témoins et traitées avec AQ10.

La courbe de tendance (droite en pointillés) et la valeur du coefficient de détermination (R^2) ont été estimées pour l'ensemble des points. Les trois points rouges correspondent aux données de sévérité obtenues le 2^{ème} jour à 13h dans des conditions climatiques exceptionnelles (24°C et 86 % HR).

Effet de la température et de l'humidité relative sur l'efficacité de la protection par le traitement avec AQ10

La protection de la tomate causée par le traitement avec l'agent de biocontrôle AQ10 contre *O. neolycopersici* varie entre 13 % à 97 % (Figure 13). La période de traitement des plantes (jour x heure) a un effet significatif sur cette protection (ANOVA, $p = 0,001$). Cependant, à l'exception de deux modalités (traitements réalisés le J3 à 7h et le J2 à 13h), les valeurs d'efficacité ne sont pas significativement différentes. Le test statistique de comparaison de moyenne (test post-hoc de Newman et Keuls, $p = 0,05$) indique que le traitement réalisé le midi du deuxième jour (J2 à 13h) avec une moyenne de 97 % de protection est significativement différent de toutes les autres valeurs de protection obtenues. Cette valeur élevée de protection a été obtenue dans des conditions climatiques au moment du traitement de 24°C et 86 % d'humidité relative (Tableau 5). De plus le traitement réalisé le matin du 3^{ème} jour (J3 à 7h) à 16°C et 92 % d'humidité relative (72 % de protection) est significativement différent du traitement effectué le soir du 1^{er} jour (J1 à 19h).

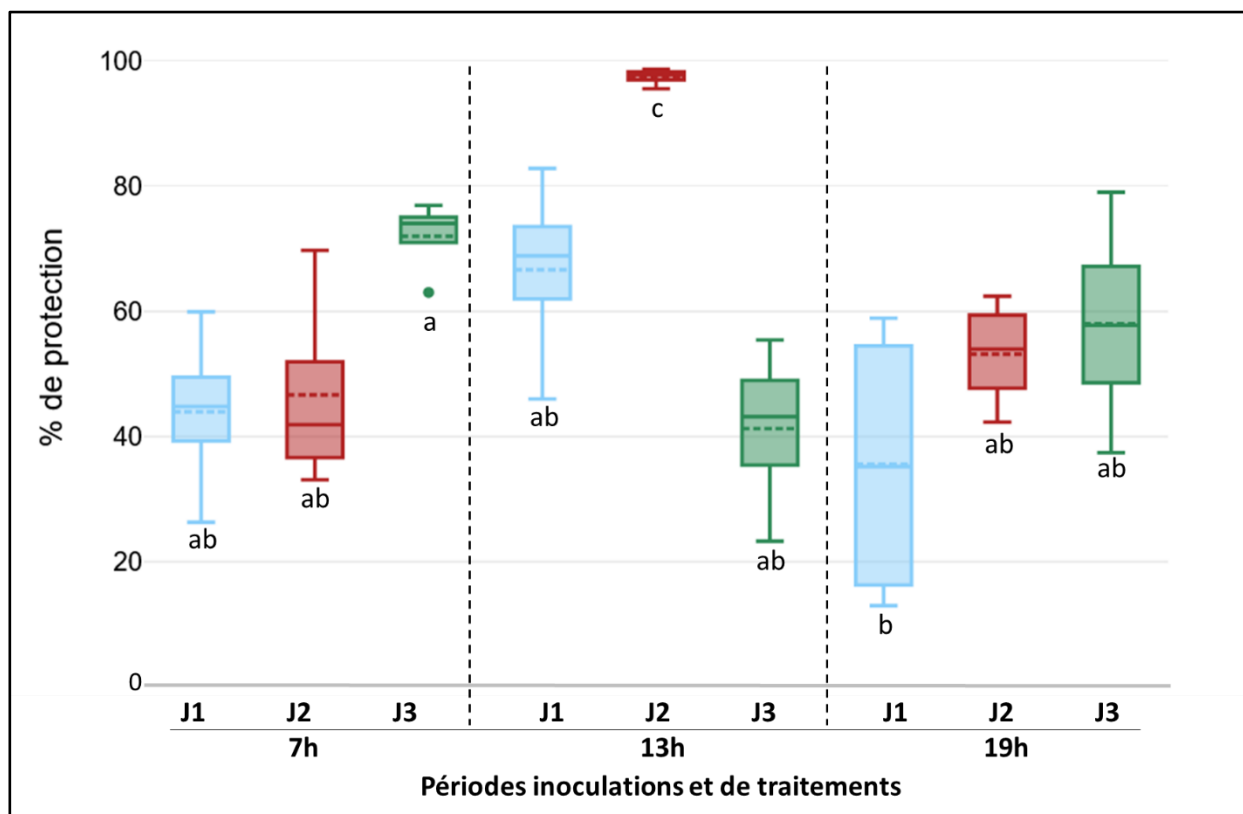


Figure 13 - Répartition des pourcentages de protection de la tomate contre l'oïdium avec AQ10 selon la période de traitement. Les traitements ont été réalisés le matin (7h) le midi (13h) et le soir (19h) sur 3 jours consécutifs (J1, J2 et J3) correspondant aux 3 répétitions du test. Les lettres différentes indiquent une différence significative entre les protections mesurées (test de comparaison de moyenne de Newman-Keuls, $p < 0,05$).

Les tests de corrélation de Pearson indiquent que le niveau de protection de la tomate par AQ10 n'est pas corrélé avec les variables liées aux températures moyennes et à l'humidité relative de l'air) au moment du traitement, ni les heures suivant le traitement (T_{pt3} à T_{pt8} , T_{v3} à T_{v8} , HR_{pt3} à HR_{pt8} , HR_{v3} à HR_{v8} , VPD_{pt3} à VPD_{pt8} , VPD_{v3} à VPD_{v8}). Les corrélations sont comprises entre -0,1 et 0,3 (Tableau 7) et sont non significatives. Ces résultats suggèrent que les facteurs climatiques n'influencent pas de manière linéaire l'efficacité du traitement.

Tableau 7 - Matrices de corrélation de Pearson entre les variables climatiques et le pourcentage de protection de la tomate suite au traitement par AQ10.

		$r_{pearson}$ (p-value) % protection
Moyenne au moment de l'inoculation et du traitement	T_0	0.00 (0,996)
	HR_0	0.30 (0,439)
	VPD_0	-0.20 (0,600)
Moyenne 1h après traitement	T_1	-0.03 (0,941)
	HR_1	0.21 (0,583)
	VPD_1	-0.13 (0,728)
Moyenne 2h après traitement	T_2	0.10 (0,729)
	HR_2	0.03 (0,938)
	VPD_2	0.01 (0,973)
Variation 1h après traitement	Tv_1	0.157 (0,685)
	HRv_1	-0.488 (0,1817)
	$VPDv_1$	0.415 (0,2662)
Variation 2h après traitement	Tv_1	0.199 (0,607)
	HRv_1	-0.086 (0,825)
	$VPDv_1$	0.134 (0,731)

Un modèle de régression linéaire multiple a été effectué. Ainsi les variables explicatives climatiques (T_0 , T_1 , T_2 et HR_0 , HR_1 et HR_2) et la variable explicative de sévérité de la maladie n'expliquent que 35,2 % de la variabilité du pourcentage de protection. De plus le modèle indique que ces variables ne sont pas significatives en tant que facteurs prédictifs de l'efficacité. Les modèles utilisant les variations de températures et d'humidités relatives ne sont pas non plus significatifs et expliquent que très faiblement l'efficacité (11,4 %). Ces résultats suggèrent que l'influence des variables climatiques sur l'efficacité n'est pas linéaire et très certainement complexe. En effet on peut observer que l'efficacité est très variable selon les parcelles élémentaires ayant subis les mêmes conditions climatiques. Cette variabilité ne peut s'expliquer ni par la sévérité de la maladie ni pas les variables climatiques mesurées. Elle peut être liée à des différences d'application et de qualité du produit ou bien à des facteurs non étudiés comme les radiations lumineuses différentes ou bien les niveaux de CO_2 . En effet, une étude précédente a montré que les radiations lumineuses (Lahlali et al., 2011) peuvent jouer un rôle essentiel dans l'efficacité du traitement à la parcelle. De plus le niveau de CO_2 est un facteur qui influence l'efficacité de AQ10 de manière importante, pouvant augmenter son efficacité de plus de 20 % (Gilardi et al., 2017).

Etude des facteurs influençant l'efficacité de protection par des approches de classification

Classification par niveau d'efficacité

Chaque parcelle élémentaire du tunnel a été classée dans un des 3 groupes d'efficacité protectrice (efficacité bonne, moyenne ou faible ; Tableau 8). Pour chaque groupe de parcelles ayant le même niveau d'efficacité, les données climatiques au moment du traitement ont été moyennées. Ainsi, les 12 parcelles ayant un niveau d'efficacité « bon » présentent une température moyenne de 25°C et une humidité relative moyenne de 67 % pour une valeur de VPD de 1,3 kPa. La seule différence significative (ANOVA, $p < 0,05$) entre les données climatiques mesurées par niveau d'efficacité concerne la température 2 heures après traitement (T_2), où la température moyenne du groupe des bonnes efficacités est statistiquement supérieure à celui des faibles efficacités (test post-hoc de Newman et Keuls, $p = 0,05$). Pour les variables climatiques après 2 heures (T_3 , HR_3 , VPD_3 , ...) il n'existe aucune différence significative.

Ces résultats suggèrent que les facteurs climatiques ne permettent pas d'expliquer les différences d'efficacité de protection observées. Cette approche ne permet donc pas de définir des profils climatiques favorables ou défavorables à l'efficacité de l'agent de biocontrôle AQ10. Cependant on peut émettre l'hypothèse qu'avec un jeu de données plus conséquent, des différences significatives entre les groupes pourraient apparaître et permettre d'établir les conditions les plus favorables à l'efficacité du traitement.

Tableau 8 - Description des groupes d'efficacité construit avec les moyennes par variables et par groupe d'efficacité, en gras les moyennes statistiquement différentes selon le test post-hoc de Newman et Keuls, $p = 0,05$

Variable Climatiques	Bonne efficacité (> 65 % de protection) 12 parcelles élémentaires	Moyenne efficacité (65 % et 40 % de protection) 14 parcelles élémentaires	Faible efficacité (< 40 % de protection) 9 parcelles élémentaires	ANOVA entre les groupes p-value
Moyenne T_0 (± erreur standard)	25,0 (±1,3)	24,2 (±1,0)	20,9(±1,5)	0,192
Moyenne HR_0 (± erreur standard)	67,0 (±6,7)	60,4 (±5,3)	73,9 (±7,0)	0,340
Moyenne VPD_0 (± erreur standard)	1,3 (±0,3)	1,4 (±0,2)	0,8 (±0,2)	0,326
Moyenne T_1 (± erreur standard)	25,5(±1,7)	25,0 (±0,8)	21,4 (±1,2)	0,090
Moyenne HR_1 (± erreur standard)	63,1 (±6,4)	61,4 (±3,8)	75,5 (±5,4)	0,165
Moyenne VPD_1 (± erreur standard)	1,4 (±0,3)	1,3 (±0,2)	0,7 (±0,4)	0,157
Moyenne T_2 (± erreur standard)	26,5 (±1,5)	24,4 (±0,9)	21,8(±0,8)	0,048
Moyenne HR_2 (± erreur standard)	60,4 (±6,1)	64,8 (±4,4)	78,0 (±4,1)	0,073
Moyenne VPD_2 (± erreur standard)	1,7 (±0,3)	1,2 (±0,2)	0,7 (±0,1)	0,059

Classification Hiérarchique sur Composantes Principales : HCPC

La classification réalisée sur les 35 parcelles élémentaires de 4 plantes réparties sur 3 jours (J1, J2 et J3) et sur trois périodes de traitement (matin .1, midi .2 et soir .3) répétées 4 fois fait apparaître 5 classes selon la classification automatique (Figure 14).

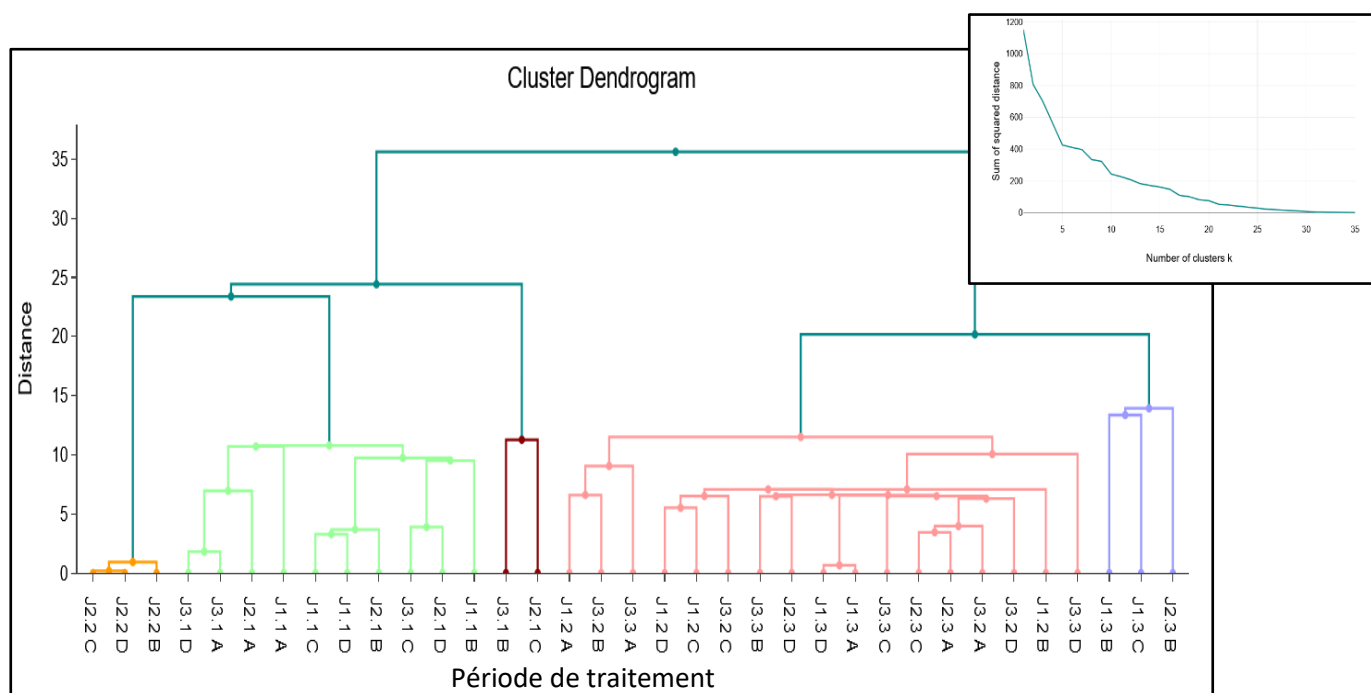


Figure 14 - Dendrogramme utilisé pour la CAH montrant le découpage en 5 groupes des parcelles élémentaires

A la suite de la classification ascendante hiérarchique, on projette les groupes constitués sur une ACP (Figure 15), où les parcelles ont été repérées par leurs coordonnées sur les axes factoriels. L'axe 1 représente majoritairement les facteurs climatiques comme les variations de température et d'humidité relative ainsi que la sévérité de la maladie sur les témoins. L'axe 2 correspond au % de protection du traitement et dans une moindre mesure aux températures (T_0 , T_1 , T_2). Ceci permet de regrouper les parcelles ayant des variables similaires.

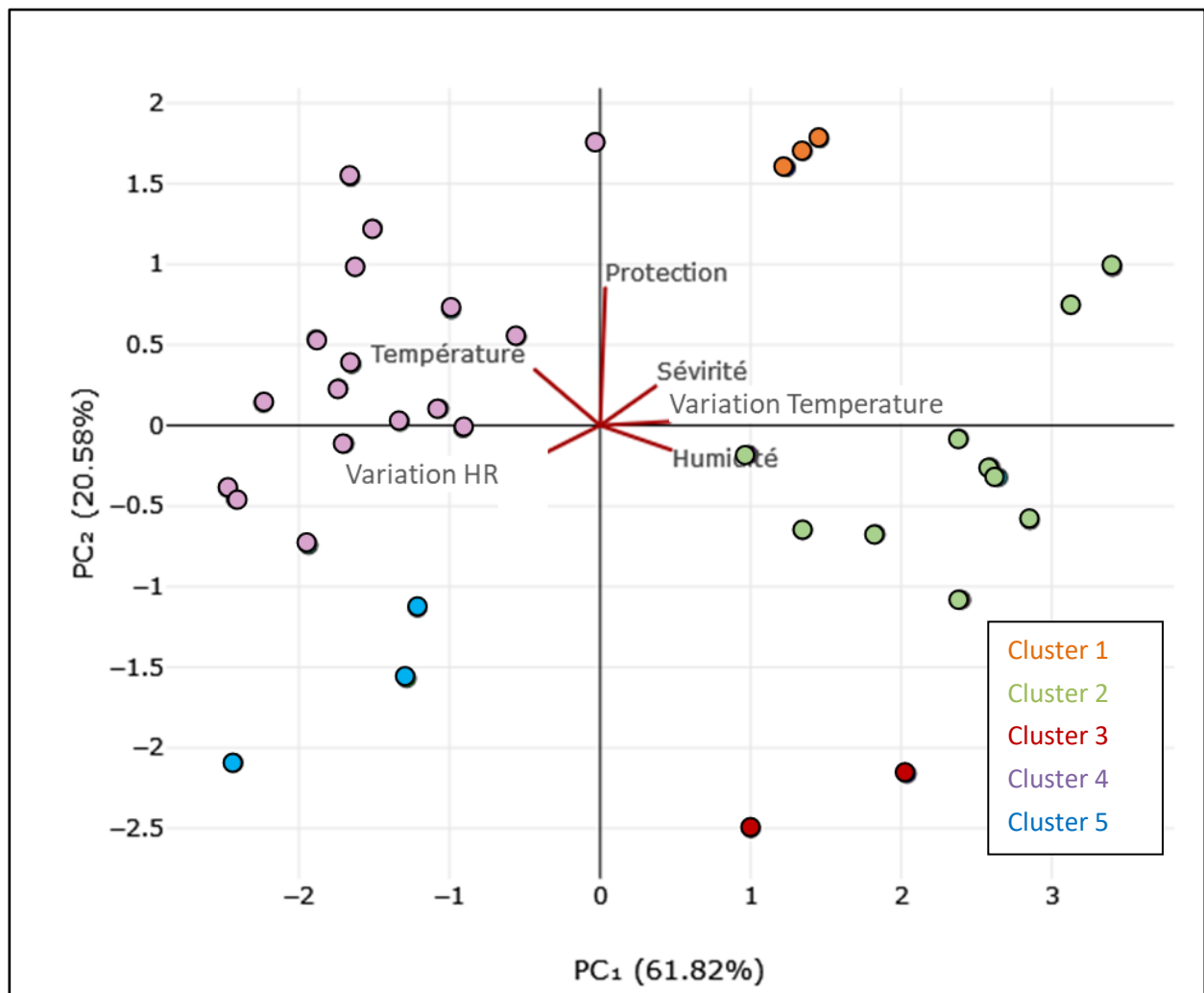


Figure 15 - Représentation des clusters sur le plan factoriel 1 :2

Les 5 clusters sont représentés dans le plan factoriel (82.4 % de variabilité expliquée) :

Le **cluster 1** (3 parcelles) est caractérisé par de fortes valeurs en efficacité de protection, de fortes variations positives de température et de fortes variations négatives d'humidité relative par rapport aux autres groupes.

Le **cluster 2** (11 parcelles) est caractérisé par de faibles valeurs d'efficacité de protection, de fortes variations positives de température et des températures faibles et des humidités élevées lors du traitement.

Le **cluster 3** (2 parcelles) est caractérisé par des valeurs très faibles en efficacité de protection et de très faibles températures lors du traitement.

Le **cluster 4** (17 parcelles) est le plus nombreux, il est très hétérogène, avec des efficacités de faible à très bonnes, avec de fortes températures et de faibles humidités relatives au moment des traitements. Ainsi que des fortes variations négatives de températures.

Le **cluster 5** (3 parcelles) est caractérisé par une faible sévérité de la maladie, associée à des efficacités de protection faibles.

Cette approche permet de montrer que les facteurs climatiques ne peuvent différencier seuls les efficacités. En effet, avec cette structuration des données, la variable sévérité de la maladie sur les

témoins joue un rôle prépondérant dans la classification. Cependant cette approche a aussi mis en avant l'importance des variables Variation de température et d'humidités relatives (Tv_1 , HRv_1 , Tv_2 , HRv_2 ,) pour permettre de différencier les groupes.

En conclusion, cette approche permet d'étudier les rapports entre les données de manière non linéaire là où la régression linéaire multiple a échoué. Cependant cette démarche se heurte à une significativité faible et se cantonne à une visualisation des liens possibles entre les données (Kimes et al., 2017). De plus la (faible) quantité de données est défavorable à cette approche. Cette méthode gagne en puissance et en significativité quand les groupes retenus sont compris entre 20 et 30 individus par groupes, il faudrait donc à minima tripler notre jeu de données pour espérer arriver à des conditions favorables (Dalmaijer et al., 2022).

Conclusions et perspectives

La protection de la tomate contre *O. neolycopersici* avec le produit formulé de biocontrôle AQ10 en condition quasi-commerciale a été démontrée et caractérisée pour la première fois. En effet, le traitement à base du champignon hyperparasite *A. quisqualis* réduit en moyenne la sévérité de la maladie d'environ 40 % et permet de réduire la sporulation du champignon pathogène d'environ 55 %. Cependant, une grande variabilité de protection a été obtenue qui va de 13 % à 97 % selon les périodes de traitements. Ces résultats sont similaires en termes d'efficacité moyenne et de variabilité d'efficacité à ceux obtenus sur d'autres pathosystèmes comme la poivron-*Leveillula taurica*, la courgette - *Podosphaera xanthii* et le melon - *Podosphaera xanthii* (Brand et al., 2009 ; Gilardi et al., 2012 ; Romero et al., 2007). L'efficacité de protection observée tend à diminuer à 21 jours pour devenir nulle à 28 jours après traitement. Ainsi pour assurer une protection en continu des plants de tomate il faudrait traiter toutes les 2 semaines pendant toute la durée de la période à risque.

L'effet du microclimat sur l'efficacité de la protection n'est pas identifiable avec certitude. En effet, la variabilité intra modalité (au sein des répétitions avec les mêmes conditions climatiques) est importante et les différences ne sont donc pas significatives entre les groupes d'efficacité subissant un microclimat différent. Pour autant, on a pu observer que la meilleure efficacité (97 %) est obtenue lors d'un traitement à 24°C et plus de 86 % HR. Le jeu de données n'a pas permis d'établir de lien entre les efficacités par rapport aux données climatiques malgré un dispositif expérimental conséquent. L'utilisation de la VPD a été décevante puisque peu d'interprétations supplémentaires ont été obtenues par rapport à l'humidité relative. De plus l'étude se basant sur des comptages ponctuels à 14 jours après traitement rend l'analyse d'évènements climatiques précis et courts (quelques heures) très difficile. En effet, l'impact des variables climatiques bien que présent est atténué par une période de plusieurs jours où le développement du pathogène aurait été affecté par le traitement puis repris. Ainsi un comptage partiel à 7 jours via des analyses qPCR aurait pu permettre de connaître un effet à court terme d'un traitement de AQ10 et enrichir les interprétations.

D'après le fabricant, pour obtenir une efficacité optimale contre les oïdiums, il faut traiter en préventif à une température comprise entre 18°C et 30°C, à une humidité relative supérieure à 80 % au moment du traitement (Biogard CBC, 2020). D'après nos résultats, ces conditions semblent nécessaires mais pas suffisantes pour obtenir une bonne efficacité. Ainsi, les conditions climatiques au moment du traitement et dans les heures qui suivent, ne semble pas directement influencer l'efficacité protectrice du traitement. Bien que leur maîtrise reste primordiale pour assurer une efficacité protectrice acceptable en condition commerciale, davantage de données doivent être générées pour construire des règles de décision précises. De plus, des études précédentes, ont également révélé le rôle essentiel des adjuvants pour assurer une efficacité de protection plus élevée sur d'autres pathosystèmes (Rajkovic et al., 2010, Shishkoff et al., 2002, Elad et al., 1998, Rur et al., 2018), ainsi l'utilisation d'adjuvant pourrait permettre d'obtenir une meilleure efficacité moins variable selon les conditions climatiques. Cette approche amène aussi une réflexion sur l'usage combiné d'AQ10 avec d'autres moyens de protection en tomate comme le soufre ou des pesticides de synthèse afin d'assurer une protection en cas d'incidence trop forte et d'échec de la protection biologique seule. Cependant il est à noter que le soufre et de nombreux fongicides sont néfastes à l'efficacité des traitements à base AQ10 réduisant sa capacité de parasitisme (Fiamingo et al., 2007 ; Schweigkofler, 2006). Enfin une étude récente sur vigne a montré l'intérêt de l'usage du produit AQ10 comme un produit de réduction de la pression de l'inoculum sur vigne (Caffi et al., 2022), réduisant l'inoculât sans toutefois protéger de l'apparition des symptômes mais en les rendant acceptables économiquement.

CHAPITRE 4 - Prototype d'un outil d'aide à la décision : DeciControl

1. Contexte du développement et problématique associée

1.1 La démarche menant à une application prototype

L'utilisation d'agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes bien que fortement encouragée, reste circonscrite à certaines problématiques, avec un nombre limité de produits utilisés et des retours mitigés. Les produits de biocontrôle souffrent d'un problème commun : la perception de leur efficacité reste faible, d'une part à cause d'un manque de référence sur leurs efficacités, et d'autre part à cause de l'absence de guide d'utilisation pratique, ce qui rend leurs utilisations souvent incertaines (voir chapitre 1). Bien que la recherche sur les produits de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes soit abondante, les informations disponibles sur les facteurs d'efficacité des produits commercialisés sont lacunaires et semblent peu applicables en tant que règles de décision pour un utilisateur potentiel (voir chapitre 2). En effet, les données disponibles ne sont pas spécifiques aux produits commercialisés, ni relatives aux pathosystèmes correspondant aux besoins des utilisateurs. En se concentrant uniquement sur les cultures maraichères, les lacunes sont encore plus flagrantes. Enfin, les données spécifiques et adaptées aux besoins des utilisateurs sont souvent générées dans des conditions trop éloignées de la production à la parcelle pour permettre la compréhension de l'efficacité de ces produits lors de leur mise en pratique par les utilisateurs (agriculteurs ou prescripteurs) (voir chapitre 2). Les données utilisables pour la construction d'un guide d'utilisation sont donc très limitées. Par la suite, grâce à l'étude de cas sur *A. quisqualis* (voir chapitre 3), il a été démontré la grande difficulté de génération de données exploitables par l'expérimentation dans la recherche de facteurs d'efficacité. On en déduit que les expérimentations peuvent enrichir les connaissances mais seulement de manière limitée et coûteuse en temps et en financement. L'étude de l'impact des conditions climatiques sur l'efficacité protectrice d'*A. quisqualis* contre l'oïdium de la tomate en est un exemple. Bien que les différentes périodes de traitement influencent l'efficacité aucun lien direct n'a pu être précisément caractérisé pour cette situation et ceci malgré la dizaine d'études précédentes sur d'autres pathosystèmes. La mise en application des connaissances acquises est difficile et nécessite notamment de nouvelles expérimentations pour consolider les données déjà obtenues.

L'hypothèse de recherche de cette thèse était que le développement d'un OAD pourrait améliorer l'efficacité des agents de biocontrôle microbiens. Ainsi le développement d'un tel outil est essentiel en tant que preuve de concept pour répondre aux interrogations sur l'intérêt de la démarche. Pour cela un prototype d'OAD a été imaginé puis créé, en co-construction avec les potentiels utilisateurs selon leurs retours collectés par l'enquête. Ce développement a pris également en compte les limitations des

données disponibles tant par la quantité que par leur qualité très hétérogène.

Cet OAD doit donc permettre en premier lieu de collecter des données du terrain, pour combler les manques des données de la littérature. Par la suite, l'objectif de l'outil sera de valoriser ces données et de les combiner avec les données scientifiques et potentiellement techniques puis de diffuser ces connaissances afin d'améliorer l'usage des agents de biocontrôle microbiens. Pour cela, nous aborderons d'abord les concepts qui servent de bases à DeciControl ainsi que de projets d'applications qui sont les sources d'inspiration de notre outil. Par la suite, nous détaillerons les résultats obtenus comme preuve de concept et enfin nous discuterons des limites actuelles et des perspectives de développement futur de l'outil.

1.2 Les concepts et les projets précédant la genèse de DeciControl

Avant de présenter le développement de l'application DeciControl, il est important de revenir sur plusieurs concepts qui sont à l'origine de la démarche de développement : les sciences participatives soutenues par les TIC et la co-construction avec une partie des futurs utilisateurs.

La convergence des avancées technologiques, des enjeux environnementaux et de la participation citoyenne a donné naissance à un domaine de recherche en constante expansion : les sciences participatives (Roturier, 2019) appuyées par les technologies de l'information et de la communication (TIC) (Bigot et al., 2012). Les sciences participatives se réfèrent à l'engagement du grand public dans la recherche scientifique, permettant ainsi une collaboration plus étroite entre les scientifiques et les citoyens. Les TIC englobent un large éventail de technologies, notamment l'informatique, les réseaux, les capteurs, et les dispositifs mobiles, qui facilitent la collecte, le traitement, le partage et l'analyse des données. Ces deux domaines interconnectés ont révolutionné de nombreux secteurs, y compris l'agriculture, en permettant notamment des avancées significatives dans la protection des plantes contre les maladies (Soulignac et al., 2019). Les applications mobiles, les réseaux de capteurs, les systèmes d'information géographique et les bases de données en ligne permettent une surveillance en temps réel des épidémies de maladies, une collecte de données à grande échelle et des méthodes de prédiction avancées. Les agriculteurs, souvent les premiers témoins des symptômes de maladies dans leurs champs, peuvent par exemple signaler ces observations grâce à des applications mobiles, contribuant ainsi à une surveillance accrue et à des réponses plus rapides (Soulignac et al., 2019).

L'utilisation des sciences participatives et des technologies de l'information et de la communication ont permis de grands succès comme les comptages d'insectes servant à évaluer la biodiversité ou à la surveillance de l'émergence d'organismes nuisibles à travers un territoire (Bœuf et al., 2012 ; Gosselin et al., 2010).

Parallèlement à ces concepts, ce sont les démarches de co-construction qui deviennent de plus en plus fréquentes en recherche. La co-construction est un processus collaboratif par lequel les connaissances sont élaborées conjointement par des experts, des acteurs de terrain, et souvent, le grand public. Dans le contexte des sciences participatives en agriculture, la co-construction implique l'engagement actif des agriculteurs, des conseillers, des chercheurs et d'autres parties prenantes dans la définition des objectifs

de recherche, dans la collecte de données et l'analyse et l'interprétation des résultats. La co-construction des connaissances est capitale en agriculture, en particulier dans le domaine de la protection des plantes contre les maladies. En effet, les agriculteurs, en tant qu'acteurs clés, apportent une expertise pratique et une connaissance quotidienne de leur contexte agronomique. La collaboration entre les agriculteurs et les scientifiques dans la co-construction de solutions pour la gestion des maladies des plantes a le potentiel de déboucher sur des approches plus efficaces et durables. La co-construction assure ainsi une meilleure implication des utilisateurs dans la réalisation d'une proposition de solution (Kenny and Regan, 2021 ; Kröbel et al., 2021). Les TIC sont un outil crucial qui facilitent cette collaboration en permettant un échange transparent et rapide d'informations entre les parties prenantes (Pinto et al., 2021 ; Shepherd, 2016)

Dans le paragraphe suivant, nous explorerons comment ces concepts ont été mis en œuvre dans des projets de sciences participatives axés sur la protection des plantes, en mettant l'accent sur l'utilisation des TIC. Les résultats de ces projets ont servi de base pour le développement de notre outil prototype dédié aux agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes.

1.2.1 Decileg, un projet issu de science participative et de co-construction pour la protection intégrée des plantes en maraîchage

Cet outil développé par le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes), vise à recueillir et formaliser des règles de décision utilisées pour la gestion sanitaire dans les cultures légumières. Ces règles sont coconstruites lors d'ateliers avec des conseillers agricoles et des expérimentateurs, puis mises à disposition sur internet. Environ 280 règles ont été établies, dont 120 sont actuellement disponibles sur le portail Ecophytopic (<https://geco.ecophytopic.fr/recherche/decileg>), pour aider à gérer les problématiques rencontrées par les agriculteurs sur le terrain. Les autres règles sont toujours en cours de validation au sein des ateliers de co-construction. Elles couvrent 12 espèces légumières pour différentes combinaisons de bioagresseurs et de cultures, comme la lutte contre le mildiou de la tomate, la pourriture grise de la fraise ou la gestion de *Tuta absoluta*. Le point le plus inspirant de cet outil est la co-construction à tous les niveaux puisque les règles sont co-élaborées, mais aussi « co-choisies » et « co-évaluées ». En effet, les situations hypothétiques servant à la construction des règles sont issues du choix des agriculteurs et des conseillers pour être proches des besoins et des réalités du terrain avant d'être abordées lors des ateliers. Cet outil recense et établit des connaissances pour les consolider et les disséminer ensuite auprès d'utilisateurs. Le développement de cet outil se poursuit en cherchant à développer davantage de règles et à intégrer un module d'évaluation des règles existantes.

1.2.2 Ephytia, une plateforme de science participative, de collecte et de diffusion de connaissances

Ephytia regroupe les principaux outils web mobiles développés à INRAE faisant appel aux sciences participatives notamment via l'application AGIIR, visant à collecter des signalements afin d'apprécier l'émergence et la dynamique de population d'insectes nuisibles ou d'auxiliaires (Roturier, 2019). La

plateforme Ephytia est issue d'un projet personnel d'un Ingénieur de recherche INRAE, spécialiste du diagnostic des cultures maraîchères en particulier et phytopathologiste généraliste. Cette plateforme met à disposition des connaissances expertes et vulgarisées en santé des plantes, principalement issues de la recherche INRAE, d'autres instituts scientifiques et techniques et de la bibliographie. La plateforme regroupe des applications distinctes mais dont la forme est générique. Elles sont dédiées à des cultures et des problématiques biotiques et abiotiques. Ces applications d'Ephytia se présentent sous un modèle de « wiki » avec des pages thématiques centrées sur une maladie, un ravageur ou un désordre abiotique. Ces pages sont découpées en plusieurs sections (généralités, symptomatologie, biologie et épidémiologie, moyens de lutte) permettant de connaître, d'identifier, de prévenir et de contrôler l'apparition de la problématique en question. Ephytia traite majoritairement des cultures maraîchères mais dispose également de contenus conséquents sur vigne, en arboriculture (prune, pomme et foresterie) et en grande culture (pomme de terre et tabac). Récemment, la plateforme Ephytia avec une autre plateforme de science participative PlantNet s'est associée au développement d'un nouvel outil de reconnaissance de maladies, directement à partir d'une image grâce à l'intelligence artificielle. Ce travail vise à moderniser et remplacer l'outil de diagnostic par comparaison d'images, actuellement présent sur l'application, qui permet d'aider à reconnaître une problématique en fonction des symptômes rencontrés (exemple pour la tomate disponible <http://ephytia.inra.fr/fr/D/167>).

2. Le prototype fonctionnel de l'outil

DeciControl a donc été créé selon les deux principes suivants :

- Coconstruire avec les futurs potentiels utilisateurs, c'est-à-dire les conseillers et agriculteurs en maraîchage ;
- S'appuyer sur les TIC pour permettre aux utilisateurs de participer facilement à la collecte de données puis d'y accéder rapidement toujours sur leur téléphone portable.

La co-construction s'est basée sur un réseau existant, le réseau Biocontrôle de l'APREL. Il s'agit d'un réseau collaboratif regroupant producteurs, conseillers et expérimentateurs, créé en 2018. Les échanges dans le cadre du réseau avaient pour objectif d'aboutir à un inventaire de solutions efficaces parmi la diversité des produits de biocontrôle existants, en décrivant les conditions dans lesquelles ces produits ont montré une efficacité de protection significative contre une maladie ou un ravageur des cultures. Pour de nombreux produits de biocontrôle, aucune information concernant leur efficacité sur le terrain n'était alors disponible, et l'arrivée de nouveaux produits sur le marché élargissait continuellement la liste de ceux pour lesquels les connaissances sont limitées. Ainsi le but du réseau a rejoint les besoins exprimés lors de l'enquête de terrain. Les utilisateurs ont besoin d'un outil pour fournir des données précises et facilement utilisables sur les conditions d'utilisation des produits afin d'assurer la meilleure efficacité possible. En effet, les résultats de la revue bibliographique retranscrits dans le chapitre 2 ne sont pas suffisants, ni en quantité, ni en qualité et par conséquent ne peuvent pas directement être utilisés pour répondre aux besoins du terrain. Pour autant, en exploitant les données disponibles de la littérature sur les produits, et en les couplant avec les retours il semble possible d'établir des guides d'utilisation des produits.

- Le second module permet à l'utilisateur de faire remonter des observations issues du terrain concernant l'efficacité des produits de biocontrôle afin d'améliorer les connaissances et les usages de ces produits.

L'outil vise à l'amélioration des pratiques en mettant en partage des données de référence sur les relations entre ces pratiques et l'efficacité du biocontrôle. L'hypothèse sous-jacente est que cet objectif est réalisable en combinant à la fois les connaissances scientifiques et techniques ainsi que le savoir du terrain (Figure 2).

Pour l'aspect purement technique, DeciControl est entièrement basé sur le Code source de Ephytia, c'est-à-dire une application web de gestion de contenus. Il s'agit d'une base de données en PostgreSQL 11 (le langage de base de données le plus répandu) avec un Framework Cake PHP 2016. Le Framework est le cadre logiciel permettant de gérer et de développer l'architecture visible de la plateforme web. Ephytia est également disponible sur mobile avec une version application via le Framework Flutter programmé en Dart.

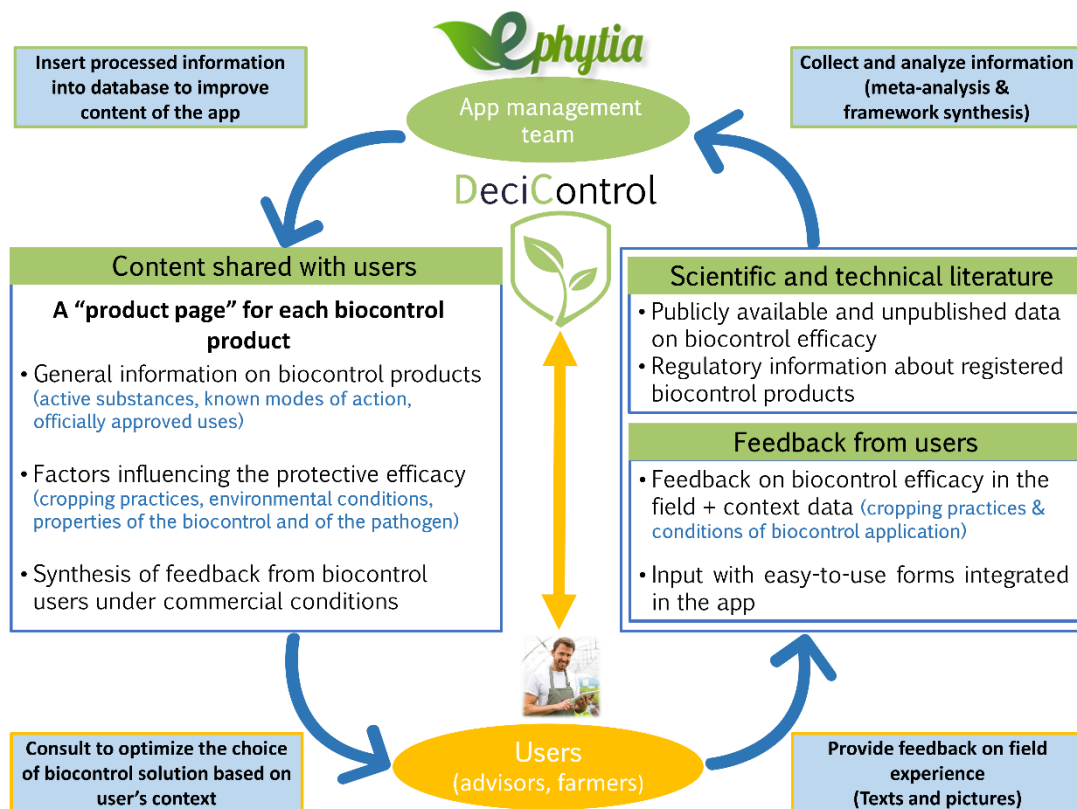


Figure 2 - Principe de fonctionnement de DeciControl issu du Poster ICPP 2023 intitulé « A Decision Support System based on literature review and farmers' experience to promote an efficient use of microbial biocontrol agents against Diseases »

La présentation technique détaillée de l'application se trouve dans une publication du journal Phytoma (Pressecq et al., 2022), également disponible en annexe 3.

2.2 La base de données

Les recherches bibliographiques détaillées dans le chapitre 2 ont été compilées dans une base de données rassemblant les informations sur les facteurs d'efficacité des agents de biocontrôle microbiens autorisés en Europe. C'est une base de données relationnelle (Paredaens et al., 2012) qui a été sélectionnée pour sa facilité de mise en place et sa robustesse. L'information y est organisée dans des tableaux à deux dimensions appelés des *relations* ou *tables* (similaires à des fichiers Excel). La base de données a fait l'objet d'un dépôt à l'office de protection des programmes le 06/03/2023 (voir Annexe 2).

Chaque publication servant à la construction de la base est analysée selon 3 étapes successives (Figure 3).

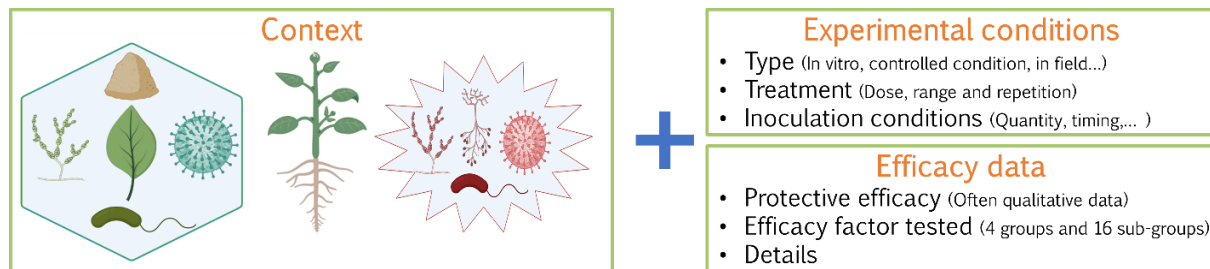


Figure 3 - Schématisation du formulaire d'analyse des publications pour leur intégration dans la base de données

D'abord, le contexte de chaque publication est obtenu et codé avec l'identification des informations sur l'agent de biocontrôle, la culture et l'agent pathogène cible. Puis les conditions expérimentales sont retranscrites selon les rubriques suivantes : le type d'expérience (in vitro, in vivo, aux champs, sur organes détachés, ...), les informations relatives aux traitements (dose, répétition, méthodes d'application...) et les conditions d'inoculation (origine, quantité, méthodes d'inoculation...). Enfin, l'analyse se concentre sur l'efficacité et les facteurs d'efficacité en récupérant les informations sur la valeur de protection apportée, si des facteurs d'efficacité ont été testés (selon les catégories établies dans le chapitre 2) et enfin le détail des effets de ces facteurs sur la protection.

Comme abordé dans le chapitre 2, cette partie s'est avérée très laborieuse en raison de la complexité des données, de la non-standardisation des expérimentations et de la très grande variabilité des données issues des publications. En effet, il n'est pas rare d'avoir des données très hétérogènes en termes de type d'expériences, de conditions d'inoculation et de traitement et surtout de mesure d'efficacité, ce qui rend toute comparaison difficile. Le processus de synthèse des connaissances n'est pas automatisé et requière temps et compétences. C'est un processus encore en cours de formalisation, basé sur une synthèse qualitative de données de qualité très variable. Les travaux présentés dans le chapitre 2 ont exploité la piste consistant à classer les informations extraites par degré d'applicabilité. On note que la base de données nécessite encore davantage de recherches pour permettre son exploitation par la diffusion d'information auprès des utilisateurs de produits de biocontrôle.

Pour compléter ces données scientifiques, une tentative d'intégration de données issues de la littérature technique a été initiée. Ces données sont par nature plus appliquées mais également de qualité parfois questionnable notamment par l'absence de témoin non traité ou de références chimiques permettant de correctement évaluer l'efficacité des agents de biocontrôle. Malgré ces limitations, environ 50

publications techniques ont été intégrées. Cependant, une autre problématique se pose concernant ces données : leur accessibilité. En effet, il n'existe pas de base unifiée ni d'outil de recherche performant pour y accéder. Enfin la langue de rédaction de ces données est également limitante puisqu'elles sont toujours dans la langue de leur pays d'origine, ce qui nécessite une traduction avant de les intégrer.

En plus de ces données, une autre approche consiste à récupérer des données directement auprès des firmes productrices. Ainsi, grâce à des accords de confidentialité, le partage de données sur des agents de biocontrôle a été initié. Leurs analyses et leur intégration sont en cours via un projet financé par le Consortium Biocontrôle DeciControl+ (<https://www6.inrae.fr/consortium-biocontrole/Projets-cofinances/DECICONTROL>). Ces données sont souvent nombreuses et enrichissantes sur la compréhension des facteurs d'efficacité mais leur utilisation demeure difficile. En effet, elles ne peuvent être ni divulguées ni citées directement. Leur exploitation est un des enjeux du projet DeciControl +.

2.3 L'outil de collecte de données du terrain

Afin de compléter les données manquantes sur les facteurs d'efficacité, des formulaires ont été construits. Ces derniers servent à documenter l'usage des produits de biocontrôle directement lors de leur utilisation et à connaître l'efficacité observée des produits ainsi que de potentiels facteurs influençant la protection obtenue. En Figure 4 et Figure 5, une capture d'écran présente la forme que prennent les formulaires de collecte de données.

Les formulaires ont été conçus pour que les utilisateurs puissent s'approprier facilement l'outil grâce à une interface utilisateur simple, minimisant le nombre de saisies (Sutcliffe, 2022). L'outil de collecte a été également présenté en détail par l'article paru dans Phytoma (Pressecq et al., 2022)

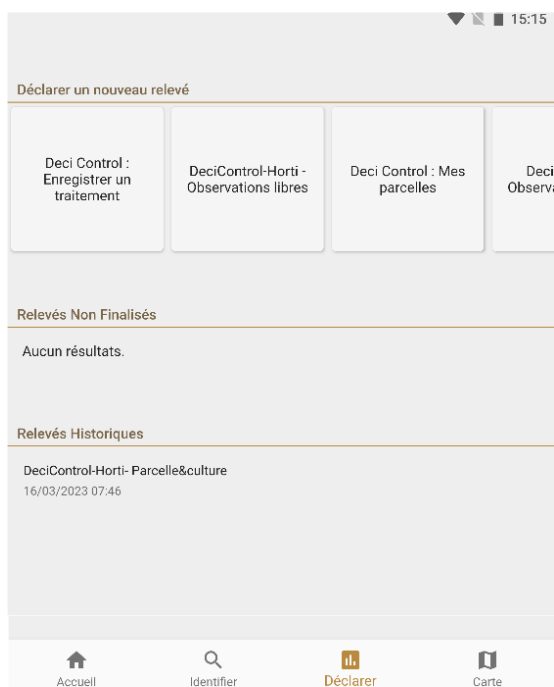


Figure 4 - Capture d'écran des formulaires de collecte de données



Figure 5 - Formulaire d'enregistrement d'un traitement sur l'application

En résumé l'outil de collecte se présente sous la forme des trois formulaires distincts collectant des informations sur la parcelle, les conditions de traitement et l'évaluation du produit. Un deuxième type de formulaire, optionnel, a un format « observation libre » et permet de faire remonter des données « en vrac » afin de familiariser l'utilisateur avec l'interface de l'application. Ce formulaire comprend toutes les questions des formulaires détaillés mais sans aucune obligation de réponse.

Table 1 - Informations collectée grâce aux formulaires de DeciControl

Parcelle (Contexte)	Conditions de(s) traitement(s)	Evaluation du produit
<ul style="list-style-type: none"> • Localisation • Culture • Variété • Précédent • Date de plantation • Densité de plantation • Mode de production • Type de production • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Bioagresseur cible • Etat initial du niveau de pression • Dose • Volume de bouillie • Mélange • Adjuvant • Matériel utilisé • Période de la journée 	<ul style="list-style-type: none"> • Date d'évaluation • Evaluation du niveau de pression à la suite de l'application du produit • Reconduction du traitement • Satisfaction du produit • Impact sur les auxiliaires • Phytotoxicité

	<ul style="list-style-type: none"> • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Interférence(s) rencontrée(s) influençant les résultats (irrigation, fertilisation, climat ...) • ...
--	---	--

Toutes les données collectées sont destinées à être analysées et intégrées dans la base de données puis diffusées via l'application.

2.4 Le prototype déployé

A partir de mai 2022, une première version de l'outil a été mise en ligne, la deuxième version a été rendue disponible à partir d'octobre 2022 et enfin une troisième version a été déployée en mars 2023. Elle reste la version en ligne en octobre 2023. En septembre 2023, l'application a été téléchargée environ 200 fois (Google Play Store et App Store) et possède 50 utilisateurs actifs au sein du réseau de l'APREL. 152 formulaires ont été collectés.

Les formulaires collectés n'ont pu être analysés pour le moment mais font l'objet d'un projet spécifique, Bioc'App. Ce projet vise à l'amélioration de l'outil de collecte et à l'analyse des formulaires.

Les analyses préliminaires montrent par exemple des usages d'agents de biocontrôle microbiens sur cinq cultures différentes (fraise, tomate, laitue, melon et courgette) avec les produits de biocontrôle les plus cités dans le chapitre 1.

Concernant les « fiches produits », un format spécifique a été conçu pour faciliter et diffuser les informations issues de la base de données (Figure 6). Le but étant de retranscrire les connaissances disponibles par un texte synthétique et spécifique, par produit et par pathosystème. Une dizaine de fiches produit sont en cours de réalisation dans le cadre du projet DeciControl + et seront rendues publiques en début 2024. Une description détaillée de la forme prévue des fiches produits a été présentée dans l'article de Phytoma (Pressecq et al., 2022).



Figure 6 - Modèle de page produit tel qu'il a été imaginé pour les versions suivantes

3. Bilan, évolutions nécessaires et limites

3.1 Collecte et synthèse des données

La collecte de données se heurte tout d'abord à une mobilisation difficile des utilisateurs (conseillers et agriculteurs) qui manquent de temps pour remplir les formulaires. Il semble évident que tant que la finalité de leurs remontées ne leur sera pas perceptible, leur implication restera faible. Il est donc primordial de continuer le travail sur la synthèse et l'intégration de ces données au sein de la base de données puis sur l'intégration de ces informations au sein de fiches produits pour les convaincre de s'engager davantage. Cette problématique a déjà été abordée dans des études précédentes montrant que la perception d'un manque d'avantages suffisants, dissuade les agriculteurs à s'engager dans la technologie des smartphones et des applications agricoles (Kenny and Regan, 2021). De plus, des ateliers de collecte de données et d'amélioration des formulaires sont prévus pour pallier cette problématique.

Enfin, un défi majeur reste la méthode de synthèse de ces données issues du terrain. Avec les succès des premiers formulaires collectés, des tentatives ont été effectuées suivant les méthodes de synthèse qualitative mais davantage de données sont nécessaires pour progresser dans cette direction. Certaines solutions seront abordées dans un des projets de recherche qui fait suite à la thèse, le projet BioC'App (2023-2026).

3.2 La mise à disposition de l'information

La construction des fiches produits demeure complexe et inachevée. En septembre 2023, le format des fiches produits doit faire l'objet de nouveaux développements notamment sur la synthétisation de l'information et sa retranscription. En effet, les données sont encore trop lacunaires, dispersées (entre les pathosystèmes) et peu applicables pour permettre d'établir une synthèse utilisable facilement par un utilisateur final. Beaucoup d'aspects du déploiement et de l'efficacité des produits ne sont pas documentés ou le sont uniquement par des argumentaires commerciaux des firmes sans source à l'appui. Ces manques handicapent la construction d'un conseil d'utilisation basé sur ces données. On peut prendre en exemple le produit Serenade (ou Rhapsody), à base *B. amyloliquefaciens* QST 713. Bien que de nombreuses données soient présentes dans la littérature notamment sur ses températures optimales de croissances et de développement, on ne connaît ni l'effet de la durée d'exposition à une température, ni l'effet de l'évolution de température dans le temps sur l'agent de biocontrôle. Ainsi malgré de nombreuses données sur la température optimale de l'agent, sa mise en pratique pour favoriser l'efficacité est très réduite. Cette complexité est très limitante pour la construction de synthèses et rend caduque ou peu informative les recommandations basées sur un seul facteur. De plus, au vu de la complexité des relations entre les facteurs et l'efficacité mise en avant dans le chapitre 3, il est nécessaire d'avoir plusieurs publications étudiant le même facteur sur le même pathosystème afin de pouvoir établir des conclusions solides. Le niveau actuel des données permet au maximum de justifier ce qui est partagé par la firme dans les guides d'utilisation commerciale mais cette fois-ci avec des publications scientifiques à l'appui. Les facteurs d'efficacité par manque en quantité (pas suffisamment d'étude sur le même facteur et sur le même pathosystème) et en qualité (diversité des cultures, des pathogènes, répétabilité des

facteurs) ne sont pas suffisants pour établir des règles de décision fiables permettant de conseiller efficacement l'utilisation de tel ou tel produit de biocontrôle dans une situation réelle.

3.3 Les problèmes techniques

Au-delà des problèmes nécessitant des travaux de recherche supplémentaires, le prototype s'est également heurté à des limites purement techniques. Du point de vue technologique, Ephytia n'est pas à la pointe de la technologie et présente un certain retard sur l'architecture et les fonctionnalités ainsi que sur l'ergonomie par rapport aux standards actuels. Elle reste cependant extrêmement compétitive en termes de prix et de durée de développement grâce à son modèle généraliste qu'on peut appliquer à n'importe quel domaine. Ainsi, le coût de développement faible (environ 5000 €) ainsi que la rapidité d'élaboration n'ont été possibles que grâce à l'outil de développement générique d'Ephytia. Cependant cette généricité a un coût puisque les fonctionnalités restent très limitées et le développement supplémentaire impossible à cause de la restructuration de la plateforme Ephytia initiée en 2023. Ainsi, il existe de nombreuses contraintes techniques liées à l'outil de collecte et à l'outil de diffusion. On peut déplorer :

- L'ergonomie datée et obsolète par rapport aux standards actuels ;
- Une impossibilité d'interfaçage avec des capteurs connectés alors qu'il s'agit d'une demande remontée par les utilisateurs lors de l'enquête présentée dans le chapitre 1 ;
- Une interface « en dur », c'est-à-dire que chaque page se comporte comme un fichier texte indépendant, ce qui empêche une liaison directe entre le contenu de la base de données et les fiches produits. Il est donc nécessaire de remplir chaque fiche manuellement au lieu d'importer du contenu.

Enfin la plate-forme actuelle ne permet pas d'intégrer des fonctionnalités (type « Search google ») liées aux avancées récentes de l'intelligence artificielle. Il faudrait recommencer à zéro sur une nouvelle plateforme plus adaptée.

3.4 Les suites de DeciControl

DeciControl n'est pas le résultat final de la thèse mais plutôt une expérimentation à part entière. Ce prototype a été conçu tout au long de la réalisation de ce travail impliquant une construction empirique visant à apporter une réponse à la question de recherche suivante : un OAD peut-il aider à améliorer l'efficacité des agents de biocontrôle microbiens ?

Le prototype d'outil vise à répondre aux besoins du terrain, en fournissant un guide d'utilisation des agents de biocontrôle microbiens basé sur les facteurs d'efficacité. Mais pour cela il doit dépasser les lacunes des données disponibles et les difficultés de génération expérimentale des facteurs d'efficacité. Le processus de développement, notamment les réflexions lors d'atelier de co-construction ont permis de mieux comprendre les limites pratiques d'utilisation des agents de biocontrôle comme le fait que la notice des produits n'est peu ou pas prise en compte ou que les informations doivent être transmises sur un format accessible sur mobile. Ainsi l'outil de collecte doit être amélioré en intégrant une collecte plus

automatisée des données via par exemple une interconnexion avec des capteurs déjà utilisés ou via le cahier de culture numérique.

Pour la diffusion d'information, la tentative via les « fiches produits » a été très enrichissante mais a montré les difficultés de synthèse des données de la littérature et la difficulté d'exploitation des retours du terrain.

DeciControl est une première étape, preuve que le concept est prometteur mais nécessitant des travaux de recherche supplémentaires (notamment ceux déjà financés) pour la collecte, la synthèse et la diffusion de ces informations auprès des utilisateurs.

Liste des Figures pour le Chapitre 4

Figure 1 - Déroulement de la thèse.....	113
Figure 2 - Principe de fonctionnement de DeciControl issu du Poster ICPP 2023 intitulé « A Decision Support System based on literature review and farmers' experience to promote an efficient use of microbial biocontrol agents against Diseases »	114
Figure 3 - Schématisation du formulaire d'analyse des publications pour leur intégration dans la base de données.....	115
Figure 4 - Capture d'écran des formulaires de collecte de données.....	117
Figure 5 - Formulaire d'enregistrement d'un traitement sur l'application	117
Figure 6 - Modèle de page produit tel qu'il a été imaginé pour les versions suivantes.....	119

Liste des Tableaux pour le Chapitre 4

Table 1 - Informations collectée grâce aux formulaires de DeciControl.....	115
--	-----

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1. Synthèse des résultats des quatre chapitres

Compte tenu des restrictions sociétales imposées à l'utilisation des pesticides chimiques et de la nécessité de maintenir des pratiques agricoles durables productives, il est indéniable que l'utilisation d'agents de biocontrôle est devenue incontournable en maraîchage pour protéger les cultures des maladies. Cependant, le premier chapitre de cette thèse a mis en évidence un manque manifeste d'efficacité dans l'utilisation de ces produits selon la perception des utilisateurs. Ceci est en grande partie dû au manque de références et de guides d'utilisation appropriés facilement disponibles pour les utilisateurs. De plus, l'offre abondante de produits de biocontrôle microbiens contraste avec leur utilisation limitée sur un nombre restreint de cibles et de cultures. Cette situation souligne un besoin pressant d'améliorer la recherche et la diffusion de connaissances dans ce domaine. Il est impératif de développer des références d'efficacité solides, ainsi que des guides d'utilisation pratiques pour les agents de biocontrôle, afin de faciliter leur adoption plus large grâce à une meilleure efficacité. En filigrane, cette perception d'un manque d'efficacité des produits de biocontrôle et de données insuffisantes dans la littérature souligne l'importance d'une collaboration accrue entre les chercheurs, les agriculteurs et l'industrie pour développer des solutions de biocontrôle plus efficaces, durables et adaptées aux pratiques.

Le travail de thèse a également consisté à établir si les lacunes exprimées reflètent une réalité au sein de la littérature scientifique sur les agents de biocontrôle microbiens. Malgré un intérêt croissant pour ces solutions alternatives dans le contexte de l'agriculture durable, la revue bibliographique menée dans le Chapitre 2 révèle une hétérogénéité marquée en ce qui concerne les informations disponibles. Si l'existence de multiples espèces de biocontrôle microbiens plus ou moins efficaces mais disponibles en Europe est indéniable, il est préoccupant de constater que les données à leur sujet sont souvent lacunaires et dispersées entre les différents agents microbiens et pathosystèmes. De plus, le faible nombre de données sur les facteurs d'efficacité, ainsi que leur hétérogénéité en termes de qualité, limite la compréhension globale de ces produits par les utilisateurs. Il est notable qu'encore moins de publications sont directement applicables en l'état, car reflétant des situations trop éloignées des conditions d'utilisation commerciales et nécessitant d'avantage de recherche.

Face à ces constats, il est impératif que la recherche future s'attache à combler ces manques en consolidant les informations existantes par les outils d'analyse et de synthèse, mais également en approfondissant l'exploration de nouveaux types de données. En effet, les données disponibles ne peuvent suffire pour combler les demandes des utilisateurs qui correspondent à une multiplicité de combinaisons de pathosystème (culture-maladie), de conditions environnementales et de pratiques agronomiques.

Dans le but d'explorer la possibilité d'acquisition de données expérimentales, un essai a été mené sur l'agent de biocontrôle microbien dans des cultures de tomate sous abri. Cette étude a mis en lumière les défis significatifs liés à l'efficacité de AQ10 contre l'oïdium de la tomate en conditions commerciales. Les résultats indiquent une performance moyenne de l'agent, soulignant ainsi la complexité des facteurs qui

influencent son efficacité sur le terrain. Bien que des tendances liées à la température et à l'humidité puissent être identifiées, la variabilité observée est trop grande pour parvenir à des conclusions définitives. Cette complexité souligne également la nécessité pressante de mener de nombreuses expérimentations supplémentaires et de collecter des données exhaustives pour établir des règles de décision fiables quant aux conditions nécessaires pour garantir une efficacité optimale. Les informations ainsi générées peuvent guider les producteurs dans leurs décisions et contribuer à une utilisation plus judicieuse des agents de biocontrôle.

Enfin, tout au long de la thèse et grâce aux résultats obtenus, un prototype d'outil d'aide à la décision a été conçu et déployé. Cet outil vise à mettre en valeur les données disponibles dans la littérature au sein d'une base de données et de les compléter avec des données issues des firmes productrices d'agents de biocontrôle et des données directement issues du terrain via les utilisateurs eux-mêmes. Ce projet initial a su convaincre des partenaires et des financeurs pour assurer la suite de son développement car il a été jugé prometteur par les acteurs de terrain et ouvre des perspectives intéressantes notamment dans le cadre des co-développements entre les firmes productrices d'agents de biocontrôle microbiens, le monde de la recherche et les utilisateurs finaux.

Cependant de nombreuses problématiques restent à régler pour favoriser l'usage des agents de biocontrôle microbiens via ce prototype d'outil. On peut citer la synthèse et la diffusion de l'information, la gestion de données manquantes, la résolution des contradictions entre les données et les mises à jour de l'outil. Des questions restent également en suspens pour la validation et l'utilisation des données issues du terrain ou encore le rôle des données confidentielles des firmes et l'importance à attribuer aux données techniques. Ces défis seront relevés dans le cadre des projets faisant suite à la thèse.

2. D'autres voies pour améliorer l'usage des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies des plantes

Dans ce manuscrit nous nous sommes focalisés sur l'amélioration de l'efficacité des agents de biocontrôle microbiens contre les maladies. Cependant il existe d'autres moyens de favoriser leurs usages notamment à s'inspirant de ce qui se fait dans d'autres secteurs ou en cherchant de nouveaux agents plus innovants.

2.1 L'exemple des productions animales : l'application d'agents de biocontrôle microbiens comme traitement préventif systématique

La volonté de réduire les intrants et d'instaurer une protection intégrée sans recours à des pesticides chimiques ne concerne pas que le secteur du maraîchage. Il apparaît également en production animale où l'usage antibiotique reste problématique. Suivant le concept du « One Health », les agents de biocontrôle microbiens ont été implantés dans la gestion sanitaire des élevages (Guéneau et al., 2022). Une nouvelle méthode d'utilisation des agents de biocontrôle microbiens pour se protéger des maladies

infectieuses (majoritairement d'origine bactérienne (Tomley and Shirley, 2009)) consiste à répandre des souches microbiennes à la suite des méthodes de nettoyages prophylactiques (Guéneau et al., 2022). Ainsi, le vide laissé sur les surfaces de production par les nettoyages traditionnels à base de chlore, de soude ou de peroxyde d'hydrogène est comblé par les micro-organismes qui forment des amas et un biofilm bloquant le développement des pathogènes et réduisant le nombre d'infections significativement (Guéneau et al., 2022). Cette approche pourrait être appliquée pour la santé des plantes de manière similaire. On retrouve par exemple ce paradigme dans les pratiques de renforcement de souches endophytes pour améliorer les défenses de la plante contre les pathogènes plutôt que d'introduire des souches allogène (Wang et al., 2023).

2.2 Les mycovirus comme nouveaux agents de biocontrôle microbiens

La recherche de solutions durables pour la gestion des pathogènes des plantes s'est intensifiée ces dernières décennies, avec plus de 20 espèces d'agents de biocontrôle différentes autorisées en Europe et en France. Cependant, pour continuer à réduire l'utilisation des pesticides chimiques, il est impératif d'explorer et de découvrir de nouveaux candidats microbiens efficaces. Outre les genres peu présents actuellement comme les *Saccharomyces* ou les *Pantoea*, c'est en direction des virus que la recherche peut investiguer le plus grand nombre de nouveaux candidats innovants pour la protection des plantes. En effet, les agents de biocontrôle à base de virus existent déjà mais leur utilisation reste limitée en Europe. En septembre 2023, 3 bactériophages sont listés dans la base de données européenne mais aucun n'est autorisé pour le moment (voir Figure 7 de l'introduction). Pour les USA, sept bactériophages ont été enregistré (<http://npic.orst.edu/NPRO/>). La première raison est la difficulté réglementaire qui rendent le coût inabordable pour l'enregistrement spécifique à chaque hôte par rapport au marché potentiel (Wagemans et al., 2022). Une autre raison évoquée est l'acceptation sociétale d'utiliser des virus pour protéger les plantes contre des maladies. En effet pour accepter les virus comme une solution prometteuse c'est l'image des virus qu'il faut changer pour la rendre acceptable pour la société et les législateurs (Carradore, 2019). Dans le domaine on peut citer les expérimentations pionnières concernant les virus entomopathogènes (Deka et al., 2021 ; Wagemans et al., 2022) et les virus de protections croisées issus de souches non pathogènes (Wagemans et al., 2022 ; Ziebell and Carr, 2010) qui font désormais partie intégrante de la protection intégrée en maraîchage.

Mais c'est en direction des bactériophages, que l'innovation est la plus présente. En effet, depuis plus de 100 ans, les phages ont été utilisés dans le domaine médical notamment en Union soviétique (Chanishvili, 2012) mais commencent à être utilisables en agriculture depuis les années 1990 (Halawa, 2023). Depuis les années 2000 ces agents infectieux spécifiques des bactéries ont suscité un intérêt croissant dans le domaine de la protection des plantes comme le démontrent les programmes « Farm to Fork » (Fernández et al., 2018 ; Nafarrate et al., 2020). L'utilisation de phages en tant qu'agents de biocontrôle offre des avantages significatifs : tout d'abord, les phages présentent une spécificité remarquable, ciblant précisément des pathogènes bactériens spécifiques sans perturber les microorganismes non-ciblés, préservant ainsi l'équilibre microbiologique des écosystèmes agricoles (Holtappels et al., 2021). L'avancée

continue de la recherche sur les phages en tant qu'agents de biocontrôle prometteurs ouvre de nouvelles perspectives mais leur mise sur le marché reste lente, de nombreux défis restent à relever comme leur formulation et le risque d'apparition de résistance. De plus, sans nier l'intérêt des phages, leur ciblage uniquement bactérien limite leur impact dans la protection des plantes où la majorité des maladies présentes sont plutôt fongiques ou issues d'oomycètes. Enfin, même si leur mode d'action est différent des autres agents de biocontrôle, leur utilisation en pratique reste assez similaire à ceux étudiés dans ce manuscrit. Les mêmes problématiques s'appliquent sur les facteurs d'efficacité, le déploiement de l'agent, son développement et l'expression de son mode d'action, en bref, les bactériophages restent sur le modèle des traitements qui viennent remplacer les traitements à base de pesticides chimiques.

Pour autant, il existe une autre catégorie de virus qui semble encore plus prometteuse, s'éloignant du modèle de traitement pour résoudre une problématique, les mycovirus. Leur potentiel réside dans leur capacité à infecter et à moduler le métabolisme de champignons pathogènes des plantes, réduisant ainsi leur virulence (Longkumer and Ahmad, 2020). Les observations et les expériences sur les mycovirus commencent dès les années 1950 notamment sur le chancre du châtaignier avec des succès mitigés dus à la difficulté de dissémination et la grande sensibilité des arbres américains à *Cryphonectria parasitica*, le champignon responsable (Double et al., 2017 ; Turina and Rostagno, 2007). Plus récemment, une étude a montré qu'après traitement de semences de colza contre *S. sclerotiorum* par un mycovirus, l'agent pathogène changeait son comportement : il se développe à la surface et sous l'épiderme de la feuille sans tuer les cellules de la plante. Le mycovirus supprime la production de facteurs de pathogénicité, transformant le champignon en endophyte, et induit dans la plante une résistance à *S. sclerotiorum* et même à *Botrytis cinerea* (Khan et al., 2023 ; Zhang et al., 2020 ; Zhou et al., 2021). Suite à ces avancées, de nouvelles publications ont fait suite à cette découverte et sa mise en application sur d'autres pathogènes comme *Rhizoctonia solani* (Umer et al., 2023), la fusariose du blé (Zhang et al., 2023). Au-delà du front de science que constituent les mycovirus pour la protection des plantes, le développement de ces solutions résout de nombreuses limites des produits de biocontrôle microbiens. En effet, la première limite majeure des agents de biocontrôle est la comparaison constante avec les produits pesticides chimiques, que ce soit dans leur utilisation ou dans leur efficacité attendue. Ils restent des traitements et sont jugés comme tels. Les mycovirus changent ce paradigme : il n'est plus question de traitement mais d'implantation du génome viral directement pendant la production des plants ou des semences afin de protéger la plante des maladies éventuelles dès le début de son implantation. Le déploiement de cette solution se rapproche donc davantage de la sélection génétique que d'un traitement à proprement parler. Les mycovirus résolvent également la question sur la qualité de traitement puisque ce n'est plus l'agriculteur qui devra traiter mais une entité spécialisée avant la vente des semences ou des plants. Bien évidemment de nombreuses problématiques restent en suspens comme le risque écologique d'installation et de dissémination de souches virales à grande échelle, le contournement de résistances chez les pathogènes et les effets sur des pathogènes non-cibles. Mais les développements de solutions à base de mycovirus comme agent de biocontrôle est une des pistes les plus intéressantes pour favoriser l'usage de biocontrôle dans un cadre différent.

3. Ce que m'a apporté la thèse et ma petite contribution pour la promotion des agents de biocontrôle

La réalisation de ma thèse a été une expérience extrêmement enrichissante à bien des égards. Non seulement elle m'a permis d'acquérir de précieuses compétences en recherche (bibliographie, problématisation, hypothèse et expérimentations, ...), mais elle a également renforcé ma compréhension du rôle essentiel que jouent les agents de biocontrôle microbiens dans l'agriculture durable. Ma petite contribution à la promotion de ces agents a été un aspect gratifiant de ce voyage académique et professionnel.

En ce qui concerne les compétences et les techniques de recherche, la thèse m'a offert l'opportunité de plonger profondément dans le domaine des agents de biocontrôle microbiens. J'ai dû développer une expertise dans la collecte et l'analyse de données, ainsi que dans la compréhension des facteurs régissant l'efficacité des agents de biocontrôle microbiens. Ces compétences m'ont non seulement aidé à mener à bien ma recherche, mais elles ont également eu une incidence positive sur ma capacité à aborder d'autres défis complexes dans le domaine de l'agriculture.

L'une des leçons les plus précieuses que j'ai apprises au cours de ma thèse est l'importance des réseaux d'experts dans la promotion des agents de biocontrôle. J'ai pu constater que la diffusion des connaissances et des innovations dans ce domaine dépendait en grande partie de la collaboration et de la communication entre les chercheurs, les agriculteurs, les organismes gouvernementaux et les industriels du monde agricole. Mon travail de thèse m'a permis de mieux comprendre comment fonctionne ce type de réseau complexe et comment il peut être renforcé pour favoriser l'adoption plus large de solutions novatrices pour protéger les plantes.

De plus, grâce à nos résultats de recherche, j'ai eu la chance de rejoindre une start-up prometteuse qui se consacre à la promotion des agents de biocontrôle. Cette expérience professionnelle me donnera l'occasion de mettre en pratique les connaissances acquises pendant ma thèse. Je pourrai contribuer activement à la mission de la start-up en utilisant nos résultats de recherche pour développer des produits et des stratégies visant à aider les agriculteurs à adopter plus largement les solutions de biocontrôle appuyées par les nouvelles technologies. Cela a été une étape importante pour moi, car cela m'a montré que la recherche académique peut avoir un impact concret et positif sur les pratiques agricoles.

En résumé, ma thèse m'a apporté des compétences de recherche essentielles, une compréhension approfondie des agents de biocontrôle microbiens, et m'a ouvert les portes pour contribuer activement à la promotion des agents de biocontrôle grâce à mon travail au sein d'une start-up. Je suis convaincu que cette expérience continuera à jouer un rôle clé dans ma carrière et dans la promotion d'une agriculture plus durable.

Bibliographie

- Agence Bio, 2022. Les chiffres 2021 du secteur bio [WWW Document]. URL https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2022/06/DP-final_AGENCE-BIO-10-juin-2022.pdf (accessed 6.30.23).
- Agreste, 2022. Recensement agricole 2020 [WWW Document]. URL <https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#c=home> (accessed 6.18.23).
- Aguilar-Veloz, L.M., Calderón-Santoyo, M., González, Y.V., Ragazzo-Sánchez, J.A., 2020. Application of essential oils and polyphenols as natural antimicrobial agents in postharvest treatments: Advances and challenges. *Food Sci. Nutr.* 8, 2555–2568. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1437>
- Akoglu, H., 2018. User's guide to correlation coefficients. *Turk. J. Emerg. Med.* 18, 91–93. <https://doi.org/10.1016/j.tjem.2018.08.001>
- Alary, É., 2016. L'histoire des paysans français, Perrin. ed, Pour l'histoire.
- Alix, Y., 2009. Perrette et le tracteur : le paysan dans la publicité [WWW Document]. URL <https://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2009-01-0101-004> (accessed 8.3.23).
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Amigues, 2010. Théophraste. Recherches sur les plantes, Belin. ed, Botanique.
- Ara, I., Turner, L., Harrison, M.T., Monjardino, M., deVoil, P., Rodriguez, D., 2021. Application, adoption and opportunities for improving decision support systems in irrigated agriculture: A review. *Agric. Water Manag.* 257, 107161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107161>
- Asprooth, L., Norton, M., Galt, R., 2023. The adoption of conservation practices in the Corn Belt: the role of one formal farmer network, Practical Farmers of Iowa. *Agric. Hum. Values.* <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10451-5>
- Aulagnier, A., Goulet, F., 2017. Des technologies controversées et de leurs alternatives. Le cas des pesticides agricoles en France. *Sociol. Trav.* 59. <https://doi.org/10.4000/sdt.840>
- Authority (EFSA), E.F.S., Carrasco Cabrera, L., Medina Pastor, P., 2021. The 2019 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA J.* 19, e06491. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6491>
- Balny, C., 2017. De l'histoire naturelle à la biologie moderne en passant par la chimie 48, 12.
- Bardin, M., Ajouz, S., Comby, M., Lopez-Ferber, M., Graillet, B., Siegwart, M., Nicot, P.C., 2015. Is the efficacy of biological control against plant diseases likely to be more durable than that of chemical pesticides? *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00566>
- Bardin, M., Nicot, P.C., 2022. Microorganisms as biocontrol products, in: Fauvergue, X., Rusch, A., Barret, M., Bardin, M., Jacquin-Joly, E., Malausa, T., Lannou, C. (Eds.), *Extended Biocontrol*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 127–136. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2150-7_11
- Bardin, M., Pugliese, M., 2020. Biocontrol agents against diseases, in: Gullino, M.L., Albajes, R., Nicot, P.C. (Eds.), *Integrated pest and disease management in greenhouse crops, plant pathology in the 21st century*. Springer International Publishing, Cham, pp. 385–407. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22304-5_13

- Bardin, M., Siegwart, M., 2022. Can pests develop resistance to biocontrol products? in: Fauvergue, X., Rusch, A., Barret, M., Bardin, M., Jacquin-Joly, E., Malausa, T., Lannou, C. (Eds.), *Extended Biocontrol*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 267–272. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2150-7_23
- Bennett, A.J., Leifert, C., Whipps, J.M., 2003. Survival of the biocontrol agents *Coniothyrium minitans* and *Bacillus subtilis* MBI 600 introduced into pasteurised, sterilised and non-sterile soils. *Soil Biol. Biochem.* 35, 1565–1573. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.08.001>
- Berger, F., Li, H., White, D., Frazer, R., Leifert, C., 1996. Effect of pathogen inoculum, antagonist density, and plant species on biological control of *phytophthora* and *pythium* damping-off. *Phytopathology* 86, 428–433.
- Bertrand, C., Malausa, T., Nicot, P.C., 2022. The Challenge of biocontrol deployment, in: Fauvergue, X., Rusch, A., Barret, M., Bardin, M., Jacquin-Joly, E., Malausa, T., Lannou, C. (Eds.), *Extended Biocontrol*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 207–218. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2150-7_18
- Bigot, R., Crouette, P., Daudey, E., Delakian, I., 2012. Rapport réalisé à la demande de : Le Conseil Général de l’Economie, de l’Industrie, de l’Energie et des Technologies (CGEJET) L’Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP).
- Biogard CBC, 2020. AQ 10® Fongicide microbien contre l’oïdium à base d’*Ampelomyces quisqualis* [WWW Document]. URL https://cbcbiogard.fr/wp-content/uploads/2020/03/AQ10_DEPLIANT_2020.pdf (accessed 10.14.22).
- Biswas, S., Ghosh, B., 2014. Chlordecone, in: Wexler, P. (Ed.), *Encyclopedia of toxicology* (Third Edition). Academic Press, Oxford, pp. 846–848. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00275-X>
- Bœuf, G., Allain, Y.-M., Bouvier, M., 2012. L’apport des sciences participatives à la connaissance de la biodiversité en France. *Lett. L’OCIM Mus. Patrim. Cult. Sci. Tech.* 8–18. <https://doi.org/10.4000/ocim.1119>
- Bogen, K., 1996. The effect of questionnaire length on response rates: a review of the literature [WWW Document]. URL <https://www.census.gov/library/working-papers/1996/adrm/sm96-05.html>
- Bonfante, A., Monaco, E., Manna, P., De Mascellis, R., Basile, A., Buonanno, M., Cantilena, G., Esposito, A., Tedeschi, A., De Michele, C., Belfiore, O., Catapano, I., Ludeno, G., Salinas, K., Brook, A., 2019. LCIS DSS—An irrigation supporting system for water use efficiency improvement in precision agriculture: A maize case study. *Agric. Syst.* 176, 102646. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102646>
- Bonny, S., 1994. Vers une agriculture plus respectueuse de l’environnement ? La dynamique de la production de techniques agricoles plus écologiques en France. *Cah. Agric.* 3, 385–396.
- Boro, M., Sannyasi, S., Chettri, D., Verma, A.K., 2022. Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: a review. *Arch. Microbiol.* 204, 666. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-03279-w>
- Boulahouat, S., Cherif-Silini, H., Silini, A., Bouket, A.C., Luptakova, L., Alenezi, F.N., Belbahri, L., 2023. Biocontrol efficiency of *rhizospheric Bacillus* against the plant pathogen *Fusarium oxysporum*: a promising approach for sustainable agriculture. *Microbiol. Res.* 14, 892–908. <https://doi.org/10.3390/microbiolres14030062>

- Brand, M., Messika, Y., Elad, Y., David, D.R., Szejnberg, A., 2009. Spray treatments combined with climate modification for the management of *Leveillula taurica* in sweet pepper. *Eur. J. Plant Pathol.* 124, 309–329. <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9421-z>
- Bravo, A., Likitvivatanavong, S., Gill, S.S., Soberón, M., 2011. *Bacillus thuringiensis*: A story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochem. Mol. Biol., Special Issue: Toxicology and Resistance* 41, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2011.02.006>
- Bregaglio, S., Savian, F., Raparelli, E., Morelli, D., Epifani, R., Pietrangeli, F., Nigro, C., Bugiani, R., Pini, S., Culatti, P., Tognetti, D., Spanna, F., Gerardi, M., Delillo, I., Bajocco, S., Fanchini, D., Fila, G., Ginaldi, F., Manici, L.M., 2022. A public decision support system for the assessment of plant disease infection risk shared by Italian regions. *J. Environ. Manage.* 317, 115365. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115365>
- Buitenhuis, R., Cock, M.J.W., Colmenarez, Y.C., Clercq, P.D., Edgington, S., Gadaleta, P., Gwynn, R., Heimpel, G., Hill, M., Hinz, H.L., Hoddle, M.S., Jäkel, T., Klapwijk, J.N., Leung, K., Kay, F.M., Messelink, G.J., Silvestri, L., Smith, D., Sosa, A., Wäckers, F.L., Walsh, G.C., Wyckhuys, K.A.G., Zaviezo, T., 2023. Sustainable use and conservation of microbial and invertebrate biological control agents and microbial biostimulants. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bullock, D.S., Bullock, D.G., 2000. From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology. *Precis. Agric.* 2, 71–101. <https://doi.org/10.1023/A:1009988617622>
- Busse, M., Zoll, F., Siebert, R., Bartels, A., Bokelmann, A., Scharschmidt, P., 2021. How farmers think about insects: perceptions of biodiversity, biodiversity loss and attitudes towards insect-friendly farming practices. *Biodivers. Conserv.* 30, 3045–3066. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02235-2>
- Caffi, T., Legler, S.E., Furiosi, M., 2022. Application of *Ampelomyces quisqualis* in the integrated management of grapevine powdery mildew. *Microb. Biocontrol Agents Dev. Eff. Biopestic.*
- Cai, F., Druzhinina, I.S., 2021. In honor of John Bissett: authoritative guidelines on molecular identification of *Trichoderma*. *Fungal Divers.* 107, 1–69. <https://doi.org/10.1007/s13225-020-00464-4>
- Carbo, A., Teixido, N., Usall, J., Solsona, C., Torres, R., 2021. Formulated *Ampelomyces quisqualis* CPA-9 applied on zucchini leaves: influence of abiotic factors and powdery mildew mycoparasitization. *Eur. J. Plant Pathol.* 161, 37–48. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02302-y>
- Carlos, C.C.R., Val, M. do C.M., 2022. Novel technologies and Decision Support Systems to optimize pesticide use in vineyards, in: Costa, J.M., Catarino, S., Escalona, J.M., Comuzzo, P. (Eds.), *Improving Sustainable Viticulture and Winemaking Practices*. Academic Press, pp. 147–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85150-3.00007-4>
- Carradore, R., 2019. Making viruses more socially acceptable: A sociological framework for virus-based plant protection products. *Teor. Praksa* 56, 798–814.
- Castonguay, S., 2010. Creating an agricultural world order: Regional plant protection problems and International Phytopathology, 1878-1939. *Agric. Hist.* 84, 46–73.

- Cawoy, H., Mariutto, M., Henry, G., Fisher, C., Vasilyeva, N., Thonart, P., Dommes, J., Ongena, M., 2014. Plant defense stimulation by natural isolates of *bacillus* depends on efficient surfactin production. *Mol. Plant-Microbe Interact.* MPMI 27, 87–100. <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-13-0262-R>
- Chanishvili, N., 2012. Chapter 1 - Phage therapy—History from Twort and d’Herelle through Soviet experience to current approaches, in: Łobocka, M., Szybalski, W. (Eds.), *Advances in Virus Research, Bacteriophages, Part B*. Academic Press, pp. 3–40. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394438-2.00001-3>
- Chomicki, G., Schaefer, H., Renner, S.S., 2020. Origin and domestication of *Cucurbitaceae* crops: insights from phylogenies, genomics and archaeology. *New Phytol.* 226, 1240–1255. <https://doi.org/10.1111/nph.16015>
- CNIL, 2023. Record of processing activities; French Data Protection Authority (CNIL) [WWW Document]. URL <https://www.cnil.fr/en/record-processing-activities> (accessed 7.20.23).
- Collinge, D.B., Jensen, D.F., Rabiey, M., Sarrocco, S., Shaw, M.W., Shaw, R.H., 2022. Biological control of plant diseases – What has been achieved and what is the direction? *Plant Pathol.* 71, 1024–1047. <https://doi.org/10.1111/ppa.13555>
- Cotes, A.M., 2011. Registry and regulation of biocontrol agents on food commodities in South America. *Acta Hortic.* 301–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.905.33>
- Covert, S.F., Aoki, T., O’Donnell, K., Starkey, D., Holliday, A., Geiser, D.M., Cheung, F., Town, C., Strom, A., Juba, J., Scandiani, M., Yang, X.B., 2007. Sexual reproduction in the soybean sudden death syndrome pathogen *Fusarium tucumaniae*. *Fungal Genet. Biol.* 44, 799–807. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2006.12.009>
- Creissen, H.E., Jones, P.J., Tranter, R.B., Girling, R.D., Jess, S., Burnett, F.J., Gaffney, M., Thorne, F.S., Kildea, S., 2021. Identifying the drivers and constraints to adoption of IPM among arable farmers in the UK and Ireland. *Pest Manag. Sci.* 77, 4148–4158. <https://doi.org/10.1002/ps.6452>
- Creissen, H.E., Jones, P.J., Tranter, R.B., Girling, R.D., Jess, S., Burnett, F.J., Gaffney, M., Thorne, F.S., Kildea, S., 2019. Measuring the unmeasurable? A method to quantify adoption of integrated pest management practices in temperate arable farming systems. *Pest Manag. Sci.* 75, 3144–3152. <https://doi.org/10.1002/ps.5428>
- Dalmajer, E.S., Nord, C.L., Astle, D.E., 2022. Statistical power for cluster analysis. *BMC Bioinformatics* 23, 205. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04675-1>
- Damos, P., 2015. Modular structure of web-based decision support systems for integrated pest management. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1347–1372. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0319-9>
- Daoust, R.A., Hofstein, R., 1996. *Ampelomyces quisqualis*, a new biofungicide to control powdery mildew in grapes, in: Brighton Crop Protection Conference: Pests & Diseases - 1996, Vols 1-3. British Crop Protection Council, Farnham, pp. 33–40.
- DeCuir-Gunby, J.T., Marshall, P.L., McCulloch, A.W., 2011. Developing and using a codebook for the analysis of interview data: an example from a professional development research project. *Field Methods* 23, 136–155. <https://doi.org/10.1177/1525822X10388468>
- DeFranzo, S.E., 2014. Advantages and disadvantages of face-to-face data collection. *J. Bus. Manag.* 4, 23–24.

- Deguine, J.-P., Aubertot, J.-N., Flor, R.J., Lescourret, F., Wyckhuys, K.A.G., Ratnadass, A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>
- Deka, B., Baruah, C., Babu, A., 2021. Entomopathogenic microorganisms: their role in insect pest management. *Egypt. J. Biol. Pest Control* 31, 121. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00466-7>
- Dik, A.J., Verhaar, M.A., Bélanger, R.R., 1998. Comparison of three biological control agents against cucumber powdery mildew (*Sphaerotheca fuliginea*) in semi-commercial-scale glasshouse trials. *Eur. J. Plant Pathol.* 104, 413–423. <https://doi.org/10.1023/A:1008025416672>
- Dong, X.-M., Lian, Q.-G., Chen, J., Jia, R.-M., Zong, Z.-F., Ma, Q., Wang, Y., 2022. The improved biocontrol agent, F1-35, protects watermelon against *Fusarium* wilt by triggering jasmonic acid and ethylene pathways. *Microorganisms* 10, 1710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091710>
- Donley, N., 2019. The USA lags behind other agricultural nations in banning harmful pesticides. *Environ. Health* 18, 44. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0488-0>
- Double, M.L., Nuss, D.L., Rittenour, W.R., Holásková, I., Short, D.P.G., Kasson, M.T., MacDonald, W.L., 2017. Long-term field study of transgenic hypovirulent strains of *Cryphonectria parasitica* in a forest setting. *For. Pathol.* 47, e12367. <https://doi.org/10.1111/efp.12367>
- DRAAF PACA, 2022. L'agriculture, l'agroalimentaire et la forêt: Provence-Alpes-Côte d'Azur [WWW Document]. URL https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/draaf-paca-infographie-chiffres-cles_v20220905.pdf
- Droby, S., Wisniewski, M., Teixidó, N., Spadaro, D., Jijakli, M.H., 2016. The science, development, and commercialization of postharvest biocontrol products. *Postharvest Biol. Technol., Alternatives to the use of synthetic fungicides for the control of postharvest decay of fruit and vegetables: current status and future perspectives* 122, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.04.006>
- Dunlap, C.A., 2019. Taxonomy of registered *Bacillus spp.* strains used as plant pathogen antagonists. *Biol. Control* 134, 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.04.011>
- Dutta, P., Deb, L., Pandey, A.K., 2022. *Trichoderma*- from lab bench to field application: Looking back over 50 years. *Front. Agron.* 4.
- Ebrahimi-Zarandi, M., Saberi Riseh, R., Tarkka, M.T., 2022. *Actinobacteria* as effective biocontrol agents against plant pathogens, an overview on their role in eliciting plant defense. *Microorganisms* 10, 1739. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091739>
- Eckert, 2023. Biocontrôle en maraichage, panorama des usages réalisé par le CTIFL. *Phyteis*. URL <https://phyteis.fr/actualites/biocontrrole-en-maraichage-panorama-des-usages-realise-par-le-ctifl/> (accessed 9.27.23).
- Edwards, R., Holland, J., 2013. What is qualitative interviewing? Bloomsbury Academic. <https://doi.org/10.5040/9781472545244>
- Ehler, L.E., 2006. Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Manag. Sci.* 62, 787–789. <https://doi.org/10.1002/ps.1247>

- Ehlers, G.A.C., Caradus, J.R., Fowler, S.V., 2020. The regulatory process and costs to seek approval for the development and release of new biological control agents in New Zealand. *BioControl* 65, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10526-019-09975-9>
- Eisinga, R., te Grotenhuis, M., Larsen, J.K., Pelzer, B., 2012. Interviewer BMI effects on under- and over-reporting of restrained eating: evidence from a national Dutch face-to-face survey and a postal follow-up. *Int. J. Public Health* 57, 643–647. <https://doi.org/10.1007/s00038-011-0323-z>
- Elad, Y., Jacob, D., Rav David, D., Burshtein, M., Sztjenberg, A., Yehezkel, H., Ganot, L., Shmuel, D., Matan, E., Messika, Y., 2009. Development of climate control methods for integrated management of powdery mildew of tomato caused by *Oidium Neolyopersici*. *Acta Hortic.* 727–732. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.807.109>
- Elad, Y., Kirshner, B., Sztjenberg, A., 1998. Management of powdery mildew and gray mold of cucumber by *Trichoderma harzianum* T39 and *Ampelomyces quisqualis* AQ10. *Biocontrol* 43, 241–251. <https://doi.org/10.1023/A:1009919417481>
- FactomineR, 2008. missMDA [WWW Document]. URL http://factominer.free.fr/missMDA/index_fr.html (accessed 8.20.21).
- Falk, S.P., Gadoury, D.M., 1995. Partial control of grape powdery mildew by the mycoparasite *Ampelomyces quisqualis*. *Plant Dis.* 79, 483-490. <https://doi.org/10.1094/PD-79-0483>.
- FAO, OMS, 2021. Managing pesticides in agriculture and public health: A compendium of FAO and WHO guidelines and other resources - Second edition. FAO and WHO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cb3179en>
- Fauvergue, X., Rusch, A.A., Barret, M., Bardin, M., Jacquin-Joly, E., Malausa, T., Lannou, C., 2022. Extended biocontrol. Springer Dordrecht ; Editions Quae.
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>
- Fernández, L., Gutiérrez, D., Rodríguez, A., García, P., 2018. Application of Bacteriophages in the Agro-Food Sector: A Long Way Toward Approval. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 8.
- Fiamingo, F., Elad, Y., Pertot, I., 2007. Effect of application time of control agents on *Podosphaera aphanis* and side effect of fungicides on biocontrol agents survival on strawberry leaves.
- Flamant, J.-C., 2010. Une brève histoire des transformations de l’agriculture au 20^è siècle 20.
- Francés, J., Bonaterra, A., Moreno, M.C., Cabrefiga, J., Badosa, E., Montesinos, E., 2006. Pathogen aggressiveness and postharvest biocontrol efficiency in *Pantoea agglomerans*. *Postharvest Biol. Technol.* 39, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.11.002>
- Frank, R.W., 1990. The “hungry gap,” crop failure, and famine: the fourteenth-century agricultural crisis and piers plowman 18.
- Frederiks, C., Wesseler, J.H., 2019. A comparison of the EU and US regulatory frameworks for the active substance registration of microbial biological control agents. *Pest Manag. Sci.* 75, 87–103. <https://doi.org/10.1002/ps.5133>
- Gideon, L., 2012. Handbook of survey methodology for the social sciences. Springer Science & Business Media.

- Gilardi, G., Baudino, M., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2012. Efficacy of biocontrol agents and natural compounds against powdery mildew of zucchini. *Phytoparasitica* 40, 147–155. <https://doi.org/10.1007/s12600-011-0206-0>
- Gilardi, G., Gisi, U., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2017. Effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the chemical and biological control of powdery mildew of zucchini and the Phoma leaf spot of leaf beet. *Eur. J. Plant Pathol.* 148, 229–236. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-1078-4>
- Giles, K.L., McCornack, B.P., Royer, T.A., Elliott, N.C., 2017. Incorporating biological control into IPM decision making. *Curr. Opin. Insect Sci.* 20, 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2017.03.009>
- Giotis, C., Markellou, E., Theodoropoulou, A., Kostoulas, G., Wilcockson, S., Leifert, C., 2012. The effects of different biological control agents (BCAs) and plant defence elicitors on cucumber powdery mildew (*Podosphaera xanthii*). *Org. Agric.* 2, 89–101. <https://doi.org/10.1007/s13165-012-0031-x>
- González-Domínguez, E., Caffi, T., Ciliberti, N., Rossi, V., 2015. A mechanistic model of *Botrytis cinerea* on grapevines that includes weather, vine growth stage, and the main infection pathways. *PLOS ONE* 10, e0140444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140444>
- González-Domínguez, E., Legler, S., Fedele, G., Ammour, M.S., Caffi, T., Rossi, V., 2018. Helping farmers in timing the application of biocontrol agents in viticulture 4.
- Gosselin, M., Gosselin, F., Julliard, R., 2010. L'essor des sciences participatives pour le suivi de la biodiversité : intérêts et limites. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 3, 76–83. <https://doi.org/10.3917/set.003.0076>
- Goulet, F., Aulagnier, A., Fouilleux, E., 2023. Moving beyond pesticides: Exploring alternatives for a changing food system. *Environ. Sci. Policy* 147, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.06.007>
- Granato, D., Santos, J.S., Escher, G.B., Ferreira, B.L., Maggio, R.M., 2018. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective. *Trends Food Sci. Technol.* 72, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.006>
- Griswold, E., 2012. How 'Silent Spring' Ignited the Environmental Movement 9.
- Guéneau, V., Plateau-Gonthier, J., Arnaud, L., Piard, J.-C., Castex, M., Briandet, R., 2022. Positive biofilms to guide surface microbial ecology in livestock buildings. *Biofilm* 4, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2022.100075>
- Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.M., Reau, R., Savini, I., 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cah. Agric.* 26, 1. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017004>
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F.I., Orozco-Mosqueda, M. del C., Fadiji, A.E., Hyder, S., Babalola, O.O., Santoyo, G., 2023. *Trichoderma Species*: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review. *Plants* 12, 432. <https://doi.org/10.3390/plants12030432>
- Halawa, E.M., 2023. Challenges of bacteriophages application in controlling bacterial plant diseases and how to overcome them. *J. Genet. Eng. Biotechnol.* 21, 98. <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00549-y>

- Hänggi, L., 2022. Biocontrôle, IBMA France présente les chiffres pour 2021 [WWW Document]. Réf. Agro. URL <https://www.reference-agro.fr/en-2021-le-marche-du-biocontrôle-progresse-de-16-pour-atteindre-274-me/> (accessed 9.27.23).
- Harris, L., Brown, G., 2010. Mixing interview and questionnaire methods: practical problems in aligning data. *Pract. Assess. Res. Eval.* 15. <https://doi.org/10.7275/959j-ky83>
- Hase, S., Takahashi, S., Takenaka, S., Nakaho, K., Arie, T., Seo, S., Ohashi, Y., Takahashi, H., 2008. Involvement of jasmonic acid signalling in bacterial wilt disease resistance induced by biocontrol agent *Pythium oligandrum* in tomato. *Plant Pathol.* 57, 870–876. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01858.x>
- He, M., Wen, J., Yin, Y., Wang, P., 2021. Metabolic engineering of *Bacillus subtilis* based on genome-scale metabolic model to promote fengycin production. *3 Biotech* 11, 448. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02990-7>
- Helepciuc, F.-E., Todor, A., 2022. Improving the authorization of microbial biological control products (MBCP) in the European Union within the EU Green Deal framework. *Agronomy* 12, 1218. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051218>
- Heurgon, J., 1976. L'agronome carthaginois Magon et ses traducteurs en latin et en grec. *Comptes Rendus Séances Académie Inscr. B.-lett.* 120, 441–456. <https://doi.org/10.3406/crai.1976.13274>
- Heuvel, R.M.V., 1996. The promise of precision agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 51, 38–40.
- Hewedy, O.A., Abdel-Lateif, K.S., Bakr, R.A., 2020. Genetic diversity and biocontrol efficacy of indigenous *Trichoderma* isolates against *Fusarium* wilt of pepper. *J. Basic Microbiol.* 60, 126–135. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900493>
- Hmamouchi, I., 2021. Comment savoir si mes données suivent une distribution normale ? EpiRheum.com. URL <https://epirheum.com/comment-savoir-si-mes-donnees-suivent-une-distribution-normale/> (accessed 7.11.23).
- Hofstein, R., Daoust, R.A., Aeschlimann, J.P., 1996. Constraints to the development of biofungicides: The example of “AQ10”, a new product for controlling powdery mildews. *Entomophaga* 41, 455–460. <https://doi.org/10.1007/BF02765797>
- Holtappels, D., Fortuna, K., Lavigne, R., Wagemans, J., 2021. The future of phage biocontrol in integrated plant protection for sustainable crop production. *Curr. Opin. Biotechnol., Systems Biology • Nanobiotechnology* 68, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.08.016>
- Howard, R.J., 1996. Cultural control of plant diseases: a historical perspective. *Can. J. Plant Pathol.* 18, 145–150. <https://doi.org/10.1080/07060669609500639>
- Husson, F., Josse, J., Pages, J., 2010. Principal component methods - hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data?
- IBMA, 2023. Baromètre IBMA France du Biocontrôle 2022 : des résultats en demi-teinte [WWW Document]. URL <https://messengerie.inrae.fr/my.logout.php3?errorcode=19> (accessed 10.8.23).
- IBMA, 2022a. IBMA Biocontrol success [WWW Document]. IBMA Biocontrol Success Ex. URL <https://www.ibmabiocontrolsuccess.org/case/> (accessed 6.30.23).
- IBMA, 2022b. What is Biocontrol. IBMA-Glob. URL <https://ibma-global.org/what-is-biocontrol> (accessed 7.7.22).

- Ingold, C.T., Davey, R.A., Wakley, G., 1981. The teliospore pedicel of *Phragmidium mucronatum*. Trans. Br. Mycol. Soc. 77, 439–442. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(81\)80055-1](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(81)80055-1)
- IOBC, 2006. History of IOBC [WWW Document]. URL https://www.iobc-global.org/download/IOBC_History_Book_1956-2006.pdf (accessed 4.3.23).
- Jabbar, A., Liu, W., Wang, Y., Zhang, J., Wu, Q., Peng, J., 2022. Exploring the impact of farmer field schools on the adoption of sustainable agricultural practices and farm production: a case of Pakistani citrus growers. *Agronomy* 12, 2054. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092054>
- Jacob, D., David, D.R., Sztjenberg, A., Elad, Y., 2008. Conditions for development of powdery mildew of tomato caused by *Oidium neolycopersici*. *Phytopathology*® 98, 270–281. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-3-0270>
- Jarvis, W.R., Slingsby, K., 1977. The control of powdery mildew of greenhouse cucumber by water sprays and *Ampelomyces quisqualis*. *Plant Dis. Report.* 61, 728–730.
- Kang, X.-X., Jia, S.-L., Wei, X., Zhang, M., Liu, G.-L., Hu, Z., Chi, Z., Chi, Z.-M., 2022. Liamocins biosynthesis, its regulation in *Aureobasidium spp.*, and their bioactivities. *Crit. Rev. Biotechnol.* 42, 93–105. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1931017>
- Keller, S., Conradin, K., 2019. Semi-structured interviews [WWW Document]. URL <https://sswm.info/planning-and-programming/decision-making/gathering-ideas/semi-structured-interviews> (accessed 6.30.23).
- Kenny, U., Regan, Á., 2021. Co-designing a smartphone app for and with farmers: Empathising with end-users' values and needs. *J. Rural Stud.* 82, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.12.009>
- Khan, H.A., Mukhtar, M., Bhatti, M.F., 2023. Mycovirus-induced hypovirulence in notorious fungi *Sclerotinia*: a comprehensive review. *Braz. J. Microbiol.* 54, 1459–1478. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01073-4>
- Khan, R., Khan, M.A., Ansari, M.A., Dhingra, N., Bhati, N., 2022. Chapter 1 - Machine learning-based agriculture, in: Khan, M.A., Khan, R., Ansari, M.A. (Eds.), *Application of Machine Learning in Agriculture*. Academic Press, pp. 3–27. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90550-3.00003-5>
- Kimes, P.K., Liu, Y., Neil Hayes, D., Marron, J.S., 2017. Statistical significance for hierarchical clustering. *Biometrics* 73, 811–821. <https://doi.org/10.1111/biom.12647>
- Kiss, L., 2003. A review of fungal antagonists of powdery mildews and their potential as biocontrol agents. *Pest Manag. Sci.* 59, 475–483. <https://doi.org/10.1002/ps.689>
- Kloepper, J.W., Ryu, C.-M., 2006. Bacterial endophytes as elicitors of induced systemic resistance, in: Schulz, B.J.E., Boyle, C.J.C., Sieber, T.N. (Eds.), *Microbial Root Endophytes, Soil Biology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 33–52. https://doi.org/10.1007/3-540-33526-9_3
- Köhl, J., Kolnaar, R., Ravensberg, W.J., 2019. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: relevance beyond efficacy. *Front. Plant Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>
- Koutsouris, A., Zarokosta, E., 2022. Farmers' networks and the quest for reliable advice: innovating in Greece. *J. Agric. Educ. Ext.* 28, 625–651. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2021.2012215>
- Kröbel, R., Stephens, E.C., Gorzelak, M.A., Thivierge, M.-N., Akhter, F., Nyiraneza, J., Singer, S.D., Geddes, C.M., Glenn, A.J., Devillers, N., Alemu, A.W., Luce, M.S., Giardetti, D., 2021. Making farming more

- sustainable by helping farmers to decide rather than telling them what to do. *Environ. Res. Lett.* 16, 055033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abef30>
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J. Am. Stat. Assoc.* 47, 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Kuehne, G., 2016. Eight issues to think about before interviewing farmers. *Forum Qual. Sozialforschung Forum Qual. Soc. Res.* 17. <https://doi.org/10.17169/fqs-17.2.2421>
- Kumar, A.M., Ganeshan, G., Reddy, K.N., Ramachandra, Y.L., 2008. Integrated disease management for the control of powdery mildew (*Leveillula taurica* (Lev.) Arn.) in Bell Pepper 7.
- Kuznetsova, M.A., Iakusheva, O.I., Rogozhin, A.N., Borovsky, K.V., Statsyuk, N.V., 2021. Digital forecast technologies for sustainable agriculture: optimization of fungicidal treatments of potato for the Far East region. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 666, 042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042023>
- Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmael, Q., El Hamss, H., Belabess, Z., Barka, E.A., 2022. Biological control of plant pathogens: a global perspective. *Microorganisms* 10, 596. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>
- Lahlali, R., Massart, S., Serrhini, M.N., Jijakli, M.H., 2008. A Box-Behnken design for predicting the combined effects of relative humidity and temperature on antagonistic yeast population density at the surface of apples. *Int. J. Food Microbiol.* 122, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.053>
- Lahlali, R., Raffaele, B., Jijakli, M.H., 2011. UV protectants for *Candida oleophila* (strain O), a biocontrol agent of postharvest fruit diseases. *Plant Pathol.* 60, 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02368.x>
- Lamichhane, J.R., Arendse, W., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., Roman, J.C., van Bijsterveldt-Gels, J.E.M., Wick, M., Messéan, A., 2015. Challenges and opportunities for integrated pest management in Europe: A telling example of minor uses. *Crop Prot.* 74, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.04.005>
- Lamichhane, J.R., Bischoff-Schaefer, M., Bluemel, S., Dachbrodt-Saaydeh, S., Dreux, L., Jansen, J.-P., Kiss, J., Köhl, J., Kudsk, P., Malausa, T., Messéan, A., Nicot, P.C., Ricci, P., Thibierge, J., Villeneuve, F., 2017. Identifying obstacles and ranking common biological control research priorities for Europe to manage most economically important pests in arable, vegetable, and perennial crops. *Pest Manag. Sci.* 73, 14–21. <https://doi.org/10.1002/ps.4423>
- Lamichhane, J.R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., Messéan, A., 2016. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Dis.* 100, 10–24. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-15-0574-FE>
- Lamichhane, J.R., Messéan, A., Ricci, P., 2019. Chapter Two - Research and innovation priorities as defined by the Ecophyto plan to address current crop protection transformation challenges in France, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 81–152. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.11.003>
- Lane, D.E., Walker, T.J., Grantham, D.G., 2023. IPM adoption and impacts in the United States. *J. Integr. Pest Manag.* 14, 1. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmac028>

- Lapierre, 2018. Impact of the DEPHY network on pesticide use: Evidence from French vineyards [WWW Document]. URL https://www.hdigitag.fr/wp-content/uploads/M%C3%A9moire_Margaux-Lapierre.pdf (accessed 7.28.23).
- Larané, A., 2023. Néolithique - Sédentarisation et agriculture - Herodote.net [WWW Document]. URL https://www.herodote.net/Sedentarisation_et_agriculture-synthese-165.php (accessed 8.3.23).
- Lechenet, M., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Boissinot, F., Petit, M.-S., Petit, S., Munier-Jolain, N.M., 2014. Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming. *PLOS ONE* 9, e97922. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097922>
- Lefebvre, M., Langrell, S.R.H., Gomez-y-Paloma, S., 2015. Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 27–45. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0237-2>
- Leonardi, C., Guichard, S., Bertin, N., 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration, and quality of tomato fruits. *Sci. Hortic.* 84, 285–296. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00127-2)
- Leroux, B., 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France : 1950-1990. *Pour* 227, 59–66. <https://doi.org/10.3917/pour.227.0059>
- Longkumer, I.Y., Ahmad, M.A., 2020. Potential of mycovirus in the biological control of fungal plant pathogens: a review. *Agric. Rev.* 41, 238–247.
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., Yamori, W., 2015. Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Sci. Hortic.* 197, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>
- Lyu, D., Zajonc, J., Pagé, A., Tanney, C.A.S., Shah, A., Monjezi, N., Msimbira, L.A., Antar, M., Nazari, M., Backer, R., Smith, D.L., 2021. Plant Holobiont Theory: The phytomicrobiome plays a central role in evolution and success. *Microorganisms* 9, 675. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040675>
- Marian, M., Shimizu, M., 2019. Improving performance of microbial biocontrol agents against plant diseases. *J. Gen. Plant Pathol.* 85, 329–336. <https://doi.org/10.1007/s10327-019-00866-6>
- Massart, S., Martinez-Medina, M., Jijakli, M.H., 2015. Biological control in the microbiome era: Challenges and opportunities. *Biol. Control* 89, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.06.003>
- Matthews, K.B., Schwarz, G., Buchan, K., Rivington, M., Miller, D., 2008. Wither agricultural DSS? *Comput. Electron. Agric.* 61, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.11.001>
- MDS, D.A.F., 1795. *La philosophie dans le boudoir*, Folio Classique. Gallimard.
- Mendras, H., 1960. Exode rural et Industrialisation [WWW Document]. URL <https://www.proquest.com/openview/92ed85d0d3c0e68dec24bea3709032b0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1817112> (accessed 8.3.23).
- Messelink, G.J., Bennison, J., Alomar, O., Ingegno, B.L., Tavella, L., Shipp, L., Palevsky, E., Wackers, F.L., 2014. Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BIOCONTROL* 59, 377–393. <https://doi.org/10.1007/s10526-014-9579-6>

- Mieslerová, B., Cook, R.T.A., Wheeler, C.P., Lebeda, A., 2022. Ecology of Powdery Mildews – Influence of abiotic factors on their development and epidemiology. *Crit. Rev. Plant Sci.* 41, 365–390. <https://doi.org/10.1080/07352689.2022.2138044>
- Mieslerová, B., Lebeda, A., 2010. Influence of temperature and light conditions on germination, growth and conidiation of *Oidium neolycopersici*. *J. Phytopathol.* 158, 616–627. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2009.01663.x>
- Mir, S.A., Qasim, M., Arfat, Y., Mubarak, T., Bhat, Z.A., Bhat, J.A., Bangroo, S.A., Sofi, T.A., 2015. Decision support systems in a global agricultural perspective-a comprehensive review. *Int J Agric Sci* 7, 403–415.
- Moerkens, R., Janssen, D., Brenard, N., Reybroeck, E., del Mar Tellez, M., Rodríguez, E., Bosmans, L., Leirs, H., Sluydts, V., 2021. Simplified modelling enhances biocontrol decision making in tomato greenhouses for three important pest species. *J. Pest Sci.* 94, 285–295. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01256-0>
- Monus, L., 2019. Enquête de l'IBMA France, colloque-2019 [WWW Document]. URL <https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/agenda/enquetelenamomusibmafrancecolloque-2019.pdf> (accessed 7.9.23).
- Morton, V., Staub, T., 2008. A Short History of Fungicides. *APSnet Feature Artic.* <https://doi.org/10.1094/APSnetFeature-2008-0308>
- Moser, R., Pertot, I., Elad, Y., Raffaelli, R., 2008. Farmers' attitudes toward the use of biocontrol agents in IPM strawberry production in three countries. *Biol. Control* 47, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.07.012>
- MSA, 2017. La population des chefs d'exploitation agricole ou d'entreprise agricole en 2016 [WWW Document]. URL <https://statistiques.msa.fr/wp-content/uploads/2017/06/TB-La-population-des-CE-chefs-exploitation-ou-chefs-entreprise-agricole-2016.pdf> (accessed 6.18.23).
- Mukherjee, P.K., Horwitz, B.A., Herrera-Estrella, A., Schmoll, M., Kenerley, C.M., 2013. *Trichoderma* Research in the genome Era. *Annu. Rev. Phytopathol.* 51, 105–129. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102353>
- Nafarrate, I., Miranda, K., Mateo, E., Lasagabaster, A., 2020. Use of campylobacter bacteriophages as biocontrol agents within the farm-to-fork process.
- Nguyen, H.-T., Nicot, P.C., Bardin, M., 2018. Optimiser l'utilisation des agents de biocontrôle en caractérisant leurs facteurs d'efficacité : le cas d'*Ampelomyces quisqualis* contre *Oidium neolycopersici* sur la tomate.
- Nicot, P.C., Alabouvette, C.C., Bardin, M., Blum, B., Kohl, J., Ruocco, M., 2012. Review of factors influencing the success or failure of biocontrol: technical, industrial, and socio-economic perspectives. *IOBC WPRS Bull.* 78, 95.
- Nicot, P.C., Bardin, M., 2012. Biological and integrated protection in the Mediterranean greenhouse: is disease management the weak link? *IOBC-WPRS Bulletin* 80, 11–17.
- Nicot, P.C., Gilardi, G., Gard, B., Gullino, M.L., 2020. Vegetable and Herb Disease Management in Protected Culture, in: Elmer, W.H., McGrath, M., McGovern, R.J. (Eds.), *Handbook of vegetable*

- and herb diseases, handbook of plant disease management. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35512-8_6-1
- Nicot, P.C., International Organization for Biological Control of noxious animals and plants, West Palaearctic Regional Section, 2011. Classical and augmentative biological control against diseases and pests: critical status analysis and review of factors influencing their success.
- Nicot, P.C., Pressecq, T., Bardin, M., 2022. Advances in bioprotectants for plant disease control in horticulture, in: Warwick University, UK, Collier, R. (Eds.), Burleigh Dodds Series in Agricultural Science. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 37–76. <https://doi.org/10.19103/AS.2021.0095.02>
- Noh, H., Lee, J., 2022. The effect of vapor pressure deficit regulation on the growth of tomato plants grown in different planting environments. *Appl. Sci.* 12, 3667. <https://doi.org/10.3390/app12073667>
- Ojiambo, P.S., Scherm, H., 2006. Biological and application-oriented factors influencing plant disease suppression by biological control: A meta-analytical review. *Phytopathology* 96, 1168–1174. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-1168>
- Olmstead, R.G., Bohs, L., Migid, H.A., Santiago-Valentin, E., Garcia, V.F., Collier, S.M., 2008. A molecular phylogeny of the Solanaceae. *TAXON* 57, 1159–1181. <https://doi.org/10.1002/tax.574010>
- ONEILL, T.M., Niv, A., Elad, Y., Shtienberg, D., 1996. Biological control of *Botrytis cinerea* on tomato stem wounds with *Trichoderma harzianum*. *Eur. J. Plant Pathol.* 102, 635–643. <https://doi.org/10.1007/BF01877244>
- Ons, L., Bylemans, D., Thevissen, K., Cammue, B.P.A., 2020. Combining biocontrol agents with chemical fungicides for integrated plant fungal disease control. *Microorganisms* 8, 1930. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121930>
- Orlob, G.B., 1971. History of plant pathology in the Middle Ages. *Annu. Rev. Phytopathol.*
- Paredaens, J., Bra, P.D., Gysens, M., Gucht, D. van, 2012. The structure of the relational database model. Springer Science & Business Media.
- Pasini, C., D'Aquila, F., Curir, P., Gullino, M.L., 1997. Effectiveness of antifungal compounds against rose powdery mildew (*Sphaerotheca pannosa* var. *rosae*) in glasshouses. *Crop Prot.* 16, 251–256. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(96\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(96)00095-6)
- Pertot, I., Puopolo, G., Giovannini, O., Angeli, D., Sicher, C., 2017. Advantages and limitations involved in the use of microbial biofungicides for the control of root and foliar phytopathogens of fruit crops 10.
- Philipp, W.-D., Crüger, G., 1979. Parasitismus von *Ampelomyces quisqualis* auf Echten Mehltaupilzen an Gurken und anderen Gemüsearten / Mycoparasitism of *Ampelomyces quisqualis* on powdery mildew of cucumber and other vegetable species. *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz J. Plant Dis. Prot.* 86, 129–142.
- Philippe, M.-A., Polombo, N., 2009. Soixante années de remembrement 18.
- Pineau, A., Sousa, L. de, Soularue, A., Pasquet, M., 2015. Use and recommendation of biocontrol products for farmers and cooperative advisors in cropping systems. 5th Int. Conf. Plant Prot. Methods Altern. 11-13 March 2015 Lille Fr. 835–844.

- Pinto, D.M., Oliveira, P. de, Fachini Minitti, A., Mansur Mendes, A., Freitas Vilela, G., Castro, G.S.A., Nogueira Júnior, L.R., Bogiani, J.C., Rocha, J.D., Lage Novaes, R.M., Barros, I. de, Stachetti Rodrigues, G., Pinto, D.M., Oliveira, P. de, Fachini Minitti, A., Mansur Mendes, A., Freitas Vilela, G., Castro, G.S.A., Nogueira Júnior, L.R., Bogiani, J.C., Rocha, J.D., Lage Novaes, R.M., Barros, I. de, Stachetti Rodrigues, G., 2021. Impact assessment of information and communication technologies in agriculture: application of the ambitec-TICs method. *J. Technol. Manag. Amp Innov.* 16, 91–101. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242021000200091>
- Porat, R., Lichter, A., Terry, L.A., Harker, R., Buzby, J., 2018. Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers' homes: Quantifications, causes, and means of prevention. *Postharvest Biol. Technol.* 139, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.11.019>
- Prahl, K.C., Klink, H., Hasler, M., Hagen, S., Verreet, J.-A., Birr, T., 2022. Can decision support systems help improve the sustainable Use of Fungicides in Wheat? *Sustainability* 14, 15599. <https://doi.org/10.3390/su142315599>
- Pressecq, T., Duval, P., Armand, J.-M., Bourgeay, J.-F., Gaudin, J., Blancard, D., Nicot, P.C., Rousselin, A., Bardin, M., Goillon, C., Tchamitchian, M., 2022. Un OAD pour faciliter l'utilisation du biocontrôle. *Phytoma* 43.
- Puopolo, G., 2022. Microbial biocontrol agents: developing effective biopesticides, in: *Microbial Biocontrol Agents: Developing Effective Biopesticides*. CABI.
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A.S., Srivastav, A.L., Kaushal, J., 2021. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *J. Clean. Prod.* 283, 124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
- Rekanovic, E., Milijasevic, S., Todorovic, B., Potocnik, I., 2007. Possibilities of biological and chemical control of *Verticillium* wilt in pepper. *Phytoparasitica* 35, 436–441. <https://doi.org/10.1007/BF03020601>
- Rokach, L., Maimon, O., 2005. Clustering Methods, in: Maimon, O., Rokach, L. (Eds.), *Data Mining and knowledge discovery handbook*. Springer-Verlag, New York, pp. 321–352. https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X_15
- Romero, D., de Vicente, A., Zerouh, H., Cazorla, F.M., Fernandez-Ortuno, D., Tores, J.A., Perez-Garcia, A., 2007. Evaluation of biological control agents for managing cucurbit powdery mildew on greenhouse-grown melon. *Plant Pathol.* 56, 976–986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01684.x>
- Rossi, V., Sperandio, G., Caffi, T., Simonetto, A., Gilioli, G., 2019. Critical success factors for the adoption of decision tools in IPM. *Agronomy* 9, 710. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110710>
- Roturier, C., 2019. Les sciences et recherches participatives à l'INRA. *Rev. For. Fr.* 71, 143–152. <https://doi.org/10.4267/2042/70625>
- Rupnik, R., Kukar, M., Vračar, P., Košir, D., Pevec, D., Bosnić, Z., 2019. AgroDSS: a decision support system for agriculture and farming. *Comput. Electron. Agric., BigData and DSS in Agriculture* 161, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.001>
- Samada, L.H., Tambunan, U.S.F., 2020. Biopesticides as promising alternatives to chemical pesticides: a review of their current and future status. *OnLine J. Biol. Sci.* 20, 66–76. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2020.66.76>

- Samaran, C., 1951. L'agriculture française au Moyen Âge. *J. Savants* 4, 145–157.
- Sare, A.R., Jijakli, M.H., Massart, S., 2021. Microbial ecology to support integrative efficacy improvement of biocontrol agents for postharvest diseases management. *Postharvest Biol. Technol.* 179, 111572. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111572>
- Savvas, D., 2021. Optimizing plant nutrition for production of vegetables and cut flowers in open and closed hydroponic systems. *Acta Hortic.* 71–86. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1321.10>
- Saxena, A.K., Kumar, M., Chakdar, H., Anuroopa, N., Bagyaraj, D.J., 2020. *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. *J. Appl. Microbiol.* 128, 1583–1594.
- Schaffner, U., Knapp, M., Seier, M., 2021. Biological control successes and failures: Eurasian region. *Biol. Control Glob. Impacts Chall. Future Dir. Pest Manag.* 403–437.
- Schärlig, A., 1999. Décider sur plusieurs critères - Panorama de l'aide à la décision multicritère - Alain Schärlig (EAN13 : 9782880740733) [WWW Document]. EPFL Press. URL <https://www.epflpress.org/produit/281/9782880740733/decider-sur-plusieurs-criteres> (accessed 10.2.23).
- Schweigkofler, W., 2006. Effects of fungicides on the germination of *Ampelomyces quisqualis* AQ10, a biological antagonist of the powdery mildew of the grapevine.
- Segarra, G., Casanova, E., Aviles, M., Trillas, I., 2010. *Trichoderma asperellum* strain T34 controls *Fusarium* Wilt disease in tomato plants in soilless culture through competition for iron. *Microb. Ecol.* 59, 141–149. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9545-5>
- Shafi, J., Tian, H., Ji, M., 2017. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Biotechnol. Equip.* 31, 446–459. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>
- Shepherd, A., 2016. TIC et agriculture : Tirer les enseignements de l'expérience. CTA.
- Shirsath, R., Khadke, N., More, D., Patil, P., Patil, H., 2017. Agriculture decision support system using data mining, in: 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). Presented at the 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/I2C2.2017.8321888>
- Shishkoff, N., McGrath, M.T., 2002. AQ10 biofungicide combined with chemical fungicides or AddQ spray adjuvant for control of cucurbit powdery mildew in detached leaf culture. *Plant Dis.* 86, 915–918. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.8.915>
- Shtienberg, D., 2013. Will decision-support systems be widely used for the management of plant diseases? *Annu. Rev. Phytopathol.* 51, 1–16. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102244>
- Shtienberg, D., Elad, Y., 1997. Incorporation of weather forecasting in integrated, biological-chemical management of *Botrytis cinerea*. *Phytopathology* 87, 332–340. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1997.87.3.332>
- Singh, A.P., Yerudkar, A., Liuzza, D., Liu, Y., Glielmo, L., 2022. An optimal decision support system based on crop dynamic model for N-Fertilizer Treatment. *Sensors* 22, 7613. <https://doi.org/10.3390/s22197613>

- Soullignac, V., Leveau, L., Pinet, F., Bergez, J.-É., 2019. Les technologies de l'information et de la communication dans la transition agroécologique. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 29, 34–37. <https://doi.org/10.3917/set.029.0034>
- Spadaro, D., Gullino, M.L., 2005. Improving the efficacy of biocontrol agents against soilborne pathogens. *Crop Prot.* 24, 601–613. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.11.003>
- STHDA, 2017. Classification hiérarchique sur composantes principales : l'essentiel - Articles - STHDA.
- Sutcliffe, A., 2022. *Designing for User Engagement: Aesthetic and Attractive User Interfaces.* Springer Nature.
- Swynghedauw, 2006. Les racines dix-neuviémistes de la révolution biologique contemporaine [WWW Document]. URL <https://www.biusante.parisdescartes.fr/sfhm/hsm/HSMx2006x040x002/HSMx2006x040x002x0141.pdf> (accessed 11.22.22).
- Syed Ab Rahman, S.F., Singh, E., Pieterse, C.M.J., Schenk, P.M., 2018. Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Sci.* 267, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.11.012>
- Sztejnberg, A., Galper, S., Mazar, S., Lisker, N., 1989. *Ampelomyces quisqualis* for biological and integrated control of powdery mildews in Israel. *J. Phytopathol.-Phytopathol. Z.* 124, 285–295. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1989.tb04925.x>
- Tenaillon, M.I., Charcosset, A., 2011. A European perspective on maize history. *C. R. Biol., On the trail of domestications, migrations, and invasions in agriculture* 334, 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.12.015>
- Terre Inovia, 2021. Colza : comment lutter contre les ravageurs et les maladies du printemps ? [WWW Document]. URL <https://www.terresinovia.fr/documents/20126/3921605/Colza-Les+maladies-du-printemps-190122.pdf/6d0df206-31c7-481e-a4ed-77e27a60ee11?t=1642600038169> (accessed 10.31.23).
- Tomley, F.M., Shirley, M.W., 2009. Livestock infectious diseases and zoonoses. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 2637–2642. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0133>
- Tout va très bien, Madame la Marquise, 2023.
- Trigiano, B.H.O., Robert N. (Ed.), 2016. *Plant pathology concepts and laboratory Exercises*, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781315380773>
- Tripathi, A.N., Meena, B.R., Pandey, K.K., Singh, J., 2020. Microbial bioagents in agriculture: status and prospects, in: Rakshit, A., Singh, H.B., Singh, A.K., Singh, U.S., Fraceto, L. (Eds.), *New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture.* Springer, Singapore, pp. 331–368. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1322-0_20
- Turc, E., Presseccq, T., Nicot, P.C., Bardin, M., 2022. Modes of action of microbial biocontrol agents against plant diseases. *Microb. Biocontrol Agents*, CABI Books 45–68. <https://doi.org/10.1079/9781789249200.0003>
- Turina, M., Rostagno, L., 2007. Virus-induced hypovirulence in *Cryphonectria Parasitica*: Still an unresolved conundrum. *J. Plant Pathol.* 89, 165–178.

- Tut, G., Magan, N., Xu, X., 2023. Influence of abiotic factors on kinetics of viable populations of biocontrol agents in the phyllosphere of lettuce and strawberry leaves. *Plant Pathol.* 72, 1069–1080. <https://doi.org/10.1111/ppa.13719>
- Umer, M., Mubeen, M., Shakeel, Q., Ali, S., Iftikhar, Y., Bajwa, R.T., Anwar, N., Rao, M.J., He, Y., 2023. Mycoviruses: antagonistic potential, fungal pathogenesis, and their interaction with *Rhizoctonia solani*. *Microorganisms* 11, 2515. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102515>
- Urbaneja, A., González-Cabrera, J., Arnó, J., Gabarra, R., 2012. Prospects for the biological control of *Tuta absoluta* in tomatoes of the Mediterranean basin. *Pest Manag. Sci.* 68, 1215–1222. <https://doi.org/10.1002/ps.3344>
- Valiorgue, B., Bourlier Bagues, É., Hollandts, X., 2020. Quelles évolutions de la raison d'être des coopératives agricoles françaises ? Regard historique sur un construit social. *RECMA* 358, 23–38. <https://doi.org/10.3917/recma.358.0023>
- van Lenteren, J.C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W.J., Urbaneja, A., 2018. Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl* 63, 39–59. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9801-4>
- van Lenteren, J.C., Nicot, P.C., 2020. Integrated Pest Management methods and considerations concerning implementation in greenhouses, in: *Integrated Pest and Disease Management in Greenhouse Crops*. Springer, Cham, pp. 177–193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22304-5_6
- Verhaar, M.A., Kerssies, A., Hijwegen, T., 1999. Effect of relative humidity on mycoparasitism of rose powdery mildew with and without treatments with mycoparasites / Der Einfluss von relativer Luftfeuchtigkeit auf die Bekämpfung von Echtem Mehltau an Rosen mit und ohne Behandlungen mit Mykoparasiten. *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz J. Plant Dis. Prot.* 106, 158–165.
- Vijay krishna kumar, K., Yellareddygar, S.KR., Reddy, M.S., Kloepper, J.W., Lawrence, K.S., Zhou, X.G., Sudini, H., Groth, D.E., Krishnam raju, S., Miller, M.E., 2012. Efficacy of *Bacillus subtilis* MBI 600 against sheath blight caused by *Rhizoctonia solani* and on growth and yield of rice. *Rice Sci.* 19, 55–63. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60021-3)
- Wagemans, J., Holtappels, D., Vainio, E., Rabiey, M., Marzachi, C., Herrero, S., Ravanbakhsh, M., Tebbe, C.C., Ogiastro, M., Ayllón, M.A., Turina, M., 2022. Going Viral: virus-based biological control agents for plant protection. *Annu. Rev. Phytopathol.* 60, 21–42. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021621-114208>
- Wang, Z., Hu, X., Solanki, M.K., Pang, F., 2023. A synthetic microbial community of plant core microbiome can be a potential biocontrol tool. *J. Agric. Food Chem.* 71, 5030–5041. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08017>
- Witzgall, P., Kirsch, P., Cork, A., 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *J. Chem. Ecol.* 36, 80–100. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9737-y>
- Wong, C.K.F., Saidi, N.B., Vadamalai, G., Teh, C.Y., Zulperi, D., 2019. Effect of bioformulations on the biocontrol efficacy, microbial viability, and storage stability of a consortium of biocontrol agents against *Fusarium* wilt of banana. *J. Appl. Microbiol.* 127, 544–555. <https://doi.org/10.1111/jam.14310>

- Woo, S.L., Hermosa, R., Lorito, M., Monte, E., 2023. *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nat. Rev. Microbiol.* 21, 312–326. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5>
- Wu, Q., Sun, R., Ni, M., Yu, J., Li, Y., Yu, C., Dou, K., Ren, J., Chen, J., 2017. Identification of a novel fungus, *Trichoderma asperellum* GDFS1009, and comprehensive evaluation of its biocontrol efficacy. *PLoS ONE* 12, e0179957. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179957>
- Yarwood, C.E., 1932. *Ampelomyces quisqualis* on clover mildew. *Phytopathology* 22.
- Zhai, Z., Martínez, J.F., Beltran, V., Martínez, N.L., 2020. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges. *Comput. Electron. Agric.* 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>
- Zhang, H., Xie, J., Fu, Y., Cheng, J., Qu, Z., Zhao, Z., Cheng, S., Chen, T., Li, B., Wang, Q., Liu, X., Tian, B., Collinge, D.B., Jiang, D., 2020. A 2-kb mycovirus converts a pathogenic fungus into a beneficial endophyte for *Brassica* protection and yield enhancement. *Mol. Plant* 13, 1420–1433. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.08.016>
- Zhang, L., Wang, S., Ruan, S., Nzabanita, C., Wang, Y., Guo, L., 2023. A mycovirus VIGS vector confers hypovirulence to a plant pathogenic fungus to control wheat *FHB*. *Adv. Sci.* 10, 2302606. <https://doi.org/10.1002/advs.202302606>
- Zhou, L., Li, X., Kotta-Loizou, I., Dong, K., Li, S., Ni, D., Hong, N., Wang, G., Xu, W., 2021. A mycovirus modulates the endophytic and pathogenic traits of a plant associated fungus. *ISME J.* 15, 1893–1906. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00892-3>
- Ziebell, H., Carr, J.P., 2010. Chapter 6 - Cross-Protection: a century of mystery, in: Carr, John P., Loebenstein, G. (Eds.), *Advances in Virus Research, natural and engineered resistance to plant viruses, Part II*. Academic Press, pp. 211–264. [https://doi.org/10.1016/S0065-3527\(10\)76006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-3527(10)76006-1)

ANNEXE 1 : Sources bibliographiques analysées dans le Chapitre 2

List of publications concerning efficacy factors for authorised strains in European Union countries

A. *quisqualis* (12 publications)

- Brand, M., Messika, Y., Elad, Y., David, D.R., Sztejnberg, A., 2009. Spray treatments combined with climate modification for the management of *Leveillula taurica* in sweet pepper. *Eur. J. Plant Pathol.* 124, 309–329. <https://doi.org/10.1007/s10658-008-9421-z>
- Caffi, TITO, SARA E. Legler, et MARGHERITA Furiosi. « Application of *Ampelomyces quisqualis* in the integrated management of grapevine powdery mildew ». *Microbial Biocontrol Agents: Developing Effective Biopesticides*, 2022.
- Elad, Y., Kirshner, B., Sztejnberg, A., 1998. Management of powdery mildew and gray mold of cucumber by *Trichoderma harzianum* T39 and *Ampelomyces quisqualis* AQ10. *Biocontrol* 43, 241–251. <https://doi.org/10.1023/A:1009919417481>
- Elad, Y., Messika, Y., Brand, M., David, D.R., Sztejnberg, A., 2007. Effect of colored shade nets on pepper powdery mildew (*Leveillula taurica*). *Phytoparasitica* 35, 285–299. <https://doi.org/10.1007/BF02981163>
- Fiamingo, F., Elad, Y., Pertot, I., 2007. Effect of application time of control agents on *Podosphaera aphanis* and side effect of fungicides on biocontrol agents survival on strawberry leaves.
- Gilardi, G., Baudino, M., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2012. Efficacy of biocontrol agents and natural compounds against powdery mildew of zucchini. *Phytoparasitica* 40, 147–155. <https://doi.org/10.1007/s12600-011-0206-0>
- Gilardi, G., Manker, D.C., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2008. Efficacy of the biocontrol agents *Bacillus subtilis* and *Ampelomyces quisqualis* applied in combination with fungicides against powdery mildew of zucchini. *J. Plant Dis. Prot.* 115, 208–213. <https://doi.org/10.1007/BF03356265>
- Hofstein, R., Daoust, R.A., Aeschlimann, J.P., 1996. Constraints to the development of biofungicides: The example of “AQ10”, a new product for controlling powdery mildews. *Entomophaga* 41, 455–460. <https://doi.org/10.1007/BF02765797>
- Legler, S.E., Pintye, A., Caffi, T., Gulyas, S., Bohar, G., Rossi, V., Kiss, L., 2016. Sporulation rate in culture and mycoparasitic activity, but not mycohost specificity, are the key factors for selecting *Ampelomyces* strains for biocontrol of grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*). *Eur. J. Plant Pathol.* 144, 723–736. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0834-1>
- Rajkovic, S., Tabakovic-Tosic, M., Markovic, M., Milovanovic, J., Mitic, D., 2010. Application of AQ-10 biofungicide on *Quercus robur* L. Seedlings. *Fresenius Environ. Bull.* 19, 2987–2992.

- Romero, D., de Vicente, A., Zeriuoh, H., Cazorla, F.M., Fernandez-Ortuno, D., Tores, J.A., Perez-Garcia, A., 2007. Evaluation of biological control agents for managing cucurbit powdery mildew on greenhouse-grown melon. *Plant Pathol.* 56, 976–986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01684.x>
- Shishkoff, N., McGrath, M.T., 2002. AQ10 biofungicide combined with chemical fungicides or AddQ spray adjuvant for control of cucurbit powdery mildew in detached leaf culture. *PLANT DIS.* 86, 915–918. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.8.915>

***Aureobasidium pullulans* DSM 14940 & DSM 14941 (7 publications)**

- Bika, R., Palmer, C., Alexander, L., Baysal-Gurel, F., 2020. Comparative performance of reduced-risk fungicides and biorational products in management of postharvest *Botrytis* blight on bigleaf *Hydrangea* cut flowers. *HortTechnology* 30, 659–669. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04656-20>
- Calvo-Garrido, C., Roudet, J., Aveline, N., Davidou, L., Dupin, S., Fermaud, M., 2019. Microbial antagonism toward *Botrytis* bunch rot of grapes in multiple field tests using one *Bacillus ginsengihumi* strain and formulated biological control products. *Front. Plant Sci.* 10, 105. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00105>
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>
- Johnson, K.B., Temple, T.N., 2013. Evaluation of strategies for fire blight control in organic pome fruit without antibiotics. *Plant Disease* 97, 402–409. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-12-0638-RE>
- McCormack, P., Wildman, H.G., Jeffries, P., 1995. The influence of moisture on the suppression of *Pseudomonas syringae* by *Aureobasidium pullulans* on an artificial leaf surface. *FEMS Microbiol Ecol* 16, 159–165. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1995.tb00279.x>
- Sylla, J., Alsanius, B.W., Krüger, E., Wohanka, W., 2015. Control of *Botrytis cinerea* in strawberries by biological control agents applied as single or combined treatments. *Eur J Plant Pathol* 143, 461–471. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0698-4>
- Zajc, J., Černoša, A., Francesco, A.D., Castoria, R., Curtis, F.D., Lima, G., Badri, H., Jijakli, H., Ippolito, A., Gostinčar, C., Zalar, P., Gunde-Cimerman, N., Janisiewicz, W.J., 2020. Characterization of *Aureobasidium pullulans* isolates selected as biocontrol agents against fruit decay pathogens 10.

***Bacillus amyloliquefaciens* FZB24 (6 publications)**

- Fatemeh, A., Masoud, T., Pejman, A., Aidin, H., 2014. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) and stratification on germination traits of *Crataegus pseudoheterophylla* Pojark. seeds. *Scientia Horticulturae* 172, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.049>
- Guel, A., Kidoglu, F., Tuezal, Y., Tuezal, I.H., 2008. Effects of nutrition and *Bacillus amyloliquefaciens* on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growing in perlite. *Span. J. Agric. Res.* 6, 422–429. <https://doi.org/10.5424/sjar/2008063-335>
- Myresiotis, C.K., Karaoglanidis, G.S., Vryzas, Z., Papadopoulou-Mourkidou, E., 2012. Evaluation of

plant-growth-promoting rhizobacteria, acibenzolar-S-methyl and hymexazol for integrated control of *Fusarium* crown and root rot on tomato. Pest Manag. Sci. 68, 404–411. <https://doi.org/10.1002/ps.2277>

Nagendran, K., Karthikeyan, G., Faisal, P.M., Kalaiselvi, P., Raveendran, M., Prabakar, K., Raguchander, T., 2014. Exploiting endophytic bacteria for the management of sheath blight disease in rice. Biol. Agric. Hortic. 30, 8–23. <https://doi.org/10.1080/01448765.2013.841099>

Sylla, J., Alsanius, B.W., Krüger, E., Becker, D., Wohanka, W., 2013. In vitro compatibility of microbial agents for simultaneous application to control strawberry powdery mildew (*Podosphaera aphanis*). Crop Protection 51, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.04.011>

Tziros, G.T., Samaras, A., Karaoglanidis, G.S., 2021. Laminarin induces defense responses and efficiently controls olive leaf spot disease in olive. Molecules 26, 1043. <https://doi.org/10.3390/molecules26041043>

***Bacillus amyloliquefaciens* IT 45 (1 publication)**

Beasse, C., Bellalou, S., 2019. Evaluation of biocontrol solutions against *Pythium* of carrot in the field, in: Grzebelus, D., Baranski, R. (Eds.), Proceedings of the 11 International Symposium on Carrot and Other Apiaceae. Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp. 263–267. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1264.32>

***Bacillus amyloliquefaciens* MBI 600 (14 publications)**

Amein, T., Wright, S.A.I., Wikström, M., Koch, E., Schmitt, A., Stephan, D., Jahn, M., Tinivella, F., Gullino, M.L., Forsberg, G., Werner, S., van der Wolf, J., Groot, S.P.C., 2011. Evaluation of non-chemical seed treatment methods for control of *Alternaria brassicicola* on cabbage seeds. J Plant Dis Prot 118, 214–221. <https://doi.org/10.1007/BF03356406>

Bennett, A.J., Leifert, C., Whipps, J.M., 2003. Survival of the biocontrol agents *Coniothyrium minitans* and *Bacillus subtilis* MBI 600 introduced into pasteurised, sterilised, and non-sterile soils. Soil Biology and Biochemistry 35, 1565–1573. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.08.001>

Kumar, K.V.K., Sudhakar, P., Yellareddygar, S.K., Kloepper, J.W., Sudini, H., Reddy, E.C.S., Lawrence, K.S., Podile, A.R., Suresh, K., Sruthi, V.S., Raju, K., Miller, M.E., Al-Turki, A., El-Meleigi, M.A., Sayyed, R.Z., Reddy, M.S., n.d. Efficacy of Integral® (*Bacillus subtilis* MBI 600) in sheath blight management and yield enhancement of rice.

Leisso, R.S., Miller, P.R., Burrows, M.E., 2009. The influence of biological and fungicidal seed treatments on chickpea (*Cicer arietinum*) damping off. Can. J. Plant Pathol. 31, 38–46. <https://doi.org/10.1080/07060660909507570>

Menzel, C.M., Gomez, A., Smith, L.A., 2016. Control of grey mould and stem-end rot in strawberry plants growing in a subtropical environment. Australasian Plant Pathol. 45, 489–498. <https://doi.org/10.1007/s13313-016-0440-5>

Rios, F.A., Freitas, S.-E.K.R., Contiero, R.L., Braz, G.B.P., Roman, R., Belani, R.B., Catapan, V., 2018. Agronomic performance of soybean treated with *Bacillus amyloliquefaciens*. AJMR 12, 1020–1027. <https://doi.org/10.5897/AJMR2018.9006>

Said, A.A., Moharam, M.H.A., 2015. Effect of some commercial bio-agents on yield and damping-off disease of wheat lines (*Triticum aestivum vulgair* L.). Journal of Plant Production 6, 995–1011. <https://doi.org/10.21608/jpp.2015.49814>

Samaras, A., Efthimiou, K., Roumeliotis, E., Karaoglanidis, G.S., 2018. Biocontrol potential and plant-growth-promoting effects of *Bacillus amyloliquefaciens* MBI 600 against *Fusarium oxysporum*

f. sp. radidis-lycopersici on tomato. Acta Hortic. 139–146.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1207.18>

- Schmidt, C. S., Agostini, F., Leifert, C., Killham, K., Mullins, C.E., 2004. Influence of soil temperature and matric potential on sugar beet seedling colonization and suppression of *Pythium* damping-off by the antagonistic bacteria *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis*. Phytopathology® 94, 351–363. <https://doi.org/10.1094/PHTO.2004.94.4.351>
- Schmidt, Christoph Stephan, Agostini, F., Simon, A., Whyte, J., Townend, J., Leifert, C., Killham, K., Mullins, C., 2004. Influence of soil type and pH on the colonisation of sugar beet seedlings by antagonistic *Pseudomonas* and *Bacillus* strains, and on their control of *Pythium* damping-off. European Journal of Plant Pathology 110, 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/s10658-004-1600-y>
- Schmitt, A., Koch, E., Stephan, D., Kromphardt, C., Jahn, M., Krauthausen, H.-J., Forsberg, G., Werner, S., Amein, T., Wright, S.A.I., Tinivella, F., van der Wolf, J., P, S., 2009. Evaluation of non-chemical seed treatment methods for the control of *Phoma valerianellae* on lamb's lettuce seeds. J Plant Dis Prot 116, 200–207. <https://doi.org/10.1007/BF03356311>
- Vijay krishna kumar, K., Yellareddygari, S.K.R., Reddy, M.S., Kloepper, J.W., Lawrence, K.S., Zhou, X.G., Sudini, H., Groth, D.E., Krishnam raju, S., Miller, M.E., 2012. Efficacy of *Bacillus subtilis* MBI 600 against sheath blight caused by *Rhizoctonia solani* and on growth and yield of rice. Rice Science 19, 55–63. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(12\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(12)60021-3)
- Zhang, S., Vallad, G.E., White, T.L., Huang, C.-H., 2011. Evaluation of microbial products for management of powdery mildew on summer squash and cantaloupe in Florida. Plant Disease 95, 461–468. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-10-0521>
- Zhou X.G, Liu G., n.d. Efficacy of combined use of *brassica* biofumigant crop and PGPR strain for managing sheath blight in rice, 2011. [WWW Document]. URL https://beaumont.tamu.edu/elibrary/Reports/Zhou/2011_9_ShB%20Brassica%20MIB600%20Quadris.pdf (accessed 2.17.23).

Bacillus amyloliquefaciens QST 713 (49 publications)

- Abbasi, P.A., Weselowski, B., 2015. Efficacy of *Bacillus subtilis* QST 713 formulations, copper hydroxide, and their tank mixes on bacterial spot of tomato. Crop Protection 74, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.04.009>
- Ayer, K.M., Strickland, D.A., Choi, M., Cox, K.D., 2021. Optimizing the integration of a biopesticide (*Bacillus subtilis* QST 713) with a single-site fungicide (Benzovindiflupyr) to reduce reliance on synthetic multisite fungicides (Captan and Mancozeb) for management of apple scab. PLANT DIS. 105, 3545–3553. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-21-0426-RE>
- Bailey, K.L., Derby, J., Boyetchko, S.M., Sawchyn, K., Becker, E., Sumampong, G., Shamoun, S., James, D., Masri, S., Varga, A., 2012. In vivo studies evaluating commercial biofungicide suppression of blight caused by *Phytophthora ramorum* in selected ornamentals. Biocontrol Sci. Technol. 22, 1268–1283. <https://doi.org/10.1080/09583157.2012.724659>
- Belete, T., Bastas, K.K., Francesconi, S., Balestra, G.M., 2021. Biological effectiveness of *Bacillus subtilis* on common bean bacterial blight. J. Plant Pathol. 103, 249–258. <https://doi.org/10.1007/s42161-020-00727-8>
- Biondi, E., Gallipoli, L., Mazzaglia, A., Fuentealba, S.P., Kuzmanovic, N., Bertaccini, A., Balestra, G.M., 2021. *Bacillus*-based products for management of kiwifruit bacterial canker. Phytopathol. Mediterr. 60, 215–228. <https://doi.org/10.36253/phyto-12184>
- Calvo, H., Roudet, J., Gracia, A.P., Venturini, M.E., Fermaud, M., 2021. Comparison of efficacy and modes of action of two high-potential biocontrol *Bacillus* strains and commercial biocontrol

- products against *Botrytis cinerea* in table grapes. *OENO One* 55, 228–243. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.3.4688>
- Cinquerrui, Alessandro, Giancarlo Polizzi, Dalia Aiello, et Alessandro Vitale. « Integrated management for the reduction of *Calonectria* infections in ornamental nurseries ». *Plant Disease* 101, no 1 (janvier 2017): 165-69. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-16-0801-RE>.
- De Curtis, F., Ianiri, G., Raiola, A., Ritieni, A., Succi, M., Tremonte, P., Castoria, R., 2019. Integration of biological and chemical control of brown rot of stone fruits to reduce disease incidence on fruits and minimize fungicide residues in juice. *Crop Prot.* 119, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.01.020>
- Dorighello, D.V., Forner, C., de Campos Leite, R.M.V.B., Bettiol, W., 2020. Management of Asian soybean rust with *Bacillus subtilis* in sequential and alternating fungicide applications. *Australasian Plant Pathol.* 49, 79–86. <https://doi.org/10.1007/s13313-019-00677-5>
- Everett, K.R., Timudo-Torrevilla, O.E., Taylor, J.T., Yu, J., 2007. Fungicide timing for control of summer rots of apples. *New Zealand Plant Protection* 60, 15–20. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2007.60.4627>
- Fascella, S., Boeri, G.L., Cangelosi, B., Pasini, C., Benuzzi, M., Curir, P., 2015. Experiences of biological control of *Pseudomonas viridiflava* on cut flowers of *Ranunculus asiaticus*, in: Mauget, J.C., Godet, S. (Eds.), *II International Symposium on Horticulture in Europe*. Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp. 291–295.
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>
- Fiamingo, F., Elad, Y., Pertot, I., 2007. Effect of application time of control agents on *Podosphaera aphanis* and side effect of fungicides on biocontrol agents survival on strawberry leaves.
- Forner, C., Bettiol, W., do Nascimento, L.M., Terao, D., 2013. Postharvest control of *Penicillium digitatum* in Pera orange trees with microorganisms and heat treatment. *Rev. Bras. Frutic.* 35, 23–31. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000100004>
- Gava, C.A.T., Alves, I.L.S., Duarte, N.C., 2019. Timing the application of *Bacillus subtilis* QST 713 in the integrated management of the postharvest decay of mango fruits. *Crop Prot.* 121, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.013>
- Gilardi, G., Baudino, M., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2012. Efficacy of biocontrol agents and natural compounds against powdery mildew of zucchini. *Phytoparasitica* 40, 147–155. <https://doi.org/10.1007/s12600-011-0206-0>
- Hong, S.-J., Kim, J.-H., Kim, Y.-K., Jee, H.-J., Shim, C.-K., Kim, M.-J., Park, J.-H., Han, E.-J., Goo, H.-J., Choi, K.-Y., 2014. Control efficacy of mixed application of microbial and chemical fungicides against powdery mildew of red pepper. *The Korean Journal of Pesticide Science* 18, 409–416. <https://doi.org/10.7585/kjps.2014.18.4.409>
- Ibrahim, Y.E., Saleh, A.A., El Komy, M.H., Al Saleh, M.A., 2016. *Bacillus subtilis* QST 713, copper hydroxide, and their tank mixes for control of bacterial citrus canker in Saudi Arabia. *Journal of Citrus Pathology* 3. <https://doi.org/10.5070/C431030994>
- Jo, E.J., Kang, B.G., Jang, K.S., Choi, Y.H., Kim, J.-C., Choi, G.J., 2014. Control efficacy of Serenade formulation against *Rhizoctonia* and *Pythium* damping-off diseases. *Research in Plant Disease* 20, 201–205. <https://doi.org/10.5423/RPD.2014.20.3.201>
- Keinath, A.P., 2016. Polyoxin d and other biopesticides reduce gummy stem blight but not anthracnose on melon seedlings. *Plant Health Progress* 17, 177–181. <https://doi.org/10.1094/PHP-RS-16-0025>
- Mantecon, J.D., 2008. Efficacy of chemical and biological strategies for controlling the soybean

- brown spot (*Septoria glycines*). *Cienc. Investig. Agrar.* 35, 211–214.
- Mattox, C.M., Kowalewski, A.R., McDonald, B.W., Lambrinos, J.G., Pscheidt, J.W., 2018. Rolling and biological control products affect *Microdochium* patch severity on a sand-based annual bluegrass putting green. *Agron. J.* 110, 2124–2129. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0008>
- Matzen, N., Heick, T.M., Jorgensen, L.N., 2019. Control of powdery mildew (*Blumeria graminis* spp.) in cereals by Serenade (R) ASO (*Bacillus amyloliquefaciens* (former subtilis) strain QST 713). *Biol. Control* 139, UNSP 104067. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104067>
- Menzel, C.M., Gomez, A., Smith, L.A., 2016. Control of grey mould and stem-end rot in strawberry plants growing in a subtropical environment. *Australasian Plant Pathol.* 45, 489–498. <https://doi.org/10.1007/s13313-016-0440-5>
- Muzhinji, N., Woodhall, J.W., Truter, M., van der Waals, J.E., 2018. Variation in fungicide sensitivity among *Rhizoctonia* isolates recovered from potatoes in South Africa. *PLANT DIS.* 102, 1520–1526. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-17-1470-RE>
- Ni, L., Punja, Z.K., 2021. Management of powdery mildew on greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants using biological and chemical approaches. *Can. J. Plant Pathol.* 43, 35–42. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1746694>
- Orel, D.C., 2020. Biocontrol of bacterial diseases with beneficial bacteria in lettuce. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences* 13, 108–117.
- Ozdemir, Y., Polat, Z., Ozkan, M., Kostı, R.I., 2016. Effects of selected bio-fungicide and fungicide treatments on shelf life and quality characteristics of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Quality* 39, 25–35. <https://doi.org/10.1111/jfq.12174>
- Peng, G., n.d. Control of clubroot on canola using the biofungicide Serenade plus cultivar resistance [WWW Document]. URL <https://www.gcirc.org/fileadmin/documents/Proceedings/IRCPrague2011vol2/CropProtection/Pages%20de%20IRC2011-1134.pdf> (accessed 2.27.23).
- Pernezny, K., Stoffella, P., Havranek, N., Sanchez, J., Beany, A., 2005. BAM! Kicking control of target spot up a notch, in: Momol, M.T., Ji, P., Jones, J.B. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Symposium on Tomato Diseases*. International Society Horticultural Science, Leuven 1, pp. 175–179. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.695.19>
- Piermann, L., Fujinawa, M.F., Pontes, N. de C., Haddad Galvao, J.A., Bettiol, W., 2023. Inhibition of mycelial growth, conidial germination, and *Botrytis cinerea* Pers.:Fr colonization in begonia with biocompatible products. *Sci. Agric.* 80, e20210062. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0062>
- Potočnik, I., Todorović, B., Rekanović, E., Luković, J., Paunović, D., Milijašević-Marčić, S., 2018. Impact of *Bacillus subtilis* QST713 mushroom grain spawn treatment on yield and green mould control. *Pesticidi i fitomedicina* 33, 205–211.
- Punja, Z.K., Rodriguez, G., Tirajoh, A., 2016. Effects of *Bacillus subtilis* strain QST 713 and storage temperatures on post-harvest disease development on greenhouse tomatoes. *Crop Prot.* 84, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.02.011>
- Punja, Z.K., Tirajoh, A., Collyer, D., Ni, L., 2019. Efficacy of *Bacillus subtilis* strain QST 713 (Rhapsody) against four major diseases of greenhouse cucumbers. *Crop Prot.* 124, UNSP 104845. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104845>
- Ramos, Y.G., Duin, I.M., da Silva, M.R.L., Júnior, R.P.L., 2022. Bioactive copper and *Bacillus subtilis* for the control and resistance induction against citrus canker in sweet orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] orchard establishment. *Scientia Horticulturae* 303, 111238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111238>

- Reiss, A., Jorgensen, L.N., 2017. Biological control of yellow rust of wheat (*Puccinia striiformis*) with Serenade (R) ASO (*Bacillus subtilis* strain QST713). Crop Prot. 93, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.009>
- Roberts, P.D., Momol, M.T., Ritchie, L., Olson, S.M., Jones, J.B., Balogh, B., 2008. Evaluation of spray programs containing famoxadone plus cymoxanil, acibenzolar-S-methyl, and *Bacillus subtilis* compared to copper sprays for management of bacterial spot-on tomato. Crop Prot. 27, 1519–1526. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.06.007>
- Rotolo, C., Angelini, R.M.D.M., Dongiovanni, C., Pollastro, S., Fumarola, G., Di Carolo, M., Perrelli, D., Natale, P., Faretra, F., 2018. Use of biocontrol agents and botanicals in integrated management of *Botrytis cinerea* in table grape vineyards. Pest Manag. Sci. 74, 715–725. <https://doi.org/10.1002/ps.4767>
- Rungjindamai, N., Jeffries, P., Xu, X.-M., 2014. A novel strategy to reduce overwintering inoculum of *Monilinia laxa*. Eur. J. Plant Pathol. 140, 591–596. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0473-y>
- Schoofs, H., Verjans, W., Deckers, T., De Maeyer, L., Bylemans, D., 2015. The use of the bacterial antagonist *Bacillus subtilis* and the plant defense enhancer fosetyl-al against fire blight on pear. Acta Hort. 485–492. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1094.65>
- Sevic, M., Gasic, K., Ignjatov, M., Mijatovic, M., Prokic, A., Obradovic, A., 2019. Integration of biological and conventional treatments in control of pepper bacterial spot. Crop Prot. 119, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.01.006>
- Sison, M.A., 2014. Management and research operations for rice biological control trials at the Bayer Cropsience Research Center. Undergraduate Theses.
- Solano-Báez, A.R., Leyva-Mir, S.G., Núñez-Pastrana, R., Quezada-Salinas, A., Márquez-Licon, G., 2021. Biocontrol of damping-off of zucchini squash seedlings with *Bacillus subtilis* QST 713. RMF 39. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2101-2>
- Stridh, L.J., Mostafanezhad, H., Andersen, C.B., Odilbekov, F., Grenville-Briggs, L., Lankinen, Å., Liljeroth, E., 2022. Reduced efficacy of biocontrol agents and plant resistance inducers against potato early blight from greenhouse to field. J Plant Dis Prot 129, 923–938. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00633-4>
- Tian, X., Zheng, Y., 2013. Evaluation of biological control agents for *Fusarium* wilt in *Hiemalis begonia*. Can. J. Plant Pathol. 35, 363–370. <https://doi.org/10.1080/07060661.2013.812580>
- Twizeyimana, M., Hartman, G.L., 2019. Effect of selected biopesticides in reducing soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) development. PLANT DIS. 103, 2460–2466. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-19-0384-RE>
- Wylie, A.C., Punja, Z.K., 2021. Assessing aerated vermicompost tea combined with microbial biological control agents for suppression of *Fusarium* and *Rhizoctonia*. Phytopathology 111, 1137–1151. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0156-R>
- Yikilmazsoy, G., Tosun, N., 2021. Characterization of *Fusarium sambucinum* isolates associated with potato dry rot and evaluation of cultivar susceptibility and fungicides. Turk. J. Agric. For. 45, 222–233. <https://doi.org/10.3906/tar-2006-100>
- Zeng, W., Kirk, W., Hao, J., 2012. Field management of *Sclerotinia* stem rot of soybean using biological control agents. Biol. Control 60, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.09.012>

***Bacillus amyloliquefaciens* ssp. *plantarum* D747 (6 publications)**

- Biondi, E., Gallipoli, L., Mazzaglia, A., Fuentealba, S.P., Kuzmanovic, N., Bertaccini, A., Balestra, G.M., 2021. *Bacillus*-based products for management of kiwifruit bacterial canker. Phytopathol.

- Mediterr. 60, 215–228. <https://doi.org/10.36253/phyto-12184>
- Calvo, H., Roudet, J., Gracia, A.P., Venturini, M.E., Fermaud, M., 2021. Comparison of efficacy and modes of action of two high-potential biocontrol *Bacillus* strains and commercial biocontrol products against *Botrytis cinerea* in table grapes. *OENO One* 55, 228–243. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.3.4688>
- Cinquerrui, A., Polizzi, G., Aiello, D., Vitale, A., 2017. Integrated management for the reduction of *Calonectria* infections in ornamental nurseries. *Plant Disease* 101, 165–169. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-16-0801-RE>
- Fascella, S., Boeri, G.L., Cangelosi, B., Pasini, C., Benuzzi, M., Curir, P., 2015. Experiences of biological control of *Pseudomonas viridiflava* on cut flowers of *Ranunculus asiaticus*, in: Mauget, J.C., Godet, S. (Eds.), *11 International Symposium on Horticulture in Europe*. Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp. 291–295.
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>
- Pethybridge, S.J., Vaghefi, N., Kikkert, J.R., 2017. Management of *Cercospora* leaf spot in conventional and organic table beet production. *PLANT DIS.* 101, 1642–1651. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0528-RE>
- Rotolo, C., Angelini, R.M.D.M., Dongiovanni, C., Pollastro, S., Fumarola, G., Di Carolo, M., Perrelli, D., Natale, P., Faretra, F., 2018. Use of biocontrol agents and botanicals in integrated management of *Botrytis cinerea* in table grape vineyards. *Pest Manag. Sci.* 74, 715–725. <https://doi.org/10.1002/ps.4767>

***Bacillus pumilus* QST 2808 (5 publications)**

- Bailey, K.L., Derby, J., Boyetchko, S.M., Sawchyn, K., Becker, E., Sumampong, G., Shamoun, S., James, D., Masri, S., Varga, A., 2012. In vivo studies evaluating commercial biofungicide suppression of blight caused by *Phytophthora ramorum* in selected ornamentals. *Biocontrol Sci. Technol.* 22, 1268–1283. <https://doi.org/10.1080/09583157.2012.724659>
- Darby, H., Cummings, E., 2016. The efficacy of spraying organic fungicides to control *fusarium* head blight infection in spring wheat.
- do Amarante, C.V.T., Bartnick, V.A., da Silveira, J.P.J., Coldebella, M.C., Denardi, V., Steffens, C.A., 2017. Alternative treatments for postharvest control of blue mold in ‘Fuji’ apples. *Acta Hortic.* 133–138. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1179.20>
- Piermann, L., Fujinawa, M.F., Pontes, N. de C., Haddad Galvao, J.A., Bettiol, W., 2023. Inhibition of mycelial growth, conidial germination, and *Botrytis cinerea* *Pers.:Fr* colonization in begonia with biocompatible products. *Sci. Agric.* 80, e20210062. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0062>
- Serrano, L., Manker, D., Brandi, F., Cali, T., 2013. The use of *Bacillus subtilis* QST 713 and *Bacillus pumilus* QST 2808 as protectant fungicides in conventional application programs for black leaf streak control, in: VanDenBergh, I., Amorim, E.P., Johnson, V. (Eds.), *International IShs-Promusa Symposium on Bananas and Plantains: Towards Sustainable Global Production and Improved Use*. Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp. 149–155.

***Candida oleophila* O (14 publications)**

- Bajji, M., Jijakli, M.H., n.d. Wound age effect on the efficacy of *Candida oleophila* strain O against

post-harvest decay of apple fruits.

- Bastiaanse, H., de Bellaire, L. de L., Lassois, L., Misson, C., Jijakli, M.H., 2010. Integrated control of crown rot of banana with *Candida oleophila* strain O, calcium chloride and modified atmosphere packaging. *Biol. Control* 53, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.10.012>
- Jijakli, H., Lahlali, R., 2011. Ecological fitness of *Pichia anomala* strain K and *Candida oleophila* strain O to control postharvest diseases of apples, in: Postharvest Meeting.
- Jijakli, H., Lassois, L., Lahlali, R., 2004. Antagonistic activity of yeast against post-harvest diseases of tropical fruits. *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer* 50.
- Lahlali, R., Friel, D., n.d. Comparative study of the ecological niche of *Penicillium expansum* Link., *Botrytis cinerea* Pers. and their antagonistic yeasts *Candida oleophila* strain O and *Pichia anomala* strain K.
- Lahlali, R., Jijakli, I.H., de Ph, U., n.d. Evaluation of population density of *Pichia anomala* strain K and *Candida oleophila* strain O and their protection against *Penicillium expansum* Link on apples.
- Lahlali, R., Jijakli, M.H., 2009. Enhancement of the biocontrol agent *Candida oleophila* (strain O) survival and control efficiency under extreme conditions of water activity and relative humidity. *Biol. Control* 51, 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.07.014>
- Lahlali, R., Massart, S., Serrhini, M.N., Jijakli, M.H., 2008. A Box-Behnken design for predicting the combined effects of relative humidity and temperature on antagonistic yeast population density at the surface of apples. *Int. J. Food Microbiol.* 122, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.053>
- Lahlali, R., Raffaele, B., Jijakli, M.H., 2011. UV protectants for *Candida oleophila* (strain O), a biocontrol agent of postharvest fruit diseases. *Plant Pathol.* 60, 288–295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02368.x>
- Lahlali, R., Serrhini, M.N., Jijakli, H., 2005. Development of a biological control method against postharvest diseases of citrus fruits. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences* 70.
- Lahlali, R., Serrhini, M.N., Jijakli, M.H., n.d. Efficacy assessment of *Candida oleophila* (strain o) and *Pichia anomala* (strain k) against major postharvest diseases of citrus fruits in Morocco.
- Lassois, L., de Bellaire, L. de L., Jijakli, M.H., 2008. Biological control of crown rot of bananas with *Pichia anomala* strain K and *Candida oleophila* strain O. *Biol. Control* 45, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.01.013>
- Massart, S., Luna-Guarda, M., Jijakli, M.H., 2004. In situ development and application of cDNA-AFLP to isolate genes of *Candida oleophila* (strain O) potentially involved in antagonistic properties against *Botrytis cinerea*. *Commun Agric Appl Biol Sci* 69, 595–599.
- Wang, Y., Luo, Y., Sui, Y., Xie, Z., Liu, Y., Jiang, M., Liu, J., 2018. Exposure of *Candida oleophila* to sublethal salt stress induces an antioxidant response and improves biocontrol efficacy. *Biological Control* 127, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.09.002>

***Clonostachys catenulatum* J1446 (16 publications)**

- Chatterton, S., Jayaraman, J., Punja, Z.K., 2008. Colonization of cucumber plants by the biocontrol fungus *Clonostachys rosea* f. *catenulata*. *Biol. Control* 46, 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.02.007>
- Chatterton, S., Punja, Z.K., 2012. Colonization of geranium foliage by *Clonostachys rosea* f. *catenulata*, a biological control agent of *botrytis* grey mould. *Botany* 90, 1–10. <https://doi.org/10.1139/B11-076>
- Chatterton, S., Punja, Z.K., 2010. Factors influencing colonization of cucumber roots by

- Clonostachys rosea f. catenulata*, a biological disease control agent. *Biocontrol Sci. Technol.* 20, 37–55. <https://doi.org/10.1080/09583150903350253>
- Hannusch, D.J., Boland, G.J., 1996. Interactions of air temperature, relative humidity, and biological control agents on grey mold of bean. *Eur. J. Plant Pathol.* 102, 133–142. <https://doi.org/10.1007/BF01877100>
- Jiakli, H., n.d. Efficacy of Prestop against soil borne and foliar pathogens on European crops [WWW Document]. URL https://www.abim.ch/fileadmin/abim/documents/presentations2012/ABIM_2012_4_Haissam_Jiakli.pdf (accessed 6.19.20).
- Knudsen, I.M.B., Thomsen, K.A., Jensen, B., Poulsen, K.M., 2004. Effects of hot water treatment, biocontrol agents, disinfectants, and a fungicide on storability of English oak acorns and control of the pathogen, *Ciboria batschiana*. *Forest Pathology* 34, 47–64. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2003.00348.x>
- Lahdenperä, M.-L., 2020. A case study: Use of Prestop® mix biofungicide in entomovectoring on apple against storage rot diseases, in: Smagghe, G., Boecking, O., Maccagnani, B., Mänd, M., Kevan, P.G. (Eds.), *Entomovectoring for Precision Biocontrol and Enhanced Pollination of Crops*. Springer International Publishing, Cham, pp. 137–145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18917-4_8
- Mommaerts, V., Put, K., Smagghe, G., 2011. *Bombus terrestris* as pollinator-and-vector to suppress *Botrytis cinerea* in greenhouse strawberry. *Pest Management Science* 67, 1069–1075. <https://doi.org/10.1002/ps.2147>
- Ni, L., Punja, Z.K., 2021. Management of powdery mildew on greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants using biological and chemical approaches. *Can. J. Plant Pathol.* 43, 35–42. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1746694>
- Pirc, M., Dreo, T., 2013. Selection of DNA extraction method for monitoring of biocontrol agent, *Gliocladium catenulatum* J1446. *Zbornik Predavanj in Referatov*, 11. Slovenskega Posvetovanja o Varstvu Rastlin Z Mednarodno Udeležbo (in okrogli mize o zmanjšanju tveganja zaradi rabe FFS v okviru projekta CropSustain), Bled, Slovenia, 5.-6. Marec 2013 74–77.
- Punja, Z.K., Ni, L., 2021. The bud rot pathogens infecting cannabis (*Cannabis sativa* L., marijuana) inflorescences: symptomology, species identification, pathogenicity, and biological control. *Canadian Journal of Plant Pathology* 43, 827–854. <https://doi.org/10.1080/07060661.2021.1936650>
- Punja, Z.K., Yip, R., 2003. Biological control of damping-off and root rot caused by *Pythium aphanidermatum* on greenhouse cucumbers. *Can. J. Plant Pathol.-Rev. Can. Phytopathol.* 25, 411–417.
- Rose, S., Parker, M., Punja, Z.K., 2003. Efficacy of biological and chemical treatments for control of *fusarium* root and stem rot on greenhouse cucumber. *Plant Disease* 87, 1462–1470. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.12.1462>
- Rose, S., Yip, R., Punja, Z.K., 2004. Biological control of *Fusarium* and *Pythium* root rots on greenhouse cucumbers grown in rockwool, in: Vanachter, A. (Ed.), *Managing Soil-Borne Pathogens: A Sound Rhizosphere to Improve Productivity in Intensive Horticultural Systems*. International Society Horticultural Science, Leuven 1, pp. 73–78.
- Utkhede, R.S., Koch, C.A., 2004. Evaluation of biological and chemical treatments for control of gummy stem blight on cucumber plants grown hydroponically in greenhouses. *BioControl* 49, 109–117. <https://doi.org/10.1023/B:BICO.0000009394.75429.a7>
- Wylie, A.C., Punja, Z.K., 2021. Assessing aerated vermicompost tea combined with microbial

biological control agents for suppression of *Fusarium* and *Rhizoctonia*. *Phytopathology* 111, 1137–1151. <https://doi.org/10.1094/PHTO-05-20-0156-R>

***Coniothyrium minitans* Con/m/91-08 (15 publications)**

- Bennett, A.J., Leifert, C., Whipps, J.M., 2003. Survival of the biocontrol agents *Coniothyrium minitans* and *Bacillus subtilis* MBI 600 introduced into pasteurised, sterilised, and non-sterile soils. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 1565–1573. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.08.001>
- Çolak Ateş, A., 2019. Effect of *Coniothyrium minitans* and *Trichoderma harzianum* in the biological control of white mold disease (*Sclerotinia sclerotiorum*) in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Appl. Ecol. Env. Res.* 17. https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1568715701
- Elshestawi, M., Elkhaky, M.T., Sayed, S.R., Bahkali, A.H., Mohammed, A.A., Gambhir, D., Mansour, A.S., Elgorban, A.M., 2017. Integrated control of white rot disease on beans caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans (R) and reduced fungicides application. *Saudi J. Biol. Sci.* 24, 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.038>
- Jing, L., Navi, S.S., Yang, X., 2015. Effects of colonisation by different strains of *Coniothyrium minitans* on the viability of sclerotia of *Sclerotinia sclerotiorum*. *Biocontrol Sci. Technol.* 25, 460–474. <https://doi.org/10.1080/09583157.2014.989386>
- Lüth, P., Boulon, J.P., Eiben, U., 2012. New ways of applying the fungal antagonist *Coniothyrium minitans* strain CON/M/91-08 to protect oilseed rape against *sclerotinia* stem rot. 10e Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, France, 3, 4 & 5 Décembre, 2012 692–702.
- McQuilken, M.P., Chalton, D., 2009. Potential for biocontrol of *sclerotinia* rot of carrot with foliar sprays of Contans WG (*Coniothyrium minitans*). *Biocontrol Sci. Technol.* 19, 229–235. <https://doi.org/10.1080/09583150802635549>
- Ohberg, H., Bang, U., 2010. Biological control of clover rot on red clover by *Coniothyrium minitans* under natural and controlled climatic conditions. *Biocontrol Sci. Technol.* 20, 25–36. <https://doi.org/10.1080/09583150903337805>
- Partridge, D.E., 2005. Potential for management of *Sclerotinia* blight of peanut (*Arachis hypogaea* L.) caused by *Sclerotinia minor* with the biological control agent *Coniothyrium minitans* - ProQuest [WWW Document]. URL <https://www.proquest.com/openview/636e77c079cf3b5f07256222e315eb9c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y> (accessed 2.20.23).
- Partridge, D.E., Sutton, T.B., Jordan, D.L., 2006a. Effect of environmental factors and pesticides on mycoparasitism of *Sclerotinia minor* by *Coniothyrium minitans*. *Plant Disease* 90, 1407–1412. <https://doi.org/10.1094/PD-90-1407>
- Partridge, D.E., Sutton, T.B., Jordan, D.L., Curtis, V.L., Bailey, J.E., 2006b. Management of *Sclerotinia* Blight of peanut with the biological control agent *Coniothyrium minitans*. *Plant Disease* 90, 957–963. <https://doi.org/10.1094/PD-90-0957>
- Ruark, S.J., Shew, B.B., 2010. Evaluation of microbial, botanical, and organic treatments for control of peanut seedling diseases. *PLANT DIS.* 94, 445–454. <https://doi.org/10.1094/PDIS-94-4-0445>
- Tomprefa, N., Hill, R., Whipps, J., McQuilken, M., 2011. Some environmental factors affect growth and antibiotic production by the mycoparasite *Coniothyrium minitans*. *Biocontrol Science and Technology* 21, 721–731. <https://doi.org/10.1080/09583157.2011.575211>
- Van Beneden, S., Leenknecht, I., Franca, S.C., Hofte, M., 2010. Improved control of lettuce drop caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans combined with lignin or a reduced fungicide application. *Crop Prot.* 29, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.08.003>

Zeng, W., 2010. Management of soybean (*Glycine max* L.) white mold by reducing *Sclerotinia sclerotiorum* population using beneficial microorganisms - ProQuest [WWW Document]. URL <https://www.proquest.com/openview/b95b34d558b55f69fbfc58b899706c23/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750> (accessed 2.20.23).

Zeng, W., Kirk, W., Hao, J., 2012. Field management of *Sclerotinia* stem rot of soybean using biological control agents. *Biol. Control* 60, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.09.012>

***Metschnikowia fructicola* NRRL Y-27328**

Karabulut, O.A., Tezcan, H., Daus, A., Cohen, L., Wiess, B., Droby, S., 2004. Control of preharvest and postharvest fruit rot in Strawberry by *Metschnikowia fructicola*. *Biocontrol Science and Technology* 14, 513–521. <https://doi.org/10.1080/09583150410001682287>

Liu, J., Wisniewski, M., 2011. Effect of heat shock treatment on stress tolerance and biocontrol efficacy of biocontrol yeasts. *Acta Hort.* 227–232. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.905.24>

Liu, J., Wisniewski, M., Droby, S., Tian, S., Hershkovitz, V., Tworkoski, T., 2011. Effect of heat shock treatment on stress tolerance and biocontrol efficacy of *Metschnikowia fructicola*. *FEMS Microbiol. Ecol.* 76, 145–155. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.01037.x>

Zhimo, V.Y., Kumar, A., Biasi, A., Salim, S., Feygenberg, O., Toamy, M.A., Abdelfattaah, A., Medina, S., Freilich, S., Wisniewski, M., Droby, S., 2021. Compositional shifts in the strawberry fruit microbiome in response to near-harvest application of *Metschnikowia fructicola*, a yeast biocontrol agent. *Postharvest Biology and Technology* 175, 111469. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111469>

***Phlebiopsis gigantea* (1 publication)**

Knudsen, I.M.B., Thomsen, K.A., Jensen, B., Poulsen, K.M., 2004. Effects of hot water treatment, biocontrol agents, disinfectants, and a fungicide on storability of English oak acorns and control of the pathogen, *Ciboria batschiana*. *Forest Pathology* 34, 47–64. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2003.00348.x>

***Pseudomonas chlororaphis* MA342 (9 publications)**

Abuamsha, R., Salman, M., Ehlers, R.-U., 2011. Improvement of seed bio-priming of oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera*) with *Serratia plymuthica* and *Pseudomonas chlororaphis*. *Biocontrol Science and Technology* 21, 199–213. <https://doi.org/10.1080/09583157.2010.537311>

Bennett, A.J., Whipps, J.M., 2008. Beneficial microorganism survival on seed, roots and in rhizosphere soil following application to seed during drum priming. *Biol. Control* 44, 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.11.005>

Hamada, A.M., Fatehi, J., Jonsson, L.M.V., 2018. Seed treatments with thiamine reduce the performance of generalist and specialist aphids on crop plants. *Bulletin of Entomological Research* 108, 84–92. <https://doi.org/10.1017/S0007485317000529>

Hammoudi, O., 2014. Effect of antagonistic microorganisms on gray mold caused by *Botrytis cinerea* on tomato and strawberry under laboratory and greenhouse conditions. *Arab Journal*

of Plant Protection 32, 64–71.

- Kawas, H., Hamoudi, O., Ahmad, A., Ismail, I.D., 2017. Evaluation of efficacy of four bacterial strains of plant growth promoting rhizobacter to induce systemic resistance against Cucumber mosaic virus in tomato plants grown in the greenhouse. Arab Journal of Plant Protection 35, 6–15.
- Knudsen, I.M.B., Thomsen, K.A., Jensen, B., Poulsen, K.M., 2004. Effects of hot water treatment, biocontrol agents, disinfectants, and a fungicide on storability of English oak acorns and control of the pathogen, *Ciboria batschiana*. Forest Pathology 34, 47–64. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2003.00348.x>
- Minchev, Z., Kostenko, O., Soler, R., Pozo, M.J., 2021. Microbial consortia for effective biocontrol of root and foliar diseases in tomato. Frontiers in Plant Science 12.
- Roberti, R., Veronesi, A., Flamigni, F., 2012. Evaluation of microbial products for the control of zucchini foot and root rot caused by *Fusarium solani* f. sp. *cucurbitae* race 1. Phytopathol. Mediterr. 51, 317–331.
- Wang, J., 2012. Gene expression of ABC-transporters in the fungal biocontrol agent *Clonostachys rosea* in response to anti-fungal metabolites from *Pseudomonas chlororaphis* [WWW Document]. URL <https://stud.epsilon.slu.se/4533/> (accessed 2.21.23).

***Pseudomonas* sp DSMZ 13134 (9 publications)**

- Buddrus-Schiemann, K., Schmid, M., Schreiner, K., Welzl, G., Hartmann, A., 2010. Root colonization by *Pseudomonas* sp DSMZ 13134 and impact on the indigenous rhizosphere bacterial community of barley. Microb. Ecol. 60, 381–393. <https://doi.org/10.1007/s00248-010-9720-8>
- Knot, P., Caslavova, I., Skladanka, J., 2019. Effect of Proradix method seed treatment and seed age on germinability of meadow grass, in: Pazderu, K. (Ed.), Seed and Seedlings Xiv. Czech University Life Sciences Prague, Prague 6, pp. 199–203.
- Lekfeldt, J.D.S., Rex, M., Mercl, F., Kulhanek, M., Tlustos, P., Magid, J., de Neergaard, A., 2016. Effect of bioeffectors and recycled P-fertiliser products on the growth of spring wheat. Chem. Biol. Technol. Agric. 3, 22. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0074-4>
- Mercl, F., Zilincikova, N., Kraus, K., Kulhanek, M., Tlustos, P., 2017. *Bacterium Pseudomonas* sp dsmz 13134 improves yield of maize biomass on alkaline soil treated with torrefied sewage sludge. Czech University Life Sciences Prague, Prague 6.
- Mpanga, I.K., Gomez-Genao, N., Moradtalab, N., Wanke, D., Chrobaczek, V., Ahmed, A., Windisch, S., Geistlinger, J., Hafiz, F.B., Walker, F., Ludewig, U., Neumann, G., 2019. The role of N form supply for PGPM-host plant interactions in maize. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 182, 908–920. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900133>
- Nkebiwe, P.M., Neumann, G., Müller, T., 2017. Densely rooted rhizosphere hotspots induced around subsurface NH₄⁺-fertilizer depots: a home for soil PGPMs? Chem. Biol. Technol. Agric. 4, 29. <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0111-y>
- Roberti, R., Veronesi, A., Flamigni, F., 2012. Evaluation of microbial products for the control of zucchini foot and root rot caused by *Fusarium solani* f. sp. *cucurbitae* race 1. Phytopathol. Mediterr. 51, 317–331.
- Weinmann, M., Roemheld, V., Mueller, T., 2010. The effects of plant growth promoting rhizobacteria on healthy plant growth of tomato affected by soil sickness.
- Yusran, Y., Roemheld, V., Mueller, T., 2009. Effects of *Pseudomonas* sp. "Proradix" and *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 on the Establishment of AMF Infection, Nutrient Acquisition and Growth of Tomato Affected by *Fusarium oxysporum* Schlecht f.sp. *radicis-lycopersici* Jarvis and Shoemaker. <https://escholarship.org/uc/item/8g70p0zt>

***Pythium oligandrum* M1 (15 publications)**

- Al-Assiuty, A.-N.I.M., Khalil, M.A., Ismail, A.-W.A., van Straalen, N.M., Ageba, M.F., 2014. Effects of fungicides and biofungicides on population density and community structure of soil oribatid mites. *Sci. Total Environ.* 466, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.063>
- Belonoznikova, K., Hyskova, V., Vaskova, M., Krizek, T., Cokrtova, K., Vanek, T., Halirova, L., Chudy, M., Zufic, A., Ryslava, H., 2022. Seed Protection of *Solanum lycopersicum* with *Pythium oligandrum* against *Alternaria brassicicola* and *Verticillium albo-atrum*. *Microorganisms* 10, 1348. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071348>
- Duskova, E., 1995. New biological fungicides for plant-protection registered in the Czech Republic, in: Manka, M. (Ed.), *Environmental Biotic Factors in Integrated Plant Disease Control*. Polish Phytopathological Soc, 60-625 Poznan, pp. 211–216.
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>
- Georgieva, N., Nikolova, I., Delchev, G., 2020. Response of spring vetch (*Vicia sativa* L.) to organic production conditions. *Bulg. J. Agric. Sci.* 26, 520–526.
- Georgieva, N., Nikolova, I., Delchev, G., 2015. Organic cultivation of field pea by use of products with different action. *Span. J. Agric. Res.* 13. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015134-7861>
- Kuchtova, P., Kazda, J., Cihlar, P., Plachka, E., Hajkova, M., Havel, J., Dvorak, P., Supova, E., 2009. Influence of different preparations and their combinations on the yield of poppy seed (*Papaver somniferum* L.), in: Svachula, V., Vach, M., Tun, D. (Eds.), *Prosperous Oil Crops 2009*. Czech University Life Sciences Prague, Prague 6, pp. 82–87.
- Makleit, P., Szoke, L., Veres, S., 2020. Powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) infection and amount of key defence chemicals - cyclic hydroxamic acids - of field cultivated wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Cent. Eur. Agric.* 21, 741–750. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.4.2655>
- Nikolova, I., Georgieva, N., 2014. Effects of biological insecticides NeemAzal T/S and Pyrethrum FS EC and their interaction with organic products in treatments of pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Hemiptera: Aphididae) on *Pisum sativum* (L.). 1 29. <https://doi.org/10.2298/pif.v29i3.6385>
- Pisarcik, M., Hakl, J., Hrevusova, Z., 2020. Effect of *Pythium oligandrum* and poly-beta-hydroxy butyric acid application on root growth, forage yield and root diseases of red clover under field conditions. *Crop Prot.* 127, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104968>
- Pisarcik, M., Hakl, J., Mensik, L., Szabo, O., Nerusil, P., 2019. Biological control in lucerne crops can negatively affect the development of root morphology, forage yield and quality. *Plant Soil Environ.* 65, 477–482. <https://doi.org/10.17221/398/2019-PSE>
- Pisarcik, M., Hakl, J., Szabo, O., Hrevusova, Z., 2021. Efficacy of variable timing of *Pythium oligandrum* applications on red clover grown under field conditions. *Crop Prot.* 149, 105780. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105780>
- Rekanovic, E., Milijasevic, S., Todorovic, B., Potocnik, I., 2007. Possibilities of biological and chemical control of *Verticillium* wilt in pepper. *Phytoparasitica* 35, 436–441. <https://doi.org/10.1007/BF03020601>
- Stridh, L.J., Mostafanezhad, H., Andersen, C.B., Odilbekov, F., Grenville-Briggs, L., Lankinen, Å., Liljeroth, E., 2022. Reduced efficacy of biocontrol agents and plant resistance inducers against potato early blight from greenhouse to field. *J Plant Dis Prot* 129, 923–938. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00633-4>

Witkowicz, R., Biel, W., 2022. A novel method for analyzing mineral ratio profiles of treated buckwheat sprouts (*Fagopyrum esculentum* Moench). Journal of Food Composition and Analysis 114, 104800. <https://doi.org/10.1016/j.ifca.2022.104800>

***Saccharomyces cerevisiae* LAS02 (No publication)**

***Streptomyces* K61 (anciennement *S. griseoviridis*) (14 publications)**

Aiello, D., Vitale, A., Guarnaccia, V., Cinquerrui, A., Formica, P.T., Polizzi, G., 2012. Red clover as a model plant for studying the effects of fungicide and biological treatments to control *Calonectria* diseases. Red clover as a model plant for studying the effects of fungicide and biological treatments to control *Calonectria* diseases. 80, 291–296.

Covert, S.F., Aoki, T., O'Donnell, K., Starkey, D., Holliday, A., Geiser, D.M., Cheung, F., Town, C., Strom, A., Juba, J., Scandiani, M., Yang, X.B., 2007. Sexual reproduction in the soybean sudden death syndrome pathogen *Fusarium tucumaniae*. Fungal Genetics and Biology 44, 799–807. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2006.12.009>

Elmer, W.H., McGovern, R.J., 2004. Efficacy of integrating biologicals with fungicides for the suppression of *Fusarium* wilt of cyclamen. Crop Protection 23, 909–914. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.01.012>

In vitro efficacy tests against *Fusarium* spp. causing garlic dry rot [WWW Document], n.d. URL <https://publicatt.unicatt.it/handle/10807/135404> (accessed 2.22.23).

Knudsen, I.M.B., Thomsen, K.A., Jensen, B., Poulsen, K.M., 2004. Effects of hot water treatment, biocontrol agents, disinfectants and a fungicide on storability of English oak acorns and control of the pathogen, *Ciboria batschiana*. Forest Pathology 34, 47–64. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2003.00348.x>

Leisso, R.S., Miller, P.R., Burrows, M.E., 2009. The influence of biological and fungicidal seed treatments on chickpea (*Cicer arietinum*) damping off. Can. J. Plant Pathol. 31, 38–46. <https://doi.org/10.1080/07060660909507570>

Minuto, A., Spadaro, D., Garibaldi, A., Gullino, M.L., 2006. Control of soilborne pathogens of tomato using a commercial formulation of *Streptomyces griseoviridis* and solarization. Crop Prot. 25, 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.08.001>

Punja, Z.K., Yip, R., 2003. Biological control of damping-off and root rot caused by *Pythium aphanidermatum* on greenhouse cucumbers. Can. J. Plant Pathol.-Rev. Can. Phytopathol. 25, 411–417.

Roberti, R., Veronesi, A., Flamigni, F., 2012. Evaluation of microbial products for the control of zucchini foot and root rot caused by *Fusarium solani* f. sp. *cucurbitae* race 1. Phytopathol. Mediterr. 51, 317–331.

Rose, S., Parker, M., Punja, Z.K., 2003. Efficacy of biological and chemical treatments for control of *Fusarium* root and stem rot on greenhouse cucumber. Plant Disease 87, 1462–1470. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.12.1462>

Rose, S., Yip, R., Punja, Z.K., 2004. Biological control of *Fusarium* and *Pythium* root rots on greenhouse cucumbers grown in rockwool, in: Vanachter, A. (Ed.), Managing Soil-Borne Pathogens: A Sound Rhizosphere to Improve Productivity in Intensive Horticultural Systems. International Society Horticultural Science, Leuven 1, pp. 73–78.

Sanogo, S., Lujan, P., 2022. Seed, plant, and soil treatment with selected commercial *Bacillus*-based and *Streptomyces*-based biofungicides and chemical fungicides and development of *Phytophthora* blight on chile pepper. Archives of Phytopathology and Plant Protection 55,

331–343. <https://doi.org/10.1080/03235408.2021.2019426>

Schmitt, A., Koch, E., Stephan, D., Kromphardt, C., Jahn, M., Krauthausen, H.-J., Forsberg, G., Werner, S., Amein, T., Wright, S.A.I., Tinivella, F., van der Wolf, J., P, S., 2009. Evaluation of non-chemical seed treatment methods for the control of *Phoma valerianellae* on lamb's lettuce seeds. *J Plant Dis Prot* 116, 200–207. <https://doi.org/10.1007/BF03356311>

Utkhede, R.S., Koch, C.A., 2004. Evaluation of biological and chemical treatments for control of gummy stem blight on cucumber plants grown hydroponically in greenhouses. *BioControl* 49, 109–117. <https://doi.org/10.1023/B:BICO.0000009394.75429.a7>

***Streptomyces lydicus* WYEC 108 (15 publications)**

Bailey, K.L., Derby, J., Boyetchko, S.M., Sawchyn, K., Becker, E., Sumampong, G., Shamoun, S., James, D., Masri, S., Varga, A., 2012. In vivo studies evaluating commercial biofungicide suppression of blight caused by *Phytophthora ramorum* in selected ornamentals. *Biocontrol Sci. Technol.* 22, 1268–1283. <https://doi.org/10.1080/09583157.2012.724659>

Chen, X., Pizzatti, C., Bonaldi, M., Saracchi, M., Erlacher, A., Kunova, A., Berg, G., Cortesi, P., 2016. Biological Control of Lettuce Drop and Host Plant Colonization by Rhizospheric and Endophytic *Streptomyces*. *Front. Microbiol.* 7, 714. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00714>

Covert, S.F., Aoki, T., O'Donnell, K., Starkey, D., Holliday, A., Geiser, D.M., Cheung, F., Town, C., Strom, A., Juba, J., Scandiani, M., Yang, X.B., 2007. Sexual reproduction in the soybean sudden death syndrome pathogen *Fusarium tucumaniae*. *Fungal Genetics and Biology* 44, 799–807. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2006.12.009>

Dara, S.K., Dara, S.S., Dara, S.S.R., 2020. Managing *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* Race 4 with beneficial microorganisms including entomopathogenic fungi. *Acta Hort.* 111–116. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1270.11>

Darby, H., Cummings, E., 2016. The efficacy of spraying organic fungicides to control fusarium head blight infection in spring wheat.

Elmer, W.H., McGovern, R.J., 2004. Efficacy of integrating biologicals with fungicides for the suppression of *Fusarium* wilt of cyclamen. *Crop Protection* 23, 909–914. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.01.012>

Himmelstein, J., Maul, J.E., Balci, Y., Everts, K.L., 2016. Factors Associated with Leguminous Green Manure Incorporation and *Fusarium* Wilt Suppression in Watermelon. *PLANT DIS.* 100, 1910–1920. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-15-0956-RE>

Leisso, R.S., Miller, P.R., Burrows, M.E., 2009. The influence of biological and fungicidal seed treatments on chickpea (*Cicer arietinum*) damping off. *Can. J. Plant Pathol.* 31, 38–46. <https://doi.org/10.1080/07060660909507570>

Menzel, C.M., Gomez, A., Smith, L.A., 2016. Control of grey mould and stem-end rot in strawberry plants growing in a subtropical environment. *Australasian Plant Pathol.* 45, 489–498. <https://doi.org/10.1007/s13313-016-0440-5>

Sepúlveda Rubio, C.I., 2012. Efecto in vitro de bioantagonistas en cepas de basidiomycotas aislados de vid (*Vitis vinifera* L.) con síntomas de degradación de la madera. In vitro effect of biocontrol agents against basidiomycotas strains isolated from grapevine (*Vitis vinifera* L.) with wood degradation symptoms.

Tian, X., Zheng, Y., 2013. Evaluation of biological control agents for *Fusarium* wilt in *Hiemalis begonia*. *Can. J. Plant Pathol.* 35, 363–370. <https://doi.org/10.1080/07060661.2013.812580>

Utkhede, R.S., Koch, C.A., 2004. Evaluation of biological and chemical treatments for control of gummy stem blight on cucumber plants grown hydroponically in greenhouses. *BioControl* 49,

109–117. <https://doi.org/10.1023/B:BICO.0000009394.75429.a7>

- Zeng, W., 2010. Management of soybean (*Glycine max* L.) white mold by reducing *Sclerotinia sclerotiorum* population using beneficial microorganisms - ProQuest [WWW Document]. URL <https://www.proquest.com/openview/b95b34d558b55f69bfc58b899706c23/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750> (accessed 2.20.23).
- Zeng, W., Kirk, W., Hao, J., 2012. Field management of *Sclerotinia* stem rot of soybean using biological control agents. *Biol. Control* 60, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.09.012>
- Zhang, S., Vallad, G.E., White, T.L., Huang, C.-H., 2011. Evaluation of microbial products for management of powdery mildew on summer squash and cantaloupe in Florida. *Plant Disease* 95, 461–468. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-10-0521>

***Trichoderma asperellum* ICC 012 (4 publications)**

- Celar, F.A., Kos, K., 2022. Compatibility of the commercial biological control agents *Trichoderma asperellum* (ICC 012) and *Trichoderma gamsii* (ICC 080) with selected herbicides. *J Plant Dis Prot* 129, 85–92. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00547-7>
- Di Marco, S., Metruccio, E.G., Moretti, S., Nocentini, M., Carella, G., Pacetti, A., Battiston, E., Osti, F., Mugnai, L., 2022. Activity of *Trichoderma asperellum* strain ICC 012 and *Trichoderma gamsii* strain ICC 080 toward diseases of esca complex and associated pathogens. *Frontiers in Microbiology* 12.
- Roberti, R., Veronesi, A., Flamigni, F., 2012. Evaluation of microbial products for the control of zucchini foot and root rot caused by *Fusarium solani* f. sp. *cucurbitae* race 1. *Phytopathol. Mediterr.* 51, 317–331.
- Van Beneden, S., Leenknecht, I., Franca, S.C., Hofte, M., 2010. Improved control of lettuce drop caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans combined with lignin or a reduced fungicide application. *Crop Prot.* 29, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.08.003>

***Trichoderma asperellum* T-34 (8 publications)**

- Borrero, C., Trillas, M.I., Delgado, A., Aviles, M., 2012. Effect of ammonium/nitrate ratio in nutrient solution on control of *Fusarium* wilt of tomato by *Trichoderma asperellum* T34. *Plant Pathol.* 61, 132–139. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02490.x>
- Estévez-Geffriaud, V., Vicente, R., Vergara-Díaz, O., Narváez Reinaldo, J.J., Trillas, M.I., 2020. Application of *Trichoderma asperellum* T34 on maize (*Zea mays*) seeds protects against drought stress. *Planta* 252, 8. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03404-3>
- García-Lopez, A.M., Recena, R., Aviles, M., Delgado, A., 2018. Effect of *Bacillus subtilis* QST713 and *Trichoderma asperellum* T34 on P uptake by wheat and how it is modulated by soil properties. *J. Soils Sediments* 18, 727–738. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1829-7>
- Maria García-Lopez, A., Aviles, M., Delgado, A., 2013. Iron availability thresholds for the inoculation of cucumber with *Trichoderma asperellum* T34. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176, 867–875. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300277>
- Rashid, I.A.S., Abdelghany, R.E.A., Abd-EL-Hamed, W.F.M., 2022. Potential of bioagents application pre-harvest strawberry on fruit rots and quality under storage conditions. *Egyptian Journal of Phytopathology* 50, 79–87. <https://doi.org/10.21608/ejp.2022.161990.1069>
- Segarra Braunstein, G., Avilés, M., Borrero, C., Trillas Gay, M.I., 2013. Effectiveness and versatility of the biological control of *Phytophthora capsici* in pepper by *Trichoderma asperellum* T34.

- Segarra, G., Casanova, E., Aviles, M., Trillas, I., 2010. *Trichoderma asperellum* strain T34 controls *Fusarium* Wilt disease in tomato plants in soilless culture through competition for iron. *Microb. Ecol.* 59, 141–149. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9545-5>
- Trillas, M.I., Casanova, E., Cotxarrera, L., Ordovas, J., Borrero, C., Aviles, M., 2006. Composts from agricultural waste and the *Trichoderma asperellum* strain T-34 suppress *Rhizoctonia solani* in cucumber seedlings. *Biol. Control* 39, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.05.007>

***Trichoderma atroviride* I-1237 (3 publications)**

- Cordier, C., Alabouvette, C., 2009. Effects of the introduction of a biocontrol strain of *Trichoderma atroviride* on non-target soil micro-organisms. *Eur. J. Soil Biol.* 45, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2008.12.004>
- Reis, P., Gaspar, A., Alves, A., Fontaine, F., Rego, C., 2021. Combining an HA + Cu (ii) site-targeted copper-based product with a pruning wound protection program to prevent infection with *Lasiodiplodia* spp. in grapevine. *Plants* 10, 2376. <https://doi.org/10.3390/plants10112376>
- Reis, P., Mondello, V., Diniz, I., Alves, A., Rego, C., Fontaine, F., 2022. Effect of the combined treatments with LC2017 and *Trichoderma atroviride* strain I-1237 on disease development and defense responses in vines infected by *Lasiodiplodia theobromae*. *Agronomy-Basel* 12, 996. <https://doi.org/10.3390/agronomy12050996>

***Trichoderma atroviride* IMI 206040**

- Fernández-Sandoval, M.T., Ortiz-García, M., Galindo, E., Serrano-Carreón, L., 2012. Cellular damage during drying and storage of *Trichoderma harzianum* spores. *Process Biochemistry* 47, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.10.006>
- Hjeljord, L.G., Stensvand, A., Tronsmo, A., 2000. Effect of temperature and nutrient stress on the capacity of commercial *Trichoderma* products to control *Botrytis cinerea* and *Mucor piriformis* in greenhouse strawberries. *Biological Control* 19, 149–160. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0859>
- Speckbacher, V., Ruzsanyi, V., Wigger, M., Zeilinger, S., 2020. The *Trichoderma atroviride* strains P1 and IMI 206040 differ in their light-response and VOC production. *Molecules* 25, 208. <https://doi.org/10.3390/molecules25010208>

***Trichoderma atroviride* SC1 (11 publications)**

- Chammem, H., Nesler, A., Pertot, I., 2021. Wood pellets as carriers of conidia of *Trichoderma atroviride* SC1 for soil application. *Fungal Biol.* 125, 989–998. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2021.08.003>
- Fedele, G., Brischetto, C., Rossi, V., 2020. Biocontrol of *Botrytis cinerea* on grape berries as influenced by temperature and humidity. *Front. Plant Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01232>

- Leal, C., Richet, N., Guise, J.-F., Gramaje, D., Armengol, J., Fontaine, F., Trotel-Aziz, P., 2021. Cultivar contributes to the beneficial effects of *Bacillus subtilis* PTA-271 and *Trichoderma atroviride* SC1 to protect grapevine against *Neofusicoccum parvum*. *Front. Microbiol.* 12, 726132. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.726132>
- Longa, C.M.O., Pertot, I., 2009. An intact soil-core microcosm method to evaluate the survival and vertical dispersal of *Trichoderma atroviride* SC1. *Lett. Appl. Microbiol.* 49, 609–614. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2009.02715.x>
- Longa, C.M.O., Pertot, I., Tosi, S., 2008. Ecophysiological requirements and survival of a *Trichoderma atroviride* isolate with biocontrol potential. *J. Basic Microbiol.* 48, 269–277. <https://doi.org/10.1002/jobm.200700396>
- Longa, C.M.O., Savazzini, F., Tosi, S., Elad, Y., Pertot, I., 2009. Evaluating the survival and environmental fate of the biocontrol agent *Trichoderma atroviride* SC1 in vineyards in northern Italy. *J. Appl. Microbiol.* 106, 1549–1557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.04117.x>
- Pasini, L., Prodorutti, D., Pastorelli, S., Pertot, I., 2016. Genetic diversity and biocontrol of *Rosellinia necatrix* infecting apple in northern Italy. *PLANT DIS.* 100, 444–452. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-15-0480-RE>
- Pellegrini, A., Prodorutti, D., Pertot, I., 2014. Use of bark mulch pre-inoculated with *Trichoderma atroviride* to control *Armillaria* root rot. *Crop Prot.* 64, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.06.007>
- Pellegrini, A., Prodorutti, D., Pertot, I., 2012. Effect of temperature on the antagonism between biocontrol agents and *Cylindrocarpon destructans*. *Effect of temperature on the antagonism between biocontrol agents and Cylindrocarpon destructans.* 78, 311–313.
- Pertot, I., Prodorutti, D., Colombini, A., Pasini, L., 2016. *Trichoderma atroviride* SC1 prevents *Phaeomoniella chlamydospora* and *Phaeoacremonium aleophilum* infection of grapevine plants during the grafting process in nurseries. *Biocontrol* 61, 257–267. <https://doi.org/10.1007/s10526-016-9723-6>
- Savazzini, F., Longa, C.M.O., Pertot, I., 2009. Impact of the biocontrol agent *Trichoderma atroviride* SC1 on soil microbial communities of a vineyard in northern Italy. *Soil Biol. Biochem.* 41, 1457–1465. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.027>

***Trichoderma atroviride* T11 (3 publications)**

- Berlanas, C., Andrés-Sodupe, M., López-Manzanares, B., Maldonado-González, M.M., Gramaje, D., 2018. Effect of white mustard cover crop residue, soil chemical fumigation and *Trichoderma* spp. root treatment on black-foot disease control in grapevine. *Pest Management Science* 74, 2864–2873. <https://doi.org/10.1002/ps.5078>
- Cinquerrui, A., Polizzi, G., Aiello, D., Vitale, A., 2017. Integrated management for the reduction of *Calonectria* infections in ornamental nurseries. *Plant Disease* 101, 165–169. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-16-0801-RE>
- Gugliuzzo, A., Aiello, D., Biondi, A., Giurdanella, G., Siscaro, G., Zappalà, L., Vitale, A., Garzia, G.T., Polizzi, G., 2022. Microbial mutualism suppression by *Trichoderma* and *Bacillus* species for controlling the invasive ambrosia beetle *Xylosandrus compactus*. *Biological Control* 170, 104929. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104929>

***Trichoderma gamsii* ICC 080 (4 publications)**

- Celar, F.A., Kos, K., 2022. Compatibility of the commercial biological control agents *Trichoderma asperellum* (ICC 012) and *Trichoderma gamsii* (ICC 080) with selected herbicides. J Plant Dis Prot 129, 85–92. <https://doi.org/10.1007/s41348-021-00547-7>
- Di Marco, S., Metruccio, E.G., Moretti, S., Nocentini, M., Carella, G., Pacetti, A., Battiston, E., Osti, F., Mugnai, L., 2022. Activity of *Trichoderma asperellum* strain ICC 012 and *Trichoderma gamsii* strain ICC 080 toward diseases of esca complex and associated pathogens. Frontiers in Microbiology 12.
- Roberti, R., Veronesi, A., Flamigni, F., 2012. Evaluation of microbial products for the control of zucchini foot and root rot caused by *Fusarium solani* f. sp. *cucurbitae* race 1. Phytopathol. Mediterr. 51, 317–331.
- Van Beneden, S., Leenknecht, I., Franca, S.C., Hofte, M., 2010. Improved control of lettuce drop caused by *Sclerotinia sclerotiorum* using Contans combined with lignin or a reduced fungicide application. Crop Prot. 29, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.08.003>

***Trichoderma harzianum* ITEM 908**

- Marzano, M., Gallo, A., Altomare, C., 2013. Improvement of biocontrol efficacy of *Trichoderma harzianum* vs. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* through UV- induced tolerance to fusaric acid. Biol. Control 67, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.09.008>

***Trichoderma harzianum* T-22 (25 publications)**

- Aada, A.M., Hack, E., 2013. The effect of the biological control agent *Trichoderma harzianum* T-22 on spot blotch disease in Libyan barley cultivars in a field experiment. The effect of the biological control agent *Trichoderma harzianum* T-22 on spot blotch disease in Libyan barley cultivars in a field experiment. 86, 219–225.
- Abbey, J.A., Percival, D., Anku, K., Schilder, A., Asiedu, S.K., 2022. Managing *Botrytis* blossom blight of wild blueberry through field sanitation, lime sulfur and *Trichoderma* application. Can. J. Plant Pathol. <https://doi.org/10.1080/07060661.2021.2023649>
- Albano, S., Chagnon, M., Mexia, A., 2009. Effectiveness of *Apis mellifera* and *Bombus impatiens* as dispersers of the Rootshield® biofungicide (*Trichoderma harzianum*, strain T-22) in a strawberry crop [WWW Document]. URL https://www.bpi.gr/files/journal/2009/july/Volume-Issue%28July_2009%29.pdf#page=13 (accessed 2.23.23).
- Batta, Y.A., 2004. Effect of treatment with *Trichoderma harzianum* Rifai formulated in invert emulsion on postharvest decay of apple blue mold. International Journal of Food Microbiology 96, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.04.002>
- Bennett, A.J., Whipps, J.M., 2008. Beneficial microorganism survival on seed, roots and in rhizosphere soil following application to seed during drum priming. Biol. Control 44, 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.11.005>
- Brown, M.S., Baysal-Gurel, F., Oliver, J.B., Adesso, K.M., 2019. Comparative performance of fungicides, biofungicides, and host plant defense inducers in suppression of phytophthora root rot in flowering dogwood during simulated root flooding events. Plant Disease 103, 1703–

1711. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1597-RE>
- Çolak Ateş, A., 2019. Effect of *Coniothyrium minitans* and *Trichoderma harzianum* in the biological control of white mold disease (*Sclerotinia sclerotiorum*) in lettuce (*Lactuca sativa* L.). Appl. Ecol. Env. Res. 17. https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1568715701
- Elmer, W.H., McGovern, R.J., 2004. Efficacy of integrating biologicals with fungicides for the suppression of *Fusarium* wilt of cyclamen. Crop Protection 23, 909–914. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.01.012>
- Ferrigo, D., Raiola, A., Piccolo, E., Scopel, C., Causin, R., 2014. *Trichoderma harzianum* T22 induces in maize systemic resistance against *Fusarium verticillioides*. Journal of Plant Pathology.
- Hjeljord, L.G., Stensvand, A., Tronsmo, A., 2000. Effect of temperature and nutrient stress on the capacity of commercial *Trichoderma* products to control *Botrytis cinerea* and *Mucor piriformis* in greenhouse strawberries. Biological Control 19, 149–160. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0859>
- Inch, S.A., 2010. Screening and evaluation of potential fungal antagonists for the biological control of *Fusarium* head blight incited by *Gibberella zeae*.
- Khadka, R.B., Miller, S.A., 2021. Synergy of anaerobic soil disinfestation and *Trichoderma* spp. in *Rhizoctonia* root rot suppression. Frontiers in Sustainable Food Systems 5.
- Kovach, J., Petzoldt, R., Harman, G.E., 2000. Use of honeybees and bumble bees to disseminate *Trichoderma harzianum* 1295-22 to strawberries for *Botrytis* control. Biological Control 18, 235–242. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0839>
- Leisso, R.S., Miller, P.R., Burrows, M.E., 2009. The influence of biological and fungicidal seed treatments on chickpea (*Cicer arietinum*) damping off. Can. J. Plant Pathol. 31, 38–46. <https://doi.org/10.1080/07060660909507570>
- Lo, C.-T., Nelson, E.B., Harman, G.E., 1997. Improved Biocontrol Efficacy of *Trichoderma harzianum* 1295-22 for foliar phases of turf diseases by use of spray applications. Plant Disease 81, 1132–1138. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.10.1132>
- Mattox, C.M., Kowalewski, A.R., McDonald, B.W., Lambrinos, J.G., Pscheidt, J.W., 2018. Rolling and biological control products affect *Microdochium* patch severity on a sand-based annual bluegrass putting green. Agron. J. 110, 2124–2129. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0008>
- Mersha, Z., Ibarra-Bautista, M.A., 2022. Evaluation of selected biological and chemical treatments against soil-borne diseases of ginger in high tunnel production. Horticulturae 8, 870. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100870>
- Nkebiwe, P.M., Neumann, G., Müller, T., 2017. Densely rooted rhizosphere hotspots induced around subsurface NH₄⁺-fertilizer depots: a home for soil PGPMs? Chem. Biol. Technol. Agric. 4, 29. <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0111-y>
- Picton, D.D., Hummer, K.E., 2003. Control of powdery mildew on leaves and stems of gooseberry. HortTechnology 13, 365–367. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.2.0365>
- Sofo, A., Milella, L., Tataranni, G., 2010. Effects of *Trichoderma harzianum* strain T-22 on the growth of two Prunus rootstocks during the rooting phase. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 85, 497–502. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512704>
- Twizeyimana, M., Hartman, G.L., 2019. Effect of selected biopesticides in reducing soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) development. PLANT DIS. 103, 2460–2466. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-19-0384-RE>
- Vitale, A., Cirvilleri, G., Castello, I., Aiello, D., Polizzi, G., 2012. Evaluation of *Trichoderma harzianum* strain T22 as biological control agent of *Calonectria pauciramosa*. BioControl 57, 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9423-1>

- Yiğit, F., Dikilitaş, M., 2007. Control of *fusarium* wilt of tomato by combination of fluorescent *Pseudomonas*, non-pathogen *Fusarium* and *Trichoderma harzianum* T-22 in greenhouse conditions. <https://doi.org/10.3923/ppj.2007.159.163>
- Yücel, S., Ay, T., Çolak, A., 2009. Effect of *Trichoderma harzianum* rifai KRL AG2 to control root rot disease (*Rhizoctonia solani*, *Fusarium solani*) of cucumber in protected crops. Plant Protection Bulletin 48, 41–47.
- Zeng, W., Kirk, W., Hao, J., 2012. Field management of *Sclerotinia* stem rot of soybean using biological control agents. Biol. Control 60, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.09.012>

ANNEXE 3 : Article Phytoma DeciControl

(Version avant mise en page par l'éditeur)

Decicontrol, un OAD pour faciliter l'utilisation du biocontrôle

L'outil numérique, co-construit avec et pour le terrain, permet de partager les connaissances et les savoirs sur l'efficacité des produits de biocontrôle.

THOMAS PRESSECQ^{1,2} & ⁴, PAULINE DUVAL⁴, JEAN-MARC ARMAND³, JEAN-FRANÇOIS BOURGEAY¹, JONATHAN GAUDIN¹, DOMINIQUE BLANCARD³, PHILIPPE NICOT¹, AURÉLIE ROUSSELIN⁴, MARC BARDIN¹, CLAIRE GOILLON⁴ ET MARC TCHAMITCHIAN²

¹Pathologie végétale – INRAE.

²Ecodéveloppement – INRAE.

³Santé et agroécologie du vignoble – INRAE.

⁴Association provençale de recherche et d'expérimentation légumière - APREL

RÉSUMÉ

CONTEXTE – Le manque de références scientifiques et techniques est un réel frein au développement de pratiques adaptées à l'usage des produits de biocontrôle.

ÉTUDE – Un réseau d'échanges « biocontrôle », regroupant maraîchers, conseillers et expérimentateurs, a été initié en 2018 dans la région Sud-Est. Un des objectifs de ce réseau est d'encourager le suivi des produits sur le terrain afin d'optimiser leur utilisation.

OAD - Dans le cadre d'une thèse (2019-2023) encadrée par INRAE et l'APREL, un outil d'aide à la décision (OAD) a été créé en 2021, en collaboration avec la plateforme Ephytia (INRAE) : il centralise à la fois des informations recueillies dans des articles scientifiques, des résultats d'expérimentations non

publiés provenant d'instituts techniques et d'entreprises de biocontrôle, ainsi que des retours du terrain.

MOTS-CLÉS – Biocontrôle, OAD, références d'efficacité

Le développement du biocontrôle s'est accéléré ces dernières années avec l'arrivée de nombreux produits et innovations sur le marché. Leur appropriation par les producteurs reste cependant longue et difficile. Le coût, la technicité d'utilisation et la perception d'un "manque de preuves d'efficacité" sont les principales réticences rencontrées auprès des utilisateurs. Il en est de même pour les conseillers qui sont peu à l'aise avec les préconisations de ces produits et souhaitent être davantage formés pour mieux accompagner les agriculteurs et agricultrices dans ce changement.

Un nouveau paradigme de la protection des plantes

Régulation vs éradication

L'utilisation du biocontrôle repose sur une logique qui diffère de l'utilisation des pesticides chimiques de synthèse. Deux types d'approche cohabitent au sein des agents de biocontrôle selon leurs cibles. Pour la lutte contre les ravageurs, l'approche s'appuie sur une gestion des équilibres ou de maintien des populations de bioagresseurs en dessous d'un seuil de risque acceptable pour le producteur, et non une éradication complète de ces derniers. Pour les pathogènes (bactéries, virus, champignons et autres), l'approche est plus complexe car les seuils de nuisibilité et d'équilibre sont très souvent inconnus du fait d'une détection tardive *via* l'apparition de symptômes bien après l'infection initiale. Dans les deux cas, l'utilisation du biocontrôle doit s'inscrire dans une stratégie de protection intégrée mobilisant d'autres leviers qui peuvent être complémentaires (physiques, agronomiques, génétiques, biologiques...) à l'échelle de l'exploitation. Concevoir l'utilisation du biocontrôle comme une solution de substitution directe d'un pesticide chimique de synthèse est une idée à déconstruire auprès des producteurs. En effet les agents de biocontrôle bien qu'identifiés comme « PPP » c'est-à-dire « plant protection products » au niveau de la réglementation constituent un nouveau paradigme de la protection des plantes et non une nouvelle génération de pesticide.

Un manque de références scientifiques et techniques

La connaissance des modes d'action des agents de biocontrôle est cruciale pour comprendre comment ils interagissent dans l'écosystème de la parcelle et quelles sont les conditions requises pour favoriser leur action protectrice. Les processus physiologiques et métaboliques impliqués ne sont pas complètement connus, en particulier dans des environnements complexes tels que ceux rencontrés dans une parcelle agricole. En conséquence, leur efficacité protectrice est bien souvent très différente selon que les essais sont réalisés en conditions contrôlées ou au champ. Les retours d'expériences sur l'efficacité venant du terrain sont également variables d'une parcelle à une autre, montrant parfois de bons résultats mais souvent instables lors de répétitions. Les paramètres expliquant ces échecs ou ces succès sont multiples et peinent à être identifiés précisément tant dans la littérature scientifique que technique. Pour expliquer ces résultats contrastés, des facteurs sont étudiés et classés en différentes

catégories :

1. la plante (espèce, variété, stade phénologique, état physiologique, stress, niveau de sensibilités de base...);
2. les conditions environnementales pendant et après l'application (température, hygrométrie, radiations lumineuses, type de sol, microbiote, etc.);
3. les pratiques culturales (itinéraire cultural, fertilisation, irrigation, etc.);
4. l'agent pathogène (souche, virulence, agressivité, pression de maladie);
5. le produit (formulation, persistance et conditions d'application, qualité de pulvérisation, concentration, volume, présence d'adjuvant, compatibilité avec les autres outils de protection, risque de phytotoxicité...).

Ce manque de références scientifiques et techniques est un réel frein au développement de l'utilisation du biocontrôle

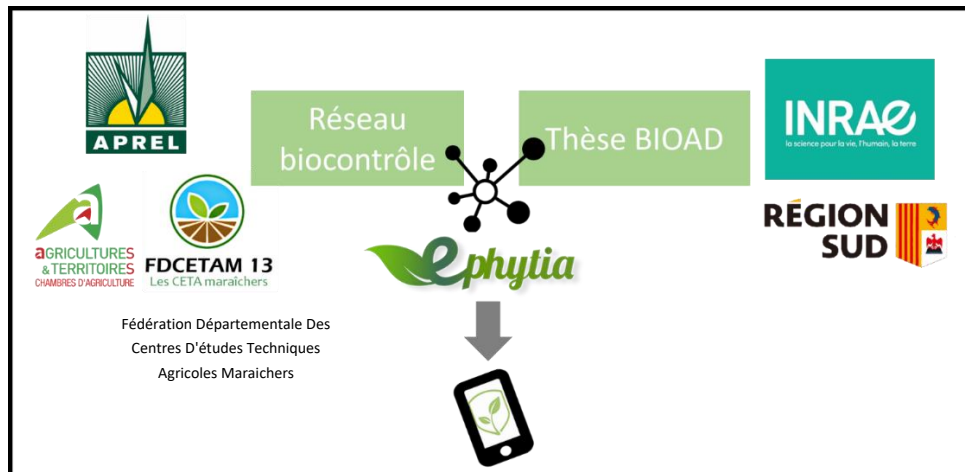
Un Outil d'Aide à la Décision pour faciliter l'usage du biocontrôle microbien

Les défis du biocontrôle ont permis le financement de nombreux projets par les politiques publiques liées au plan Ecophyto. Grâce à ce dynamisme, de nombreux outils émergent depuis une dizaine d'années et ont pour but de diffuser des informations techniques sur les moyens permettant de réduire l'utilisation des pesticides *via* différentes alternatives dont le biocontrôle. Le portail « EcophytoPIC » (<https://ecophytopic.fr/>) héberge de nombreuses bases de données, fiches techniques et liens connexes sur ces thématiques. Les outils « Levier PIC » et « Contrat de solutions » proposent des fiches techniques dont 24 % et 27 % correspondent à l'utilisation du biocontrôle. Ces outils listent les solutions de biocontrôle disponibles en France, mais ne précisent pas les conditions optimales de leur application pour obtenir une efficacité de protection significative.

En maraîchage dans la région Sud-Est de la France, un réseau d'échanges spécifiques à cette thématique, regroupant producteurs, conseillers et expérimentateurs, a été initié en 2018. Ces échanges ont pour objectif principal d'aboutir à un inventaire de solutions efficaces parmi la diversité des produits de biocontrôle existants, en décrivant les conditions dans lesquelles ces produits ont montré une efficacité de protection significative contre une maladie ou un ravageur des cultures. Pour de nombreux produits de biocontrôle, aucune information concernant leur efficacité sur le terrain n'est disponible, et l'arrivée de nouveaux produits sur le marché élargit la liste de ceux pour lesquels les connaissances sont limitées. Un des objectifs de ce réseau est donc d'encourager le suivi spécifique de ces produits sur le terrain afin de mieux s'en servir. Parallèlement à cela, la thèse « BIOAD » visant à développer un outil d'aide à la décision pour améliorer l'utilisation du biocontrôle contre les maladies des plantes (financement région PACA et INRAE) de Thomas Presseccq (2019-2023) encadrée par INRAE et APREL (Association provençale de recherche et d'expérimentation légumière), est venue renforcer cette dynamique avec pour objectif notamment de créer un outil d'aide à la décision (OAD) pour faciliter l'usage du biocontrôle microbien contre les maladies des plantes. À la suite d'enquêtes menées auprès de producteurs et conseillers agricoles, l'action s'est orientée vers la construction d'une base de données, qui permet de centraliser à la fois des informations recueillies dans des articles scientifiques, des résultats d'expérimentations non publiés provenant d'instituts techniques et d'entreprises de biocontrôle, et des retours du terrain. Ces différentes approches ont abouti en 2021

à la création de l'application numérique DeciControl conçue en collaboration avec la plateforme Ephytia (INRAE).

Fig. 11 : Partenaires impliqués dans la création de DeciControl



Un outil collaboratif pour partager les connaissances et les savoirs

Deux modules

L'outil DeciControl comprend deux modules :

1. (i) une première partie qui permet à l'utilisateur de faire remonter des observations issues du terrain concernant l'efficacité des produits de biocontrôle ;
2. (ii) une seconde partie qui donne à l'utilisateur l'accès à des fiches de synthèse (construites à partir de la base de données) par produit.

L'outil vise avant tout l'amélioration des pratiques *via* la mise à disposition de données de référence sur l'efficacité du biocontrôle. Cet objectif est réalisable grâce à la nature hybride de l'outil qui permet de combiner à la fois les connaissances scientifiques et techniques ainsi que le savoir du terrain. Cette dualité se retrouve dans la forme de l'outil ainsi qu'au sein de sa sortie principale, la fiche produit.

Les Fiches Produits

Les « fiches produits » sont réalisées par produit commercialisé et non par matière active. Bien que certaines informations soient similaires, il peut exister de nombreuses différences entre deux produits ayant la même matière active selon les co-formulants et les adjuvants utilisés. Ces derniers peuvent en effet modifier le niveau d'efficacité protectrice d'un produit.

On accède à ces « fiches produits » de deux façons différentes : (i) soit depuis une page « maladie » de la plateforme Ephytia- par exemple, la page '*Botrytis* de la tomate' permet d'accéder à la liste des produits homologués sur ce patho-système ; (ii) soit, directement, par l'index des produits et des matières actives présentes sur l'application.

Chaque fiche comporte trois sections spécifiques dont chacune apporte des éléments pour élucider la

solution de biocontrôle la plus appropriée à une situation donnée :

Informations générales

La section « Informations générales » comporte les informations sur l'homologation, la matière active et les modes d'action en lien direct avec des ressources officielles et institutionnelles comme la base Ephy (<https://ephy.anses.fr/>), les ressources de l'Acta (<https://www.acta.asso.fr/>) ou encore Ephytia (<https://ephytia.INRAE.fr>). Les informations sur les modes d'action sont issues de sources scientifiques fiables et sont complétées par les données des fabricants de produits.

Cette partie sera également alimentée par des ressources fournies par les entreprises propriétaires des agents de biocontrôle comme des extensions d'usages ou pour la diffusion de nouveaux résultats d'essais.

Informations scientifiques et techniques

La section « Informations scientifiques et techniques sur les facteurs influençant l'efficacité du produit de biocontrôle » se concentre sur les connaissances disponibles sur l'agent de biocontrôle dans la littérature scientifique et technique. Dans le cadre de la thèse BIOAD ainsi que dans les expérimentations de l'APREL et d'autres centres d'expérimentation, une certaine quantité de connaissances a déjà été recensée et sera mise à disposition sous forme d'extrait synthétique. Cette partie reflète donc directement l'état de la recherche sur un produit de biocontrôle donné. Bien qu'informatrice et pouvant être utile à la compréhension générale de l'agent de biocontrôle, cette partie reste souvent trop éloignée du terrain puisque la majorité des données sont issues d'expériences réalisées en conditions contrôlées. Par exemple, dans cette partie on retrouvera les températures optimales pour les différentes matières actives, ou les conditions d'humidité favorables ainsi que les interactions positives et négatives avec d'autres produits de protection des plantes. Cette base de connaissances a vocation à être étoffée par des mises à jour sur les résultats de futures expérimentations. De plus, avec l'accord des firmes concernées, elle pourra inclure des éléments d'information non publiés dans la littérature scientifique afin d'améliorer les connaissances et donc l'usage du produit par les utilisateurs. Ce travail de synthèse nécessite un travail bibliographique important, qui a été initié pendant la thèse susmentionnée et qui sera poursuivi.

Informations issues de retours du terrain par les utilisateurs

La troisième section est la plus innovante et la plus proche des questionnements des utilisateurs car elle est la plus représentative de leurs besoins. Dans une optique de science participative ce sont les utilisateurs qui vont contribuer à étoffer son contenu. En effet, ce contenu sera construit au fur et à mesure *via* une synthèse des retours d'expériences d'utilisation du biocontrôle. L'analyse des données collectées sera mise en perspective avec les autres données disponibles de la littérature avant de les rendre disponibles sur la fiche produit correspondante de manière anonymisée. Cette synthèse du terrain va s'appuyer sur des données plutôt qualitatives que quantitatives. La synthèse de ces données viendra en complément des données scientifiques et techniques des autres sections.

Comment sont centralisés les retours du terrain ?

Les retours du terrain sont permis grâce à des formulaires simples directement intégrés à l'application. Ils ont pour objectif de centraliser toute information issue du terrain concernant les conditions d'efficacité de produits de biocontrôle.

La construction de la base de données à partir des remontées du terrain a nécessité dans un premier temps de créer des formulaires de saisie et de définir quelles informations doivent être intégrées, par qui et de quelle manière. Pour que les utilisateurs puissent s'approprier facilement l'outil, la conception de ces formulaires a été réfléchi de façon à ce que l'outil s'adapte avant tout à l'utilisateur. L'ergonomie de la saisie est ainsi primordiale pour assurer une large utilisation. La saisie se faisant par smartphone, elle doit être à la fois rapide, intuitive et efficace. Les formulaires doivent être courts sans pour autant être trop succincts. Un minimum d'informations est requis pour pouvoir analyser et interpréter les données. Pour autant, trop de questions et de lourdeur, telles que des comptages de bioagresseurs, ne sont pas obligatoires, car cela risquerait d'entraver l'obtention de retours. Un compromis a été réalisé entre le nombre d'informations essentielles à l'analyse des données et la praticité de l'outil, en essayant de ne pas perdre en qualité et en fiabilité pour la synthèse des résultats.

Le prototype de l'outil DecControl a été conçu suivant ce compromis pour les conseillers du réseau de l'APREL (filière maraîchage) sur la base de 2 types de saisies sont disponibles, répondant à deux besoins distincts (Tableau 1) :

- Une saisie détaillée avec un formulaire rattaché au contexte parcellaire et un formulaire rattaché aux conditions et à l'évaluation du traitement ;
- Une saisie brève avec du texte libre et la possibilité de prendre une photo.

Cet outil est en cours d'amélioration et fait l'objet d'une seconde année de tests par le réseau avec des modifications en fonction des avis des utilisateurs.

Tableau 1 - Informations demandées dans les formulaires de saisie de l'outil DeciControl pour les retours de terrain. (en gras les éléments les plus importants)

Parcelle	Conditions de(s) traitement(s)	Évaluation du produit
<ul style="list-style-type: none">- Localisation- Culture- Variété- Précédent- Date de plantation- Densité de plantation- Mode de production- Type de production- ...	<ul style="list-style-type: none">- Produit- Bioagresseur cible- État initial du niveau de pression- Dose- Volume de bouillie- Mélange- Adjuvant- Matériel utilisé- Période de la journée	<ul style="list-style-type: none">- Date d'évaluation- Évaluation du niveau de pression à la suite de l'application du produit- Reconduction du traitement- Satisfaction du produit- Impact sur les auxiliaires- Phytotoxicité- Interférence(s) rencontrée(s) influençant les résultats (irrigation, fertilisation, climatique...)

Quelle suite pour le développement de DeciControl ?

Un déploiement national

Moins d'un an après le lancement de l'outil, le premier bilan est positif pour DeciControl. L'application, bien que toujours en rodage au niveau régional, se prépare à un déploiement national *via* différents partenariats pour amplifier les retours et augmenter sa base d'utilisateurs. En effet, les prochains mois vont voir l'ouverture graduelle de pages présentant les « fiches produits » pour des produits de biocontrôle disposant d'une autorisation de mise sur le marché (AMM), permettant une mise à disposition de l'information auprès d'utilisateurs de l'application pour les guider dans leurs pratiques. De plus, ce déploiement permettra la collecte de retours d'informations de la part des utilisateurs des produits de biocontrôle sur différents territoires, accélérant ainsi l'accumulation de connaissances et leur validation. Le but étant de générer le plus de retours possibles afin d'affiner la connaissance pour chaque produit.

La réalisation de ces ambitions de croissance est prévue à l'aide de financements qui ont été sollicités auprès de différentes instances comme INRAE, le Consortium Biocontrôle (<https://www6.INRAE.fr/consortium-biocontrole/>), l'Europe (https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/cluster-6-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment_en) et le CASDAR (<https://www.franceagrimer.fr/Accompagner/CASDAR-Recherche-appliquee-et-genetique/CASDAR-Appel-a-projet-Demultiplication>).

Les améliorations en cours et prévues

Les retours d'expériences déjà obtenus pendant cette phase de test sur le réseau régional ont été multiples et permettent des améliorations nombreuses. L'amélioration de l'ergonomie et la correction des bugs divers afin de faciliter le plus possible l'expérience utilisateur sont la priorité. Des ajustements ont été effectués et sont actuellement à nouveau en phase de test concernant le contenu des formulaires, leur taille, leur niveau de détails et surtout leur praticité vis-à-vis des différentes utilisations possibles des produits de biocontrôle. Par exemple, le niveau de détails demandé sur les conditions de traitements doit être repensé notamment au niveau des comptages pour gagner en précision afin de connaître l'état sanitaire avant et après traitement. Un autre aspect concerne la possibilité de retours libres et simplifiés afin de capter ces connaissances diffuses mais essentielles générées dans les groupes de discussion autour du biocontrôle. Ce formulaire très simple encourage les retours spontanés pour remplir un futur onglet « discussion » au sein de l'application. Cette fonctionnalité donne la possibilité de faire remonter des photos, des ressentis et des avis "à chaud" sur le biocontrôle pour faire réagir les autres utilisateurs.

Enfin, des utilisateurs soulignent le besoin d'intégrer les biostimulants en tant que fertilisants qui stimulent le processus de nutrition des végétaux. Ces derniers font en effet partie intégrante des pratiques agricoles et pourraient bénéficier du système de remontée d'information du terrain pour améliorer leur déploiement.

Et demain

Le but restera le même, guider les utilisateurs dans le choix de la solution de biocontrôle la plus adaptée à leurs situations et les soutenir dans le déploiement des produits de biocontrôle. Pour poursuivre ses objectifs DeciControl, a besoin de plus d'utilisateurs et utilisatrices pilotes pour servir

de testeurs dans différentes régions de production. L'utilisation de l'application ne nécessite aucune compétence informatique et requiert simplement une inscription pour faire remonter de l'information. Plus cette application sera utilisée, plus pertinents seront les retours de performance du biocontrôle vers la communauté d'utilisateurs. Elle est d'ores et déjà disponible gratuitement sur téléphone mobile *via* Playstore ou Applestore mais aussi directement sur navigateurs web *via* le site Ephytia).

POUR EN SAVOIR PLUS : <https://ephytia.INRAE.fr/fr/Home/index>

CONTACT – thomas.presseccq@inrae.fr & Duval@aprel.fr

LIENS INTERNET –

DeciControl

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.inra.decicontrol> **(Android)**

<https://apps.apple.com/fr/app/decicontrol/id1564957878> **(Apple)**

http://ephytia.inra.fr/fr/P/175/Deci_Control **(Web)**

RÉFÉRENCES -

