

Agroscope

Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)

Parcours : Plant Health Protection

Année universitaire 2024-2025

Stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière (*Beta vulgaris*)
par la levure *Metschnikowia pulcherrima* et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) comme plante
compagne

Mémoire de Fin d'Etudes :

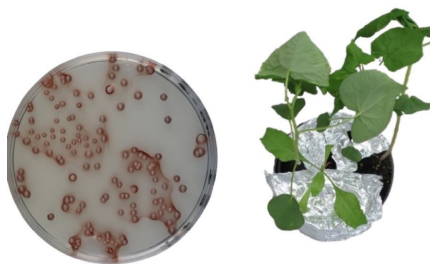
10/03/2025-28/08/2025

Par : Matthieu LE HEN

Soutenu à Angers le : 09/09/2025

Maître de stage : Cécile BRABANT-HYRONDELLE

Collaboratrice scientifique à Agroscope



Agroscope

Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)

Parcours : Plant Health Protection

Année universitaire 2024-2025

Stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière (*Beta vulgaris*)
par la levure *Metschnikowia pulcherrima* et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) comme plante
compagne

Mémoire de Fin d'Etudes :

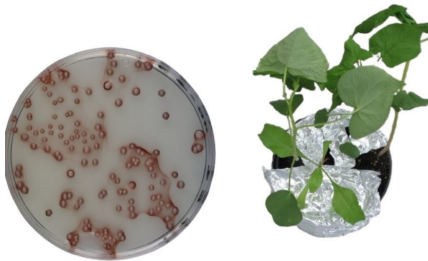
10/03/2025-28/08/2025

Par : Matthieu LE HEN

Soutenu à Angers le : 09/09/2025

Maître de stage : Cécile BRABANT-HYRONDELLE

Collaboratrice scientifique à Agroscope



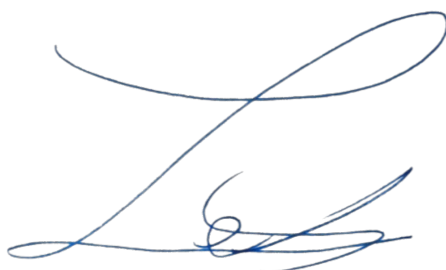
ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e),

Matthieu Le Hen,

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

Signature :



REMERCIEMENTS

Merci à Cécile Brabant pour la confiance qu'elle m'a témoignée tout au long de mon stage ; pour que je puisse donner le meilleur de moi-même dans la mise en œuvre des différentes missions qu'elle m'a confiées. Ses conseils, son expérience professionnelle qu'elle m'a partagée, m'ont été très précieux pour mener à bien ce stage.

Je remercie également mon enseignant référent Mr Tricault, pour le temps et l'attention qu'il a consacrés pour m'aider à structurer et diriger mes questionnements scientifiques.

Je tenais à remercier Anaïs Feuillet pour son attention ainsi que pour les échanges tant professionnels que extra-professionnels que nous avons eu.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe d'entomologie avec laquelle j'ai eu le plaisir d'échanger ; merci pour leur aide précieuse, en extérieur tout comme en serre, à Marie Bauli, Marie Bole et Grace Skowronski et plus particulièrement à Stephan Kelleberger , Romain Chablais, Eric Rémolif et Julie Laurent qui m'ont permis d'avoir le matériel nécessaire pour mener l'ensemble de mes expériences je leur suis très reconnaissant.

Je souhaite par ailleurs remercier Florian Freimoser Josep Massanacodina et Matthieu wilhelm de l'équipe de mycologie pour les informations et les conseils reçus ; Justine Brodard, Nathalie Dubuis de l'équipe de Virologie pour les formations et la réalisation des analyses ELISA de mes prélèvements aux champs.

Je remercie également mes proches, pour leur soutien infaillible, qui m'ont aidé à arriver jusqu'ici, dont tout particulièrement Enora Cieslak.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	5
GLOSSAIRE.....	9
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	11
LISTE DES ANNEXES.....	13
Stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière avec la levure <i>Metschnikowia pulcherrima</i> et le sarrasin.....	1
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Contexte global.....	1
1.1.1. Structure d'accueil et objectif de ce stage.....	1
1.1.2. Protection contre les ravageurs dans un contexte de transition agroécologique.....	1
1.1.4. Culture de la betterave à sucre en Suisse.....	2
1.1.5. Évolution des stratégies phytosanitaires betteravières.....	2
1.2. Contexte scientifique.....	3
1.2.1. Les virus de la jaunisse de la betterave (VY).....	3
1.2.2. Les pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave.....	5
1.2.3. Autres menaces pour la betterave.....	7
1.2.4 La lutte intégrée contre les ravageurs.....	8
1.3. Objectifs et stratégie du stage.....	10
1.3.1 Questionnement scientifique.....	10
1.3.2 Démarches expérimentales.....	11
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	12
2.1 Matériels biologiques.....	12
2.1.1. Conditions d'élevage des <i>M. Persicae</i> sains.....	12
2.1.2. Infection des plantes au BYV.....	12
2.1.3. Condition de culture en serre.....	12
2.1.4. Culture in vitro <i>M. pulcherrima</i> APC1.2.....	13
2.1.5. Variété de betterave à sucre.....	13
2.1.6. Matériel végétal des tests concernant <i>M. pulcherrima</i>	13

2.1.7. Matériel végétal des tests avec sarrasin.....	15
2.1 Méthodes.....	15
2.2.1. Expérimentations en serre.....	15
2.2.2. Expérimentations au champ.....	17
2.2.3. Analyses de la CFU.....	17
2.2.4. Analyses moléculaire.....	17
3. ANALYSES DES RÉSULTATS.....	19
3.1. Potentiel de biocontrôle de <i>M.pulcherrima</i> vis-à-vis des ravageurs de la betterave	19
3.1.1. Transfert de <i>M. Pulcherrima</i> à la betterave.....	19
3.2. Potentiel de biocontrôle de <i>M.pulcherrima</i> vis-à-vis des ravageurs de la betterave	20
3.2.1. Analyse de la modification du comportement de <i>M.persicae</i> par <i>M.pulcherrima</i>	20
3.2.2. Expérimentations au champ.....	21
3.3. Potentiel de biocontrôle du sarrasin associé à la betterave vis-à-vis des ravageurs de la betterave.....	22
3.3.1. Analyse de la modification du comportement des ravageurs par le sarrasin....	22
4. DISCUSSIONS.....	23
4.1. Transfert de <i>M. pulcherrima</i> à la betterave.....	23
4.1.1. Protocole d'inoculation de <i>M. pulcherrima</i> à la betterave.....	23
4.2. Synthèse des résultats de l'évaluation des stratégies de lutte intégrée.....	25
4. 3. Influence <i>M. pulcherrima</i> sur le comportement de <i>M.persicae</i> en serre.....	25
4.3.1. Effet de <i>M. pulcherrima</i> sur le choix des pucerons.....	25
4.3.2. Effet de <i>M. pulcherrima</i> la transmission virale des pucerons.....	25
4.2.3. Effet de <i>M. pulcherrima</i> sur le fitness de <i>M. persicae</i>	26
4.2.4. L'analyse des essais au champ.....	27
4.3. Influence du sarrasin sur le comportement de <i>Chaetocnema</i> spp. et <i>M.persicae</i>	28
5. CONCLUSION.....	29
6. OUVERTURE.....	30
7. BIBLIOGRAPHIE.....	31
8. SITOGRAFIE.....	36

GLOSSAIRE

Agrosystème ou agroécosystème	Ensemble des relations entre les cultures, les techniques de production agricole et le milieu environnant (fr-academic)
Anthosphère	Micro-organismes colonisant les fleurs (Cordovez <i>et al.</i> , 2019)
Biocontrôle	Produit et technique de protection des plantes basé sur l'utilisation de processus biologiques médiés par des organismes ou des substances biologiques (Gouli et Marcelino, 2016)
Bottom-up forces (Régulation par le bas)	Effets de l'environnement abiotique et/ou des organismes des niveaux trophiques inférieurs se répercutant en cascade sur les organismes des niveaux trophiques supérieurs (Han et al., 2022)
Carposphère	Micro-organismes colonisant les fruits (Cordovez <i>et al.</i> , 2019)
Chlorose	Symptômes causés par une maladie ou un désordre physiologique, qui se caractérisent par une réduction ou une perte de la coloration verte normale (Oxford, 2004)
ELISA Directe	ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) où un échantillon immobilisé sur une surface solide interagit avec un anticorps de détection conjugué qui permet la révélation des échantillons positifs (Debonneville et Reynard, 2013)
Endophyte	Organisme qui vit à l'intérieur d'une plante dans une relation commensale avec cet hôte végétal et donc qui n'a aucun impact négatif sur la plante (Gouli et Marcelino, 2016)
Fitness	Mesure du succès reproductif relatif d'un individu ou d'un génotype dans une population donnée à un moment donné (Oxford, 2004).
Gestion intégrée	Système de lutte contre des ennemis naturels qui, [...] associée à un environnement et à la dynamique des populations de ces ennemis naturels, utilise toutes les techniques et méthodes appropriées de la manière la plus durable possible et maintient les populations d'ennemis naturels à des niveaux inférieurs aux dommages économiques qu'elles causent. » (Kogan, 1998)
Microbiome	Microorganismes colonisant les surfaces et les tissus internes des plantes (Cordovez <i>et al.</i> , 2019)
Phylosphère	Microorganismes colonisant les parties aériennes des plantes (Cordovez <i>et al.</i> , 2019)

Plante compagne	Plante de service – qui apporte un ou plusieurs services écosystémiques à l’agrosystème – utilisée en association avec une culture de rente (Caravel <i>et al.</i> , 2020).
Population holocyclique	Population de pucerons dont le cycle de reproduction inclut une génération sexuée et au moins une génération parthénogénétique (Turpeau <i>et al.</i> , 2024a)
Priming	Consiste à exposer préalablement les plantes à un facteur déclencheur, leur permet d’être plus tolérantes aux événements de stress biotiques ou abiotiques ultérieurs. (Oxford, 2004)
Quantification Cycle, Cq	Est le nombre de cycles pour lesquels la fluorescence dépasse pour la première fois le seuil (biorad)
Rétrotranscription	La transcription inverse est la réaction inverse de la transcription, par la synthèse d'un brin d'ADN complémentaire à partir d'une matrice ARN (Oxford, 2004)
Sémiochimiques	Composés servant de signaux et facilitant les interactions entre les organismes (Bruce et al., 2005)
Services écosystémiques	Processus naturels utiles et souvent nécessaires aux populations humaines sans qu'elles aient à agir pour les obtenir (fr-academic)
Système de Production Extensif (Extenso)	Répondant à l'article 68 de l'OPD notamment : art. 68 al. 3 : du semis à la récolte de la culture principale, la culture doit être effectuée sans recours aux produits phytosanitaires suivants les substances chimiques figurant à l’annexe 1, partie A, OPPh 134
Tolérance	Forme de résistance génétique à un agent pathogène. L'hôte présente des performances accrues par rapport aux membres d'autres cultivars, populations ou souches affectées par le pathogène. (Gouli et Marcelino, 2016)
Transmission	Transfert ou transport d'un agent infectieux d'un réservoir ou d'un vecteur vers un hôte sensible (Gouli et Marcelino, 2016)
Colony-forming unit (CFU)	unité de mesure microbiologique correspondant au nombre de micro-organismes viables présents dans un échantillon, capables de se multiplier et de former des colonies visibles, cultivés après dilution appropriée, sur un milieu solide dans des conditions de culture appropriées, exprimée en CFU/mL ou CFU/g.
Virus	Particules infectieuses, composées d'une capsule protéique et d'un noyau d'acide nucléique (ADN ou ARN), qui dépendent d'un organisme hôte pour se répliquer (Gouli et Marcelino, 2016)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BMV	Beet Mild Yellowing Virus
BtMV	Beet Mosaic Virus
BWYV	Beet Western Yellows Virus
BYV	Beet Yellows Virus
CFU	Colonie Formant Unité (colonie/mL)
COV	Composé Organique Volatil
ELISA	Enzyme-Linked Immunosorbent Assay
FSB	Fédération Suisse des Betteraviers
IFT	Indice de Fréquence de traitement
NNI	Néonicotinoïdes
NTC	No Template Charge
OFAG	Office Fédéral de l'Agriculture
PCR	Réaction de Polymérisation en Chaîne (Polymerase Chain Reaction)
PDA	Milieu de culture solide à base de pomme de terre Dextrose Agar
pph	Produit phytosanitaire
RFU	Relative Fluorescence Units
RTqPCR	RT-qPCR transcription inverse suivit d'une PCR quantitative
SBR	Syndrome des Basses Richesses
ssRNA+	Génome virale composé d'une séquence d'ARN à polarité positive
Stade BBCH	Echelle représentant le stade phénologique des plantes cultivées (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) (Uwe Meier, 2001)
VY	Virus de la jaunisse
YPG	Milieu de culture liquide à base d'extrait de levure, peptone et D-glucose

INDEX DES FIGURES

Figure 1. Contexte de ce stage au sein d'Agroscope.....	14
Figure 2. Chronologie de la gestion sanitaire des ravageurs selon les stades BBCH.....	2
Figure 3. Représentation des modalités d'acquisition et transmission par les pucerons, (Hurpin et Mouchart, 1981).....	4
Figure 4. Dégâts provoqués par les altises de betterave au champ.....	7
Figure 5. Dégâts provoqués par le charançon sur la betterave.....	7
Figure 6. Synthèse des effets délétères du sarrasin vis-à-vis des populations de ravageurs.....	9
Figure 7. Methode d'infection des betteraves aux BYV par <i>M.persicae</i>	12
Figure 8: Arbre de décision des expériences réalisées afin de répondre à la problématique.....	13
Figure 9. Représentation schématique du dispositif expérimental en extérieur.....	14
Figure 10. Représentation schématique des expériences des tests de choix réalisés avec ou sans <i>M pulcherrima</i>	15
Figure 11. Représentation schématique des expériences de test de choix réalisées le sarrasin en association avec la betterave.....	15
Figure 12. Représentation schématique des tests de performance réalisés avec ou sans traitement de <i>M. pulcherrima</i> à la betterave.....	16
Figure 13. Optimisation du protocole de traitement des graines de betterave.....	19
Figure 14. Taux de germination avec ou sans traitement avec la levure de 2 variétés BioSuisse.....	19
Figure 15. Distribution du choix moyen de <i>M.persicae</i> entre les plantes avec ou sans <i>M. pulcherrima</i>	20
Figure 16. Distribution de la charge virales des plantes positives au BYV selon les modalités avec ou sans <i>M. pulcherrima</i>	20
Figure 17. Influence de <i>M. pulcherrima</i> sur fitness de <i>M.persicae</i>	21
Figure 18. Analyse des composantes principales des observation au champ selon les modalités.....	22
Figure 19. Propotion en pourcentage des plantes positives au BYV parmi les modalités.....	22
Figure 20. Test de dommages des <i>Chaetocnema spp</i> et test de choix des <i>M. persicae</i> des expériences push-pull du sarrasin en association avec la betterave.....	23
Figure 21. Carte thermique de la distribution spatiale des comptages parmi les plantes de la parcelle.....	27
Figure 22. Tableau de chaleur des correlations entre la somme des populations de pucerons, d'auxilliaires et des plantes positives BYV.....	28
Figure 23: Inhibition de la croissance de <i>Cercospora beticola</i> à distance par <i>Metschnikowia pulcherrima</i> et <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques biologiques des virus de la jaunisse de la betterave, adapté de William M. Wintermantel.....	3
Tableau 2. Représentation des symptômes du BYV obtenus sur plantes en serre et en extérieur.....	4
Tableau 3. Dommages des pucerons provoqués aux betteraves.....	5
Tableau 4. Caractéristiques de développement des pucerons <i>Aphis fabae</i> et <i>Myzus persicae</i> en climat tempéré.....	6
Tableau 5. Synthèse des plantes de service en interculture adapté de (Caravel <i>et al.</i> , 2020).....	8
Tableau 6. Liste des primers utilisés pour la RTqPCR.....	17
Tableau 7. Mix réactionnel utilisé.....	17
Tableau 8. Synthèse des analyses de variance des données de comptage.....	21
Tableau 9. Tableau de synthèse des aspirations au champs.....	22

LISTE DES ANNEXES

Annexe I. Stratégies phytosanitaires contre les ravageurs étudiés.....	
Annexe II. Analyse et méthode de calcul des données issues des plantes positives par RTqPCR.....	
Annexe III. Distribution de la biomasse des betteraves aérienne (a) et racinaire (b).....	
Annexe IV. Croissance et développement au champ les betteraves par <i>M. pulcherima</i>	
Annexe V. Distribution du nombre des pucerons spatiale entre les modalités (b).....	
Annexe VI. Distribution de la biomasse des betteraves aérienne (a) et racinaire (b) entre les plantes symptomatique et saines azu BYV.....	
Annexe VII. Distribution du nombre de trous de ponte du charançon de la betterave (<i>Lixus juncii</i>) spatiale (a) et entre les modalités (b).....	

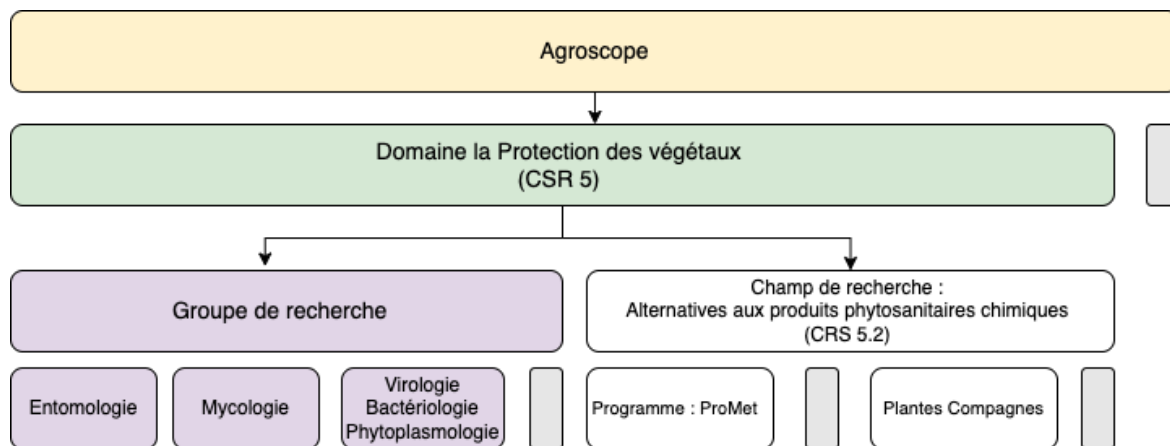


Figure 1. Contexte de ce stage au sein d'Agroscope

En vert est représenté, le domaine stratégique de recherche de la [Protection des végétaux \(CSR 5\)](#) au sein d'Agroscope .

Ce stage s'articule au sein de trois groupes de recherches (représentés en violet), et dans le cadre du champ de recherche représenté en blanc.

STRATÉGIE DE LUTTE INTÉGRÉE CONTRE LES RAVAGEURS DE LA BETTERAVE SUCRIÈRE AVEC LA LEVURE *METSCHNIKOWIA PULCHERRIMA* ET LE SARRASIN

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte global

1.1.1. Structure d'accueil et objectif de ce stage

Ce stage de 6 mois a été effectué au sein de la station de Recherche de Changins d'Agroscope, qui est l'Institut de Recherche agronomique et agroalimentaire de la Confédération Suisse, rattaché à l'Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG) et au Département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche (DEFR) (Conseil fédéral, 1999). Agroscope est le centre de compétences national pour l'agriculture et l'agroalimentaire (Conseil fédéral, 2024), dont les objectifs, définis dans le Plan directeur de la recherche (DEFR, 2024), visent à promouvoir une agriculture durable, à protéger l'environnement et à garantir une alimentation de qualité.

Ce stage s'inscrit dans une approche pluridisciplinaire en collaboration avec les trois groupes de recherches Entomologie et Nématologie ; Mycologie et Virologie, Bactériologie et phytoplasmodologie. Dans le cadre du champ de recherche "alternative aux produits phytosanitaires chimiques, ce stage s'articule autour de deux projets : "ProMet" et "les plantes compagnes", afin d'étudier des méthodes de gestion intégrée* vis-à-vis des ravageurs et des maladies de la betterave sucrière (Figure 1).

1.1.2. Protection contre les ravageurs dans un contexte de transition agroécologique

Les maladies et ravageurs sont préoccupants à l'échelle mondiale ; ils entraînent une baisse de la qualité des productions et une perte annuelle des rendements agricoles estimée de 20 à 30 % (Savary *et al.*, 2019). De surcroît, le réchauffement climatique est susceptible de modifier les réponses physiologiques et écologiques des ravageurs (Lehmann *et al.*, 2020) et d'accroître les dommages causés (Deutsch *et al.*, 2018). Dans ce contexte, la lutte chimique est la méthode de gestion la plus répandue (Graczyk *et al.*, 2017 ; Deutsch *et al.*, 2018 ; Kaleem Ullah *et al.*, 2023). Elle représente environ 16 % des volumes totaux des produits phytosanitaires (pph) utilisés (Graczyk *et al.*, 2017). L'intensification de l'usage des insecticides tend à accroître les risques de résistance des insectes à ces produits (Kaleem Ullah *et al.*, 2023) ainsi que leurs effets délétères (Deutsch *et al.*, 2018) sur la santé humaine (Graczyk *et al.*, 2017) et sur les écosystèmes. La biodiversité, moteur des rendements agricoles (Dannenberg *et al.*, 2024), est donc menacée par l'agriculture intensive (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019).

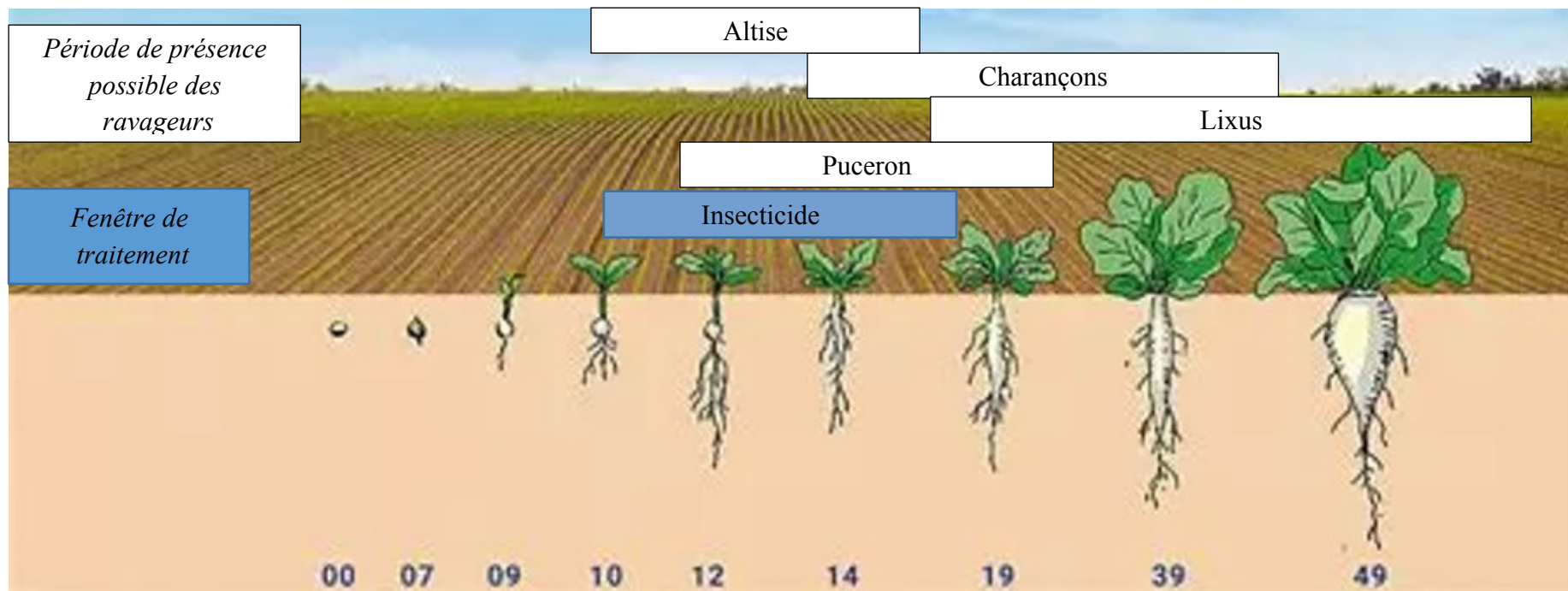


Figure 2. Chronologie de la gestion sanitaire des ravageurs selon les stades BBCH

Pucerons 2-10 feuilles (Masche, 2024)

Altises : 09-4 feuilles (Masche, 2024)

Charançon : 4-6 feuilles et fin juillet (ITB, 2025)

Échelle BBCH améliorée d'après Uwe Meier, 2001

Stade 00 : Semence sèche , Stade 07 : les téguments de la graine sont percés par ses cotylédons, Stade 09 : les cotylédons percent la surface du sol, Stade 10 : les cotylédons sont complètement développés ; Stade 12 : la 2ème feuille complètement étalée, Stade 14 : 4ème feuille complètement étalée, Stade 19 : 9ème ou complètement étalée , Stade 39 : la rosette atteint son diamètre maximal, Stade 49 : les organes végétatifs de récolte atteignent leur taille finale

Face à ces enjeux, une gestion phytosanitaire durable est essentielle pour renforcer la résilience des agrosystèmes* et préserver les services écosystémiques* (Dardouri, 2018, Caravel *et al.*, 2020, Möhring, 2022). Dans ce cadre, les *contributions* [financières] *au système de production* dites *Extenso** par le renoncement aux fongicides et insecticides de synthèse du semis jusqu'à la récolte, ont été étendues à la betterave en 2023 (OFAG, 2025).

1.1.4. Culture de la betterave à sucre en Suisse

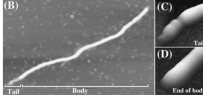
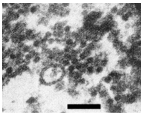
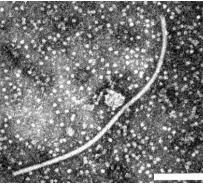
La betterave à sucre, *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *saccharifera* (Alefeld, 1866), est une plante bisannuelle de la famille des Chénopodiacees. Elle a une importance économique, étant la 9^e culture en volume dans le monde. (FAO, 2023). En Suisse, elle est cultivée sur 17 000 hectares (FSB, 2025). Cependant, les productions Bio et Extenso représentent 1,9% du total de la surface cultivée et sont marquées par un rendement en sucre inférieur d'environ 55% et 30% respectivement (FSB, 2025). En effet, comme représenté sur la Figure 2 la betterave présente une croissance lente en début de cycle, la rendant sensible à la concurrence des adventices et aux ravageurs (OEPP, 1994, Dierauer et Jenny, 2022), ainsi qu'à la jaunisse virale (Demal, 2021 ; Borgolte *et al.*, 2024), ce qui rend nécessaire l'utilisation de pph après l'implantation de la betterave, afin de préserver les rendements (OEPP, 1994).

1.1.5. Évolution des stratégies phytosanitaires betteravières

Dès 1992, la filière betteravière utilisait des néonicotinoïdes (NNI) en enrobage des semences (Hauer *et al.*, 2017) comme insecticides systémiques à large spectre (Jeschke et Nauen, 2008). Ces derniers étaient l'outil de contrôle efficace durant une centaine de jours à partir du semis, en particulier contre les pucerons vecteurs des jaunisses virales (Hauer *et al.*, 2017), ce qui permettait la rentabilité des productions Extenso (Rödiger *et al.*, 2024).

Cependant, dans le "Plan de réduction des pesticides en Suisse" les NNI étaient controversés (Bosshard, 2016), à la fois pour leurs effets sur la santé (EFSA, 2023) et sur les organismes non-cibles (IPI, 2025) et pour leur forte rémanence dans l'environnement (Jones *et al.*, 2014). Cela a conduit à leur interdiction en Suisse en 2019, hormis l'acétamipride, restant soumis à dérogation. Cette interdiction a conduit à l'augmentation du nombre d'applications d'insecticides. Selon la base de données *monitoring agroenvironnemental*, les IFT* d'insecticides sont passés de 0,4 entre 2017 et 2019 à 2.1 en 2021 (Sandie Masson, Responsable du Projet PestiRed, communication personnelle).

Tableau 1. Caractéristiques biologiques des virus de la jaunisse de la betterave, adapté de William M. Wintermantel

Genre	Espèces ^a	Vecteurs principaux	Mode de transmission	Morphologie du virion	Transmission	Hôtes	Symptômes
<i>Closterovirus</i>	BYV  [1]	<i>Aphis fabae</i> <i>M. persicae</i> [1]	Semi persistant	Hélicoïdale	Phloème	~120 espèces réparties en 15 familles. [2]	Décoloration des nervures Jaunissement internervaire Jaunissement généralisé
<i>Polerovirus</i>	BWYV BChV BMV [3] 	<i>Myzus persicae</i> , <i>Macrosiphum euphorbiae</i> [4]	Persistant	Icosaédrique	Phloème	<i>Beta vulgaris</i> <i>Spinacia oleracea</i> <i>Montia perfoliata</i> <i>Nicotiana benthamiana</i> <i>Arabidopsis thaliana</i> . [2]	Décoloration des nervures Jaunissement généralisé
<i>Potyvirus</i>	BtMV  [6]	<i>Acyrtosiphon pisum</i> <i>Aphis fabae</i> <i>Macrosiphum euphorbiae</i> <i>Metopolophium dirhodum</i> <i>Ropalosiphum padi</i> [4]	Non persistant	Hélicoïdale	Systémique	NA	Mosaïque généralisée

^a Abréviation des espèces virales : BYV, Beet yellows virus; BWYV, Beet western yellows virus; BChV, Beet chlorosis virus; BMV, Beet mild yellowing virus; BtMV, Beet mosaic

Sources : *Closterovirus* [1] (Limburg *et al.*, 1997) [2] (Dolja, 2003) ; *Polerovirus* : [3] particules de BMV, la barre représente 100 nm (Duffus, 1972), [4] (Kozłowska-Makulska *et al.*, 2009), [5] (Stevens *et al.*, 2005) ; *Potyvirus* : [6] particules de BtMV, la barre représente 100 nm (Russell, 1971), [7] (Dusi and Peters, 1999).

Toutefois, les traitements foliaires curatifs alternatifs offrent une protection limitée vis-à-vis de la transmission de la jaunisse par les pucerons (Hauer *et al.*, 2017) ou des autres ravageurs tels que l'altise de la betterave (von Doris Bigler, 2020), autrefois régulés classiquement par les NNI. De plus, les ravageurs présentent des cas de résistance aux principaux insecticides de substitution (Eleftherianos *et al.*, 2008 ; Hauer *et al.*, 2017).

1.2. Contexte scientifique

1.2.1. Les virus de la jaunisse de la betterave (VY)

Généralités

Les virus* de la jaunisse (VY) sont des virus ssRNA+ * de trois genres distincts : *Closterovirus* auquel appartient le "Beet Yellows Virus" (BYV) ; *Poleroovirus* comprenant le "Beet Mild Yellowing Virus" (BMYV), le "Beet Western Yellows Virus" (BWYV) et "Beet Chlorosis Virus" (BChV) ; et *Potyvirus* pour le "Beet Mosaic Virus" BtMV (Wintermantel, 2005 ; Ruus, 2020), comme présenté dans le Tableau 1.

Transmission des VY

Ces virus ont des caractéristiques complexes (Wintermantel, 2005) et leurs gammes de pucerons vecteurs et de plantes hôtes varient (tableaux 1). Les *Poleroovirus* sont des virus persistants circulants et non propagatifs (Wintermantel, 2005 ; Kozłowska-Makulska *et al.*, 2009), ce qui signifie qu'ils traversent l'hémolymph vers les glandes salivaires sans transmission à la descendance (Yele et Poddar, 2019). Le BYV est semi-persistant, se liant à la cuticule du stylet (Pirone et Blanc, 1996 ; James et Zhou, 2015 ; Jiménez *et al.*, 2021). La transmission des *Poleroovirus* et du BYV à la betterave se fait par la salive, lors de l'intrusion du stylet du puceron dans les cellules du phloème* de la plante hôte. (Boissinot *et al.*, 2017; Jiménez *et al.*, 2021). Le BtMV est en revanche, non-persistant (Dusi et Peters, 1999), donc son acquisition est transitoire (Yele et Poddar, 2019) et la transmission est systémique dans la plante (Wintermantel, 2005) représentée dans la Figure 3.

Symptômes des VY

Les symptômes initiaux des VY incluent l'épaississement et la déformation des limbes, suivie d'une chlorose réticulée puis généralisée avec des structures de mosaïques et parfois d'une sénescence précoce des feuilles (Wintermantel, 2005, Hossain *et al.*, 2021) comme illustré sur le Tableau 2.

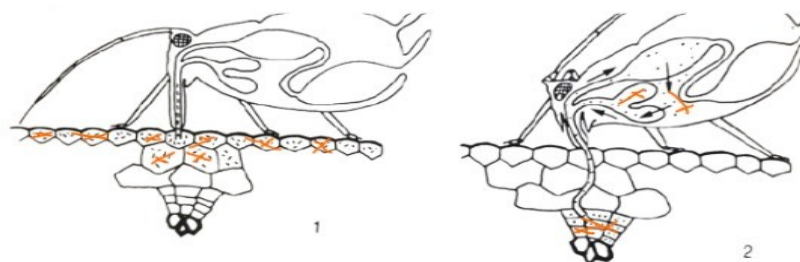


Figure 3. Représentation des modalités d'acquisition et transmission par les pucerons, (Hurpin et Mouchart, 1981)

Représentation schématique d'un virus non circulant non persistant (1) et d'un virus circulant (2).

Tableau 2. Représentation des symptômes du BYV obtenus sur plantes en serre et en extérieur

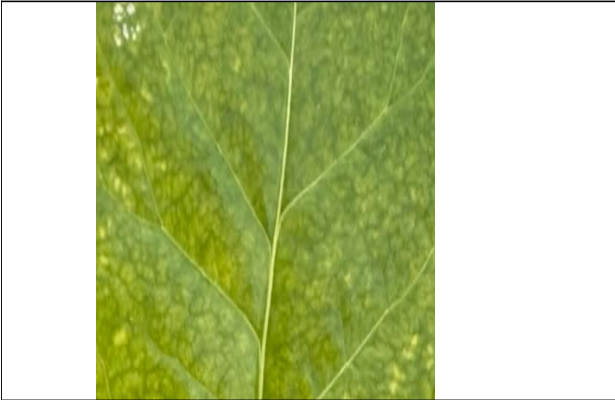
Mosaïque (a)	Éclaircissement des nervures (b)
	
Jaunissement réticulé (c)	Jaunissement généralisé (d)
	

Illustration des symptômes provoqués par le BYV allant d'une mosaïque (a), une décoloration des nervures (b) suivie d'un jaunissement internervaire (c) et un jaunissement généralisé caractérisé par des taches nécrotiques (d)

Le BYV provoque une décoloration des nervures suivie d'un jaunissement internervaire évoluant vers un jaunissement généralisé avec des tâches nécrotiques (Tableau 2). Les *Polérovirus* causent un jaunissement internervaire sans décoloration initiale des nervures. Le BtMV est à l'origine d'une mosaïque généralisée des feuilles. (Wintermantel, 2005).

Caractéristiques des infections aux VY

La sensibilité de la betterave aux VY dépend de l'espèce virale (Wintermantel, 2005; Borgolte *et al.*, 2024), mais aussi des variétés (Wintermantel, 2005) et du stade phénologique (Demal, 2021; Borgolte *et al.*, 2024). Le BYV (Wintermantel, 2005; Borgolte *et al.*, 2024) et le BChV (Hossain *et al.*, 2021) entraînent de pertes de rendement variables jusqu'à 30 % en condition naturelle (Hossain *et al.*, 2021 ; Borgolte *et al.*, 2024). Le BtMV a lui une faible incidence sur les rendements (Wintermantel, 2005; Borgolte *et al.*, 2024) . Ils peuvent aussi être retrouvés fréquemment en co-infections (Borgolte *et al.*, 2024). Ces multi-infections virales sont fréquentes en Suisse (Mahillon *et al.*, 2022), et accentuent les symptômes ainsi que les pertes de rendement (Hossain *et al.*, 2021 ; Borgolte *et al.*, 2024, Khechmar *et al.*, 2024) avec des phénomènes d'exclusion des espèces virales entre les cellules d'une même feuille infectée (Khechmar *et al.*, 2024).

Composition des espèces des YV en Suisse

En Suisse, les infections au YV de la betterave sont majoritairement dues au BYV ou BChV alors que le BMYV est sporadique en Suisse romande (Mahillon *et al.*, 2022). L'incidence et la nature des infections YV varient entre les régions et selon les années (Mahillon *et al.*, 2022). Des conditions météorologiques plus douces augmentent l'abondance des vols responsables de la transmission précoce (Hossain *et al.*, 2021 ; Mahillon *et al.*, 2022).

Tableau 3. Dommages des pucerons provoqués aux betteraves

(a) Déformations foliaires (plante atteinte à droite, plante saine à gauche)	(b) Dépérissement des plantes
	
(c) Miellat	(d) Vection de virus
	

Sur ce tableau figurent les différents dommages que les pucerons provoquent aux betteraves. La première image figure le phénotype d'une feuille normale étalée à droite, figure le phénotype d'une feuille crispée par l'injection de les salives de *M. percicae* (a). La seconde image montre le de dépérissement d'une plante banque dû à l'alimentation des colonies de *M. percicae* (b). La troisième image montre des traces de fumagine par le miellat d'une colonie de *A.febae* (c). La quatrième image montre une chlorose réticulée à droite du limbe d'une feuille de betterave, par l'action du BYV (d).

1.2.2. Les pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave

Dégâts et gestion par les pucerons de la betterave

Les pucerons (Hémiptères : Aphidoidés) comptent près de 5 000 espèces dommageables aux cultures (Hurpin et Mouchart, 1981 ; Turpeau *et al.*, 2024). Certains dommages sont directs, avec la crispation des feuilles due à l'injection de salive, réduisant la surface foliaire. Le prélèvement de la sève élaborée compromet la croissance, jusqu'au possible dépérissement des plantes (cf. Figure 4). Dans un second temps, leur présence en nombre peut provoquer l'apparition d'une fumagine due à la production de miellat et même la transmission de virus aux plantes cultivées. (Turpeau *et al.*, 2024).

Le puceron noir de la fève *Aphis fabae* (Scopoli, 1763) et le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* (Sulzer, 1776), de la sous-famille des Aphididés, sont très polyphages. Ils ont une large gamme d'hôtes secondaires lorsque les ailés migrent vers des hôtes secondaires au printemps et ont un potentiel de multiplication important (Ruus, 2020) comme illustré sur le Tableau 4. Ces pucerons sont préjudiciables à de nombreuses plantes cultivées, notamment la betterave. *Myzus persicae* est le principal vecteur de la jaunisse de la betterave (YV) (Limburg *et al.*, 1997; Kozłowska-Makulska *et al.*, 2009).

Les moyens de luttés à l'échelle de la parcelle se concentrent principalement sur la gestion de *M. persicae* (Annexe I). En effet, *M. persicae* possède une meilleure efficacité de transmission du BYV (Limburg *et al.*, 1997), du BMV et du BChV (Kozłowska-Makulska *et al.*, 2009) qu'*A. fabae* et une forte tendance à la dispersion à l'intérieur de la parcelle (Ruus, 2020), ce qui accroît son potentiel virulent à l'échelle de la parcelle (Ben-Ari *et al.*, 2015). Au contraire d'*A. fabae* qui forme des colonies en manchons parfois très denses sur les plantes hôtes secondaires (Turpeau *et al.*, 2024) et restent sur leurs hôtes (Cécile Brabant, communication personnelle).

Tableau 4. Caractéristiques de développement des pucerons *Aphis fabae* et *Myzus persicae* en climat tempéré

Espèces	Hôtes primaires	Pontes des fondatrices	Périodes de migrations	Hôtes secondaires	Paramètres biologiques des pucerons virginipares
<i>Myzus persicae</i> (Sulzer, 1776)  [1]	Arbres du genre Prunus (ex. pêcher, abricotier) (Greene, 2009 ; Ruus, 2020)	2–7 œufs près des boutons floraux (Greene, 2009 ; Ruus, 2020)	Fin mai (Greene, 2009 ; Ruus, 2020)	+ 50 familles botaniques (Greene, 2009 ; Turpeau <i>et al.</i> , 2024)	Durée de vie : 10–12 jours ; ±20 générations (Greene, 2009 ; Ruus, 2020)
<i>Aphis fabae</i> (Scopoli, 1763)  [1]	Fusain d'Europe (<i>Euonymus europaeus</i>) et viorne (<i>Viburnum opulus</i>)	6–10 œufs sous les écailles de l'écorce (Greene, 2009 ; Ruus, 2020)	Mi-mai (Greene, 2009)	+ 200 espèces végétales (Greene, 2009 ; Turpeau <i>et al.</i> , 2024)	Durée de vie : ±50j; ±30 générations (Greene, 2009)

Tableau synthétique de la biologie de *M.persicae* et *A. fabae* [1] où les images proviennent de (Clément *et al.*, 2024). En rose, figure les paramètres biologique et la gamme d’hotes primaires des pucerons sexupares. En vert, figure les paramètres biologique de femmelle virginipare, d’après (Greene, 2009 ; Ruus, 2020 ; Turpeau *et al.*, 2024)

Biologie de *M. Persicae* et *A. fabae*

Ces espèces ont des cycles biologiques variables selon les conditions environnementales (Blackman, 1972). En condition tempérée, *A. fabae* et *M. persicae* ont un cycle biologique holocyclique*, générant plusieurs générations par an, alternant entre des reproductions asexuée, des parthénogénèses vivipares et une seule reproduction sexuée (Turpeau *et al.*, 2024a). Ces espèces sont hétéroéciques*, par leur variété d'hôtes, leur reproduction sexuée se déroule sur un hôte primaire non apparenté aux hôtes secondaires sur lequel des générations asexuées sont ensuite produites (Turpeau *et al.*, 2024 ; Cieslak, 2024), comme illustré sur le Tableau 4. Leurs cycles biologiques leur confèrent donc un haut potentiel d'adaptation à leur environnement (Orantes *et al.*, 2012), et notamment aux insecticides (Eleftherianos *et al.*, 2008 ; Xu *et al.*, 2022 ; Kaleem Ullah *et al.*, 2023). C'est pourquoi les stations phytosanitaires cantonales délivrent des autorisations spéciales pour la lutte contre *M.persicae* (Annexe I ; Masche, 2024)

Dispersion des pucerons et localisation de la plante hôte

Les pucerons ailés virginipares ont la capacité de se disperser vers de nouveaux hôtes (Ben-Ari *et al.*, 2015). Cette dispersion est principalement passive, ayant un vol erratique (Ruus, 2020) facilité par le vent sur de longues distances (Ben-Ari *et al.*, 2015). L'atterrissage sur une plante hôte peut être aléatoire ou après localisation volontaire (Dardouri, 2018). Cette phase de localisation est caractérisée par un vol lent de plusieurs heures (Dardouri, 2018). Le puceron fait alors plusieurs atterrissages sur différentes plantes avant d'exercer un choix.

Choix de la plante hôte par le puceron

À l'échelle de la parcelle, les pucerons ailés peuvent donc sélectionner les plantes (Ben-Ari *et al.*, 2015) pour assurer leurs besoins nutritionnels et leur reproduction (Dardouri, 2018). La dispersion des pucerons aptères au sein et entre les plantes amplifie l'infestation du champ (Ben-Ari *et al.*, 2015). Cela résulte d'un choix dicté par leurs capacités olfactives, mais aussi visuelles.

Les pucerons, notamment *A.fabae* (Nottingham *et al.*, 1991) ainsi que *M. persicae* (Dardouri, 2018, Altesor et González, 2023) sont capables de percevoir les sémiochimiques* des plantes hôtes et non-hôtes. Les pucerons peuvent aussi distinguer efficacement les COV* des champignons entomopathogènes endophytes (Collinson *et al.*, 2024; Walther *et al.*, 2025, Fingu-Mabola *et al.*, 2020) et celles des plantes porteuses de virus (Fingu-Mabola *et al.*, 2020).



Figure 4. Dégâts provoqués par les altises de betterave au champ

Vue d'une altise s'alimentant sur la première feuille de betterave au champ (a), vue des dégâts provoqués par les alites *Chaetocnema* spp. sur la betterave endommageant les cotylédon et complètement les premières feuilles et l'apex (b).



Figure 5. Dégâts provoqués par le charançon sur la betterave

Vue d'un charançon adulte sur un pétiole de betterave (a); Trous de pontes sur un pétiole (b) ; Nécroses du pétiole provoquées par la larve (c); Charançon adulte sortant d'une galerie (d) ; Vue d'une galerie (e) ; Pourriture de la racine de betterave provoquée par l'alimentation de la larve. Sources : images (a-e) personnelles et (f) (ITB, 2025).

La préférence visuelle de *M. persicae* (Fennell *et al.*, 2020 ; Döring et Kirchner, 2022 ; Conférence inov3PT 2025), dépend de l'état nutritionnel des plantes (Döring et Kirchner, 2022) et de l'exposition au soleil (Fennell *et al.*, 2020). En conséquence, les pucerons ont une mobilité accrue dans les monocultures offrant moins de saturation visuelle (Conférence inov3PT 2025).

1.2.3. Autres menaces pour la betterave

En Suisse, les cultures de betteraves à sucre sont touchées par des ravageurs autrefois régulés par les NNIs comme les altises de la betterave (Von Doris Bigler, 2020), auxquelles s'ajoutent de nouveaux problèmes phytosanitaires comme : la cicadelle *Pentastiridus leporinus* vecteur du Syndrome des Basses Richesses » (SBR) (Schaerer *et al.*, 2019) et le charançon de la betterave (Germann et Breitenmoser, 2020). Ceux-ci sont à l'origine de pertes de sucre et de rendement (Von Doris Bigler, 2020, Mahillon *et al.*, 2022).

Les altises de la betterave : *Chaetocnema spp.*

Les altises, *Chaetocnema spp.* (Coléoptères : Chrysomelidées), sont des ravageurs avérés de diverses espèces de plantes (Vráblová et Tóth, 2001). *C. tibialis* (Illiger) est l'espèce la plus présente sur la betterave ainsi que *C. concinna* (Marsham) et *C. laevicollis* (Thomson) selon Vráblová et Tóth, (2001). Les moyens de luttés sont alors curatifs (Annexe I). Ces coléoptères polyphages s'attaquent préférentiellement aux espèces de Chénopodiacees (Vráblová et Tóth, 2001 ; Lesage et Majka, 2010) mais aussi aux Polygonacés et Amaranthacées (Vráblová et Tóth, 2001). Les larves se nourrissent notamment des racines du sarrasin (*Fagopyrum esculentum.*), de l'oseille (*Rumex acetosa*) et de la rhubarbe (*Rheum rhabarbarum*) (Vráblová et Tóth, 2001). Les adultes comme représenté sur la Figure 4, se nourrissent des feuilles et peuvent détruire le semis des betteraves (OEPP, 1994).

Le charançon de la betterave : *Lixus junci*

L'espèce *Lixus junci* (Coléoptères : Curculionidées) (Boheman) originaire de l'Europe méridionale est en expansion et a été récemment confirmée en Suisse (Germann et Breitenmoser, 2020). Ce charançon se développe sur les Amaranthacées et Chénopodiacees (OEPP, 1994). Il est actif de mai à septembre, (ITB, 2025, Figure 1) sans aucune possibilité de lutte chimique autorisée (Annexe I).

Tableau 5. Synthèse des plantes de service en interculture adapté de (Caravel *et al.*, 2020)

Effet potentiel du sarrasin comme plante de services en couvert végétal		
Effet	Mode d'action	Concept
Effet direct contre les bioagresseurs	<i>Plante barrière</i>	Empêcher les bioagresseurs de se disperser sur la culture
	<i>Plante répulsive</i>	Dissuader les bioagresseurs par les composés volatils
Effet indirect contre les bioagresseurs via l'action de leurs ennemis naturels (auxiliaires)	<i>Plante nourricière</i>	Apporter des ressources nutritives végétales
	<i>Plante attractive</i>	Attirer les ennemis naturels sur la culture de rente

Ce tableau résume les effets potentiels du sarrasin comme plante de services utilisé en interculture à la betterave, par le biais de stimuli visuels et d'odeurs d'après les connaissances présentées par (Caravel *et al.*, 2020).

Plante Barrière : utilisation d'une plante dans la culture engendrant une obstruction physique ;

Plante répulsive : utilisation d'une plante de service qui repousse le bioagresseur ;

Plante nourricière : par le nectar floral et extra-floral, pollen, fruit, sève ;

Plante attractive : par le biais de stimuli visuels ou d'odeurs bénéfiques aux ennemis naturels.

Les symptômes représentés sur la Figure 5 se caractérisent par des perforations irrégulières sur les feuilles au jeune stade, mais surtout par les galeries des larves qui engendrent des nécroses des pétioles du collet et des racines (OEPP, 1994). Cela constitue une porte d'entrée pour le champignon *Rhizopus spp.* et entraîne plus de 50 % de pertes de rendement (ITB, 2025).

Le syndrome des Basses Richesses (SBR)

Le SBR est une maladie présente dans la région Lémanique depuis 2017 (Schaerer *et al.*, 2019), elle est causée par *Candidatus Arsenophonus phytopathogenicus* (Enterobacterales : Morganellacées), (Bressan *et al.*, 2009). Ce phytopathogène est transmis par les cicadelles (Hémiptère : Cixiidées) *Pentastiridius leporinus* (Linnaeus) (Bressan *et al.*, 2009 ; Schaerer *et al.*, 2019 ; Mahillon *et al.*, 2022) et possiblement par *Reptalus panzeri* (Löw), d'après une communication personnelle de Floriane Bussereau.

1.2.4 La lutte intégrée contre les ravageurs

Leviers d'actions alternatifs au NNI

Dans un contexte de réduction de l'usage des phytosanitaires, la lutte intégrée contre les ravageurs s'impose comme une approche durable de la protection des cultures (Kogan, 1998). Celle-ci combine plusieurs leviers (Kogan, 1998), toutefois, l'ensemble de ces leviers ne permet pas de compenser les bénéfices des NNI (ANSES, 2017 ; Verheggen *et al.*, 2022). La mise en œuvre des alternatives aux traitements chimiques reste limitée et nécessite l'ajustement des itinéraires techniques de la betterave (Verheggen *et al.*, 2022). Les pratiques culturales constituent le second levier après les insecticides de synthèse (ANSES, 2017 ; Verheggen *et al.*, 2022), tandis que les agents de biocontrôle présentent pour l'instant une efficacité moindre (ANSES, 2017 ; Verheggen *et al.*, 2022) ; du fait d'un manque général de connaissances (Verheggen *et al.*, 2022).

Utilisation du sarrasin comme plante de services

Une méthode de lutte intégrée consiste à associer une culture de rente donnée avec des plantes compagnes dites « de service », sélectionnées pour les services écosystémiques qu'elles peuvent apporter (Caravel *et al.*, 2020). Ces plantes compagnes peuvent participer à la régulation des bioagresseurs de manière directe ou indirecte par le biais d'un organisme intermédiaire comme synthétisé sur le Tableau 4 (Caravel *et al.*, 2020).

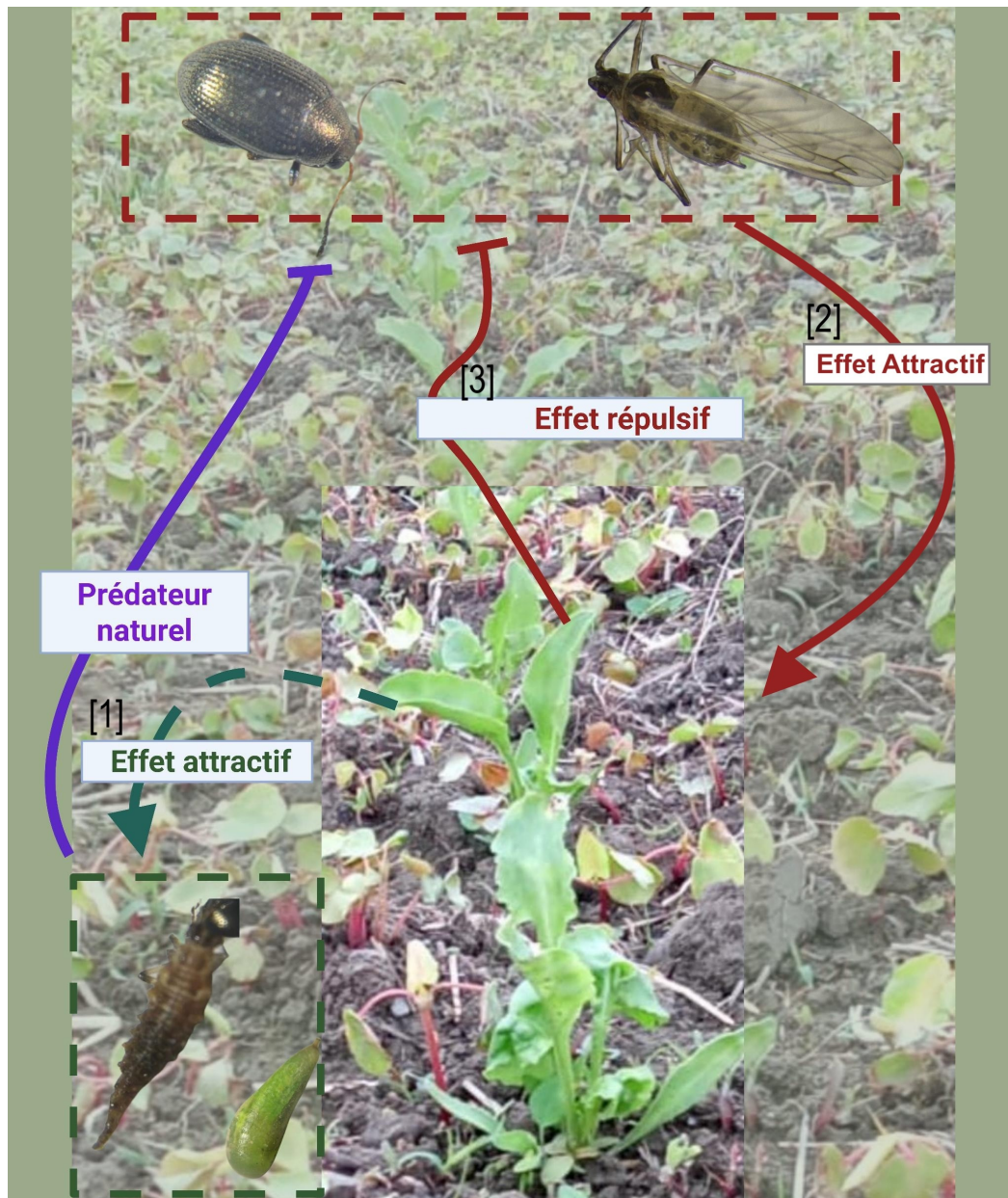


Figure 6. Synthèse des effets délétères du sarrasin vis-à-vis des populations de ravageurs

Représentation schématique des modes d'action du sarrasin envisagés, d'après les connaissances actuelles :

[1] (Amy *et al.*, 2018) - Plantes ressources et attraction des ennemis naturels

[2] (Parvaiz et Khan, 2024) - Plantes réservoirs

[3] (Brabant et Bussereau, 2025) - Plantes répulsives ou barrière

Insectes schématisés : en haut de gauche à droite, Altise de la betterave *Chaetocnema spp.* et Pucerons vert du pêcher *Myzus persicae*, en bas de gauche à droite, Larve de chrysope se nourrissant d'une altise et Pupa de syrphie (images personnelles)

Photographie du champ issue du FSB (communication personnelle)

Ces plantes de services peuvent être combinées en deux types de plantes de service : les plantes répulsives (push) et les plantes pièges (pull) (Cook *et al.*, 2007, Khan *et al.*, 2014, Caravel *et al.*, 2020).

Le sarrasin, peut servir de « plante réservoir » des auxiliaires prédateurs des ravageurs, attirés par les ressources (pollen et nectar). Le sarrasin, en bande fleurie, augmente la présence de syrphes dans le blé (*Triticum aestivum*) (Amy *et al.*, 2018). En interculture, il réduit le nombre de pucerons et des aleurodes *Bemisia tabaci* ainsi que l'incidence du Cucurbit Leaf Crumple Virus de la courgette (*Cucurbita pepo*) (Vieites-Álvarez *et al.*, 2024).

Son utilisation dans une stratégie Push-Pull avec *Tagetes spp.* diminue la densité des populations de noctuelles (*Helicoverpa armigera*) et de *M. persicae* sur les cultures maraîchères (Parvaiz et Khan, 2024). Les agriculteurs Extensio suisses ont montré également que le sarrasin semé entre les rangs de betterave peut avoir des effets limitants les dégâts des altises et infestations de pucerons (Brabant et Bussereau, 2025). Cela nécessite ainsi une étude plus approfondie, comme représenté sur la Figure 6.

Les levures associées aux plantes

On peut considérer la plante hôte et ses microbiotes comme une seule unité (Zilber-Rosenberg et Rosenberg, 2008 ; Wolfgang *et al.*, 2023). C'est pourquoi l'ingénierie du microbiote en particulier de la betterave est reconnu pour avoir un intérêt contre les pathogènes et les ravageurs (Wolfgang *et al.*, 2023). Toutefois, le rôle des levures associées à la betterave reste assez méconnu (El-Tarabily, 2004).

Les levures interfèrent avec les insectes herbivores (Ljunggren *et al.*, 2019) et avec les maladies fongiques (Freimoser *et al.*, 2019). Elles ont de plus un effet de priming* contre les virus des plantes notamment (Lee *et al.*, 2017). Ces communautés sont dynamiques dans la plante (Glushakova et Chernov, 2010). En effet, les levures et en particulier les Ascomycètes sont peu représentées dans le microbiome des graines (Simonin *et al.*, 2022 ; Marchi *et al.*, 2024) et dans le microbiome de la phyllosphère* des parties aériennes des plantes annuelles (Gouka *et al.*, 2022) et pérennes (Glushakova et Chernov, 2010). Parmi les levures Ascomycètes celles du genre *Metschnikowia* (Saccharomycetales : *Metschnikowiaceae*) en particulier *M. pulcherrima* sont les plus abondantes dans la phyllosphère (Glushakova et Chernov, 2010).

Étude du clade *Pulcherrima* du genre *Metschnikowia* comme agent de lutte biologique contre les ravageurs

Le clade *Pulcherrima* regroupe des espèces à habitat terrestre, reconnues par leur production de pulcherrimine, un pigment-chélateur rouge (Kregiel *et al.*, 2023). Ces espèces peuvent coloniser le phylloplan* (Glushakova et Chernov, 2010 ; Limtong et Koowadjanakul, 2012), l'anthosphère* (Rutkowski *et al.*, 2023) et la carposphère* (Stanevičienė *et al.*, 2021). Certaines sont dites généralistes : *M. pulcherrima* et *M. fructicola* alors que d'autres sont spécialistes de l'anthosphère *M. reukaufii*. (Glushakova et Chernov, 2010). Les levures généralistes peuvent stimuler la croissance des plantes (Limtong et Koowadjanakul, 2012 ; Kachalkin *et al.*, 2022, 2023, Alexandre Glauser, Clara Chevalley, communication personnelle) et sont utilisées par l'industrie (Freimoser *et al.*, 2019) notamment comme agents de biocontrôle en pré- et post-récoltes (ANCES, 2018).

Ces espèces influencent les interactions insecte-plante par les COV notamment (Gonzalez, 2014). Les espèces spécialistes de l'anthosphère sont associées avec les pollinisateurs, elle abondent dans le microbiote des chrysopes (Yoshihashi et Degawa, 2023), attirent les pollinisateurs (Rutkowski *et al.*, 2023), les syrphes, les guêpes parasitoïdes (Colda *et al.*, 2021) et les noctuelles *Mythimna separata* (Ma *et al.*, 2025). Les levures généralistes comme *M. pulcherrima* induisent l'évitement des noctuelles (Ma *et al.*, 2025) et attirent les ravageurs des fruits *Lobesia botrana* (Tasin *et al.*, 2018) ainsi que *Drosophila suzukii* (Bianchi *et al.*, 2020, Jones *et al.*, 2021). Un pré-test sur des concombres inoculés via les graines avec *M. pulcherrima* a révélé l'évitement par *M. persicae*, venu de l'extérieur vis-à-vis des plantes traitées avec *M. pulcherrima* (Anaïs Feuillet, communication personnelle). Ce potentiel reste à investiguer.

1.3. Objectifs et stratégie du stage

1.3.1 Questionnement scientifique

Effectué dans le contexte de l'évolution des pratiques vers des stratégies de gestion intégrée vis-à-vis des ravageurs et des maladies de la betterave sucrière. Ce stage, a pour objectif d'évaluer des méthodes alternatives de biocontrôle en investiguant l'efficacité de la levure *Metschnikowia pulcherrima* (Pitt et Miller, 1968), ainsi que les effets du sarrasin comme plante de service.

Dans quelle mesure l'intégration de la levure *Metschnikowia pulcherrima* ou du sarrasin (*Fagopyrum esculentum*) comme plante de service peut-elle constituer une stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière (*Beta vulgaris var saccharifera*) ?

Plus concrètement, les résultats des expérimentations en serre et au champ seront collectés pour tenter de répondre aux trois questions suivantes :

- I. Le traitement par *M. pulcherrima* sur la betterave seule modifie-t-il le comportement, la performance et la capacité de transmission du BYV par *M. persicae*, par rapport à la modalité témoin sous serre ?
- II. Le traitement par *M. pulcherrima* modifie-t-il les populations de ravageurs et d'auxiliaires et/ou confère-t-il une protection généralisée contre les maladies virales par rapport à la modalité témoin en plein champ ?
- III. L'association du sarrasin à la betterave influence-t-elle le comportement de *M. persicae* et de *Chaetocnema spp.* par rapport à la modalité betterave seule ?

1.3.2 Démarches expérimentales

Ce rapport investigate deux stratégies complémentaires de gestion intégrée de la betterave sucrière ; à savoir l'utilisation de micro-organismes et de plantes de services. Les résultats décrits dans la suite de ce mémoire se concentreront sur les ravageurs et les maladies virales.

Des essais ont été réalisés en serre, dans le but d'investiguer le potentiel de biocontrôle de *M. pulcherrima* vis-à-vis de *M. persicae* et de la transmission virale. Des expériences dites "Push-Pull" ont été réalisées de façon à étudier l'efficacité du sarrasin comme plante compagne de la betterave vis-à-vis de *M. persicae* et *Chaetocnema spp.*

D'autres essais ont été réalisés en plein champ dans le but d'analyser le potentiel de biocontrôle de *M. pulcherrima* vis-à-vis des pathogènes en milieu non contrôlé. Pour se faire, un essai en condition Extensio a été mis en place. À cette fin, les populations d'insectes nuisibles et utiles ont été évaluées sans *a priori* par une surveillance régulière et une aspiration. Une évaluation des symptômes de la jaunisse virale a aussi été effectuée par la suite avec une analyse moléculaire.



Figure 7. Methode d'infection des betteraves aux BYV par *M.persicae*

Phase d'acquisition [Photographie n°1] : $\pm$ 50 pucerons virginipares sont mis en contact avec des fragments de feuilles positives au BYV cultivé dans les serres d'élevage. La phase d'acquisition dure trois jours.

Phase de transmission [Photographie n°2] : les pucerons ayant acquis le virus sont transférés aux betteraves en serre à Agroscope Changins

Phase de multiplication [Photographie n°3] : par la suite, les betteraves infectées sur lesquelles se multiplient les pucerons

Image tirée du poster (Brabant *et al.*, 2024)

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Matériels biologiques

2.1.1. Conditions d'élevage des *M. Persicae* sains

Des expériences en serre sur *M. persicae* ont été réalisées avec deux populations sauvages (collectés en juin 2024 et 2025) et maintenues dans les laboratoires d'élevage. Ces derniers étaient cultivés sur choux de Chine (*Brassica rapa subsp. pekinensis*) (photopériode : 16h-/8h, intensité lumineuse $400\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, température constance de 17°C HR 65%).

2.1.2. Infection des plantes au BYV

Des pucerons sains ont été transférés sur une feuille détachée de betteraves positives au BYV issu de l'élevage, pendant 3 jours d'acquisition. Puis, 10 pucerons ont été transférés dans une "clip cage"¹, sur une plante de betterave saine durant une semaine. Les pucerons ont été retirés et des prélèvements foliaires ont été réalisés pour confirmer la transmission virale par analyse ELISA (cf. 2.2.3). Des pucerons aptères (± 30) ont été transférés aux plantes positives trois semaines avant le début des expériences, de façon à obtenir par la suite des pucerons ailés virulifères (Figure 7).

Tests de la gamme d'hôtes

Des plantes compagnes, telles que le sarrasin, ont été semées dans les cages "insect-proof" des plantes banques des *M. persicae* virulifères au BYV ou au BChV. Le but était alors que les pucerons migrent vers les plantes compagnes afin d'évaluer la capacité des plantes compagnes à être hôtes des VY.

2.1.3. Condition de culture en serre

L'objectif de ses expériences en serre était d'analyser les modifications des comportements des ravageurs de la betterave. Des plants ont été cultivés sous serre afin de réaliser les tests impliquant le sarrasin et *M. pulcherrima* (Figure 8). Pour se faire, des plantes ont été cultivées dans un terreau (Ricoter® Terreau universel) avec de l'engrais (Osmocote® Exact 5-6mois) ; 70 :0,2 V:V et ont été arrosées à la main (100-250 mL). Les conditions étaient les suivantes : la température minimale désirée 17°C/19°C et maximale de 30°C et HR : de 40 %/50 %.

¹Cage de confinement des insectes fixées sur une feuille

Arbre de décision : Stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière avec la levure Metschnikowia pulcherrima et le sarrasin

Transfert de Metschnikowia pulcherrima à la betterave (i)		
Questionnement scientifique	Méthode	Variables étudiées
1. Optimisation d'une méthode d'inoculation de M. pulcherrima à la graine.	Dénombrement	- CFU (Quantitative)
1. Optimisation d'une méthode d'inoculation de M. pulcherrima à la graine.	Phénotypage	- Taux de germination (Quantitative)
2. M. pucherrima a-t-elle un effet sur la croissance et le développement de la plante ?		- Masse aérienne & racinaire (Quantitative)

Analyse du potentiel de biocontrôle de Metschnoikowia pulcherrima vis-à-vis des ravageurs (ii)		
Questionnement scientifique	Méthode	Méthode
1. M. pucherrima a-t-elle un effet sur le choix de la plante hôte ?	• Test de choix	- Observation du choix de plante hôte Binaire (Présence absence)
2. M. pucherrima a-t-elle un effet sur la réduction de la transmission virale ?	• Analyse RTqPCR	- Sévérité (semi quantitative, 0-7)
	• Analyse des symptôme	- Incidence (qualitative)
3. M. pucherrima a-t-elle un effet sur le fitness du puceron ?	• Test de performance	- Charge virale (Quantitative)
	• Monitoring sans a priori	Charge virale relative (Quantitative)
4. M. pucherrima a-t-elle un effet au champ ?		- Taux de survie (Quantitative)
	- Taux de descendance (Quantitative)	
	- Population d'insectes (Quantitative)	
	- Symptômes (Quantitative)	

Analyse du potentiel de biocontrôle de Metschnoikowia pulcherrima vis-à-vis des ravageurs (iii)		
Questionnement scientifique	Méthode	Variables étudiées
1. Le sarrasin a-t-il un effet répulsif contre les altises de la betterave ?	• Test de dommage	- Observation du choix de plante hôte Binaire (Présence absence)
2. Le sarrasin a-t-il un effet répulsif contre le puceron vert du pêcher?	• Test de choix	- Nombre de perforations (Quantitative)
		- Observation du choix de plante hôte Binaire (Présence absence)
		- Nombre de descendance (Quantitative)

Figure 8: Arbre de décision des expériences réalisées afin de répondre à la problématique

Sur cette figure présente l'Arbre de décision représentant les stratégies expérimentales adoptées pour répondre aux questionnement scientifiques formulés dans la partie **1.3.1 Questionnement scientifique**.

Les expériences s'articulent en trois analyses où sont détaillées les méthodes et la nature des variables étudiées :

- Transfert de la levure *Metschnikowia pulcherrima* à la betterave (i)
- Evaluation du potentiel de biocontrôle de la levure *Metschnikowia pulcherrima* vis-à-vis des ravageurs de la betterave sucrière et de la réduction de la vécution des virus de la jaunisse (ii)
- Analyse du potentiel de biocontrôle du sarrasin associé à la betterave sur l'influence du comportement des ravageurs (iii)

2.1.4. Culture in vitro *M. pulcherrima* APC1.2.

La souche *M. pulcherrima* APC1.2 (N°GCA_004217705) a été cultivée en milieu solide sur PDA (3,9%, Millipore®) complémentée en fer (100 µM FeCl₃) afin que la Pulcherrimine pigmente la paroi des levures en rouge et facilite son dénombrement. Les cultures en milieu liquide étaient à base de YPG (5%, Formedium®).

2.1.5. Variété de betterave à sucre

Les essais détaillés ont été réalisés avec différentes variétés de betteraves à sucre, Novalina® et Interessa® de KWS®. La qualité germinative des lots de semences a été évaluée par le FSB en mars 2025 et l'ensemble des lots présentait une qualité germinative conforme (≥95%).

Concernant l'évaluation de l'effet de *M. pulcherrima*. Les expériences ont été réalisées avec des semences biologiques labélisées BioSuisse, où l'enrobage est à base de cellulose et dépourvu de pph ; afin de permettre la viabilité de *M. pulcherrima*.

Concernant l'évaluation de l'effet dit “ push-pull “ du sarrasin, la variété Interessa® de betterave ayant un enrobage conventionnel traitée aux pph a été utilisée.

2.1.6. Matériel végétal des tests concernant *M. pulcherrima*

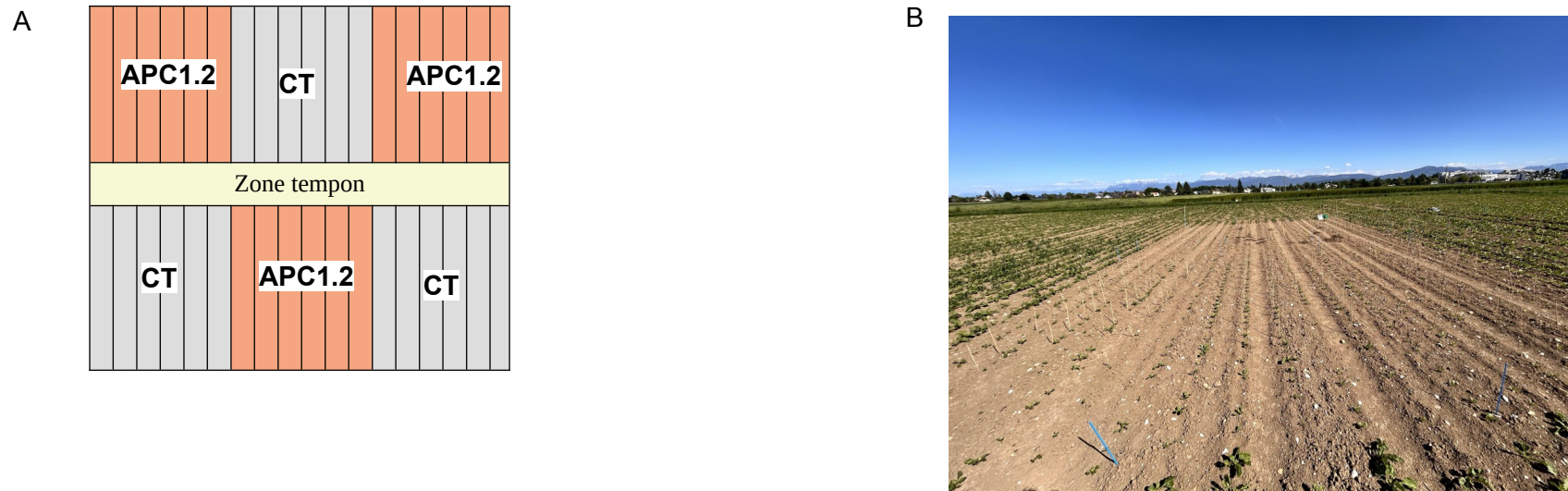
Établissement du protocole d'inoculation à la graine de *M. pulcherrima*

Afin d'évaluer le potentiel de biocontrôle de *M. pulcherrima* en serre et au champ, la méthode d'inoculation des semences a dû être développée (Figure 8). Celle-ci a été déterminée suivant 10 conditions de 3 répétitions : Comprenant 5 temporalités, (témoin, 3 min, 15 min, 1h, 2h, et 4h) et 2 modalités (graines nues et enrobage BioSuisse). Les graines ont été imbibées dans du YPG stérile ou avec *M. pulcherrima* à Densité Optique de (DO) de 1 soit environ une CFU de 5.10^8 CFU/mL (De Curtis *et al.*, 1996, Feuillet, communication personnelle) et soumises à une agitation continue à 200 rpm à 28°C. Les graines ont ensuite été séchées et mises en agitation (1 mL/graines, 20 min, 200 rpm et 28°C) et la CFU² du surnageant a été estimée selon la méthode d'estimation ISO 7218 (cf. 2.2.3.) suivant une gamme de dilution de 0 à 10^{-5} .

Inoculation de la graine par *M. pulcherrima*

Quatre lots de semis indépendants ont été réalisés avec la méthode d'inoculation des semences la plus optimale, celle-ci a été réalisée par l'imbibition des graines avec enrobage BioSuisse pendant 4 h dans du YPG avec *M. pulcherrima* à DO de 1. Ces graines ont été semées et par la suite, les plantes ont été repiquées dans des pots de 1,3 L à 2 semaines après semis.

² Colony-forming unit (CFU) : unité microbiologique qui permet de quantifier des micro-organismes viables et capables de former une colonie visible sur milieu solide, exprimée en CFU/mL ou CFU/g. (Oxford, 2004)



La qualité des inoculations a été vérifiée en estimant la CFU sur 6 graines par modalité de chaque lot (cf. 2.2.3.) suivant une gamme de dilution :

- Modalité contrôle (graine de betterave non inoculée à la levure de $0 - 10^{-3}$)
- Modalité traitement (graine de betterave inoculée à la levure de 0 et 10^{-3} - 10^{-5})

Inoculation par pulvérisation foliaire de *M. pulcherrima* APC1.2.

Du fait d'une absence de modulation du comportement des pucerons, la décision a été prise d'exécuter un traitement foliaire lors de la deuxième répétition des tests de choix et de performance. Ces traitements ont été réalisés en plus de l'inoculation de la graine.

Le protocole a été défini en extrapolant au procédé d'application du NOLI® *M. fucticola* (CFU : 1.10^{14} /Kg, ANCES, 2018), suivant les volumes de traitement appliqués pour le stade "deux feuilles" au champ (± 100 l/ha ; ITB, 2022), avec la densité des betteraves (± 20 plante/m²; Dierauer et Jenny, 2022). Les volumes appliqués étaient donc de $\pm 0,5$ mL/plantes par une DO de 2 de *M. pulcherrima*, soit une CFU d'environ 10^9 /mL (De Curtis *et al.*, 1996, Feuillet, communication personnelle). Pour préparer l'inoculum une préculture de *M. pulcherrima* a été clarifiée dans de l'eau stérile (3000 rpm pendant 10 min, répétée deux fois).

Le traitement foliaire a été réalisé de la façon suivante, une heure avant transfert des pucerons face adaxiale et abaxiale des feuilles, des tests de choix, pour que les plantes soient sèches. Le traitement foliaire a été réalisé conjointement avec le transfert des pucerons pour les tests de performance, à l'image d'un traitement au champ.

Condition de culture au champ

En complément des expériences réalisées en condition contrôlées, une expérience en plein champ a été réalisée (Figure 8). Pour se faire, des graines ont été inoculées suivant le même procédé pendant 4h avec ou sans levure, ont été séchées sous le flux laminaire afin d'être semées à la main.

L'expérience en champ était initialement conduite en Extenso et comportait 6 micro-parcelles de 18 m² (6 m x 3m) agencées en un dispositif expérimental de trois blocs, où chacun des blocs était subdivisée en deux sous-parcelle (parcelle située N°10 d'Agroscope (Duillier 1266, Suisse, 46°23'56.2"N 6°14'17.9"E), comme représenté sur la Figure 9. Chaque sous-parcelle a été semée à la main en semaine N°16 selon la densité conforme à l'itinéraire Bio Suisse (profondeur de 2 cm, distance dans la ligne 16 cm et interligne de 50 cm) (Dierauer et Jenny, 2022).

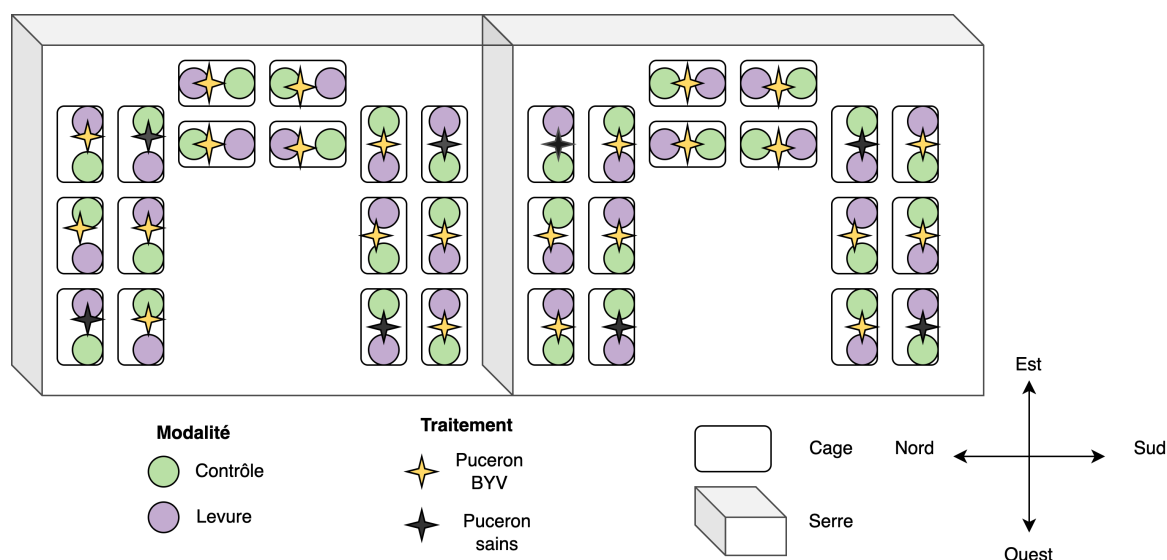


Figure 10. Représentation schématique des expériences des tests de choix réalisés avec ou sans *M. pulcherrima*

Cette figure illustre la disposition des cages avec les deux modalités avec (en présenté en violet) et sans (en présenté en en vert) *M. pulcherrima* associé à la betterave. Dans chacune des cages, un puceron a été transférée sain (en présenté en noir) ou positif (en présenté en jaune) au Beet Yellow Virus (BYV). Les pucerons virulifères permettaient d’analyser la transmission virale et les pucerons sain servait de témoins négatif et ont été disposés de part et d’autre des compartiments. Les lampes à vapeur de sodium (LPS) ont été allumées sur les 10 jours où s’étalait l’expérience afin de limiter les effets de l’environnement.

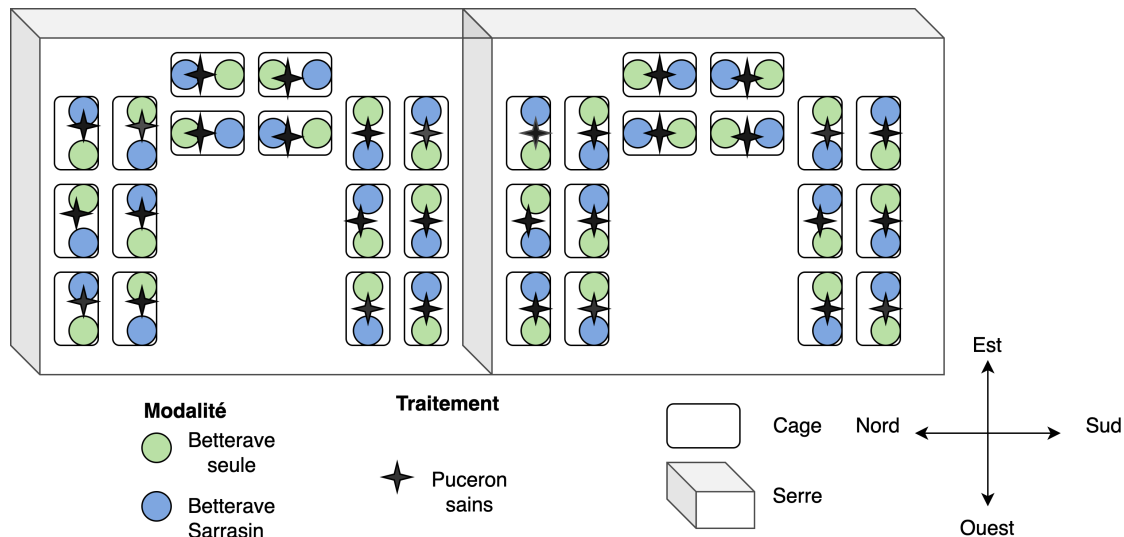


Figure 11. Représentation schématique des expériences de test de choix réalisées le sarrasin en association avec la betterave

Cette figure représente la disposition des cages avec les deux modalités avec (en présenté en bleu) et sans sarrasin (en présenté en vert) associé à la betterave. Dans chacune des cages, deux modalités étaient disposées et un *M. persicae* ailés sain a été transféré. Les éclairages LPS ont été allumés sur les 7 jours où s’étalait l’expérience afin de limiter les effets de l’environnement.

2.1.7. Matériel végétal des tests avec sarrasin

Dans le but d'évaluer le pontentiel de biocontrôle du sarrasin sur les ravageurs de la betterave, des semences de la variété Interressa® ont été semées directement au centre des pots de 1,3 L avec ou sans semences de sarrasin «Biologique». Où 5 graines ont été semées en périphérie. Nous avons conservé trois plantules de sarrasin par pot après la levée. Nous avons réaliser deux répétitions pour chacune des expériences des essais “push-pull». Concernant la première expérience, à la suite d'un manque de plantes dû à une levée hétérogène de la modalité betterave associée au sarrasin. Le même lot de plantes a ensuite été utilisé pour réaliser les tests dommages par les altises et le test de choix par *M. persicae*.

2.1 Méthodes

2.2.1. Expérimentations en serre

Tests de choix

De façon à analyser la décision de la plante hôte par les pucerons, des “ tests de choix” ont été réalisés. Pour se faire, les plantes ont été disposées en quinconces pour extraire l'effet de l'environnement. Les pucerons ont été prélevés sur des feuilles et ont subi un jeûne de 2h avant d'être transférés au centre des cages. Chaque cage comportait une plante de chaque modalité, emballées dans de l'aluminium et disposées de part et d'autre d'une cage insect-proof, au sein de laquelle les deux côtés de la cage ont été cloisonnés pour empêcher les flux d'air.

La variable mesurée des test de choix est binaire, celle-ci correspond à la présences ou à l'absence du puceron ailé entre les plantes des deux modalités entre les cages. Le choix des pucerons ailés a été observé du 1^{er} au 4^e jour puis au 7^e jour post-introduction. La moyenne a ensuite été calculée parmi les observations, correspondant au choix moyen présenté par la suite.

Tests de choix de *M. persicae* vis-à vis *M. Pucherrima* 25/04 et 26/05

Les expériences des tests de choix ont été réalisées afin de déterminer si le traitement avec *M. pucherrima* modifie-t-il le choix et/ou la transmission virale par *M. persicae* et limite-t-il la charge virale (Figure 8) ? Afin de répondre au questionnement, des “ tests de choix” ont été réalisés (Figure 10) sur des plantules de 3 semaines au stade BBCH 12, étant le stade phénologique où la plante étant la plus sensible au VY (Demal, 2021). Cette expérience a été réalisée en deux répétitions biologiques s'étalant sur deux serres comprenant 15 et 17 réplicats chacune. Chaque compartiment comportait 4 cages où des pucerons non-virulifères ont été transférés dans les cages aux extrémités compartiments et servant de témoins négatifs.

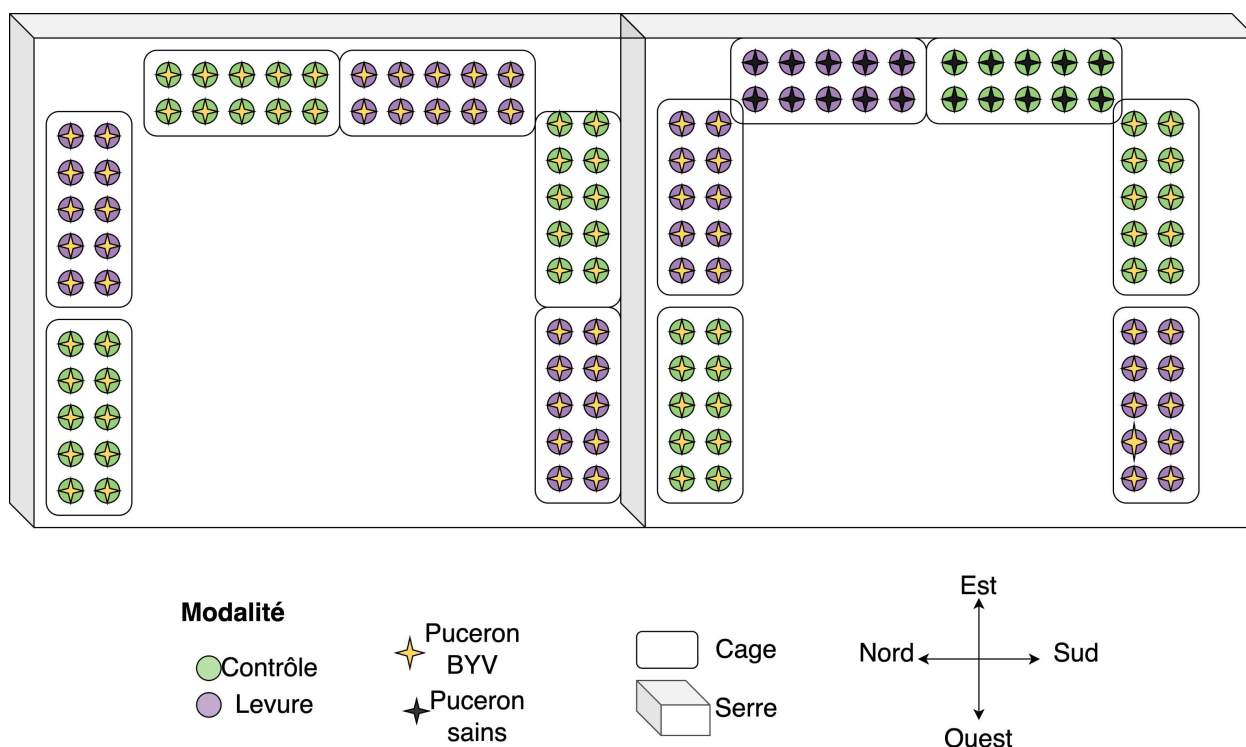


Figure 12. Représentation schématique des tests de performance réalisés avec ou sans traitement de *M. pulcherrima* à la betterave

Dans cette figure, la disposition des cages avec les deux modalités avec (en présenté en violet) et sans *M. pulcherrima* (en présenté en en vert). Sur chacune des plantes, un puceron a été transféré sain ou positif au BYV. Les pucerons ont été soumis à une prise alimentaire forcée, placés sur la face abaxiale d'une feuilles d'une plantule au stade BBCH 12. Les pucerons virulifères permettaient et les pucerons sain servait de témoins négatif. Durant les 10 jours post-transfert, les lampes éclairages LPS ont été allumées afin de limiter les effets de l'environnement.

Les observations de la présence ont été réalisées jusqu'au 7^e jour. Au 21^e jour, les symptômes des plantes ont été phénotypés sur une échelle de 0 à 7. Au 10^e jour après transfert, une pulvérisation d'Acétamipride a été réalisée (Gazelle[®], Stähler, 0,05%) pour éliminer les pucerons, de sorte à ce que les plantes infectées au BYV résultent du choix des pucerons. Au 31^e jour, des prélèvements de la première feuille entièrement développée de chacune des plantes ont été effectués, afin de mesurer la charge virale en réalisant des RTqPCR. Ensuite, à deux mois après transfert, la biomasse des racines et des parties aériennes a été quantifiée.

Tests de choix de *M persicae* vis-à-vis du sarrasin (14/07)

Ces expériences ont été conduites dans le but d'investiguer la modification du comportement alimentaire de *M persicae* par l'effet du sarrasin associé à la betterave, comme représenté sur la Figure 11 pour des plantules âgées de 4 semaines (stade 4 feuilles) BBCH 14 en deux répétitions biologiques s'étalant sur deux serres, comprenant 16 réplicats chacune.

Cette expérience a été faite avec des pucerons sains issus d'élevage, collectés en 2025. Les observations ont été réalisées comme mentionné et au 7^e jour après transfert, une observation de la présence de l'ailé et du nombre de descendances a été réalisée.

Tests de dommages (7/07)

Ces expériences ont été conduites afin d'analyser l'influence du sarrasin associé à la betterave sur le comportement alimentaire de *Chaetocnema spp.* Pour se faire, des altises ont été récupérées au champ par aspiration et ont subi un jeûne de 16h. Puis, elles ont été transférées au centre des cages comprenant des plantules âgées de 3 semaines, en deux répétitions biologiques betterave seule et Betterave associées. Chaque expérience s'étalait sur deux serres comprenant 16 réplicats chacune. La disposition des cages (Figure 11) et les observations ont été réalisées de la même façon que pour les tests de choix. Au 7^e jour après transfert, la présence de l'altise et le nombre de perforations ont été comptés pour chaque modalité.

Tests de performance (28/04 et 27/05)

Des "tests de performance" ont été réalisés pour évaluer l'influence de *M. pulcherrima* sur *M. persicae* soumis à une prise alimentaire forcée. Pour se faire, un puceron a été transféré, confiné sur l'abaxiale de la feuille dans un clip cage d'une plantule au stade BBCH 12, car les pucerons se trouvent spontanément sur la face inférieure des feuilles.

Deux répétitions biologiques ont été réalisées et chaque expérience comportait 12 cages avec 10 plantes/cage (Figure 12). Le nombre de descendances et la survie du puceron ailé ont été mesurés pour chaque plante 10 jours après transfert.

Tableau 6. Liste des primers utilisés pour la RTqPCR

BChV	qPCR BChV - 164 F qPCR BChV - 273 R qPCR BChV - 221 P-FAM FAM λ émission : 520 nm	TGGACACCAAGTTGAACAGT GTGTAAAGGGCCTGTCACCA FAM-TTGGAGCTCTTGGGACCATG-BHQ1
BYV	qPCR BYV - 2673 F qPCR BYV - 2773 R qPCR BYV - 2726 P-HEX HEX λ émission : 556nm	ATAATGTTGACTCCCGCAT GCTGAACGAGTGATTTTGTAG HEX-TACGAAAACCGAATGGGCG-BHQ1
COX <i>B.vulgaris</i>	COX_bett_F COX_bett_R COX_bett_P-ROX ROX λ émission : 602 nm	CGTCGCATTCCCGATTATCCA CAACTACAGAGATATAAGAGC ROX-TGCTTACGCAGGATGGAATGCCCT-BHQ2

Ce tableau présente les séquences, les amorces et sondes utilisées pour la PCR quantitative, où chacune étant spécifique aux séquences étudiées, et les amorces ont été développées à partir des souches de YV présentes sur le territoire suisse. Les sondes TaqMan® sont associées à des fluorophores possédant des spectres d'émission distincts entre séquences étudiées (FAM : 520 nm, HEX : 556 nm, ROX : 602 nm).

Tableau 7. Mix réactionnel utilisé

A	Réactifs	Volume finale 15 μL
	<u>2x buffer kit Promega</u>	7,5
	<u>amorces/sondes 10x</u> (concentration primers/probe 2000nM/1000nM)	1,5
	<u>GoScript™ RT Mix for 1-Step RT-qPCR (50x)</u>	0,3
	<u>RNase-free water (Qiagen)</u>	3
	<u>Template RNA</u>	2,7
B	50°C, 20min 95°C, 5min 95°C, 15s 60°C, 30s  44x	

Ce tableau figure le protocole de la RTqPCR réalisé pour le diagnostic que des betteraves au VY développé pour le laboratoire de virologie. Représentant le volume total du mix réactionnel pour une réaction (A) et le programme de la réaction (B).

2.2.2. Expérimentations au champ

Suivi des populations d'insectes et des symptômes viraux

Dans le but d'estimer le potentiel de biocontrôle de *M. pulcherrima* en condition naturelle vis-à-vis des populations de ravageurs en condition naturelle, comme représenté sur la figure 8. Un suivi régulier sur 40 plantes par sous-parcelle, soit au totale 240 plantes sélectionnées à la levée pour réaliser un monitoring sans *a priori*.

Le nombre de pucerons (*A. Fabae* et *M. Persicae*) selon les morphes (ailés et aptères) ainsi que le nombre d'auxiliaires comme les chrysopes, coccinelles et syrphes (selon les stades : œuf, larve, adulte) ont été comptés (les 25/05, 12/06 et 18/06). Le nombre de trous de ponte de *L. juncii* au niveau des pétioles a également été compté (25/06 et 09/07). En fin d'expérimentation (18/07), une aspiration a été réalisée afin de connaître le nombre d'auxiliaires et de ravageurs en aspirant ~1 s/feuille des plantes piquetées). Une notation des symptômes viraux (0 : Saines ; 1 : Suspicion ; 2 : Atteinte) a été réalisée et des prélèvements des feuilles individuelles des plantes ont été faits et chaque feuille a été analysée par tests ELISA directs (29/07).

2.2.3. Analyses de la CFU

Méthode d'estimation de la CFU selon la méthode ISO 7218

Dénombrement CFU par étalement en milieu solide : $CFU = \frac{\sum c}{v \times 1,1 \times d}$

- CFU: nombre de colonies formant unité (colonie/ ml).

- $\sum c$: somme des colonies [30, 300]

- v: volume (mL)

- d: la plus petite dilution

2.2.4. Analyses moléculaire

RTqPCR

Les extractions d'ARN des échantillons ont été réalisées selon un protocole adaptée de l'ANCES. La PCR quantitative permet la détection et la quantification en temps réel de séquences spécifiques dans les échantillons, par l'émission d'une fluorescence résolue après clivage de la sonde TaqMan®. Cette approche a été réalisée pour confirmer l'infection et analyser la charge virale des échantillons issus des tests de choix. Les produits d'extraction dilués à 10x ont été conservés à 4°C avant la réalisation de la RTqPCR. Cette méthode, développée en interne (Groux, 2022), consiste en une rétrotranscription en une étape combinée à une PCR multiplex, spécifique aux BYV, BChVet au Cytochrome c oxydase (COX) de la betterave, utilisé comme contrôle interne (cf. tableau 6).

Chaque réaction comportait deux duplicas techniques, deux témoin négatif (feuille saine), deux blanc (NTC) et deux témoin positif (feuille positive aux espèces virales, 2020) .

ELISA

Les analyses des échantillons au champ et en serre ont été externalisées à l'équipe de virologie. Cette méthode a permis d'attester l'infection des plantes symptomatique au champ ainsi que de définir la gamme d'hôtes des plantes compagnes au BYV. Ces échantillons ont été broyés dans un tampon (PBS-Tween-PVP pH :7.4) et deux réactions immunologiques par ELISA directes*ont été réalisées, pour valider la présence du BYV et du BChV. La liaison protéine de la capsid-anticorps de détection conjuguée permet une réaction colorimétrique et la révélation des échantillons positifs (Nathalie Dubuis).

Représentations et analyses des données

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R-Studio : R-4.5.1. Les représentations graphiques ont été réalisées par le package gg plots-2 et les tests effectués ont utilisé le niveau de significativité $\alpha = 0,05$; avec une correction de bonferroni selon le nombre de répétitions éventuel.

Analyses des CFU

Pour comparer les conditions d'inoculation des graines à la levure et de germination des lots de semences, un test de Kruskal-Wallis de comparaison multiple deux à deux a été réalisé.

Analyses des données moléculaires

Les données des émissions aux cours des RTqPCR, ont d'abord été vérifiées ³par la méthode des DeltaRFU⁴. Ensuite, pour comparer la charge virale entre les échantillons positifs des deux modalités, un test de Welsh a été réalisé sur des Cq du BYV et COX (obtenus par régression⁵). La charge virale relative a été calculée par le $\log_{10}(2^{[-\Delta\Delta Cq]})$ par rapport au témoin positif (Arnaud Blouin, communication personnelle). La méthode de calcul est détaillée en Annexe II. Les plantes positives ont été déterminées par la troncature des valeurs négatives après soustraction de la DO obtenue par une valeur seuil ELISA (Nathalie Dubuis, communication personnelle) :

$$DO \text{ corrigée} = DO - (3 * s) \quad ; \quad \text{où } s = \text{Écart-type (témoins négatifs NC et NTC)}$$

³ Il est nécessaire de corriger le niveau de fluorescence de base et de définir le seuil (par défaut, manuel ou par régression) à chaque réaction avant d'analyser les données (Biorad) .

⁴Delta Relative Fluorescence Units, correspond à la différence entre le niveau de fluorescence initial de celui à l'issue de la réaction .

⁵Le cycle de quantification, Cq, correspond au nombre de cycle auquel la fluorescence dépasse une valeur seuil (Biorad).

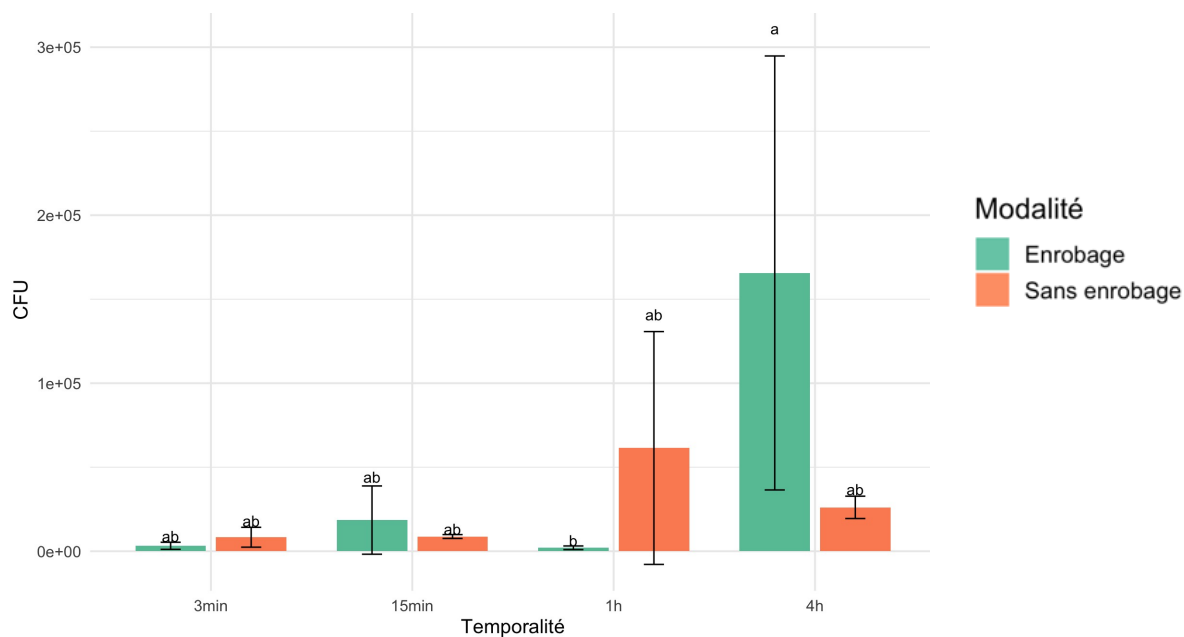


Figure 13. Optimisation du protocole de traitement des graines de betterave

Distribution de la concentration en levure (CFU/mL), dans le temps avec enrobage (vert) on sans enrobages (orange). Les lettres de significativités figurent à la suite d'un test de Kruskal-Wallis de comparaisons multiples après correction de Bonferroni. $\chi^2 = 18.6933$, $df = 7$, p -value ajustée = 0.01 *

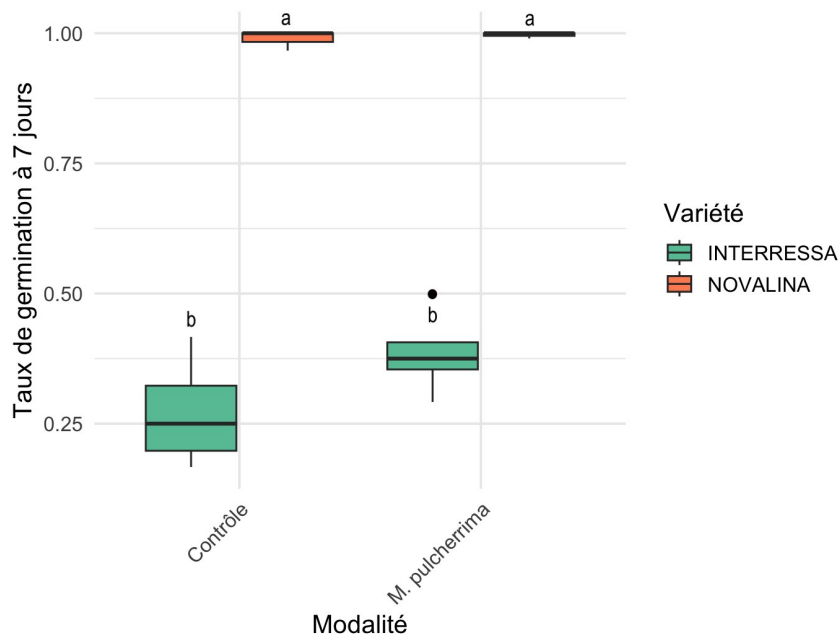


Figure 14. Taux de germination avec ou sans traitement avec la levure de 2 variétés BioSuisse

Novalina (Orange) et Interressa (vert). Les lettres de significativité figurent à la suite d'un test de Kruskal-Wallis de comparaisons multiples après correction de Bonferroni. $\chi^2 = 10.4641$, $df = 3$, p -value = 0.02.

Analyses des données de comptages en serre

Les données issues des expériences en serre, concernant les tests de choix, ont été analysées avec un test de Pearson. Les tests de dommages et de performances ont été analysés avec un test de Kruskal-Wallis.

Analyses des données au champ

Les données de comptages au champ ont été analysées par des analyses de déviance (ANODE), à partir de modèles linéaires généralisés (GLM). Les dommages des *Lixus juncii* suivaient une loi de distributions « binomiale négative ». Les populations de pucerons ont été analysées à partir d'un modèle Multivarié (MGLM) suivant une loi de distribution “*Generalized Dirichlet multinomia*“, (GDM) avec les conseils de Matthieu Wilhem, car les espèces de pucerons s'excluent mutuellement (figure 22). Une analyse des Composantes Principales (ACP) et une classification non hiérarchique combinée à un test de Pearson a été réalisée (Bouhlef, 2023) par la méthode des centres mobiles K-means (3 clusters, 25 itérations et 120 répétitions), avec le package FactoMineR (Husson, 2025).

La comparaison des plantes symptomatiques au champ et positives au BYV a été réalisée par un test de Pearson.

Des cartes de chaleur présentées en discussion, elles représentent les corrélations et la distribution spatiale des 120 plantes à partir des données de comptages.

3. ANALYSES DES RÉSULTATS

3.1. Potentiel de biocontrôle de *M.pulcherrima* vis-à-vis des ravageurs de la betterave

3.1.1. Transfert de *M. Pulcherrima* à la betterave

Inoculation de la levure à la graine

Pour rappel, la méthode d'inoculation des graines de betteraves a été évaluée en comptant le nombre de CFU à partir des graines mises en suspension dans l'eau stérile. Des différences sont observées entre les modalités (test de Kruskal-Wallis ; p-value : 0.01*). Sur la Figure 13 la durée d'incubation influence sur la CFU estimée. Un nombre faible de CFU est observé par la temporalité après 3 minutes d'incubation avec ou sans enrobage ($5,8 \times 10^3 \pm 2,0 \times 10^3$) et sont plus élevés après 4 heures ($9,6 \times 10^4 \pm 3,4 \times 10^4$).

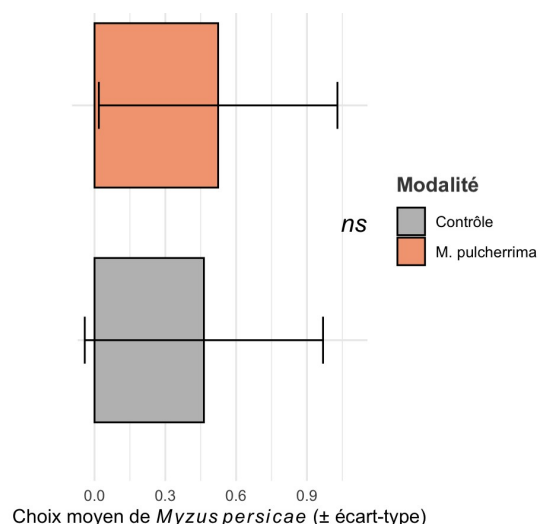


Figure 15. Distribution du choix moyen de *M.persicae* entre les plantes avec ou sans *M. pulcherrima*.

Cet histogramme présente la distribution des choix moyens réalisés parmi 41 choix observés des 65 pucerons transférés au total comprenant deux plantes de betterave inoculées avec *M. pulcherrima* (en orange) et contrôle (en gris). Le choix moyen correspond à la moyenne de la présence du puceron ailé entre les deux modalités parmi quatre observations, où les observations correspondent à des valeurs binaires relatives à la présence ou à l'absence des pucerons ailés entre deux modalités dans une cage. Le symbole *ns* figure par un test de Pearson: $\chi^2=0.11$ Df 1 p-value : 0.74.

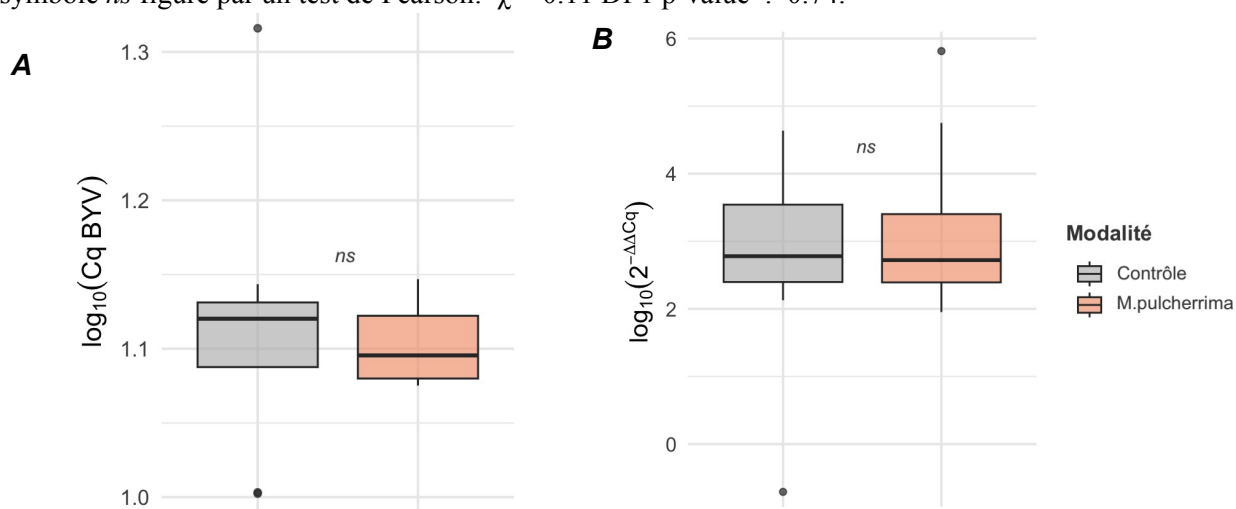


Figure 16. Distribution de la charge virale des plantes positives au BYV selon les modalités avec ou sans *M. pulcherrima*.

Cette figure, représente les distributions de la charge virale 8 plantes de la modalité contrôle et 8 de la modalité inoculée avec *M. pulcherrima* positives au BYV parmi les 57 cages où des *M. persicae* ailés virulifères ont été transférés.

A Montre la distribution du niveau des Cq de BYV déterminés par RTqPCR, **B** montre la charge virale relative $\log_{10}(2^{-\Delta\Delta Cq})$ calculée à partir des Cq BYV et COX rapportée à celle des témoins positifs (Annexe II). Les symboles *ns* figurent par des tests de Welch $\log_{10}(Cq \text{ BYV})$ $t = 0.60$, $df = 7.97$, p-value = 0.56 et $\log_{10}(2^{-\Delta\Delta Cq})$ $t = -0.59$, $df = 13.52$, p-value = 0.56

La modalité à 4h avec enrobage est plus élevée que les autres modalités et significativement différente de la modalité 1h avec enrobage (test de Dunn ; p-value : 0.02*).

3.1.1.2. Effet de *M. pulcherrima* sur la croissance et le développement des plantes

Comme représenté sur la Figure 14, le taux de germination à 7 jours ne présente aucune différence significative entre les modalités contrôle et inoculée avec *M. pulcherrima* (test de Dunn ; p-value = 0.52). En revanche, le taux de germination présente des différences significatives (test de Dunn ; p-value : 0.02*) entre les variétés de betteraves Novalina (99,28% $\pm$ 1,34) et Interressa (32,81% $\pm$ 11,01).

L'ensemble des résultats suggère que l'inoculation des graines avec la levure ne semble donc pas avoir d'incidence sur la croissance et le développement de la plante. En effet, le nombre de plantes présentes après le semis au champ, des graines incubées avec levure (84,6% $\pm$ 8,4%) et non incubées (86,7% $\pm$ 7,2%). De surcroît, les plantes ont eu une biomasse semblable racinaire et aérienne (Annexe VI).

3.2. Potentiel de biocontrôle de *M.pulcherrima* vis-à-vis des ravageurs de la betterave

3.2.1. Analyse de la modification du comportement de *M.persicae* par *M.pulcherrima*

Les objectifs de ces expériences réalisées en serre visaient à évaluer la modification du comportement des *M. persicae* – vecteurs principaux de VY – via le traitement des plantes par *M. pulcherrima*. Comme expliqué en introduction le choix des pucerons ailés constitue la source première de l'infestation au champ (Dardouri, 2018) tandis que le déplacement des pucerons aptères amplifie par la suite l'infestation (Ben-Ari *et al.*, 2015). Deux expériences ont été nécessaires afin de répondre à ces questionnements (Figure 8).

Influence de *M.pulcherrima* sur le choix de la plante hôte de *M.persicae*

Les «tests de choix» ont permis de comparer la décision ainsi que la transmission virale de *M. persicae* entre des betteraves inoculée ou non avec la levure.

Le choix moyen de *M. persicae* selon les modalités est représenté sur une échelle binaire (0-1) et correspond à la présence des pucerons entre les deux plantes transférées dans chacune des cages. Comme illustré sur la Figure 15, il n'y a pas de différences significatives visibles du choix moyen des pucerons ailés entre les plantes des modalités traitées avec *M.pulcherrima* (via graines seules et graines puis foliaire) et contrôle (test de Pearson, p-value 0.74).

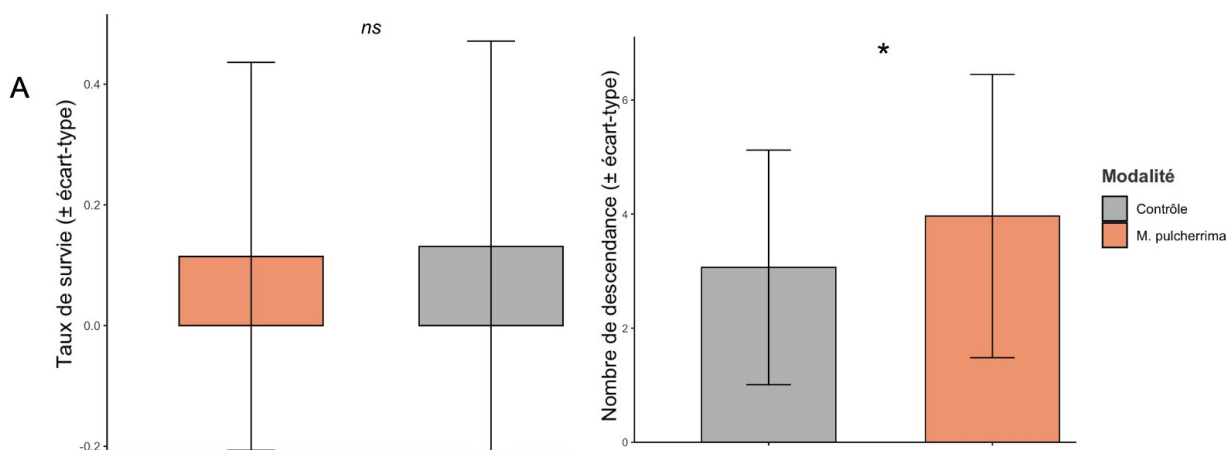


Figure 17. Influence de *M. pulcherrima* sur fitness de *M. persicae*

Cette figure présente les niveaux de performance de *M. persicae* ailés selon les modalités avec ou sans *M. pulcherrima*. Les comptages ont été réalisés 10 jours après transfert des pucerons soumis à une prise alimentaire forcée confinée sur la face inférieure des plants de betterave au stade BBCH 12. A représente le taux de survie. B représente le nombre de descendance entre les pucerons appartenant à la modalité contrôles (représenté en gris) et traitement (représenté en orange).

Les symboles * $< \alpha$ et ns $> \alpha$ figurent par deux tests de Kruskal-Wallis

Taux de survie $\chi^2 = 0.075$ Df 1 P-value : 1 1 0.78 (ns)

Descendance : $\chi^2 = 4.01$ Df 1 P-value : 0.0451 (*)

Tableau 8. Synthèse des analyses de variance des données de comptage

Variable descriptives	χ^2	Degrés de liberté	p-value
Population des pucerons	3.64	1	0,46
Nombre de pontes de <i>Lixus juncii</i>	2.63	1	0.10

Les données des comptages des 240 plantes ont été analysées par un test de Wald des suivant des GLM. Les données de comptages des populations de pucerons ont été analysés en générant un modèle multinomial généralisé GDM. Ce modèle est plus flexible, peut être utilisé lorsque les nombres de catégories présentent à la fois des corrélations positives et négatives (Zhang et al., 2017). C'est pourquoi, cette méthode d'analyse a été préconisée (Matthieu Wilhem, communication personnelle), du fait que les populations de pucerons n'étaient pas indépendantes et s'excusent mutuellement (Figure 22). Le nombre de trous de pontes a été analysé en générant un GLM suivant une loi de distribution théorique « binomiale négative » (Annexe V)

De plus parmi les 16 plantes positives par RTqPCR, les Cq de l'amplification de BYV (test de Welch ; p-value = 0.38) ainsi que la charge virale relative (test de Welch ; p-value = 0.73), étaient similaires entre les deux modalités (Figure 16).

Influence de *M.pulcherrima* sur la performance de *M.persicae*

Les «tests de performances» ont permis de comparer le succès reproductif et la survie des *M. persicae* entre soumis à une prise alimentaire forcées entre les betteraves des modalités traitement et contrôles. Sur la Figure 17.a, le taux de survie des pucerons, était semblable (test de Kruskal-Wallis ; p-value : 0.78), entre les modalités contrôle (13 %±34) et traitement (11% ±32). Le nombre de descendance entre les modalités était toutefois significativement différent (Kruskal-Wallis ; p-value = 0.045*), contrôle (3,1 ±2,4) et traitement (4,0 ±2,3), comme représenté sur la Figure 17.b. La transmission virale a été identique (test de Pearson, p-value : 0.78) entre les modalités, contrôle (14%) et traitement (16%) (données non présentées).

3.2.2. Expérimentations au champ

Une expérience au champ, a été réalisée, dans le but d'étudier, si le traitement par *M. pulcherrima* à la graine modifie-t-il les populations de ravageurs et d'auxiliaires et/ou confère-t-il une protection généralisée contre les VY ? Pour se faire un monitoring sans *a priori* a été réalisé sur 240 plantes sélectionnées à la levée.

Influence de *M.pulcherrima* sur les populations d'insectes

Afin d'évaluer l'influence de la levure sur les populations de ravageurs et d'auxiliaires, un comptage a été réalisé lors de la période de présence des ravageurs (Figure 1) ainsi qu'une analyse destructive par aspirations des 240 plantes en fin d'expérience.

Les données de comptages sur l'ensemble de la saison culturale, n'ont pas montré de différences significatives entre les modalités. Comme résumé dans le tableau, les comptages des populations d'*A.fabae* ailés et aptères ainsi que de *M. persicae* ailés et aptères n'ont montré aucune différence (Test de Wald, p-values : 0,46). L'analyse des composantes principales et la classification par la méthode de K-means des populations de pucerons et d'auxiliaires, n'ont pas montré de différences significatives entre les modalités (test de Pearson ; p-value = 0.23). De même que les trous de pontes de charançons n'ont pas présenté de différences entre les modalités (Annexe V) .

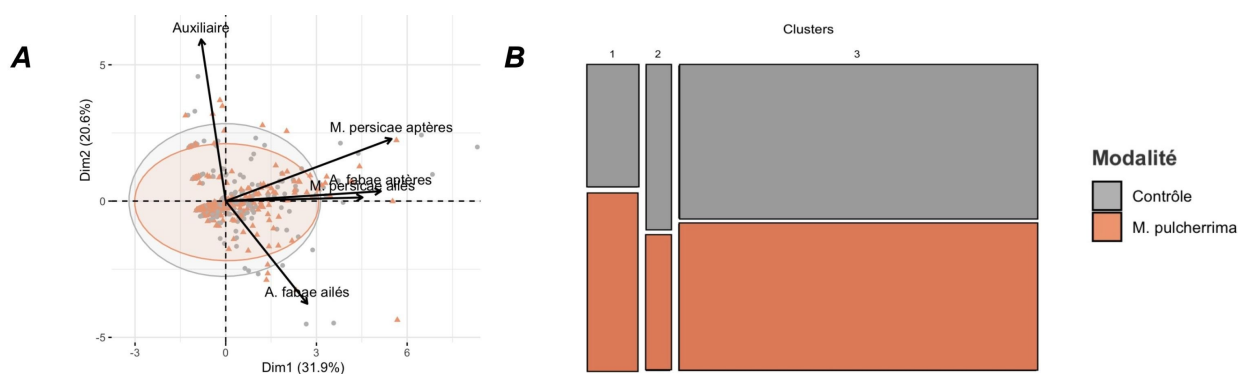


Figure 18. Analyse des composantes principales des observation au champ selon les modalités

A Représentation des données de comptages des populations de pucerons et d'auxiliaires sur un plan en deux dimensions, les flèches correspondent aux variables observées. **B** Représente l'inférence des attributions à 3 clusters parmi observations représentées sur l'ACP obtenue par les méthodes des k-means. La densité des carrés représente le nombre des observations auxquelles sont attribuées à un cluster. La comparaison entre les modalités ne montre pas de différences significatives, d'après un test de Pearson $\chi^2 = 2.93$ df = 2, p-value = 0.23.

Tableau 9. Tableau de synthèse des aspirations au champs

Condition	Plot	Altise	Araignée	Coccinellidées	Chrysope	Chenille	Diptères	Lixus	Cicadellidées	Cixiidées*	Pucerons
Contrôle	1	469	2	1	7	0		0	58	1 <i>P. leporinus</i>	2
Contrôle	2	358	1	0	20	1		3	58	0	0
Contrôle	3	383	2	0	13	0		2	112	0	2
<i>M. pulcherrima</i>	1	519	0	0	8	0		2	119	0	2
<i>M. pulcherrima</i>	2	442	0	1	11	0		4	84	1 <i>P. leporinus</i> 2 <i>R. panzeri</i>	3
<i>M. pulcherrima</i>	3	284	2	2	18	0		1	87	0	0

Ce tableau résume, le dénombrement des d'auxiliaires et ravageurs des aspirations entre les 3 sous-parcelle des modalités Contrôle et inoculées via *Metschnikowia pulcherrima*. Les aspirations ont été réalisées sur 40 plantes par sous-parcelle. La durée était d'une seconde pour chacune des feuilles de chaque plante. *Pentastiridius leporinus* et *Reptalus panzeri* ont été identifiés selon les critères de Holzinger *et al.*, 2003 avec l'appui de Floriane Bussereau. Les Cixiidées ont été transférées à l'équipe de virologie et sont ressorties négatives au SBR. (Le SBR n'a été constaté dans la zone agricole durant la saison culturale)

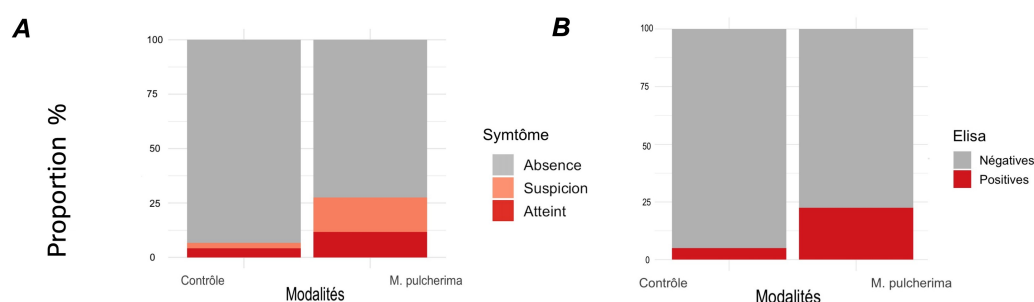


Figure 19. Proportion en pourcentage des plantes positives au BYV parmi les modalités

A Figure la répartition des symptômes au BYV parmi les 240 plantes sélectionnées, sains (gris), suspension (orange) atteinte (rouge). **B.** Figure les plantes positives (rouge) et celles négatives (gris) au BYV à l'issue des analyses ELISA. Les proportions ont été comparées avec un test de Pearson et montrent des différences significatives : les plantes symptomatiques (χ^2 : 19,04, df = 2, p-value corrigée = $7,34.10^{-5}$) et positives (χ^2 : 14.054, df = 1, p-value corrigée = $6,8.10^{-4}$) au BYV.

Les aspirations de chaque micro-parcelle ne présentent pas de différences significatives du nombre des Altises (test de Kruskal-Wallis, p -value : 0,89) et des Cicadellidées (test de Kruskal-Wallis, p -value : 0,40) (Tableau 8).

Suivi des symptômes viraux

En complément, un phénotypage des symptômes sur une échelle catégorielle (0-3) et une analyse moléculaire de feuilles symptomatique ont été opérés, afin d'étudier si le traitement avec *M. pulcherima* influence les nombre de plantes positives au VY.

Les résultats suggèrent que l'incidence au BYV était supérieure parmi les plantes de la modalité inoculées par la levure que celles contrôlées. Les plantes symptomatiques présentent des différences significatives entre les modalités (test de Pearson p -value : 0.0007*** ; Figure 19.a). De même que les plantes positives au BYV par ELISA diffèrent significativement entre les deux modalités (test de Pearson, p -value =0.0005*** ; Figure 19.b).

3.3. Potentiel de biocontrôle du sarrasin associé à la betterave vis-à-vis des ravageurs de la betterave

3.3.1. Analyse de la modification du comportement des ravageurs par le sarrasin

Comme illustré sur la Figure 20, les résultats obtenus à partir des tests de dommages issues d'une seule répétition biologique et des tests de choix de deux répétitions biologiques indépendantes ne semblent avoir révélé une modulation du comportement des ravageurs en présence ou l'absence de sarrasin associé à la betterave.

Influence de sarrasin sur les dommages des altises

Comme représenté sur la figure 20.a, les altises semblent avoir montré un évitement de la modalité des betteraves associées avec le sarrasin. Lors de la première expérience, les betteraves seules présentaient en moyenne 14.32 ($\pm$ 19.22) des perforations, contre 8.24 ($\pm$ 11.35) pour les betteraves et le sarrasin.

Influence de sarrasin sur le choix de la plante hôte de *M.persicae*

Le sarrasin a exercé d'influence sur le choix et mais sans différence sur le nombre de descendance. Comme visible la figure 20.b, les pucerons ont effectués un choix singifiquement différents (test de Pearson ; p -value : $9.44.10^{-7}$) entre les modalités, Betterave seule (0.75) et Betterave-Sarrasin (0,25. Cependant, le nombre de descendances était identique (test de Kruskal-wallis p -value : 0.31) entre les modalités Betterave seule(4.31 $\pm$ 4.52) et Betterave-Sarrasin (5.87 $\pm$ 6.07) comme représenté sur la la figure 20.c.

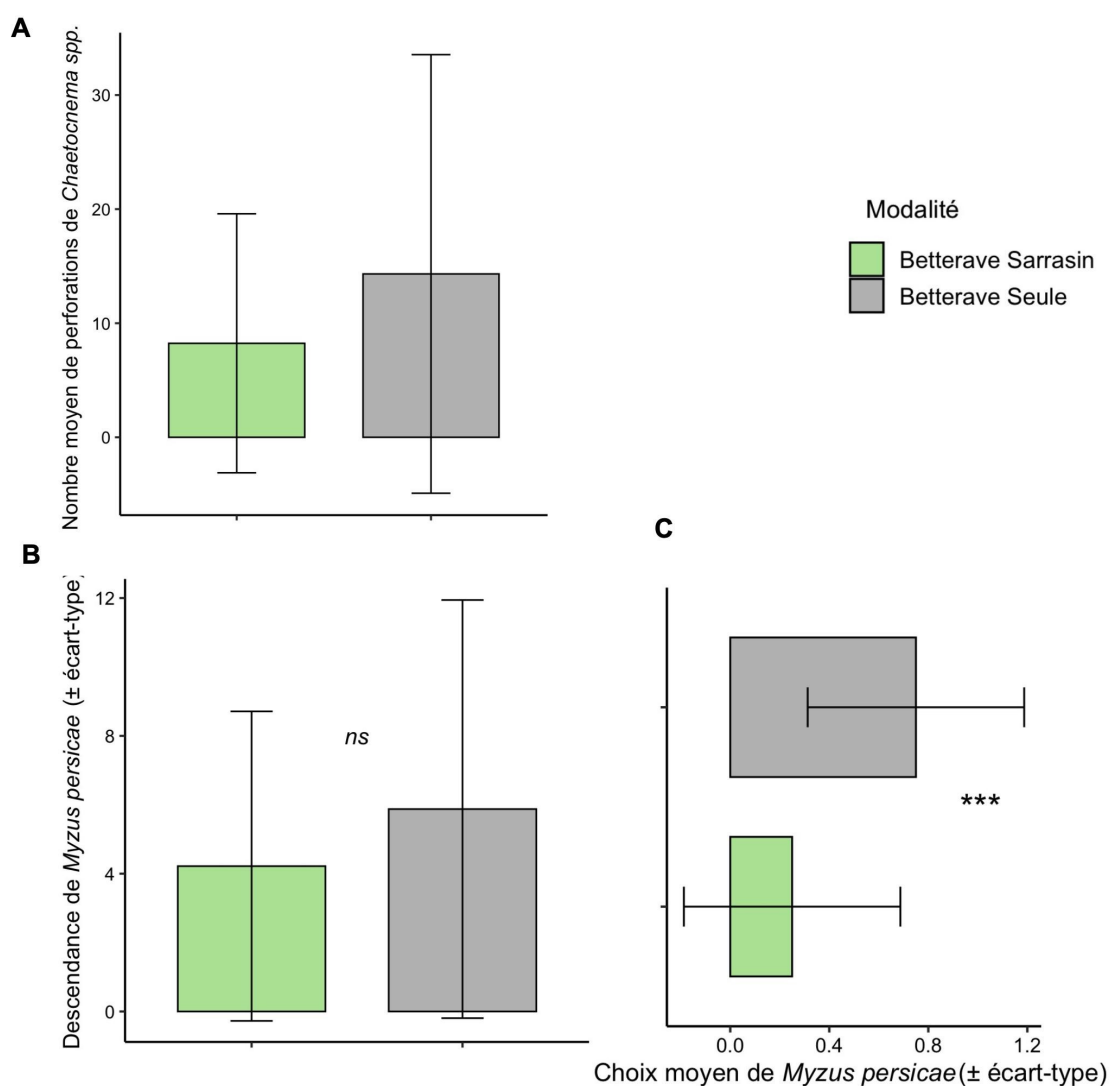


Figure 20. Test de dommages des *Chaetocnema* spp et test de choix des *M. persicae* des expériences push-pull du sarrasin en association avec la betterave.

Parmi les modalités betteraves seules (en gris) et Betterave-Sarrasin (en vert), les figures représentent les données suivantes :

La figure présente le nombre de perforations des altises de la betterave entre les modalités. Les données sont issues d'une seule répétition (**A**)

La figure présente la descendance moyenne des pucerons verts du pêcher entre les modalités (**B**) Les données issues des deux répartitions indépendantes ne montrent pas de différences significatives. Le symbole *ns* figure par un test de Kruskal-wallis: $\chi^2 = 24.038,4$ Df 1 p-value : 0.3085.

La troisième figure présente le choix moyen des pucerons *M. persicae* (C). Les données issues des deux répartitions indépendantes présentent des différences significatives entre les modalités. Le symbole *** figure par un test de Pearson: $\chi^2 = 24.038,4$ Df 1 p-value : $9.44.10^{-7}$.

4. DISCUSSIONS

4.1. Transfert de *M. pulcherrima* à la betterave

4.1.1. Protocole d'inoculation de *M. pulcherrima* à la betterave

Méthodes de dénombrement de *M. pulcherrima* par agitation des graines

La méthode de mise en suspension des levures ayant adhéré à la graine était plus adaptée qu'un broyage des graines, qui aurait entraîné de la mortalité cellulaire (Anaïs Feuillet, communication personnelle). Nous avons essayé d'estimer la concentration cellulaire par cytométrie de flux. Or, du fait que l'enrobage se désagrégeait, les marqueurs fluorescents de mortalité cellulaire se liaient à la cellulose ce qui entraînait une saturation et empêchait l'estimation. Le dénombrement des CFU en milieu solide était donc nécessaire. Celui-ci a été réalisé par la méthode ISO 7218 étant utilisée couramment en interne. Cette méthode de dénombrement n'est toutefois applicable que sur un nombre de colonies restreint (entre 30 et 300) et sous-estime le nombre réel de colonies (Anaïs Feuillet, communication personnelle). Les colonies étaient facilement discernables *in vitro*, puisque seulement deux autres organismes sont connus pour synthétiser la pulcherrimine, étant un chelateur pigmenté rouge avec le fer (Gore-Lloyd *et al.*, 2019).

Par ailleurs, le calcul de la CFU, a dû être fait manuellement, étant moins précis et sujet à des erreurs, car le dénombrement automatisé avec une macro-instruction Fiji n'a pas été optimal.

Choix de la méthode d'inoculation des graines de betterave

Dans un premier temps, il a été convenu d'appliquer la levure à la graine. En effet, le laboratoire *via* des projets antérieurs a accumulé des connaissances et établi des protocoles. Il a donc fallu adapter le procédé d'incubation aux semences de betterave. La méthode d'incubation de 4 heures avec enrobage est la plus pertinente, malgré un manque de répétition et une forte variabilité due à l'enrobage. Comme visible sur la figure 13, l'enrobage requiert un temps de ré-imbibition et se désagrège, ce qui peut expliquer la variabilité des estimations des CFU par la suite.

Toutefois, à l'issue de la première expérience, il a été décidé d'appliquer la levure de façon concomitante au transfert de pucerons. Du fait qu'il n'y avait pas de modulation du choix du puceron observable à l'issue du premier test de choix.

La possibilité qu'il n'ait pas eu de transfert de la semence vers plante a été évoqué. Puisque, le genre *Metschnikowia* abonde dans la phyllosphère mais *a priori* pas dans les graines (Communication personnelle, Marie Simonin).

Effet de biocontrôle de *M. pulcherrima* sur la fonte de semis

Le traitement des graines par la levure n'a pas eu d'effet significatif sur la levée des betteraves en serre (figure 14) et au champ (Annexe VI). toutefois, la variété Interressa biologique présentait une fonte de semis après une imbibition de 4 heures avec le milieu YPG mais restant saine dans l'eau stérile. L'agent causal n'a pas été identifié sur des plantules semées (en milieu Murashige et Skoog et dans le terreau). Les séquençages mettaient en évidence des champignons saprophytes. Comme visible sur la figure 14, les plantes incubées avec *M. pulcherrima* montrent une réduction de la fonte de semis. il pourrait être pertinent d'approfondir l'effet de *M. pulcherrima* vis-à-vis des fontes de semis. En effet, il a été montré que des levures endophytes de la betterave ont un effet antagoniste sur *Rhizoctonia solani* et améliorent la croissance des plantes (El-Tarabily, 2004).

Questionnement de la rémanence de *M. pulcherrima*

Metschnikowia pulcherrima n'a pas eu d'effet significatif sur la biomasse aérienne et racinaire (Annexe VI) 3 mois après le semis. L'absence d'effet sur la croissance peut nous interroger sur la rémanence des levures. En effet, même si la viabilité des levures a été validée lors du semis et lors de la pulvérisation, *M. pulcherrima* n'a pas été isolée à partir des feuilles à 1 et 3 mois et des racines à 3 mois post semis. Cela coïncide, avec le fait que *M. pulcherrima* APC1.2 n'a pas été réisolée 2 semaines post inoculation des graines (Anaïs Feuillet, communication personnelle). Aussi, la faible rémanence du Noli® a été soulevée par la Directrice Générale de Kopert France lors d'un échange au SIVAL 2025. Ce produit de biocontrôle n'est plus disponible sur le marché, car il nécessitait d'appliquer hebdomadairement et cela modifiait les itinéraires culturaux (Gisèle Broquier, communication personnelle).

L'environnement peut avoir une influence sur la rémanence de *M. pulcherrima* à la betterave. En effet, l'abondance et l'efficacité de *M. fructicola* appliquée à la vigne est supérieure à 15 °C, (Altieri *et al.*, 2023). Mais aussi Glushakova et Chernov ont mis en évidence que la abondance du genre *Metschnikowia* est dynamique et abonde dans la phyllosphère lors de la reprise végétative.

Questionnement de l'effet biostimulation de *M. pulcherrima*

Du fait des limites de la méthode d'isolement, il est aussi possible que *M. pulcherrima* soit présent dans le pivot racinaire de la betterave ; étant un organe de réserve riche en saccharose (Anaïs Feuillet, communication personnelle).

Puisque *M. pulcherrima* abonde dans la carposphère (Stanevičienė *et al.*, 2021) et les nectaires des fleurs (Sobhy *et al.*, 2025). Ainsi, il est probable que *M. pulcherrima* induit un priming dans la plante. En effet, il a été démontré que *M. pulcherrima* synthétise *in vitro* de l'IAA à des concentrations importantes (47,38 ng/mL ; Alexandre Glauser, Clara Chevalley, communication personnelle), ainsi qu'améliore la croissance et le développement du blé semé au champ (Josep Massana Codina, communication personnelle). On peut observer d'ailleurs que la micro-parcelle de betteraves a une meilleure vigueur que les betteraves aux alentours.

4.2. Synthèse des résultats de l'évaluation des stratégies de lutte intégrée.

Les expériences réalisées visaient à investiguer le potentiel de *M. Pulcherrima* en tant que microorganisme de biocontrôle et du sarrasin comme plante compagne, vis-à-vis des ravageurs et de la transmission virale. Ainsi, l'hypothèse principale de départ selon laquelle l'inoculation des plantes par la levure aurait un effet dépressif sur le comportement et la transmission virale par *M. persicae* a été infirmée par les résultats réalisés en serre et au champ. Ce résultat contraire aux résultats attendus sera discuté ensuite. Ces résultats figurent les premières études de l'influence d'une levure sur les ravageurs de plantes. De plus, les résultats réalisés en serre concernant l'association du sarrasin à la betterave sont conclusifs sur la réduction du nombre de dommages provoqués par *Chaetocnema spp.* et *M. persicae*, ce qui sera également étudié.

4. 3. Influence *M. pulcherrima* sur le comportement de *M.persicae* en serre

4.3.1. Effet de *M. pulcherrima* sur le choix des pucerons

Les résultats actuels suggèrent que *M. pulcherrima* n'a pas d'incidence sur le choix du puceron (figure 15). Durant les expériences sur un total de 65 cages, 42 pucerons viables ont effectué un choix. Ces données manquantes sont en cohérence avec les observations de Marie Pauli (communication personnelle). Le non-choix peut être expliqué par un stress ou par le fait que les populations de *M.persicae* ailés possèdent une espérance de vie limitée, Tableau 1.

4.3.2. Effet de *M. pulcherrima* la transmission virale des pucerons

Décision de transmettre le BYV au betterave lors des test de choix

Le choix de transmettre le BYV a été préféré à celui du BChV. En effet, le virus de la jaunisse BYV qui affecte fortement les rendements comme représenté en (Annexe VI) et les symptômes au BYV apparaissent 3 semaines après la transmission tandis que ceux du BChV apparaissent à 2 mois (Cécile Brabant, communication interne).

Comparaison de la transmission virale

L'analyse des émissions des RTqPCR montre 16 plantes positives au BYV. Parmi ces plantes positives, il n'y a pas eu de différences significatives du niveau des Cq de BYV et de la charge virale relative. La méthode des $2^{-\Delta\Delta Cq}$ a été utilisée pour normaliser les données, puisque que les extractions n'étaient pas ramenées à une même concentration. Nous pouvons donc estimer que le traitement des betteraves par *M. pulcherrima* ne modifie pas la charge virale parmi les plantes contaminées.

Une plante témoin de la première expérience montre une contamination au BYV (Annexe II). Il est donc possible qu'il ait eu des contaminations croissées lorsque les plantes ont été sorties des cages suite au traitement à l'acétamipride. En effet, les populations sauvages de pucerons présente une tolérance à cet insecticide (Cécile Brabant, communication). Au cours des expériences, un traitement à l'acétamipride n'a pas été suffisant pour réguler l'ensemble des populations et un deuxième a donc été réalisé.

Reflexion sur le manque de transmission du BYV au plantes

La première expérience présentait une transmission de 51% des pucerons virulifères transférés. Cela est proche des observation de Limburg *et al.*, 1997 et Khechmar *et al.*, 2024, où l'efficacité de transmission pour BYV est estimée à 60 % pour les *M. persicae* aptères en condition contrôlée. La transmission au BYV à une seule plante lors de la seconde expérience ne semble pas être expliquée par le prélèvement ou le jeûne puisque *persicae* est affectée significativement qu'à partir de 12h de jeûne (Limburget *al.*,1997). Mais plutôt par les conditions environnementales ayant pu influencer l'acquisition des pucerons au BYV et la tolérance des plantes au BYV.

Il est à noter que ce fut la première fois que des tests de choix ont été réalisés avec des pucerons virulifères au sein de l'équipe. Des préconisations pour les prochaines expériences seront de régénérer les plantes banques de pucerons virulifères afin de maintenir la qualité sanitaire des élevages. Puisque les pucerons morts présentaient des moisissures, probablement dû à un champignon entomopathogène. De valider au cours du temps que les plantes restent positives au VY. Mais aussi de s'assurer que le programme climatique respecte que la *température maximale désirée* en période de forte chaleur.

4.2.3. Effet de *M. pulcherrima* sur le fitness de *M. persicae*

Les résultats issus des tests de performances infirment l'hypothèse que l'inoculation par *M. plucherrima* a un effet dépressif sur les populations de pucerons.

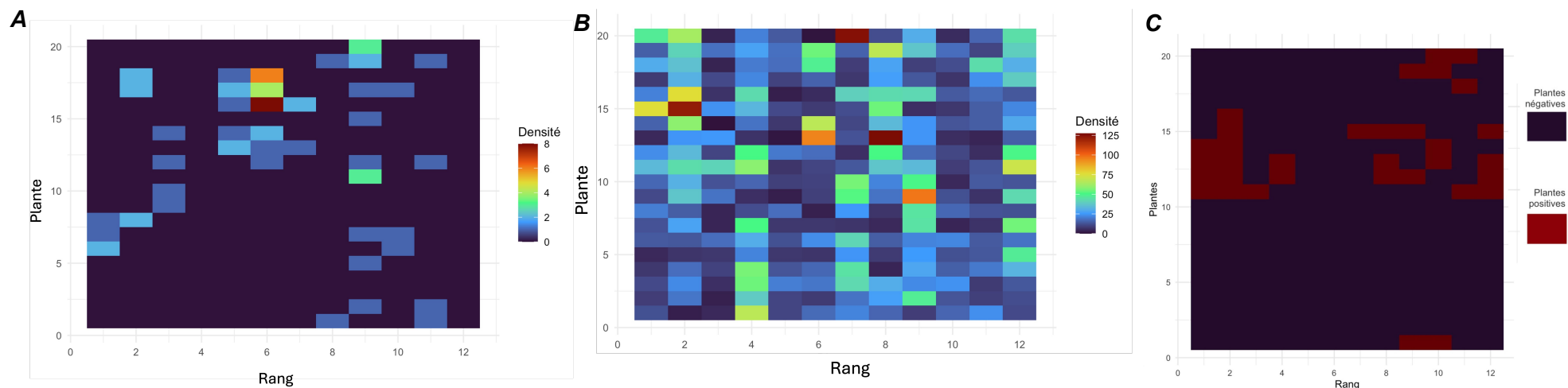


Figure 21. Carte thermique de la distribution spatiale des comptages parmi les plantes de la parcelle

Sur cette figure représente des cartes schématisées de la parcelle, chaque plante est représentée par un carré, positionné selon le couple de coordonnées (x,y) qui déterminait sa position réelle sur la parcelle. Chaque rectangle correspond la valeur des observations parmi les 240 plantes sélectionnées et à laquelle est attribuée une couleur dont l'intensité varie en fonction du nombre selon une échelle allant du bleu au rouge.

Cette figure représente les comptages de la somme des auxiliaires observés à travers la parcelle (**A**).

Cette figure représente la distribution des comptages de *Myzus persicae* aptères à travers la parcelle (**B**).

La troisième figure montre la disposition des plantes déterminées positive au BYV (en rouge) par analyse moléculaire (ELISA) à travers la parcelle (**C**).

En effet, les pucerons soumis à une prise alimentaire forcée sur des plantes traitées avec la levure augmentent de façon significative le nombre de descendances (figure 17). Cela peut être mis en relation, avec le fait que les Hémiptères suceurs de sève hébergent des endosymbiontes obligatoires, comme des levures, pour compenser un régime alimentaire déficient en nutriments essentiels (Liljesthröm *et al.*, 2017). Notamment les levures Ascomycètes du genre *Kurtzmaniella* (anciennement *Candida* ; Lopes *et al.*, 2019) sont hébergées par les cicadelles du riz *Nilaparvata lugens* (Pang *et al.*, 2012).

4.2.4. L'analyse des essais au champ

analyse des populations d'insectes au champ

Dans l'ensemble, les population d'insectes ne semblent pas avoir été modulées de façon significative entre les modalités avec ou sans levure. Les données de comptages et d'aspirations suggèrent que l'inoculation des betteraves par *M. Pulcherrima* ne semble pas avoir modulé l'abondance des populations de pucerons (Figure 18, Tableau 8), d'altises (Tableau 9) et de charaçons (Annexe VII ; Tableau 9) ainsi que les auxiliaires (Figure 18).

Influence de l'environnement sur les différences de l'incidence au BYV observées

Comme représenté montre que les auxiliaires (Figure 21.a), mais aussi les *M. persicae* (Figure 21.b) et les plantes atteintes au BYV (Figure 21.c) étaient préférentiellement situés côté nord. Ce qui montre une influence du design expérimental sur les différences significatives de l'incidence virale entre les modalités.

Influence de l'environnement sur les différences de l'incidence au BYV entre les modalités

Comme représenté sur la figure 22, il existe une corrélation positive entre les plantes positives au BYV par ELISA avec la somme des *M. persicae* aptères. De même, l'abondance des pucerons aptères est significativement plus importante parmi les plantes positives au BYV au champ (test de Wald, p-value = $4,61.10^{-7}$, données non montrées). L'analyse des données confirme donc que *Myzus persicae* est le principal vecteur des jaunisse virales et l'importance des pucerons aptères dans les dynamiques épidémiologiques (Ben-Ari *et al.*, 2015). De plus, la figure 22, met les influences les interactions entre les pucerons virulifères. Les populations d'*A. fabae* ne montrent pas de corrélation avec le nombre de plantes positives au BYV, cela est en cohérence avec Limburg *et al.*, 1997 et Ruus, 2020.

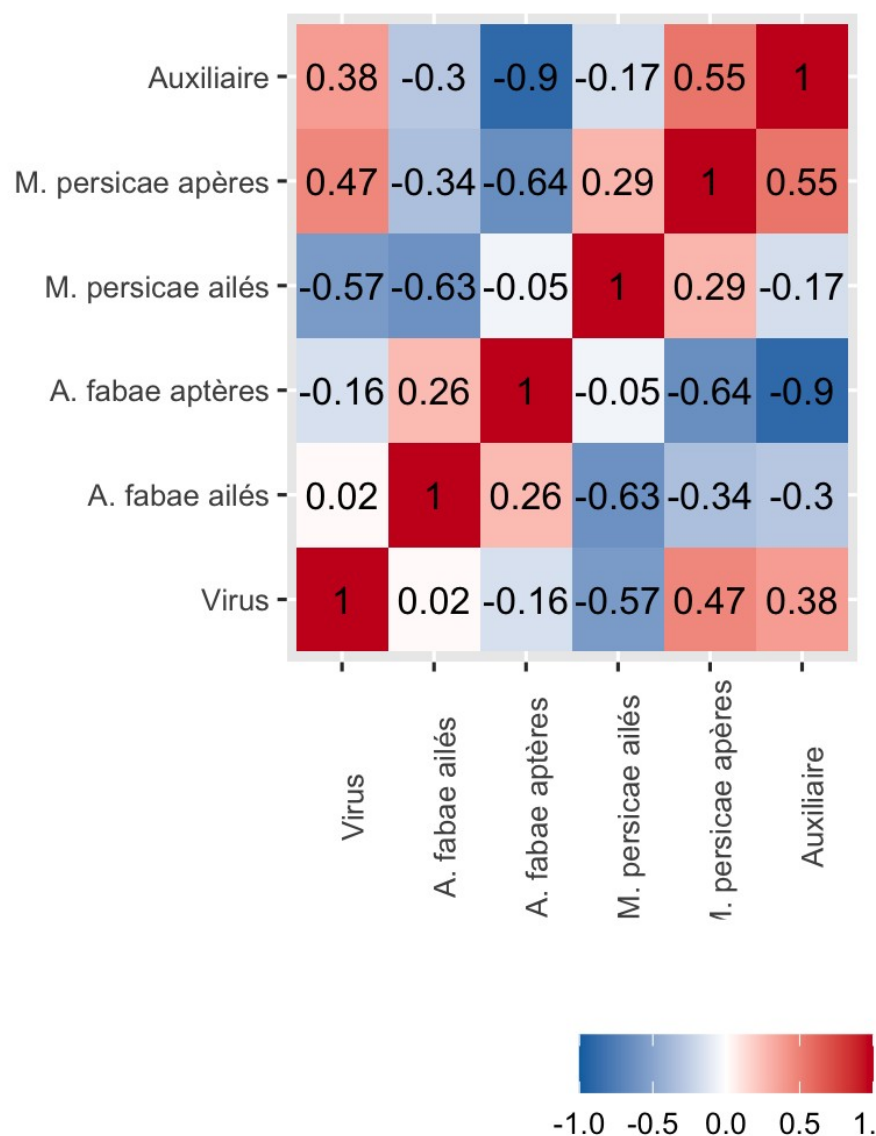


Figure 22. Tableau de chaleur des corrélations entre la somme des populations de pucerons, d'auxiliaires et des plantes positives BYV

Ce tableau illustre les coefficients de corrélations des niveaux de présence, sur la parcelle d'expérimentation, entre le virus BYV, la somme des différentes populations de pucerons et des auxiliaires.

L'échelle de couleur utilisée représente le niveau de liaison des variables : plus la couleur du coefficient tend vers le rouge, plus la corrélation est fortement positive, ce qui signifie une présence conjointe des deux variables étudiés. A l'inverse, une couleur bleu intense indique une corrélation fortement négative : la présence d'un organisme est majoritairement synonyme de l'absence de l'autre. Enfin, une couleur neutre (vers le blanc) indique une absence de corrélation et donc une absence de liaison entre les variables observés.

Mais aussi que *M.persicae* et *A.fabae* s'excluent et ceci coïncide avec les observations de Cécile Brabant. Ces dernier n'entraînent pas les mêmes symptômes. En effet, en grand nombre les colonies d'*A. fabea* crispent et dessèchent les feuilles de betterave tandis que *M.persicae* entraîne un flétrissement et une sénescence (Greene, 2009; Ruus, 2020, Cécile Brabant)

4.3. Influence du sarrasin sur le comportement de *Chaetocnema* spp. et *M.persicae*

Bien que ces résultats nécessitent une étude approfondie, les résultats actuels suggèrent que la l'association du sarrasin avec la betterave semble présenter un effet *bottom up*⁶ sur les altises et les pucerons. Il y a une diminution du nombre de perforations provoqué par les altises sur les modalités de betteraves associées aux sarrasin. Ce qui est en accord avec les observations des agriculteurs Extenso que le sarrasin associé à la betterave peut servir de « Plante répulsive et/ou barrière » *via* des stimuli olfactifs et/ou visuels.

La diminution des ravageurs en milieux non contrôlés peut également être due à un effet indirect du sarrasin utilisé, comme plante compagne de la betterave sur les populations de ravageurs.

- Le sarrasin possède également servir de « plante réservoir »(Caravel *et al.*, 2020) *via* le pollen ou le nectar (Amy *et al.*, 2018) ou de « plante reservoir » (Caravel *et al.*, 2020 ; Parvaiz et Khan, 2024) des auxiliaires, ce qui permet une régulation des ravageurs de la betterave.
- Mais aussi, le sarrasin possède également un « effet assainissant » (Caravel *et al.*, 2020). En effet les effets alléopatiques du sarrasin sont connus pour limiter la levée des adventices(Vieites-Álvarez *et al.*, 2024) – *ce qui peut expliquer le manque d'effectifs et une levée hétérogène lors de la première répétition* – . La gestion des adventices constitue un levier de la lutte intégrée, en limitant les réservoirs des VY et améliore les rendements (Dubois et al., 1993) et en limitant les ressources alimentaires disponible pour les ravageurs.Les adventices comme le liseron (*Senecio vulgaris*) constituent des réservoirs de ravageurs et des VY de la betterave sucrière. Les observations de Dolja en 2003 montrent que 120 plantes sont hôtes du BYV et les analyses ELISA réalisés par l'équipe de virologie coïncident.Les altises exploitent également diverses adventices (Vráblová et Tóth, 2001 ; EPPO,2024, observation terrain).

⁶ Effets de l'environnement abiotique et/ou des organismes des niveaux trophiques inférieurs agissant en cascade sur les organismes des niveaux trophiques supérieurs (Han et al., 2022)

La transmission du BYV et BChV n'a pas été démontrée par analyses ELISA dans les conditions d'infections artificielles (Cécile Brabant et Nathalie Dubuis). Cela nous amène à supposer que le sarrasin n'est pas un hôte des VY. Ainsi, les données et les connaissances, suggèrent que l'utilisation du sarrasin en association avec la culture de betterave à sucre peut avoir des effets «multi-services» (Caravel *et al.*, 2020) vis-à-vis des populations de ravageurs et sur l'occurrence des jaunisse virales.

5. CONCLUSION

En conclusion, ce rapport visait à évaluer l'efficacité de nouvelles méthodes de gestion intégrée, par l'utilisation de la levure *Metschnikowia pulcherrima* ou du sarrasin (*Fagopyrum esculentum*). Dans le but de répondre à la problématique suivante : Dans quelle mesure ces dernières peuvent constituer une stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs et les virus de la jaunisse de la betterave ?

Les résultats en serre ne montrent pas la modulation du choix et de la transmission virale de *M. persicae* entre les modalités avec ou sans levure. La charge virale ne semble pas également avoir été modifiée par le traitement à la levure. En revanche l'application de *M. pulcherrima* augmente de façon significative le nombre de descendances, des pucerons ailés soumis à une prise alimentaire forcée. Des limites méthodologiques subsistent toutefois quant à l'affirmation d'un non-choix et d'une augmentation du fitness par *M. pulcherrima*, due majoritairement à des contaminations environnementales et une variabilité importante au sein des modalités. Les résultats au champ ne montrent pas de modifications des populations d'insectes auxiliaires comme des ravageurs.

Le traitement foliaire semble être plus approprié que l'imbibition des graines. Il serait pertinent d'appliquer *M. pulcherrima* dans l'enrobage puisque la méthode d'inoculation *via* les semences est prometteuse pour une utilisation à grande échelle. C'est pourquoi, les travaux de recherche d'Agroscope *via* le projet Promet œuvre pour développer des solutions innovantes. La réalisation d'une RTqPCR spécifique à la synthèse de la Pulcherrimine pourrait être envisagée pour attester de la rémanence de la levure.

L'utilisation du sarrasin en association à la culture de la betterave nécessite d'autres expériences de façon à conclure à un effet direct contre les bioagresseurs de la betterave. Les services nourriciers et assainissant du sarrasin méritent d'être étudiés également. De plus pour dissocier la répulsion olfactive de la saturation visuelle du sarrasin en association à la betterave, des analyses par olfactométrie seraient intéressantes à réaliser en complément.

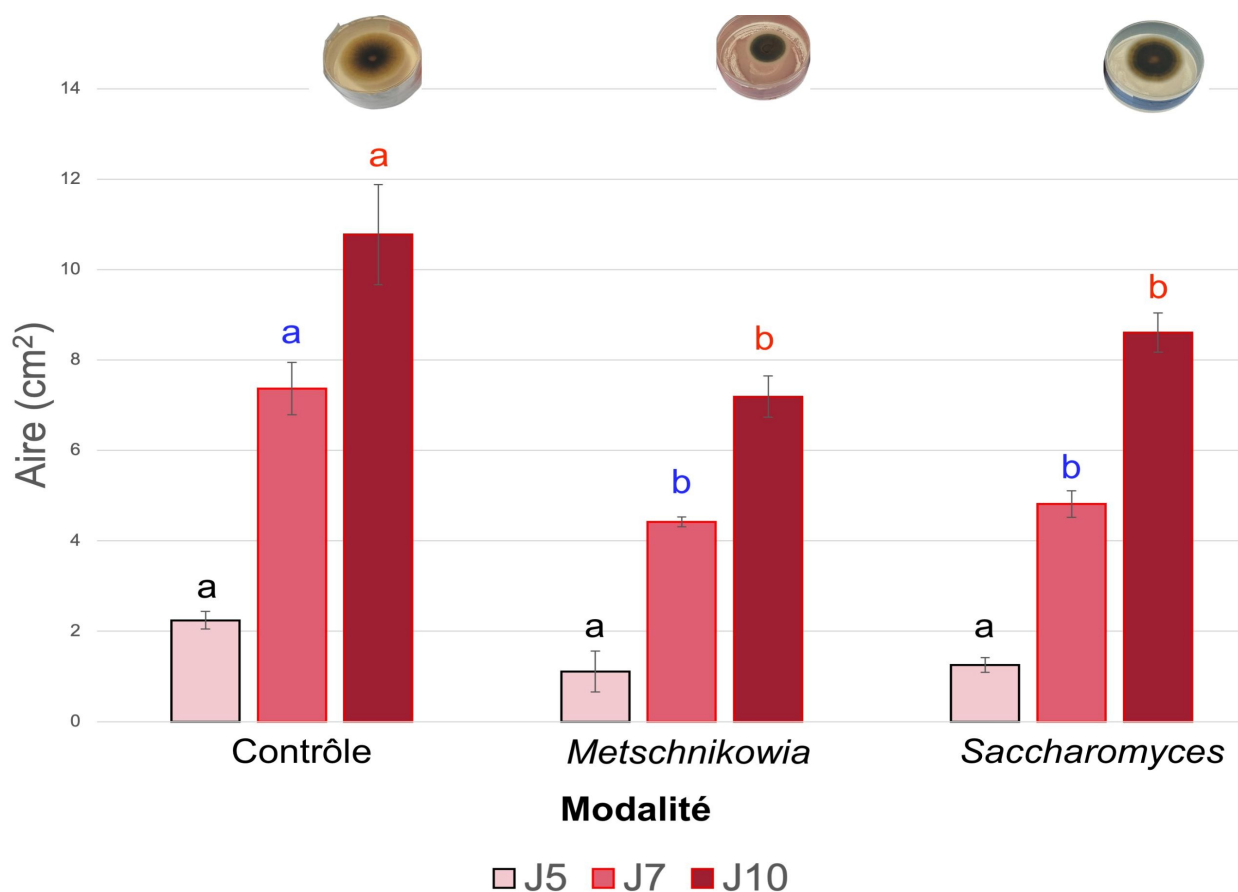


Figure 23: Inhibition de la croissance de *Cercospora beticola* à distance par *Metschnikowia pulcherrima* et *Saccharomyces cerevisiae*

Cette figure montre l'inhibition de la croissance de *C. beticola* 601 à distance. Un explant de *C. Beticola* de 0,5 cm de diamètre a été déposé dans une boîte de Pétri et chaque modalité comportait 6 répétitions. La modalité contrôles comportait deux explants de *C. beticola*. Les modalités avec levures comportaient 20µl d'un milieu YPG ramené à un DO 1 *M. pulcherrima* APC1.2 et *S.cerevisiae*.

On observe que les levures réduisent la croissance de *C. beticola*. Les lettres ont été déterminés d'après un test tukey dont les paramètres sont t 3.45 et de degré de liberté 3

6. OUVERTURE

Les résultats présentés au cours de ce rapport, semblent montré que l'inoculation des plantes par la levure ne semble pas présenté d'incidence sur la croissance et le développement des betteraves. Cela suggère que l'application de *M. pulcherrima* à la betterave pourrait être pertinente vis-à-vis des maladies fongiques. En effet, les levures du genre *Metschnikowia* possèdent des potentiels d'application, contre les champignons phytopathogènes en pré et post récolte (Freimoser *et al.*, 2019).

La cercosporiose, est une maladie causée par *Cercospora beticola*. Cette maladie se caractérise par les taches foliaires entre 2–3 mm brunâtres et grisâtres avec un bord rouge-violet (CBS, 2025). Cela diminue la photosynthèse et entraîne une destruction précoce du feuillage, ce qui diminue la croissance des racines et la teneur en sucre. (CBS, 2025). L'utilisation de *M. pulcherrima* pourrait susciter ainsi un intérêt. Les levure du genre *Metschnikowia* possèdent une capacité d'occupation de l'espace et des nutriments, sont capables de sécréter des enzymes et des toxines et l'émettre de COV ainsi que l'induire les défenses des plantes.(Freimoser *et al.*, 2019).

Des expériences *in vitro* ont été réalisées. Les confrontations directes n'ont pas été concluantes en raison de la faible croissance de *C. beticola*, tandis que des tests d'inhibition à distance ont montré une réduction de la croissance de *C. beticola* par les levures (Figure 24). En revanche les inoculations aux betteraves *in planta* et sur feuille détachée ne se sont pas avérées concluantes pour attester du potentiel de biocontrôle de *M. pulcherima* à la betterave contre *C. beticola*.

D'autres analyses sauraient nécessaires pour confirmer que *M. pulcherrima* puisse servir d'agent de phytoprotection des maladies fongiques, notamment la cercosporiose.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Altesor P, González A.** 2023. Preference and performance of the generalist aphid *Myzus persicae* on closely and distantly related plant species. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **171**, 754–764.
- Altieri V, Rossi V, Fedele G.** 2023. Biocontrol of *Botrytis cinerea* as Influenced by Grapevine Growth Stages and Environmental Conditions. *Plants* **12**, 3430.
- Amy C, Noël G, Hatt S, Uyttenbroeck R, Van De Meutter F, Genoud D, Francis F.** 2018. Flower Strips in Wheat Intercropping System: Effect on Pollinator Abundance and Diversity in Belgium. *Insects* **9**, 114.
- ANSES.** 2017. *L'évaluation mettant en balance les risques et les bénéfices relatifs d'autres produits phytopharmaceutiques autorisés ou des méthodes non chimiques de prévention ou de lutte pour les usages autorisés en France des produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes*. Maisons-Alfort: ANSES, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.
- Ben-Ari M, Gish M, Inbar M.** 2015. Walking aphids can partake in within-field dispersal to distant plants. *Basic and Applied Ecology* **16**, 162–171.
- Bianchi F, Spitaler U, Robatscher P, Vogel RF, Schmidt S, Eisenstecken D.** 2020. Comparative Lipidomics of Different Yeast Species Associated to *Drosophila suzukii*. *Metabolites* **10**, 352.
- Blackman RL.** 1972. The inheritance of life-cycle differences in *Myzus persicae* (Sulz.) (Hem., Aphididae). *Bulletin of Entomological Research* **62**, 281–294.
- Boissinot S, Pichon E, Sorin C, Piccini C, Scheidecker D, Ziegler-Graff V, Brault V.** 2017. Systemic Propagation of a Fluorescent Infectious Clone of a Polerovirus Following Inoculation by *Agrobacteria* and Aphids. *Viruses* **9**, 166.
- Borgolte S, Varrelmann M, Hossain R.** 2024. Time point of virus yellows infection is crucial for yield losses in sugar beet, and co-infection with beet mosaic virus is negligible under field conditions. *Plant Pathology* **73**, 2056–2070.
- Bosshard A.** 2016. *Plan de réduction des pesticides en Suisse : Situation actuelle, possibilités de réduction, objectifs et mesures*. OFAG.
- Bouhlef N.** 2023. Université d'Angers, M1-BV, 2022-2023 Statistiques et plan d'experimentation Classification et clustering. *in press*.
- Brabant C.** 2024. Lutte intégrée en entomologie.
- Brabant C, Bussereau F.** 2025. Ravageurs de la betterave Axes de recherche. *in press*.
- Bressan A, Sémétey O, Arneodo J, Lherminier J, Boudon-Padieu E.** 2009. Vector Transmission of a Plant-Pathogenic Bacterium in the *Arsenophonus* Clade Sharing Ecological Traits with Facultative Insect Endosymbionts. *The American Phytopathological Society* **99**, 1289–1296.
- Caravel C, Rhino B, Fournet S, Lavoie A-V.** 2020. Agrosystèmes légumiers : les plantes de service contre les bioagresseurs. *in press*.
- CBS.** 2025. Fiche technique : Cercosporiose *Cercospora beticola*.

- Clément J, Brabant C, Kellenberger S, Brosset H, Widmer N.** 2024. Lutte contre *Myzus persicae*, vecteur des jaunisses virales de la betterave, par des plantes compagnes. *in press*.
- Colda A, Bossaert S, Verreth C, Vanhoutte B, Honnay O, Keulemans W, Lievens B.** 2021. Inoculation of pear flowers with *Metschnikowia reukaufii* and *Acinetobacter nectaris* enhances attraction of honeybees and hoverflies, but does not increase fruit and seed set. (W Blenau, Ed.). PLOS ONE **16**, e0250203.
- Collinson NP, Giri K, Kaur J, Spangenberg G, Malipatil M, Mann RC, Valenzuela I.** 2024. Evaluating the Effects of *Epichloë* Fungal Endophytes of Perennial Ryegrass on the Feeding Behaviour and Life History of *Rhopalosiphum padi*. Insects **15**, 744.
- Conseil fédéral.** 1999. *Ordonnance sur l'organisation du Département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche*.
- Conseil fédéral.** 2024. *Ordonnance sur la recherche agronomique*.
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA.** 2007. The Use of Push-Pull Strategies in Integrated Pest Management. Annual Review of Entomology **52**, 375–400.
- Cordovez V, Dini-Andreote F, Carrión VJ, Raaijmakers JM.** 2019. Ecology and Evolution of Plant Microbiomes. Annual Review of Microbiology **73**, 69–88.
- Dannenberg P, Braun B, Greiner C, Follmann A, Haug M, Semedi Hargo Yuwono P, Stetter M, Widlok T, Kopriva S.** 2024. Eight arguments why biodiversity is important to safeguard food security. PLANTS, PEOPLE, PLANET **6**, 604–610.
- Dardouri T.** 2018. Implication des composés organiques volatils dans la capacité des plantes de service à perturber le comportement et les performances de *Myzus persicae* (sulzer) le puceron vert du verger. *in press*.
- De Curtis F, Torriani S, Rossi F, De Cicco V.** 1996. Selection and use of *Metschnikowia pulcherrima* as a biological control agent for postharvest rots of peaches and table grapes. 45–55.
- Debonneville C, Reynard J-S.** 2013. Développement éclair de nouveaux outils de diagnostic pour l'agronomie. *in press*.
- DEFR.** 2024. *Plan directeur de la recherche agronomique et agroalimentaire 2021–2024*. Département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche DEFR.
- Demal S.** 2021. Jaunisse virale de la betterave Essais en serre avec BYV.
- Deutsch CA, Tewksbury JJ, Tigchelaar M, Battisti DS, Merrill SC, Huey RB, Naylor RL.** 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. Science **361**, 916–919.
- Dierauer H, Jenny S.** 2022. Betteraves sucrières biologiques. *in press*.
- Dolja VV.** 2003. *Beet yellows virus* : the importance of being different. Molecular Plant Pathology **4**, 91–98.
- Döring TF, Kirchner SM.** 2022. A model for colour preference behaviour of spring migrant aphids. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences **377**, 20210283.

- Dubois D, Häni A.** 1993. Influence du désherbage sur le rendement. *in press*.
- Dusi AN, Peters D.** 1999. Beet mosaic virus: its Vector and Host Relationships. *Journal of Phytopathology* **147**, 293–298.
- EFSA.** 2023. OpenFoodTox 2.0 :Chemical Hazards Database.
- Eleftherianos I, Foster SP, Williamson MS, Denholm I.** 2008. Characterization of the M918T sodium channel gene mutation associated with strong resistance to pyrethroid insecticides in the peach-potato aphid, *Myzus persicae* (Sulzer). *Bulletin of Entomological Research* **98**, 183–191.
- El-Tarabily KA.** 2004. Suppression of *Rhizoctonia solani* diseases of sugar beet by antagonistic and plant growth-promoting yeasts. *Journal of Applied Microbiology* **96**, 69–75.
- Fennell JT, Wilby A, Sobeih W, Paul ND.** 2020. New understanding of the direct effects of spectral balance on behaviour in *Myzus persicae*. *Journal of Insect Physiology* **126**, 104096.
- Fingu-Mabola JC, Martin C, Bawin T, Verheggen FJ, Francis F.** 2020. Does the Infectious Status of Aphids Influence Their Preference Towards Healthy, Virus-Infected and Endophytically Colonized Plants? *Insects* **11**, 435.
- Freimoser FM, Rueda-Mejia MP, Tilocca B, Migheli Q.** 2019. Biocontrol yeasts: mechanisms and applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **35**, 154.
- FSB.** 2025. *Rapport annuel 2024*. Bern: Fédération Suisse des Betteraviers (FSB).
- Germann C, Breitenmoser S.** 2020. *Lixus juncii* Boheman, 1835 – confirmation de sa présence en Suisse (Coleoptera: Curculionidae). *in press*.
- Glushakova AM, Chernov IY.** 2010. Seasonal Dynamics of the Structure of Epiphytic Yeast Communities. **79**.
- Gore-Lloyd D, Sumann I, Brachmann AO, et al.** 2019a. Snf2 controls pulcherriminic acid biosynthesis and antifungal activity of the biocontrol yeast *Metschnikowia pulcherrima*. *Molecular Microbiology* **112**, 317–332.
- Gore-Lloyd D, Sumann I, Brachmann AO, et al.** 2019b. Snf2 controls pulcherriminic acid biosynthesis and antifungal activity of the biocontrol yeast *Metschnikowia pulcherrima*. *Molecular Microbiology* **112**, 317–332.
- Gouka L, Raaijmakers JM, Cordovez V.** 2022. Ecology and functional potential of phyllosphere yeasts. *Trends in Plant Science* **27**, 1109–1123.
- Gouli S, Marcelino JAP (Eds.).** 2016. *Concise illustrated dictionary of biocontrol terms*. Amsterdam: Elsevier.
- Graczyk H, Berthet A, Hopf NB.** 2017. *Occupational Exposures to Plant Protection Products and Associated Health Effects in Agricultural Workers*. Lausanne, Switzerland: State Secretariat for Economic Affairs (SECO).
- Groux R.** 2022. Détection BYV et BChV par RT-qPCR.

- Han P, Lavoit A-V, Rodriguez-Saona C, Desneux N.** 2022. Bottom-Up Forces in Agroecosystems and Their Potential Impact on Arthropod Pest Management. *Annual Review of Entomology* **67**, 239–259.
- Hauer M, Hansen AL, Manderyck B, Olsson Å, Raaijmakers E, Hanse B, Stockfisch N, Märlander B.** 2017. Neonicotinoids in sugar beet cultivation in Central and Northern Europe: Efficacy and environmental impact of neonicotinoid seed treatments and alternative measures. *Crop Protection* **93**, 132–142.
- Holzinger W, Kammerlander I, Nickel H.** 2003. *Die zikaden mitteleuropas : Fulgoromorpha, Cicadomorpha excl. Cicadellida*.
- Hossain R, Menzel W, Lachmann C, Varrelmann M.** 2021. New insights into virus yellows distribution in Europe and effects of beet yellows virus, beet mild yellowing virus, and beet chlorosis virus on sugar beet yield following field inoculation. *Plant Pathology* **70**, 584–593.
- Hurpin B, Mouchart A.** 1981. *Les pucerons des cultures*. Association de Coordination Techniques Agricole.
- Husson F, Josse J, Le S, Mazet J.** 2006. FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining. 2.12.
- James CN, Zhou JS.** 2015. Insect vector–plant virus interactions associated with non-circulative, semi-persistent transmission: current perspectives and future challenges. *Current Opinion in Virology* **15**, 48–55.
- Jeschke P, Nauen R.** 2008. Neonicotinoids—from zero to hero in insecticide chemistry. *Pest Management Science* **64**, 1084–1098.
- Jiménez J, Moreno A, Fereres A.** 2021. Semipersistently Transmitted, Phloem Limited Plant Viruses Are Inoculated during the First Subphase of Intracellular Stylet Penetrations in Phloem Cells. *Viruses* **13**, 137.
- Jones R, Fountain MT, Günther CS, Eady PE, Goddard MR.** 2021. Separate and combined *Hanseniaspora uvarum* and *Metschnikowia pulcherrima* metabolic volatiles are attractive to *Drosophila suzukii* in the laboratory and field. *Scientific Reports* **11**, 1201.
- Jones A, Harrington P, Turnbull G.** 2014. Neonicotinoid concentrations in arable soils after seed treatment applications in preceding years. *Pest Management Science* **70**, 1780–1784.
- Kachalkin A, Glushakova A, Streletskii R.** 2022. Diversity of Endophytic Yeasts from Agricultural Fruits Positive for Phytohormone IAA Production. *BioTech* **11**, 38.
- Kachalkin AV, Lepeshko AA, Streletskii RA, Glushakova AM.** 2023. Endophytic strains of the yeast *Metschnikowia pulcherrima* positive for phytohormones production. *Biologia* **79**, 299–309.
- Kaleem Ullah RM, Gao F, Sikandar A, Wu H.** 2023. Insights into the Effects of Insecticides on Aphids (Hemiptera: Aphididae): Resistance Mechanisms and Molecular Basis. *International Journal of Molecular Sciences* **24**, 6750.

- Khechmar S, Brault V, Drucker M.** 2024. Co-infection with sugar beet viruses modifies localization and aphid transmission of beet yellows virus (BYV).
- Kogan M.** 1998. Integrated Pest Management: Historical Perspectives and Contemporary Developments. *Annual Review of Entomology* **43**, 243–270.
- Kozłowska-Makulska A, Beuve M, Syller J, Szyndel MS, Lemaire O, Bouzoubaa S, Herrbach E.** 2009. Aphid transmissibility of different European beet polerovirus isolates. *European Journal of Plant Pathology* **125**, 337–341.
- Kregiel D, Czarnecka-Chrebelska KH, Schusterová H, Vadkertiová R, Nowak A.** 2023. The *Metschnikowia pulcherrima* Clade as a Model for Assessing Inhibition of *Candida* spp. and the Toxicity of Its Metabolite, Pulcherrimin. *Molecules* **28**, 5064.
- Lee G, Lee S-H, Kim KM, Ryu C-M.** 2017. Foliar application of the leaf-colonizing yeast *Pseudozyma churashimaensis* elicits systemic defense of pepper against bacterial and viral pathogens. *Scientific Reports* **7**, 39432.
- Lehmann P, Ammunét T, Barton M, et al.** 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment* **18**, 141–150.
- Lesage L, Majka CG.** 2010. Introduced leaf beetles of the Maritime Provinces, 9: *Chaetocnema concinna* (Marsham, 1802) (Coleoptera: Chrysomelidae). *Zootaxa* **2610**.
- Limburg DD, Mauk PA, Godfrey LD.** 1997. Characteristics of Beet Yellows Closterovirus Transmission to Sugar Beets by *Aphis fabae*. *Phytopathology*® **87**, 766–771.
- Limtong S, Koowadjanakul N.** 2012. Yeasts from phylloplane and their capability to produce indole-3-acetic acid. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **28**, 3323–3335.
- Ljunggren J, Borrero-Echeverry F, Chakraborty A, Lindblom TUT, Hedenström E, Karlsson M, Witzgall P, Bengtsson M.** 2019. Yeast Volatomes Differentially Affect Larval Feeding in an Insect Herbivore. (IS Druzhinina, Ed.). *Applied and Environmental Microbiology* **85**, e01761-19.
- Lopes MR, Santos ARO, Moreira JD, et al.** 2019a. *Kurtzmaniella hittingeri* f.a., sp. nov., isolated from rotting wood and fruits, and transfer of three *Candida* species to the genus *Kurtzmaniella* as new combinations. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **69**, 1504–1508.
- Lopes MR, Santos ARO, Moreira JD, et al.** 2019b. *Kurtzmaniella hittingeri* f.a., sp. nov., isolated from rotting wood and fruits, and transfer of three *Candida* species to the genus *Kurtzmaniella* as new combinations. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **69**, 1504–1508.
- Ma B, Chang H, Guo M, Ai D, Wang J, Chen R, Liu X, Ren B, Hansson BS, Wang G.** 2025. Yeast-derived volatiles orchestrate an insect-yeast mutualism with oriental armyworm moths. *Nature Communications* **16**, 1479.
- Mahillon M, Groux R, Bussereau F, Brodard J, Debonneville C, Demal S, Kellenberger I, Peter M, Steinger T, Schumpp O.** 2022. Virus Yellows and Syndrome “Basses Richesses” in Western Switzerland: A Dramatic 2020 Season Calls for Urgent Control Measures. *Pathogens* **11**, 885.

- Marchi M, Bosc-Bierne A, Lerenard T, et al.** 2024. Unexplored Yeast diversity in Seed Microbiota.
- Masche F.** 2024. *Seuils d'intervention contre les organismes nuisibles en grandes cultures (PER)*. Groupe de travail pour les seuils d'intervention en grandes cultures (AG BKSF), Stations phytosanitaires cantonales, HAFL, Agroscope, AGRIDEA.
- Meier U.** 2001. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées.
- Möhring N.** 2022. Economic drivers and barriers for pesticide risk reduction : Université d'Angers, M1-BV, 2022-2023. *in press*.
- Nottingham SF, Hardie J, Dawson GW, Hick AJ, Pickett JA, Wadhams LJ, Woodcock CM.** 1991. Behavioral and electrophysiological responses of Aphids to host and nonhost plant volatiles. *Journal of Chemical Ecology* **17**, 1231–1242.
- OEPP.** 1994. *Directive sur la bonne pratique phytosanitaire: principes de bonne pratique phytosanitaire*. Paris.
- OFAG.** 2025. *Mise en œuvre du plan d'action phytosanitaire_Rapport annuel 2024*. Office fédéral de l'agriculture OFAG Secteur Protection durable des végétaux et variétés.
- Orantes LC, Zhang W, Mian MAR, Michel AP.** 2012. Maintaining genetic diversity and population panmixia through dispersal and not gene flow in a holocyclic heteroecious aphid species. *Heredity* **109**, 127–134.
- Oxford.** 2004. Dictionary of Biology.
- Parvaiz B, Khan AA.** 2024. Influence of Trap Crop (Marigold) and Cover Crop (Buckwheat) on Population Density of *Helicoverpa armigera* and *Myzus persicae* Pests of Tomato Crop.
- Pirone TP, Blanc S.** 1996. Helper-dependent vector transmission of plant viruses. *Annual Review of Phytopathology* **34**, 227–247.
- Pitt JI, Miller MW.** 1968. Sporulation in *Candida Pulcherrima*, *Candida Reukaufii* and *Chlamydozoma* Species: Their Relationships with *Metschnikowia*. *Mycologia* **60**, 663–685.
- Rao X, Huang X, Zhou Z, Lin X.** 2013. An improvement of the $2^{-(\Delta\Delta CT)}$ method for quantitative real-time polymerase chain reaction data analysis. *Biostatistics, Bioinformatics and Biomathematics* **3**, 71–85.
- Rödiger M, Zorn A, Mielewczik M, Heitkämper K, Roesch A, El Benni N.** 2024. How does pesticide reduction affect labour time and profitability? A crop production case study. *Agricultural Systems* **220**, 104101.
- Rutkowski D, Weston M, Vannette RL.** 2023. Bees just wanna have fungi: a review of bee associations with nonpathogenic fungi. *FEMS Microbiology Ecology* **99**, fiad077.
- Ruus AG.** 2020. Virus yellows in sugar beets in Sweden and Europe. *in press*.
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG.** 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation* **232**, 8–27.

- Savary S, Willocquet L, Pethybridge SJ, Esker P, McRoberts N, Nelson A.** 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution* **3**, 430–439.
- Schaerer S, Bussereau F, Breitenmoser S, Sostizzo T, Bünter M, Corna B.** 2019. Syndrome des basses richesses - SBR. *in press*.
- Simonin M, Briand M, Chesneau G, Rochefort A, Marais C, Sarniguet A, Barret M.** 2022. Seed microbiota revealed by a large-scale meta-analysis including 50 plant species. *New Phytologist* **234**, 1448–1463.
- Stanevičienė R, Lukša J, Strazdaitė-Žielienė Ž, Ravoitytė B, Losinska-Sičiūnienė R, Mozūraitis R, Servienė E.** 2021. Mycobiota in the Carposphere of Sour and Sweet Cherries and Antagonistic Features of Potential Biocontrol Yeasts. *Microorganisms* **9**, 1423.
- Stevens M, Freeman B, Liu H, Herrbach E, Lemaire O.** 2005. Beet poleroviruses: close friends or distant relatives? *Molecular Plant Pathology* **6**, 1–9.
- Tasin M, Larsson Herrera S, Knight AL, Barros-Parada W, Fuentes Contreras E, Pertot I.** 2018. Volatiles of Grape Inoculated with Microorganisms: Modulation of Grapevine Moth Oviposition and Field Attraction. *Microbial Ecology* **76**, 751–761.
- Vieites-Álvarez Y, Reigosa MJ, Sánchez-Moreiras AM.** 2024. A decade of advances in the study of buckwheat for organic farming and agroecology (2013-2023). *Frontiers in Plant Science* **15**, 1354672.
- Vráblová M, Tóth P.** 2001. Flea beetles species associated with *Amaranthus* spp. and surrounded cultivated and wild plant species. *Acta fytotechnica et zootechnica* **4**.
- Walther C, Vallet M, Reichelt M, Giri P, Rothe B, Negwer EJ, Van Berkum PM, Gershenzon J, Unsicker SB.** 2025. A Fungal Endophyte Alters Poplar Leaf Chemistry, Deters Insect Feeding and Shapes Insect Community Assembly. *Ecology Letters* **28**, e70007.
- Wintermantel WM.** 2005. Co-infection of *Beet mosaic virus* with Beet Yellowing Viruses Leads to Increased Symptom Expression on Sugar Beet. *Plant Disease* **89**, 325–331.
- Wolfgang A, Temme N, Tilcher R, Berg G.** 2023. Understanding the sugar beet holobiont for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology* **14**, 1151052.
- Xu X, Ding Q, Wang X, Wang R, Ullah F, Gao X, Song D.** 2022. V101I and R81T mutations in the nicotinic acetylcholine receptor $\beta 1$ subunit are associated with neonicotinoid resistance in *Myzus persicae*. *Pest Management Science* **78**, 1500–1507.
- Yele Y, Poddar N.** 2019. *Virus-insect Vector Interaction and their Management*.
- Yoshihashi Y, Degawa Y.** 2023. Novel Metschnikowia yeasts from the gut of green lacewing in Japan. *Antonie van Leeuwenhoek* **116**, 1295–1304.
- Zhang Y, Zhou H, Zhou J, Sun W.** 2017. Regression Models for Multivariate Count Data. *Journal of Computational and Graphical Statistics* **26**, 1–13.
- Zilber-Rosenberg I, Rosenberg E.** 2008. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiology Reviews* **32**, 723–735.

8. SITOGRAPHIE

ANCES. 2018. NOLI KOPPERT BV. <https://ephy.anses.fr/ppp/noli>.

Biorad. The Importance of Data Analysis in Gene Expression. <https://www.bio-rad.com/en-ch/applications-technologies/qpcr-analysis?ID=8bfl2444-522e-e3cb-18cd-ccd0ec94f91a>.

Conseil fédéral suisse. 2024. *Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture*.

Duffus JE. 1972. Beet western yellows virus.

EFSA. 2023. OpenFoodTox 2.0 :Chemical Hazards Database.

FAO. 2023. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.

Dictionnaires et Encyclopédies.2025.<https://fr-academic.com/>

Greene S. 2009. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. https://agroAtlas.ru/en/content/pests/Aphis_fabae/.

Husson F, Josse J, Le S, Mazet J. 2006. FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining. 2.12.

IPI. 2025. IPI Database : Pesticide Impacts on Invertebrates.

https://www.pesticideimpacts.org/pest-predators-parasitoids?_cf_chl_tk=aGbOTVSnW6iv4x1XW5Bie4WvIw2mCkBWxL.KWijttQ-1754917413-1.0.1.1-vKIHE8SNoFBLQjXsTgwO97VxNNJy.QZrPwYwf8Vnsxg.

ITB. 2022. Traitements phytosanitaires : conseils pour leur mise en oeuvre en respectant la réglementation. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/traitements-phytosanitaires-conseils-pour-leur-mise-en-oeuvre-en-respectant-la-reglementation/>.

ITB. 2025. Le charançon Lixus juncii.

<https://www.itbfr.org/publications/fiches-bioagresseurs/le-charancon-lixus-juncii/>.

OFEV. 2025. Index des produits phytosanitaires. <https://www.psm.admin.ch/fr/produkte>.

Russell GE. 1971. Beet mosaic virus. <https://www.dpvweb.net/dpv/showdpv/?dpvno=53>.

Turpeau E, Maurice Hullé, Chaube B. 2024. Cycles biologiques : Caractères généraux des cycles. <https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/qu-est-ce-qu-un-puceron/cycles-biologiques>.

Von Doris Bigler. 2020. Comment continuer les betteraves. <https://agrobeta.ch/fr/comment-continuer-les-betteraves/>.

ANNEXES

Annexe I. Stratégies phytosanitaires contre les ravageurs étudiés

<i>Ravageurs</i>	<i>Substance active</i>	<i>Cadre réglementaire</i>	<i>Seuil d'intervention</i>	<i>Application</i>	<i>Autorisation cantonale</i>
<i>Pucerons vert</i>	<u>Acetamipride</u>	Dérogation annuelle	Traitement uniquement avec l'autorisation du service phytosanitaire cantonal		
	<u>Pirimicarbe</u>	Homologation			
	<u>Lambda-cyhalothrine</u>				
	<u>Flonicamide</u>				
<i>Pucerons noir</i>	<u>Hymexazole</u>			BCH 14-	Libre
<i>Altises</i>	<u>Deltaméthrine</u>		BCH 07 : 50 % plantes atteintes BCH 12-14 : 80 % plantes atteintes	BCH 07-14	Nécessaire
	<u>Cyperméthrine</u>				
	<u>Lambda-cyhalothrine</u>				
<i>Charançons</i>	Ø				

Ce tableau répertorie les substances actives autorisées contre les ravageurs de la betteraves en Suisse

Source : [1] Index des produits phytosanitaires (OFEV, 2025), [2] Seuils d'interventions contre les organismes nuisibles (Masche, 2024)

Annexe II. Analyse et méthode de calcul des données issues des plantes positives par RTqPCR

Echantillon	Condition	Baseline	EndRFU	ΔRFU	Cq_BYV	Cq_COX-Bet	Cq_BChV	ΔCP	ΔΔCP	2 ^{-ΔΔCP}	log ₂ ΔΔCP
3	Contrôle	1992,40	2401,46	409,06	10,08	24,71	NA	-14,63	-15,40	43350,17	4,64
14	Contrôle	1958,15	2375,65	417,50	13,06	20,55	NA	-7,49	-8,26	307,35	2,49
15	Contrôle	1980,62	2365,60	384,99	13,40	22,69	NA	-9,29	-10,06	1070,26	3,03
17	Contrôle	1983,57	2357,97	374,40	13,14	20,77	NA	-7,63	-8,40	338,67	2,53
22	Contrôle	1977,23	2371,49	394,26	10,06	24,18	NA	-14,13	-14,90	30547,15	4,48
28	Contrôle	1960,46	2317,78	357,33	13,24	23,19	NA	-9,95	-10,72	1691,10	3,23
29	Contrôle	1963,52	2359,84	396,31	13,92	20,21	NA	-6,30	-7,07	134,25	2,13
32	Traitement	1940,17	2372,13	431,96	11,89	20,93	NA	-9,04	-9,81	896,87	2,95
34	Traitement	1975,10	2394,52	419,42	13,02	20,57	NA	-7,55	-8,32	320,40	2,51
37	Traitement	1982,64	2300,60	317,96	11,91	30,45	NA	-18,54	-19,31	651655,52	5,81
38	Traitement	1986,05	2305,11	319,06	12,42	27,43	NA	-15,01	-15,78	56413,39	4,75
49	Traitement	1948,14	2384,41	436,27	13,97	19,68	NA	-5,72	-6,49	89,81	1,95
52	Traitement	2009,97	2513,17	503,19	12,06	20,94	NA	-8,88	-9,65	805,51	2,91
53	Traitement	1970,38	2397,54	427,16	14,03	20,07	NA	-6,04	-6,81	112,50	2,05
60	Traitement	1957,99	2409,20	451,21	12,51	20,16	NA	-7,66	-8,43	344,59	2,54
84	Contrôle	2042,29	2490,10	447,81	20,70	19,73	N/A	0,97	0,20	0,20	-0,71
Bett BYV/BC	Bett BYV/BC	1967,00	2379,96	412,96	19,74	19,68	21,48	0,06	-0,71	1,88	0,27
Bett BYV/BC	Bett BYV/BC	1965,64	2413,12	447,48	20,40	19,93	22,10	0,47	-0,30	1,43	0,16
Bett BYV/BC	Bett BYV/BC	1946,35	2313,59	367,24	21,84	20,25	19,82	1,60	0,82	0,65	-0,19
Bett BYV/BC	Bett BYV/BC	2290,17	2853,73	563,56	20,82	19,07	19,42	1,76	0,98	0,58	-0,24

Les données de RTqPCR ont été analysées selon cette méthode :

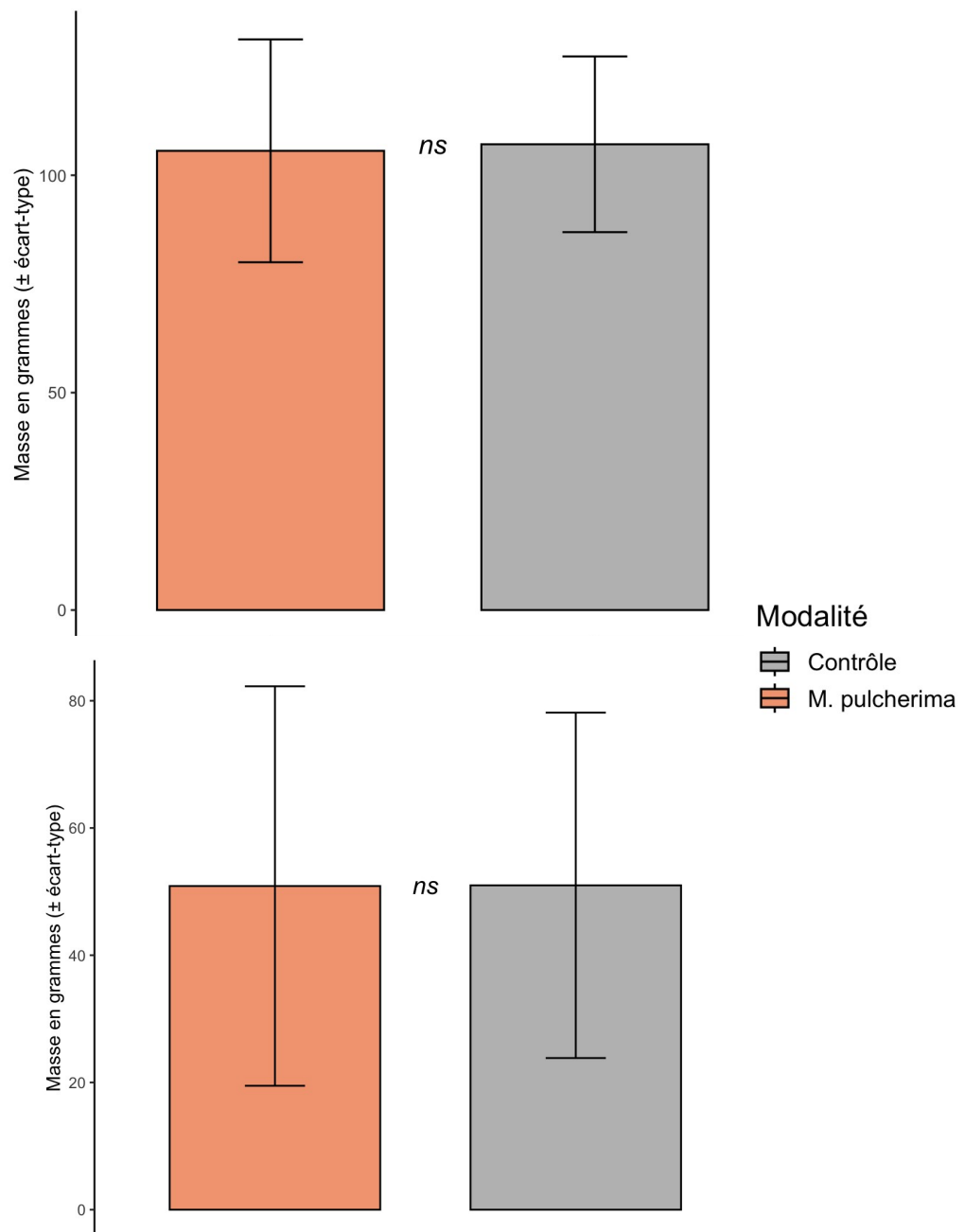
ΔRFU : End RFU - Baseline

ΔCq : $\text{Cq}_{\text{BYV}}^{\text{Échantillon}} - \text{Cq}_{\text{COX}}^{\text{Échantillon}}$

$\Delta\Delta\text{Cq}$: $\Delta\text{Cq}_{\text{Échantillon}} - \text{Moyenne}(\Delta\text{Cq}_{\text{témoin positif}})$

$\text{Log}_{10}(2^{-\Delta\Delta\text{Cq}})$

Annexe III. Distribution de la biomasse des betteraves aérienne (a) et racinaire (b)



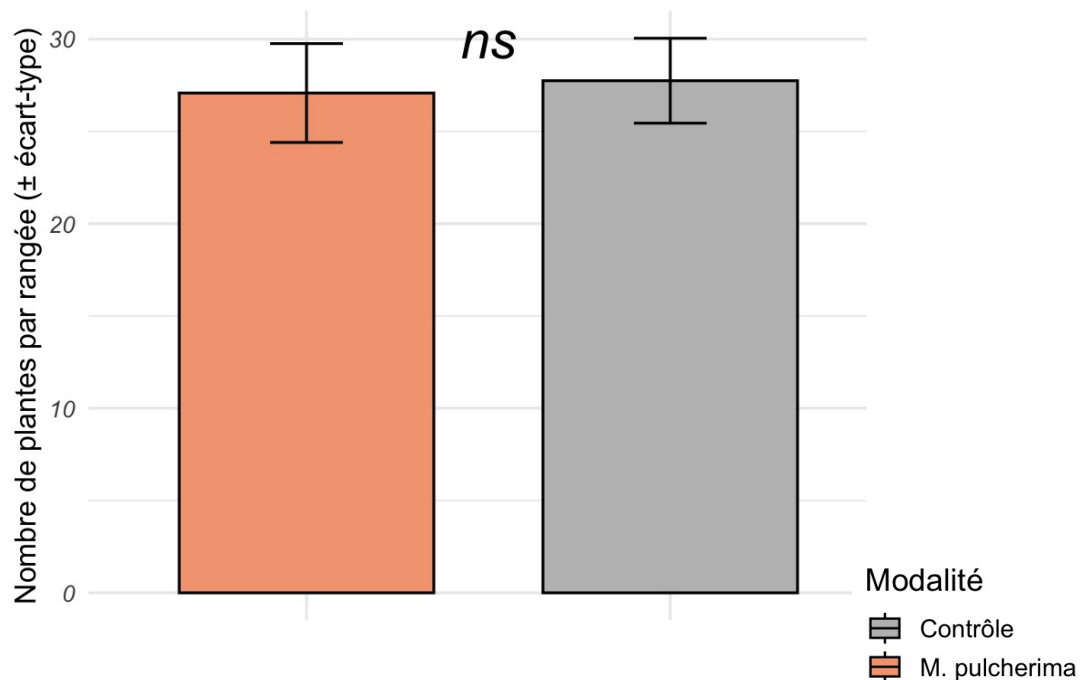
Distribution de la masse racinaire (g) selon la présence des plantes incubées ou non avec les symptômes à 2 mois après transfert des pucerons. Les symboles ns > α > α* à la suite de tests de Wald (ANODE)

Biomasse aérienne : $\chi^2 = 0.081$ Df 1 Pr(>Chisq) : 0.77

Biomasse racinaire : $\chi^2 = 0.00$ Df 1 Pr(>Chisq) : 0.99

Annexe IV. Croissance et développement au champ les betteraves par *M. pulcherima*

A



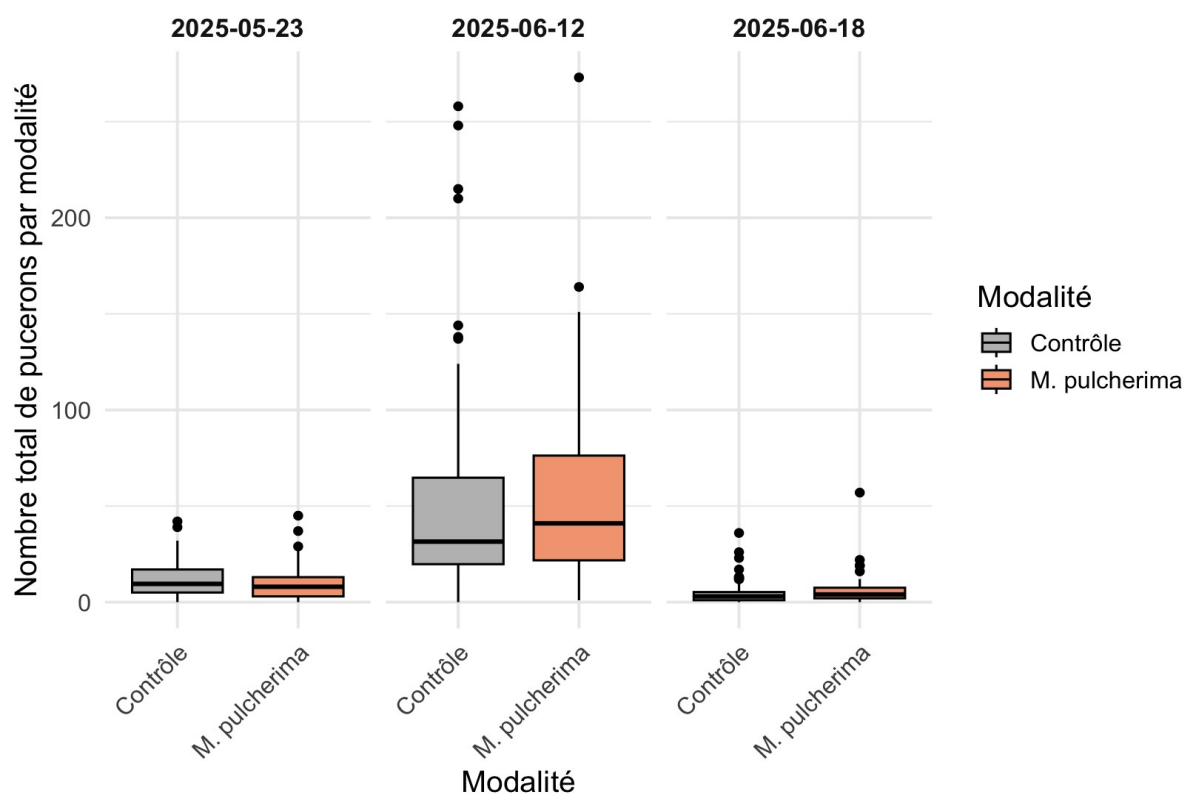
B

<i>M. pulcherrima</i>	Contrôle	<i>M. pulcherrima</i>
15,8	16,08	15,34
Contrôle	<i>M. pulcherrima</i>	Contrôle
16,54	15,8	17,4

A : Cette figure présente la distribution du nombre de plantes entre les plantes inoculées ou non avec *M. pulcherrima*. Chaque rang comportait 32 graines semées à la main. Les plantes présentes 1 mois après le semis ont été comptées et ensuite ramenées en pourcentage. Il n'y a pas de différences significatives parmi les 12 rangées des deux modalités. Le symbole ns > α à la suite de tests de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 0.27$ Df 1 P-value: 0.60

B : Le tableau montre les rendements (en kg) des betteraves récoltées parmi les six sous-parcelles. On observe que les modalités inoculées avec la levure *M. pulcherima* présentent un rendement plus faible que les modalités contrôles. Ces différences semblent être dues à la plus forte occurrence de la jaunisse virale au sein des sous-parcelles.

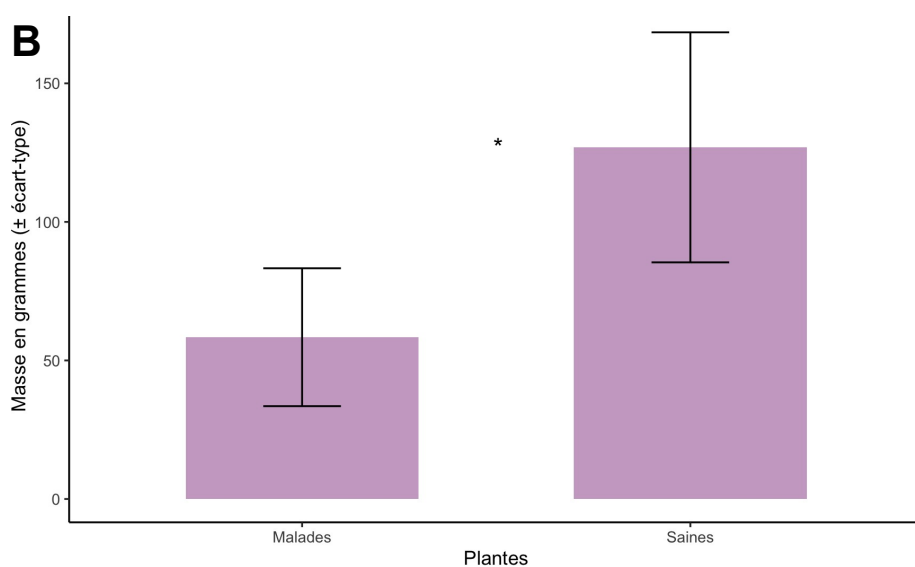
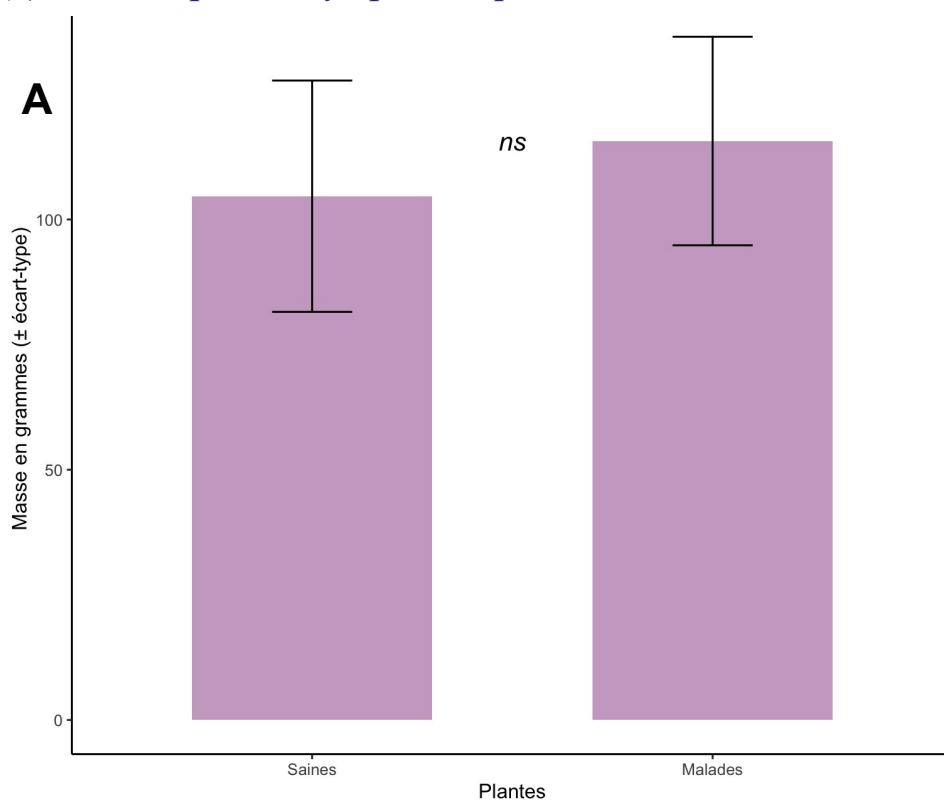
Annexe V. Distribution du nombre des pucerons spatiale entre les modalités (b)



La figure présente la distribution des pucerons présente sur les 240 plantes observées entre les modalité contrôle (en gris) et inoculée avec la levure *M. pulcherrima* (en orange). On observe une ocilation de l'abondance de puceorns entre les date d'observation.

Comme représenté sur le tableau de synthèse 8, l'abondance des *A. fabae* et *M. persicae* aptère et ailés observées ne montrent pas de différences significatives entre les modalités.

Annexe VI. Distribution de la biomasse des betteraves aérienne (a) et racinaire (b) entre les plantes symptomatique et saines azu BYV.

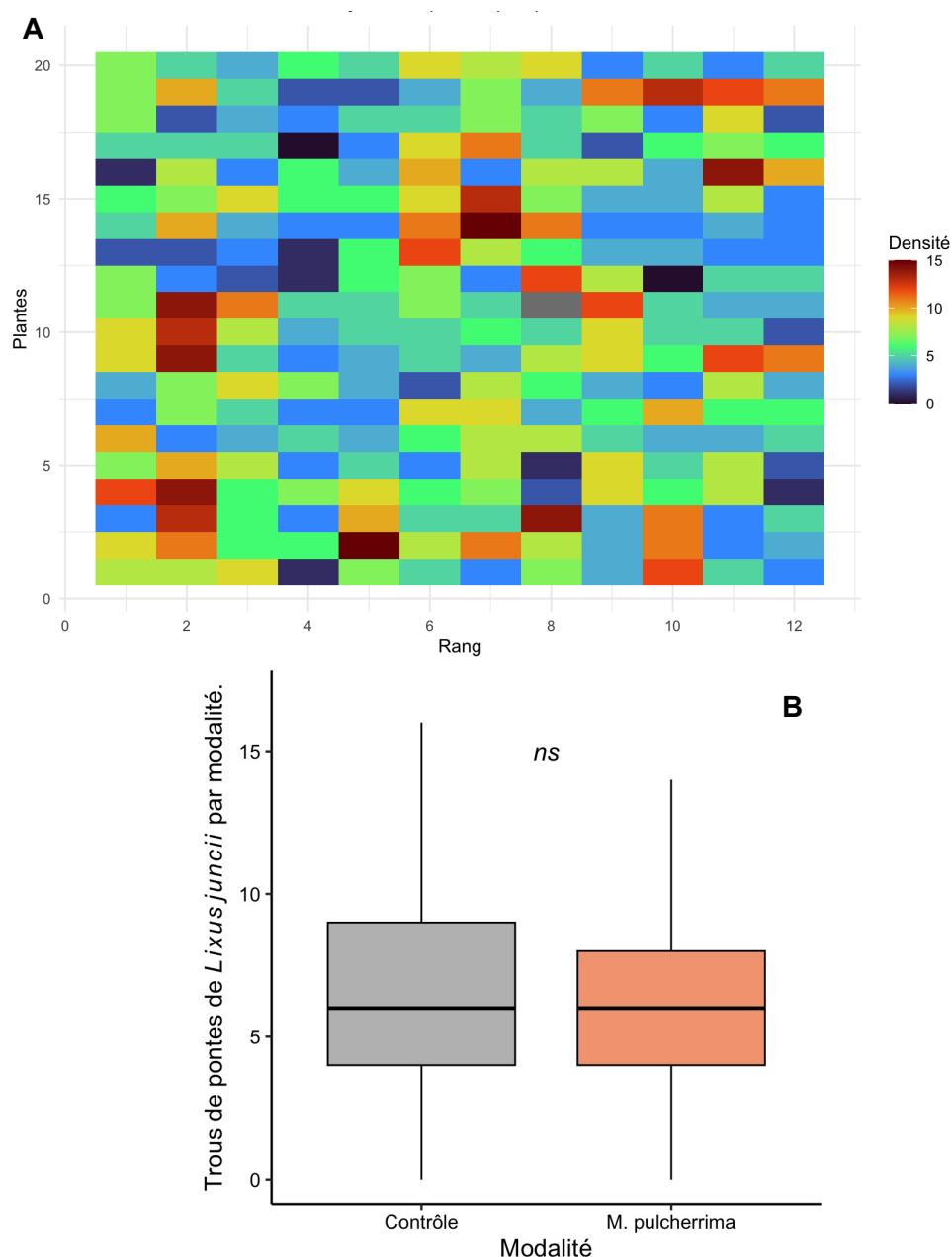


Distribution de la masse racinaire (g) selon la présence ou non de symptômes à 2 mois après transfert des pucerons. Les symbole ns > α * > α à la suite de tests de Wald (ANODE)

Biomasse $\chi^2 = 3.298$ Df 1 Pr(>Chisq) : 0.069A

Biomasse racinaire : $\chi^2 = 5.33$ Df 1 Pr(>Chisq) : 0.021 *

Annexe VII. Distribution du nombre de trous de ponte du charançon de la betterave (*Lixus juncii*) spatiale (a) et entre les modalités (b)



A La carte de chaleur illustre la répartition spatiale du nombre de trous de ponte du charançon de la betterave parmi les 240 plantes du dispositif expérimental. Chaque rectangle correspond à une plante, à laquelle est attribuée une couleur dont l'intensité varie en fonction du nombre de perforations observées, selon une échelle allant du bleu (0) au rouge (15). On note aucun gradient environnemental influençant la distribution des observations.

B La figure représente la distribution du nombre de trous de ponte du charançon de la betterave parmi les plantes de la modalité contrôles et inoculées avec *Metschnikowia pulcherrima*. La comparaison entre les

	Diplôme: Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Plant Health Protection
Auteur(s) : Matthieu Le Hen Date de naissance : 25/11/1999	Organisme d'accueil : Agroscope Adresse : 50 route de Duillet, Nyon ,1260 Maître de stage : Cécile Brabant Hyrodelle
Nb pages : 30 Annexe(s) : 3	
Année de soutenance : 2025	
Titre français : Stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs de la betterave sucrière par la levure <i>Metschnikowia pulcherrima</i> et le sarrasin comme plante compagne. Titre anglais : Integrated pest management strategies on sugar beet's harmful insects using the yeast <i>Metschnikowia pulcherrima</i> and buckwheat as companion plant.	
Résumé : Les ravageurs de la betterave restent majoritairement gérés par lutte chimique. Avec l'arrêt des néonicotinoïdes, les traitements alternatifs disponibles offrent une protection relative. Le puceron vert du pêcher (<i>Myzus persicae</i>) principal vecteur de jaunisses virales reste la principale menace. Les altises de la betterave (<i>Chaetocnema spp</i>) autrefois contrôlés avec l'apparition de problèmes émergeant, contraignent la culture de la betterave à évoluer. Les autorités Fédérales Suisses soutiennent une transition agroécologique et encouragent le non-recours aux fongicides et insecticides dans les Systèmes de Productions Extensio. Les méthodes de lutte biologique sont donc de plus en plus employées par les betteraviers Suisse. Cette étude avait pour objectif d'investiguer les méthodes de biocontrôle par l'utilisation de <i>Metschnikowia pulcherrima</i>, une levure Ascomycètes et de plantes compagnes telles que le sarrasin (<i>Fagopyrum esculentum</i>). Les résultats actuels suggèrent que le traitement des betteraves par <i>M. pulcherrima</i> en condition contrôlée et au champ n'a pas eu d'effet sur la croissance ou le développement des plantes. ni sur le comportement. Malgré une transmission et les symptômes du BYV au champ qui n'ont pas été observés en serre. Le comportement des pucerons et altises ne semble pas avoir été modifié avec le sarrasin comme plante compagne. Les expériences réalisées indiquent que <i>M. Pulcherrima</i> pourrait avoir un potentiel de biocontrôle contre les maladies fongiques. Au vu des connaissances scientifiques, le sarrasin a quant à lui un effet indirect.	
Beet pests are still mainly controlled using chemical pesticides. With the ban on Neonicotinoids, the alternative treatments available offer only a relative protection. The green peach aphid (<i>Myzus persicae</i>), is the main vector of Viral Yellows and remains the primary threat. Beet flea beetles (<i>Chaetocnema spp.</i>) previously controlled, new pests are now forcing sugar beet cultivation to evolve. The Swiss Federal Authorities promote an agroecological transition and encourage the non-use of fungicides and insecticides in Extensio's production systems. Biological control methods are therefore increasingly being used by Swiss beet growers. This study aims to investigate biological methods by using <i>Metschnikowia pulcherrima</i>, an Ascomycete yeast, and companion plants such as buckwheat (<i>Fagopyrum esculentum</i>). Results show that treating beets with <i>M. pulcherrima</i> under controlled conditions and in the field didn't affect plant growth or development, nor aphid behavior. Despite transmission and BYV symptoms in the field, this was not been observed in the greenhouse conditions. The aphid's and flea beetles behaviors did not appear to have been changed by buckwheat as a companion plant. Based on experiments conducted, <i>M. pulcherrima</i> may have biocontrol potential against fungal diseases. According to scientific knowledge, buckwheat has a indirect effects.	
Mots-clés : Betterave - Pucerons – <i>Metschnikowia pulcherrima</i> – Plantes de service – BYV – Ravageurs Key Words : Beet root – Aphids – <i>Metschnikowia pulcherrima</i> – Service plants – BYV – Pest	