

Protéger les betteraves sucrières en l'absence de néonicotinoïdes

En 2023, FranceAgriMer a mis en œuvre un appel à projets visant à recueillir des projets pour lutter contre la jaunisse de la betterave, proposés par des consortia constitués d'acteurs de la recherche et du transfert, dans le cadre de la poursuite du Plan National Recherche et Innovation (PNRI). Ce Plan vise à trouver des solutions de protection des cultures de betterave sucrière suite au retrait des néonicotinoïdes. Grâce au travail conjoint de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée, des possibilités se dessinent, tant

via la prophylaxie que par l'identification de nouveaux leviers curatifs. Ces leviers, combinés les uns avec les autres, pourraient permettre de limiter l'impact de la jaunisse sur les betteraves. De l'identification des réservoirs et des pucerons vecteurs, aux solutions de biocontrôle testées, et la quantification de leurs bénéfices et limites, ce numéro de la revue permet de dessiner les lignes pour assurer une production satisfaisante et durable suite au retrait des néonicotinoïdes et ainsi assurer la pérennité de cette filière industrielle.



/// Crédit photo : Aline WAQUET / INRAE



Innovations Agronomiques

Volume 103 – Juin/Juillet 2025

Protéger les betteraves sucrières en l'absence de néonicotinoïdes

En 2023, FranceAgriMer a mis en œuvre un appel à projets visant à recueillir des projets pour lutter contre la jaunisse de la betterave, proposés par des consortia constitués d'acteurs de la recherche et du transfert, dans le cadre de la poursuite du Plan National Recherche et Innovation (PNRI) pour lutter contre la jaunisse de la betterave. Ce Plan vise à trouver des solutions de protection des cultures de betterave sucrière suite au retrait des néonicotinoïdes. Grâce au travail conjoint de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée, des possibilités se dessinent, tant via la prophylaxie que par l'identification de nouveaux leviers curatifs. Ces leviers, combinés les uns avec les autres, pourraient permettre de limiter l'impact de la jaunisse sur les betteraves. De l'identification des réservoirs des vecteurs, aux solutions de biocontrôle testées, et la quantification de leurs bénéfices et limites, ce numéro de la revue permet de dessiner les lignes pour assurer une production satisfaisante et durable suite au retrait des néonicotinoïdes et ainsi assurer la pérennité de cette filière industrielle.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Fabienne Maupas, Directrice du département technique et scientifique de l'ITB ; Christian Huygues, Président du Comité de coordination de PNRI ; Guy Richard, Président du Conseil scientifique du PNRI.

Initiée en 2007, la revue de transfert Innovations agronomiques a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.



Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.

Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-1481-8

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1482-5

DOI : <https://doi.org/17.180/innovagro-2025-vol103>

Pour citer ce numéro : Collectif. (2025). *Innovations agronomiques*, volume 103, juin/juillet 2025. *Protéger les betteraves sucrières en l'absence de néonicotinoïdes* (Version 1). Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. <https://doi.org/17.180/innovagro-2025-vol103>

Photo de couverture : Aline Waquet / INRAE

Licence : CC BY 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Sommaire

Yannis NIO, Christelle BUCHARD, Franck DUVAL, Chantal FAURE, Frédérique MAHEO, Ghislain MALATESTA, Armelle MARAIS, Amélie MONTEIRO, Laurence SVANELLA-DUMAS, Thierry CANDRESSE et Jean-Christophe SIMON, 2025 - **Identification des réservoirs des vecteurs et des virus responsables des jaunisses de la betterave.**
Innovations Agronomiques 103, 1-9

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art01>

Damien ROLLANDEZ, Manon AVIGNON, Pierre-Antoine BOURDON et Johann FOURNIL, 2025 - **Attraction d'insectes auxiliaires contre le puceron vert, vecteur de la jaunisse de la betterave.**
Innovations Agronomiques 103, 10-19

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art02>



Véronique BRAULT, Martin DRUCKER, Quentin CHESNAIS, Aurélie MARMONIER, Hélène SCHLAEFLI, Souheyla KHECHMAR, Armelle MARAIS, Thierry CANDRESSE, Amélie MONTEIRO, Ghislain MALATESTA et Fabienne MAUPAS, 2025 - **Nouveaux éclairages sur les virus responsables de la jaunisse de la betterave sucrière.**
Innovations Agronomiques 103, 20-30

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art03>

Christian PELTIER et Samuel QUINTON, 2025 - **Enseigner-apprendre la transition agroécologique dans l'enseignement agricole : l'exemple des alternatives aux néonicotinoïdes.**
Innovations Agronomiques 103, 31-44

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art04>

Amélie MONTEIRO, Audrey FABAREZ et Fabienne MAUPAS, 2025 - **Solutions de biocontrôle contre Myzus persicae.**
Innovations Agronomiques 103, 45-52

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art05>

Audrey FABAREZ, Paul TAUVEL, Ophélie BOLINGUE, Quentin TILLOY, Damien ANDRIEU et Fabienne MAUPAS, 2025 - **Alternative aux néonicotinoïdes en betteraves sucrières : Synthèse de 4 années d'expérimentation.**
Innovations Agronomiques 103, 53-63

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art06>

Louis BOURDIN, Marie-Hélène JEUFFROY, Blandine RENAULT, Rémy BALLOT, Olivier RECHAUCHERE et Jean-Marc MEYNARD, 2025 - **Construire collectivement des alternatives aux néonicotinoïdes pour la betterave sucrière.**
Innovations Agronomiques 103, 64-78

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art07>



Identification des réservoirs des vecteurs et des virus responsables des jaunisses de la betterave

Yannis NIO¹, Christelle BUCHARD¹, Franck DUVAL¹, Chantal FAURE⁴, Frédérique MAHEO¹, Ghislain MALATESTA³, Armelle MARAIS⁴, Amélie MONTEIRO², Laurence SVANELLA-DUMAS⁴, Thierry CANDRESSE⁴, Jean-Christophe SIMON¹

¹ INRAE, UMR IGEPP (Institut de Génétique, Environnement et Protection des Plantes). Domaine de la Motte, 35653 Le Rheu Cedex, France

² ITB (Institut Technique de la Betterave). 45 rue de Naples - 75008 Paris, France

³ ITB (Institut Technique de la Betterave). Pole Betteravier du Griffon, 4 rue Denis Papin 02000 Laon, France

⁴ Univ. Bordeaux, INRAE, UMR 1332 BFP (Biologie du Fruit et Pathologie). 71 avenue Edouard Bourlaux, CS 20032, 33882 Villenave d'Ornon Cedex, France

Correspondance : jean-christophe.simon@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art01>

Résumé

L'interdiction des néonicotinoïdes utilisés contre les pucerons vecteurs des virus responsables des jaunisses de la betterave a mobilisé d'importants efforts pour identifier des alternatives. Cette étude, menée de 2021 à 2023 dans les principaux bassins betteraviers, visait à identifier les réservoirs hivernaux de vecteurs et de virus pour les intégrer dans des stratégies de gestion. Les résultats montrent que colza et moutardes sont des réservoirs majeurs de pucerons colonisant les betteraves au printemps, mais ne sont pas sources de virus. En revanche, les repousses de betteraves, et potentiellement la phacélie et la féverole, apparaissent comme des réservoirs combinés de vecteurs et de virus. Le rôle des betteraves sauvages en tant que réservoirs semble limité car les variants viraux qui les infectent sont différents de ceux sur betteraves sucrières. Ces travaux fournissent des pistes pour mieux comprendre les dynamiques épidémiques et guider la gestion.

Mots-clés : jaunisses de la betterave, virus, vecteurs, réservoirs hivernaux, dynamique épidémique, diversité clonale

Abstract: Identifying the reservoirs of vectors and viruses of beet yellows

The ban on neonicotinoids used against aphids transmitting viruses responsible for beet yellows has spurred significant efforts to identify alternatives. This study, conducted from 2021 to 2023 in major beet-growing regions, aimed to identify the winter reservoirs of vectors and viruses for integration into management strategies. The results show that oilseed rape and mustards are major reservoirs of aphids colonizing sugar beet in spring, although they are not the sources of beet viruses. Sugar beet volunteers and, potentially, phacelia (and faba bean for BtMV) appear as combined reservoirs of both vectors and beet viruses. The potential role of wild beets seems limited due to the specificity of the viral populations infecting them. This work provides clues to better understand epidemic dynamics and guide disease management.

Keywords: beet yellows, virus, vectors, winter reservoirs, epidemic dynamics, clonal diversity



1. Introduction

En France, les jaunisses de la betterave sont causées par quatre principaux virus appartenant à des familles distinctes et présentant des modes de transmission variés. Le Beet mild yellowing virus (BMV) et le Beet chlorosis virus (BChV) font partie de la famille des *Solemoviridae* et sont transmis selon le mode persistant, le Beet yellows virus (BYV) appartient aux *Closteroviridae* et est transmis selon le mode semi-persistant ; enfin le Beet mild virus (BtMV) appartient aux *Potyviridae* et est transmis selon le mode non-persistant (Brault et al., 2025). La betterave sucrière étant une culture annuelle, les parcelles sont exposées chaque année au printemps à des contaminations par des pucerons ailés qui peuvent porter ces différents virus. Cependant les plantes réservoirs sur lesquelles les pucerons acquièrent les virus sont mal connues (Stevens et al., 1994). Le principal vecteur de ces virus est le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae*, bien qu'*Aphis fabae*, le puceron noir de la fève, puisse également jouer un rôle significatif dans les épidémies de jaunisses (Limburg et al. 1997, Schliephake et al. 2000). *M. persicae* possède un spectre d'hôtes très étendu, regroupant plus de 400 espèces, tant cultivées que sauvages, appartenant à 40 familles botaniques différentes (Bass et al., 2014). De son côté, *A. fabae*, bien que préférant les Fabacées, peut également se nourrir sur des centaines d'espèces appartenant à diverses familles botaniques (Blackman & Eastop, 2000). Cette diversité des plantes-hôtes potentielles, tant pour les virus que pour leurs vecteurs, représente un défi majeur pour l'identification des réservoirs des jaunisses de la betterave. L'identification de ces réservoirs est pourtant cruciale pour développer des stratégies de gestion prophylactique efficaces contre les jaunisses. Dans le cadre du Programme National de Recherche et d'Innovation (PNRI) visant à lutter contre ces maladies, nous avons entrepris une étude destinée à identifier les réservoirs des virus des jaunisses et de leurs pucerons vecteurs. Pour ce faire, des échantillonnages de pucerons et de plantes ont été réalisés dans les principaux bassins de production de betterave sucrière en France. Notre étude s'est notamment concentrée sur la recherche de *M. persicae* et de virus de la betterave sur des espèces de plantes, cultivées ou non, susceptibles de les héberger durant l'hiver. Si ces pucerons ont acquis des virus sur ces réservoirs hivernaux, ils pourraient alors les transmettre aux cultures de betteraves. Par ailleurs, nous avons cherché à inférer l'origine des individus migrants de *M. persicae* s'apprêtant à coloniser les nouvelles cultures.

2. Méthodologie

La recherche des réservoirs des vecteurs a été menée durant trois années consécutives (2021 à 2023) dans le cadre du projet **Resaphid** financé par le PNRI et s'est appuyée sur un échantillonnage intensif des pucerons à des moments critiques de la culture de la betterave, en utilisant différentes stratégies. La campagne d'échantillonnage menée au printemps 2021 s'est concentrée principalement sur des récoltes de pucerons sur betteraves et à partir de pièges (bacs jaunes) placés dans certaines parcelles de betteraves. En 2022, une campagne d'échantillonnage plus approfondie a été réalisée dans trois bassins de production de betterave sucrière (Oise, Ain et Loiret). Elle a été conduite sur des plantes cultivées et non cultivées dans l'environnement de parcelles de betterave et juste avant l'émergence des jeunes plants de betterave, ceci afin de se placer dans un contexte réaliste (coïncidence temporelle et proximité spatiale des réservoirs potentiels et des jeunes plants de betterave au moment de leur sensibilité à la colonisation par des pucerons et aux infections virales qui peuvent en découler). En réponse à des interrogations sur le rôle éventuel des betteraves porte-graines dans la dissémination des jaunisses vers les parcelles de production, un échantillonnage spécifique a également été conduit en avril 2022 dans des parcelles de porte-graines situées dans le Loiret. La campagne de 2023 a été conçue pour répondre simultanément aux objectifs du projet Resaphid et du projet **BeetRes**, un projet compagnon axé sur l'identification des réservoirs viraux également financé par le PNRI. En s'appuyant sur une analyse bibliographique et sur les résultats obtenus lors des prospections antérieures, une liste d'environ vingt espèces végétales susceptibles d'abriter des vecteurs de virus a été établie. Ces espèces ont fait l'objet d'un échantillonnage en avril 2023 dans quatre bassins de production de



betterave (Normandie, Somme-Oise, Champagne et Centre-Val de Loire), avec un objectif d'assembler des pools de cinquante plantes par espèce végétale et par site lorsque cela était possible. Simultanément, des prélèvements ont été effectués sur des betteraves porte-graines et des cordons de déterrage afin d'explorer l'hypothèse d'un cycle épidémique des virus entièrement réalisé sur betteraves cultivées. Des betteraves sauvages (*Beta maritima*) ont également été échantillonnées. Les plantes échantillonnées ont fait l'objet d'une recherche exhaustive des virus par analyse du virome grâce à une technique basée sur le séquençage haut débit d'ARN bicaténaires hautement purifiés (Marais *et al.*, 2018). Cette approche non ciblée permet en effet de détecter l'ensemble des variants viraux circulant, y compris ceux qui ne seraient pas détectés par des méthodes sérologiques ou moléculaires classiques. Les pucerons collectés sur les différentes plantes-hôtes et dans les pièges pour les trois années d'étude ont été d'abord identifiés sur la base de critères morphologiques, complétés par des analyses moléculaires en cas d'ambiguïté. En effet, plusieurs espèces de pucerons, autres que *M. persicae* (comme *Aulacorthum solani*, *Cryptomyzus galeopsidis*, *Hyperomyzus lactucae*, *Macrosiphum euphorbiae* et *Myzus ascalonicus*), ont été recensées sur les plantes cultivées et non cultivées échantillonnées, et leurs jeunes stades larvaires peuvent facilement être confondus morphologiquement. Les individus appartenant à l'espèce *M. persicae* ont ensuite été soumis à des analyses de génotypage individuel grâce à des marqueurs génétiques utilisés dans des travaux précédents (Roy *et al.*, 2023). Ces analyses ont permis d'évaluer la diversité génétique et de caractériser la structuration des clones de *M. persicae* en fonction des plantes-hôtes et des régions géographiques.

3. Principaux résultats

3.1. Bilan des campagnes d'échantillonnage

Une soixantaine d'espèces botaniques ont été inspectées durant ces diverses prospections réalisées début avril en 2021, 2022 et 2023. Des pucerons du genre *Myzus* ont ainsi pu être prélevés sur 27 plantes différentes et *Aphis fabae* sur 5 (Tableau 1). Une confirmation de la détermination morphologique des pucerons a été réalisée par barcoding moléculaire (amplification du gène de la cytochrome oxydase et séquençage du fragment amplifié). Cette approche a permis de mettre en lumière quelques erreurs de détermination, notamment sur des jeunes stades de pucerons. Ainsi une confusion sur la seule base morphologique reste possible entre *Myzus ascalonicus*, *Myzus certus* et *Myzus persicae*. L'utilisation du barcoding moléculaire sur des échantillons de référence a permis de résoudre complètement ces problèmes d'identification. Une telle identification précise des pucerons vecteurs de jaunisses est essentielle pour bien comprendre les relations avec les plantes hôtes et les différents virus. Une fois cette mise au point faite, nous avons pu préciser la gamme d'hôte des différentes espèces de pucerons observée sur la base de nos prospections. Au total, *M. persicae* est l'espèce la plus généraliste puisqu'on la retrouve sur 24 espèces botaniques différentes. *M. ascalonicus* est également très polyphage (12 hôtes) mais semble préférer les hôtes non cultivés. Le nombre d'hôtes pour *A. fabae* est très sous-estimé car cette espèce n'a pas été traitée prioritairement dans le projet.

Il est à noter que le colza, la moutarde et la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) sont des hôtes majeurs de *M. persicae* et constituent de ce fait des réservoirs importants susceptibles de produire des migrants qui pourraient par la suite coloniser les parcelles de betterave au moment de la levée. La pomme de terre est également un bon hôte pour *M. persicae* mais cette culture n'est pas présente aux stades où la betterave est vulnérable aux virus.

Les échantillonnages réalisés début avril 2022 dans trois parcelles de betteraves porte-graines situées dans le Loiret ont révélé une très faible infestation par pucerons (3 *M. persicae* dans une seule des trois parcelles échantillonnées), ce qui suggère une très faible contribution de cette culture au risque de



jaunisses sur betterave sucrière. Toutefois la prospection de 2023 a montré une situation différente, avec une assez forte présence de *M. persicae* dans les parcelles porte-graines inspectées. Des *M. persicae* ont également été trouvés dans les cordons de déterrage ou autres repousses de culture de betteraves lors de la prospection de 2023. Ces échantillonnages 2023 ont également confirmé la présence fréquente des virus de jaunisses sur ces différentes populations de betteraves cultivées.

Tableau 1 : Présence des différentes espèces de pucerons sur les plantes-hôtes échantillonnées durant les campagnes 2021, 2022 et 2023. Abs : absent, Occas : présence occasionnelle (occurrence dans un ou quelques prélèvements), Freq : fréquent (occurrence dans de nombreux prélèvements).

Nom vernaculaire	Nom latin	<i>Myzus ascalonicus</i>	<i>Myzus persicae</i>	<i>Aphis fabae</i>
Ammi élevé	<i>Ammi majus</i>	Abs	Occas	Abs
Artichaut	<i>Cynara cardunculus</i>	Abs	Occas	Occas
Aubergine	<i>Solanum melongena</i>	Abs	Occas	Abs
Barbarée	<i>Barbarea vulgaris</i>	Abs	Occas	Abs
Bardane	<i>Arctium lappa</i>	Abs	Occas	Abs
Bourse-à-pasteur	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Occas	Occas	Abs
Betterave	<i>Beta vulgaris</i>	Abs	Freq	Freq
Bourrache	<i>Borago officinalis</i>	Abs	Occas	Abs
Cameline	<i>Camelina sativa</i>	Abs	Occas	Abs
Camomille	<i>Matricaria chamomilla</i>	Abs	Occas	Occas
Cardamine hérissée	<i>Cardamine hirsuta</i>	Abs	Occas	Abs
Cerfeuil sauvage	<i>Anthriscus sylvestris</i>	Occas	Abs	Abs
Chénopode	<i>Chenopodium album</i>	Occas	Occas	Abs
Colza	<i>Brassica napus</i>	Abs	Freq	Abs
Epinard	<i>Spinacea oleracea</i>	Abs	Occas	Abs
Fumeterre	<i>Fumaria officinalis</i>	Abs	Occas	Abs
Fève	<i>Vicia faba</i>	Abs	Abs	Freq
Laiteron des champs	<i>Sonchus arvensis</i>	Occas	Abs	Abs
Laitue	<i>Lactuca sativa</i>	Occas	Abs	Abs
Marguerite des champs	<i>Leucanthemum vulgare</i>	Abs	Occas	Abs
Mouron blanc	<i>Stellaria media</i>	Freq	Abs	Abs
Moutardes	<i>Sinapis sp.</i>	Abs	Freq	Abs
Myosotis des champs	<i>Myosotis arvensis</i>	Occas	Abs	Abs
Plantain lancéolé	<i>Plantago lanceolata</i>	Occas	Occas	Occas
Pomme de terre	<i>Solanum tuberosum</i>	Abs	Freq	Abs
Phacélie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	Abs	Freq	Abs
Ravenelle	<i>Raphanus raphanistrum</i>	Abs	Freq	Abs
Rumex	<i>Rumex obtusifolius</i>	Abs	Occas	Abs
Séneçon commun	<i>Senecio vulgaris</i>	Occas	Occas	Abs
Silène	<i>Silene alba</i>	Occas	Abs	Abs
Valériane	<i>Valeriana officinalis</i>	Occas	Abs	Abs
Véronique commune	<i>Veronica persica</i>	Freq	Occas	Abs
Nombre d'espèces hôtes		12	24	5

Des échantillonnages de pucerons ont également été menés toutes les semaines de la levée à début juin, en 2021 dans une parcelle de betteraves en Ile-et-Vilaine, en 2022 dans 5 parcelles (3 dans le



Loiret, 1 dans la Somme et 1 en Ile-et-Vilaine) et en 2023 dans 12 parcelles (3 dans le Loiret, 8 dans la Somme et 1 en Ile-et-Vilaine). La plupart de ces échantillonnages ont été réalisés par les membres du projet IAE Infrastructures Agroécologiques financé par le PNRI et coordonné par Anne Le Ralec (Institut Agro, Rennes).

L'ensemble des pucerons appartenant à l'espèce *M. persicae* ont été préservés dans l'alcool absolu en vue des analyses de génotypage.

3.2. Analyses des pucerons par génotypage

Les analyses par génotypage moléculaire des pucerons (*M. persicae*, exclusivement) s'appuient sur des marqueurs microsatellites polymorphes développés dans le cadre de projets antérieurs. Elles visent à caractériser le profil génétique des individus prélevés dans différents contextes. Tout d'abord, des échantillons de pucerons aptères ont été collectés sur diverses plantes hôtes (voir bilan des prospections) afin de déterminer s'il existe une différenciation génétique des populations de *M. persicae* selon la plante hôte. Ensuite, des échantillons ailés ont été récoltés à l'aide de bacs jaunes et de pièges à succion pour évaluer la diversité génétique des populations de pucerons en phase de colonisation des betteraves et tenter d'inférer leur origine géographique ou botanique (Figure 1). Enfin, des échantillons aptères ont été prélevés dans différentes parcelles de betteraves et à divers stades, de la levée à huit semaines après la levée. Cette dernière analyse vise à tester si la betterave exerce une pression de sélection sur les populations de *M. persicae* et à identifier les génotypes potentiellement mieux adaptés à cette culture.



Figure 1 : Dispositifs d'échantillonnage aérien des pucerons vecteurs. **A gauche**, petit bac jaune (au premier plan) et grand bac jaune (en arrière-plan), placés dans une parcelle de betterave (Rouvillers, Oise), Crédit Photo : Jean-Christophe Simon. **Au milieu**, individu ailé du puceron vert du pêcher, *Myzus persicae*. Crédit Photo : Bernard Chaubet. **A droite**, piège à succion de 12,2 m qui aspire en permanence le plancton aérien, dont les pucerons en vol. Ce piège est situé au Rheu (Ile et Vilaine), sur le domaine du centre de recherche INRAE de Rennes, Crédit Photo : Franck Duval.

Concernant la diversité et la structure génétique des populations de *M. persicae* dans le nord de la France, près de 4 000 individus ont été collectés entre 2020 et 2023 dans divers bassins de production de betteraves et sur 16 espèces botaniques. Parmi eux, 2 400 pucerons ont été génotypés à l'aide de 14 marqueurs microsatellites, constituant le jeu de données pour les analyses. Le rapport G:N, représentant le nombre de génotypes multilocus (G) rapporté à l'effectif total d'individus (N), varie de 0 (tous les individus partagent le même génotype) à 1 (chaque individu possède un génotype unique). Un rapport G:N élevé reflète donc une forte diversité génétique. Dans notre étude, la faible valeur observée (G:N = 0,16) indique une diversité clonale réduite, vraisemblablement liée à une hibernation majoritairement parthénogénétique des populations de *Myzus persicae* dans la zone géographique échantillonnée. Quatre génotypes multilocus particulièrement abondants, qualifiés de « superclones », représentent environ la moitié des individus analysés. Ces superclones sont présents d'une année sur l'autre, sur plusieurs plantes hôtes (dont la betterave) et sont largement distribués géographiquement.



Une forte proximité génétique a également été observée entre les individus présents sur betteraves et ceux sur colza et moutarde, avec près de 80 % des génotypes partagés. Cela confirme le rôle majeur de ces deux dernières cultures en tant que réservoirs hivernaux pour les populations de pucerons colonisant les betteraves au printemps.

L'analyse de la dynamique temporelle des populations de *M. persicae* sur betteraves a reposé sur 660 individus collectés en 2022 (trois parcelles dans le Loiret, une dans la Somme et une en Ile-et-Vilaine) et 741 en 2023 (trois parcelles dans le Loiret, huit dans la Somme et une en Ile-et-Vilaine). La diversité génotypique, mesurée par le rapport G:N décrit plus haut, est légèrement supérieure à celle observée à l'échelle régionale (0,23 en 2022 et 0,20 en 2023), reflétant une origine variée des individus colonisant les betteraves au printemps. Les superclones jouent cependant un rôle prédominant, représentant 54 % des individus en 2022 et 65 % en 2023. Le superclone le plus abondant sur l'ensemble des espèces botaniques échantillonnées domine également sur betterave, avec 23 % des individus en 2022 et 31 % en 2023. La dynamique temporelle de ces superclones reste stable, ceux-ci étant présents tout au long de la phase de colonisation printanière.

3.3. Premiers résultats sur l'identification des réservoirs viraux

Les résultats des séquençages obtenus à partir de l'échantillonnage de plantes réalisé en 2023 révèlent plusieurs éléments clés sur les réservoirs potentiels des virus de la betterave.

Tout d'abord, le BYV et le BtMV ont été fréquemment détectés dans des populations de betteraves maritimes (*Beta maritima*) collectées dans plusieurs régions. Cependant, la majorité des isolats de ces virus identifiés chez *B. maritima* sont différents de ceux retrouvés dans les cultures de betterave. Cela suggère l'existence de barrières limitant les flux viraux entre ces deux types de betteraves et, en corollaire, que ces populations naturelles d'une espèce très proche de la betterave cultivée ne pourraient au mieux qu'être des réservoirs de peu d'importance. De plus, aucun des quatre virus des jaunisses n'a été détecté chez le colza. Ce résultat est corroboré par des analyses élargies réalisées dans le cadre du projet PPR CPA Deep Impact. Ces dernières, menées sur 50 parcelles de colza en 2022 et 2023 en Bretagne, Bourgogne et Occitanie, ont impliqué un échantillonnage d'un total de 4 800 plantes. Qui plus est, des expériences en conditions contrôlées au laboratoire n'ont révélé aucune infection du colza par les quatre virus des jaunisses après inoculation. L'ensemble de ces données invalide l'hypothèse que le colza puisse jouer un rôle de réservoir pour les virus de la betterave.

Parmi les 17 autres espèces végétales pour lesquelles des données sur le virome ont été acquises, des virus de la betterave n'ont été identifiés que chez la phacélie (deux populations infectées sur les six analysées) et la féverole (une population infectée sur les quatre analysées). Notamment, une population de phacélie collectée dans le Loiret était infectée par le BYV et le BtMV. Cette population contenait également d'autres virus transmis par pucerons, comme le Turnip yellows virus, qui infecte le colza, et le Soybean dwarf virus, qui infecte des légumineuses. Sachant que la phacélie peut également jouer un rôle de réservoir pour les pucerons, ces résultats suggèrent que cette espèce pourrait être un point focal dans la circulation de nombreux virus transmis par ces insectes, y compris ceux affectant la betterave. Quant à la féverole, le BtMV a été détecté dans une des quatre populations, ce qui pourrait faire de cette culture un réservoir de ce virus, puisqu'elle est aussi un hôte très apprécié par le puceron vecteur *A. fabae*.

Il est important de souligner que ni le BMV, ni le BChV n'ont été détectés dans les betteraves maritimes, ni dans les autres espèces échantillonnées, à l'exception des betteraves cultivées (repousses, cordons de déterrage, porte-graines). Chez ces dernières, le BYV et le BtMV ont également été identifiés. Il convient de noter que le BMV présente une faible prévalence en France. Jointe aux résultats ci-dessus, cette dernière observation suggère un rôle central des repousses de betteraves et, éventuellement, des porte-graines dans l'épidémiologie des virus des jaunisses.



4. Discussion - conclusion

4.1. Implications pour la gestion des réservoirs de jaunisses de la betterave et de leurs vecteurs

Nos résultats mettent en évidence l'importance de certaines cultures, notamment le colza et les moutardes, en tant que réservoirs majeurs des clones de *M. persicae* responsables des colonisations de betteraves au printemps. Bien que ces cultures ne soient pas identifiées comme des sources des virus des jaunisses, elles jouent vraisemblablement un rôle central dans la dynamique des populations de pucerons. Cela pourrait ouvrir la voie à des stratégies de gestion ciblées, bien que leur mise en œuvre sur des cultures aussi répandues que le colza, puisse s'avérer complexe.

En complément, la phacélie (pour le BYV et le BtMV), la féverole (pour le BtMV) et les betteraves repousses ou porte-graines (pour les quatre virus responsables des jaunisses) ont été identifiées comme des sources à la fois de vecteurs et de virus. Les premiers résultats soulignent notamment que la phacélie pourrait jouer un rôle significatif dans la dynamique épidémique si elle n'est pas détruite en amont de la période de contamination des semis de betterave. Malgré ces avancées, des incertitudes subsistent quant à l'identification complète des réservoirs des virus des jaunisses ainsi qu'à l'importance respective que pourraient avoir les différents réservoirs potentiels identifiés à ce stade.

Ces travaux ont permis de sensibiliser à l'importance des réservoirs dans la gestion des jaunisses. Ils ont dès à présent débouché sur des recommandations pratiques diffusées au sein de la filière visant notamment à mieux gérer les repousses, les cordons de déterrage et la phacélie, identifiés comme autant de réservoirs potentiels. En parallèle, le développement d'outils diagnostiques pour la détection rapide des virus dans les populations de pucerons pourrait renforcer les capacités de surveillance épidémiologique et faciliter des interventions adaptées au niveau local. Toutefois, ces outils nécessitent encore des améliorations pour surmonter les difficultés liées notamment à la détection des virus à transmission semi-persistante ou non persistante dans les pucerons.

4.2. Avancées scientifiques et poursuite des travaux

L'identification des réservoirs de pucerons vecteurs et des virus associés aux jaunisses de la betterave constitue un objectif ambitieux et complexe. Ces difficultés étaient anticipées dès le début des travaux, car cette question reste irrésolue, tant en France qu'en Europe.

Les méthodes employées pour avancer sur la problématique des réservoirs ont reposé sur un échantillonnage extensif des pucerons présents sur une large gamme de plantes-hôtes et dans différents contextes géographiques. Plus de 10 000 pucerons ont été identifiés et le génotypage individuel des *M. persicae* échantillonnés a permis d'évaluer la diversité génétique et les dynamiques populationnelles entre différentes plantes-hôtes et régions géographiques du principal vecteur de jaunisses de la betterave. Les résultats ont mis en évidence une faible diversité des populations de *M. persicae* dans le nord de la France et l'existence de quelques superclones qui passent l'hiver sur des plantes telles que le colza et les moutardes, avant de coloniser les betteraves, où ils jouent un rôle prépondérant dans la dynamique des populations sur cette culture. Ces clones, caractérisés par leur forte plasticité écologique et leur important potentiel de dispersion, représentent des cibles prioritaires pour de futures recherches visant à préciser leurs capacités vectrices et à mieux comprendre les raisons de leur succès écologique.

Dans le même temps, l'analyse exhaustive du virome des différentes espèces végétales échantillonnées a permis (1) d'exclure un rôle de réservoir pour le colza, (2) de proposer que les betteraves sauvages (*B. maritima*) n'aient vraisemblablement qu'un rôle au mieux très limité, (3) de soulever la question d'un éventuel rôle de réservoir pour la phacélie (et de la féverole pour le BtMV). Le fait que les polérovirus BMV et BChV n'aient pas été retrouvés hors des betteraves cultivées souligne par ailleurs l'importance centrale que pourrait avoir la betterave cultivée elle-même (repousses, cordons



de déterrage, éventuellement porte-graines) dans le cycle de la jaunisse, ce qui a déjà conduit à de nouvelles recommandations en direction des producteurs afin de renforcer l'efficacité de la lutte prophylactique.

Le nouveau projet **Redivibe** (coordonné par Véronique Brault, INRAE Colmar), conduit dans le cadre du PNRI-C, rassemble des virologues et des entomologistes pour prolonger les travaux présentés dans cet article. Il vise à relever le défi d'identifier et de quantifier l'impact des différents réservoirs des jaunisses de la betterave et de leurs pucerons vecteurs. Ce projet contribuera à développer des solutions opérationnelles pour mieux gérer cette maladie, qui constitue une menace importante pour la filière sucrière française.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

T. CANDRESSE : <https://orcid.org/0000-0001-9757-1835>

A. MARAIS : <https://orcid.org/0000-0003-2482-1543>

J.C. SIMON : <https://orcid.org/0000-0003-0620-5835>

C. BUCHARD : <https://orcid.org/0009-0004-7280-6959>

Contributions des auteurs

Conception du projet : TC, AMA, JCS

Echantillonnage au champ : YN, CB, FD, AMO, GM, TC, JCS

Expérimentation : YN, FM, FD, CB, GM, CF, LS, AMA

Analyse des données : YN, FM, JCS, TC

Rédaction du draft : JCS

Relecture, finalisation du manuscrit : JCS, TC

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Anne Le Ralec, Ségolène Buzy et Léna Barascou pour les échantillons de *M. persicae* prélevés sur betteraves dans le cadre du projet IAE du PNRI. Un grand merci aussi à



toutes les personnes de l'ITB qui nous ont aidés à collecter les pucerons et les plantes lors des campagnes 2022 et 2023. Véronique Brault, Aurélie Marmonier, Hélène Schlaefli sont remerciées pour le partage des données sur la détection des virus des jaunisses dans les résidus de culture de betteraves et sur les tests d'inoculation dans le colza. Enfin, la Plateforme INRAE GenoToul (Toulouse, France, <https://doi.org/10.15454/1.5572369328961167E12>) est remerciée pour la réalisation des séquençages Illumina pour les analyses de virome.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié du soutien financier de FranceAgriMer attribué aux projets Resaphid et BeetRes.

Références bibliographiques

- Bass C., Puinean A.M., Zimmer C.T., Denholm I., Field L.M., Foster S.P., Gutbrod O., Nauen R., Slater R., Williamson M.S., 2014. The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, 41-51.
- Blackman R.L., Eastop V.F., 2000. *Aphids on the World's Crops*, Second Edition. John Wiley & Sons.
- Brault V., Drucker M., Chesnais Q., Marmonier A., Schlaefli H., Khechmar S., Marais A., Candresse T., Monteiro A., Malatesta G., Maupas F. 2025. Seuls ou en association, nouveaux éclairages sur les virus responsables de la jaunisse de la betterave sucrière. *Innovations agronomiques*. Sous presse.
- Limburg D.D., Mauk P.A., Godfrey L.D., 1997. Characteristics of Beet Yellows Closterovirus transmission to sugar beets by *Aphis fabae*. *Phytopathology*, 87, 766-771.
- Marais A, Faure C, Bergey B, Candresse T. 2018. Viral Double-Stranded RNAs (dsRNAs) from Plants: Alternative Nucleic Acid Substrates for High-Throughput Sequencing. *Methods in Molecular Biology*;1746,45-53. doi: 10.1007/978-1-4939-7683-6_4.
- Roy L., Barrès B., Capderrey C., Mahéo F., Micoud A., Hullé M., Simon J.C., 2022. Host plant species and insecticides shape the evolution of genetic and clonal diversity in a major aphid crop pest. *Evolutionary Applications*, 15, 1653-1669.
- Schliephake E., Graichen K., Rabenstein, F., 2000. Investigations on the vector transmission of the Beet mild yellowing virus (BMVYV) and the Turnip yellows virus (TuYV). *Journal of Plant Diseases and Protection*, 107, 81-87
- Stevens M., Smith H.G., Hallsworth P.B., 1994. The host range of beet yellowing viruses among common arable weed species. *Plant Pathology*, 43, 579-588.

Pour citer cet article : Yannis Nio, Christelle Buchard, Franck Duval, Chantal Faure, Frédérique Maheo, *et al.*. Identification des réservoirs des vecteurs et des virus responsables des jaunisses de la betterave. *Innovations Agronomiques*, 2025, 103, pp.1-9. [10.17180/ciag-2025-vol103-art01](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art01)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Attraction d'insectes auxiliaires contre le puceron vert, vecteur de la jaunisse de la betterave.

Damien ROLLANDEZ, Manon AVIGNON, Pierre-Antoine BOURDON, Johann FOURNIL

M2i Group Life Sciences -1, rue royale - 112 bureaux de la Colline - Bâtiment G1 – Entresol 1 - 92 213 Saint-Cloud Cedex – France

Correspondance : damien.rollandez@m2i-group.fr; johann.fournil@m2i-group.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art02>

Résumé

Le présent article expose les résultats du projet BAP mené dans le cadre du PNRI Betteraves, visant à développer des solutions alternatives aux néonicotinoïdes dans la lutte contre le puceron vert *Myzus persicae*. Ces résultats présentent l'évaluation d'une formulation micro-encapsulée d'E-β-farnésène pour attirer les insectes prédateurs et auxiliaires. Des tests d'olfactométrie ont démontrés que la formulation concentrée à 10 % de substance active a un effet d'attraction de coccinelles significatif. Trois essais en champs sur betterave ont ensuite révélé que l'association huile paraffinique avec cette formulation permet une réduction des populations de pucerons plus importante que l'huile seule, limitant la jaunisse au même niveau qu'un traitement à base de flonicamide, substance active d'un insecticide homologué. Cette approche offre une alternative durable aux insecticides.

Mots-clés : médiateur chimique, phéromone, kairomone, puceron, betterave, biocontrôle, composés organiques volatils

Abstract: Demonstration of the effectiveness of a solution for attracting beneficial insects against the green aphid, vector of beet yellows.

This article presents the results of the BAP project carried out as part of the PNRI Beet program, aimed at developing alternative solutions to NNIs for the control of the green aphid *Myzus persicae*. These results present the evaluation of a micro-encapsulated formulation of E-β-farnesene to attract predatory and beneficial insects. Olfactometry tests demonstrated that the formulation, concentrated at 10 % active substance, had a significant ladybug attractant effect. Three field trials on beet then revealed that combining paraffinic oil with this formulation reduced aphid populations more significantly than oil alone, limiting yellows to the same level as a flonicamide-based treatment. This approach offers a sustainable alternative to insecticides.

Keywords: chemical mediator, pheromone, kairomone, aphid, beet, biocontrol, volatile organic compounds

1. Introduction

Les pucerons, notamment le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*), représentent une menace majeure pour les cultures en raison leur capacité tout à fait exceptionnelle pour se reproduire. Une fois les premiers individus établis sur la plante hôte, la population double toutes les 24 h grâce à son mode de reproduction asexuée de type parthénogenèse ce qui empêche les approches classiques employant les phéromones comme la confusion sexuelle (Dixon, 1977). Le piégeage de masse quant à lui est à exclure sur ce type de culture car il n'aurait aucune réalité économique.

Une étude bibliographique faite par M2i Group et le CNRS a montré qu'il est possible d'avoir une approche de rupture en utilisant les composés sémio-chimiques des pucerons mais aussi des plantes



stressées pour attirer les insectes aphidiphages (Li *et al.*, 2019 ; Stökl *et al.*, 2011). La phéromone d'alarme du puceron, le E- β -farnésène (EbF), est en effet une molécule reconnue par les prédateurs des pucerons pour localiser les colonies : elle joue donc un rôle de kairomone pour ces insectes aphidiphages (Francis *et al.*, 2004). Cependant la littérature montre que le niveau d'émission doit être suffisant, sûrement du niveau d'émission des plantes agressées, pour pouvoir avoir un effet sur les prédateurs (Vosteen *et al.*, 2016).

Les prédateurs ciblés sont en priorité les *coccinellidae* en raison du fait qu'elles sont aphidiphages à tous les stades (larves et adultes) et nécessiteront donc moins d'aménagements floraux pour maintenir l'espèce. Néanmoins, les populations de syrphes et de chrysopes sont également ciblées, leurs larves étant aphidiphages, et la diversification du cortège d'auxiliaires étant un élément important dans le renforcement de l'efficacité de la lutte biologique (Rodriguez-Saona *et al.*, 2011).

Au regard de cette littérature abondante, M2i Group a fait le choix d'adopter une stratégie d'attraction de prédateurs de pucerons pour contrôler la propagation des maladies, en particulier la jaunisse de la betterave.

De plus, la technologie développée par M2i depuis ses débuts, la micro-encapsulation, permet d'avoir un produit simple à utiliser et adaptable en fonction de la culture visée (ici pulvérisation par spray). En plus d'être biosourcée et biodégradable, la formulation M2i est sans résidu, stable et stockable à température ambiante et garantit à l'application une diffusion et une longue rémanence de composés organiques volatiles. Les formulations micro encapsulées sprayables de M2i sont également miscibles à d'autres substances (fongicides, herbicides...) et sont applicables en toute simplicité avec les matériels standards des agriculteurs sans aucune modification des buses.

Un des objectifs de ce projet a donc été de mettre au point une formulation pulvérisable (spray) destinée à attirer sur la parcelle des insectes auxiliaires et des prédateurs des pucerons verts, vecteurs de virose.

Le produit mis au point constitue un booster de biodiversité qui va permettre une lutte biologique naturelle intense et efficace, seule ou en complément des traitements habituels biologique (huile aphicide pour en augmenter l'efficacité) ou conventionnels (flonicamide pour en réduire l'usage). Ces associations permettent la combinaison d'une action directe dans la lutte contre les pucerons via un insecticide de contact et un effet prolongé par l'attraction d'auxiliaires prédateurs grâce aux kairomones micro encapsulées.

Dans le cadre du projet, un test d'olfactométrie en laboratoire ainsi que trois essais en champs de betterave porte-graines associant la solution M2i avec une huile de paraffine ont été réalisés. Les objectifs des essais ainsi menés ont été d'évaluer la dose efficace en substance active du produit ainsi que l'efficacité de la formulation, à la fois pour attirer les prédateurs des pucerons, notamment les coccinelles, syrphes et chrysopes, mais aussi pour limiter la propagation des viroses en culture de betterave.

Le programme BAP mené sous l'égide de l'ITB avec le concours de Téréos, l'UMR 5174 CNRS/IRD/Université Toulouse 3 « Evolution et Diversité Biologique » (EDB), et Bioline Agrosciences de 2021 à 2023 a permis la mise au point de cette solution efficace et désormais commerciale.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Test d'olfactométrie en laboratoire

Dans le but de vérifier que le dosage utilisé dans la formulation était en adéquation avec les doses décrites dans la littérature, des tests d'olfactométrie sur coccinelles à deux points (*Adalia bipunctata*)



ont été réalisés à partir de deux formulations avec des doses de kairomone différentes (chargées respectivement à 5 % ou 10 % de substance active).

Le dispositif, le calibrage et le protocole d'utilisation de l'olfactomètre pour ces tests de comportement sont issus d'un long travail effectué par le CNRS.

Les tests de comportement ont été réalisés au laboratoire de l'équipe RIME, dans une pièce noire ayant pour seule source de lumière un spot lumineux positionné face à un olfactomètre en Y. Chaque branche de l'olfactomètre mesurait 8 cm de long et 2 cm de diamètre intérieur et les deux branches supérieures étaient espacées de 120°. Les insectes étaient déposés un à un dans la branche principale et leur parcours était noté jusqu'à leur choix final entre la branche de droite ou la branche de gauche. Ces dernières étaient reliées soit à de l'air purifié humidifié soit à de l'air humidifié chargé en kairomones provenant de 10 µL de la formulation 5 % diluée 300 fois (S5D300) ou de la formulation 10 % diluée 300 fois (S10D300) déposés sur du papier filtre (bandelette de 3 cm sur 1 cm). Une sonde thermo-hygrométrique était placée au centre de l'olfactomètre avant chaque début de test pour contrôler la température et l'humidité ($T = 21,1 \pm 0,34$ °C ; $RH = 60,61 \pm 3,63$ %).

Chaque test durait 10 minutes mais dès que les individus avaient effectué leur choix, le chronomètre était stoppé. Les individus n'ayant pas fait de choix au bout des 10 minutes de tests ont été considérés comme « non-choix » et n'ont pas été intégrés dans l'analyse statistique des données. Les modalités testées dans ces essais comportementaux ont été les suivantes :

- Air VS Papier filtre seul ;
- Air VS 10 µL de la formulation 5 % diluée 300 fois sur papier filtre ;
- Air VS 10 µL de la formulation 10 % diluée 300 fois sur papier filtre.

Tous les 10 tests (environ 1h), l'olfactomètre utilisé était lavé à l'acétone et/ou changé et la source d'odeur renouvelée puis changée de côté. Au total, 43 à 49 tests pour chaque modalité auront été réalisés.

2.2. Essais en champs de betteraves porte-graines

L'objectif de ces essais était d'évaluer l'efficacité du mélange kairomonal dans la lutte contre le puceron vert, ici en augmentant l'efficacité d'une huile de paraffine associée sur betterave porte-graine. Cette association combine en effet une action directe dans la lutte contre les pucerons via un insecticide de contact et un effet prolongé par l'attraction d'auxiliaires prédateurs grâce aux kairomones.

Sur les communes de Maves (Essais n°1) et d'Ymonville (Essais n°2 et n°3), trois essais ont été menés en partenariat avec l'ITB pour tester l'association de l'huile paraffinique avec deux formulations kairomonales développées par M2i, respectivement concentrées à 5 % (« produit M2i à 5 % ») et 10 % (« produit M2i à 10 % ») de substance active. En plus d'être comparées à un témoin non traité, ces associations ont été comparées à l'application d'une huile paraffinique seule ainsi que l'application d'un insecticide à base de flonicamide seul. Ces modalités testées au cours des essais sont détaillées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Les applications des modalités associées aux produits M2i (produits M2i à 5 % et 10 %) devaient être renouvelées tous les 7 à 10 jours maximum. Trois applications ont été effectuées au total :

- 1^{re} application : stade BBCH12 (ou apparition des 1ers pucerons) ;
- 2^e application : 7 à 10 jours après la 1^{ère} application ;
- 3^e application : 7 à 10 jours après la 2^{ème} application.

Tableau 1 : Modalités testées lors des essais en champs de betterave porte-graines



Traitement	Matière active	Qté pdt/ha/appli.	Taille de la parcelle	Dates de traitement Essais n°1 (Maves)	Dates de traitement Essais n°2 et3 (Ymonville)
1.	Huile de paraffine	15 L	1 000 m ²	06/10; 16/10; 25/10	18/10; 28/10; 05/11
2.	Produit M2i à 5%* + huile de paraffine	1 L + 15 L	1 000 m ²	06/10; 16/10; 25/10	18/10; 28/10; 05/11
3.	Produit M2i à 10%** + huile de paraffine	1 L + 15 L	1 000 m ²	06/10; 16/10; 25/10	18/10; 28/10; 05/11
4.	Témoin non traité	-	1 000 m ²	-	-
5.	Témoin producteur (Flonicamide)	140 g/ha	1 000 m ²	25/10	28/10

* Formulation dosée à 5 % de substances actives ; **Formulation dosée à 10 % de substances actives

Afin d'évaluer l'efficacité de chaque modalité, les notations suivantes étaient réalisées sur 10 plantes marquées et suivies durant toute la saison :

- comptage du nombre de plantes infectées avant chaque application ;
- comptage des pucerons et auxiliaires avant chaque application ;
- observation d'éventuels symptômes de phytotoxicité

Après la 3^e application du produit, deux notations supplémentaires ont été effectuées durant les deux semaines suivantes pour compter le nombre de plantes infectées, le nombre de pucerons et d'auxiliaires, et évaluer la phytotoxicité.

Pour l'essai n°1 (Maves) un comptage de coccinelles issues d'un lâcher a également été effectué afin d'évaluer l'efficacité de l'effet « attractif d'auxiliaires » de l'association huile paraffinique et mélange kairomonal, ainsi que l'observation d'auxiliaires naturellement présents dans la parcelle. Enfin une évaluation et notation des symptômes de jaunisse en fin de saison a également été réalisé. Cette notation correspond à l'attribution à l'œil nu d'une note de 1 à 9 (score de 1 pour une parcelle saine ; score de 9 pour une parcelle très marquée par les symptômes de la jaunisse de la betterave).

Les résultats présentés concernent uniquement les comptages de pucerons verts aptères. En effet, la pression puceron étant très faible durant la période des essais, le nombre de pucerons verts ailés ou de pucerons noirs était trop faible voire inexistant pour être pris en compte dans l'analyse.

3. Résultats

3.1. Test d'olfactométrie en laboratoire

3.1.1. Choix des individus

La formulation concentrée à 10 % diluée 300 fois (S10D300) a attiré significativement 67 % des coccinelles testées sous cette modalité ($p = 0.021$), alors que la formulation concentrée à 5 % diluée 300 fois (S5D300) n'a pas significativement attiré *A. bipunctata* (succès : 56 %, $p = 0.542$) au seuil de tolérance de 5 % (fig. 1). Le choix des coccinelles pour la formulation concentrée à 10 % diluée 300 fois est bien dû à l'attractivité de la formulation et non à celle du papier filtre (témoin) puisque *A. bipunctata* n'est significativement pas attirée par le papier filtre seul ($p = 0.775$).

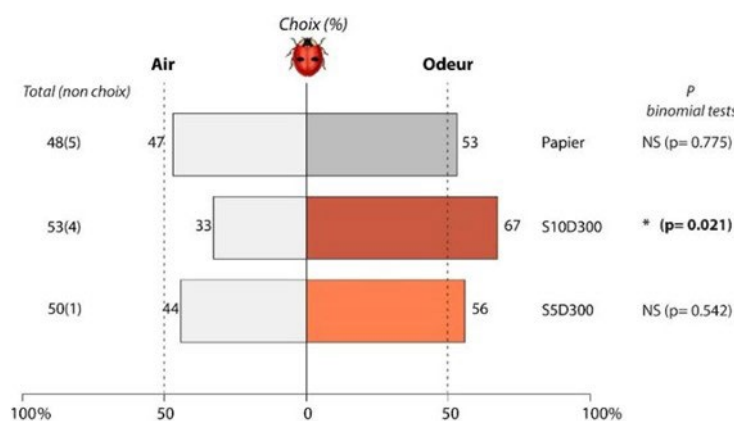


Figure 1 : Résultats des choix de *A. bipunctata* dans les tests de comportement. Le choix pour la formulation concentrée à 10 % est coloré en rouge sur la figure, en orange pour la formulation concentrée à 5 % et en gris pour le papier filtre seul. Les chiffres associés aux histogrammes correspondent au pourcentage de réponse pour chaque choix (air ou odeur). Le nombre d'individus testés est affiché à gauche

du graphique dont le nombre de non-choix entre parenthèse.

3.1.2. Temps de prise de décision

Les coccinelles ont choisi la source d'odeur correspondant à la formulation S10D300 en 140,22s en moyenne, alors qu'elles ont choisi la source d'odeur correspondant à la formulation S5D300 et au papier filtre seul en moyenne en 158,48s et 214,21s respectivement (fig. 2). Le temps de prise de décision n'est pas significativement différent entre les traitements ($p = 0.42$), même si *A. bipunctata* semble mettre moins de temps à choisir la formulation 10 % diluée 300 fois qui est pourtant significativement plus attractive (fig. 1).

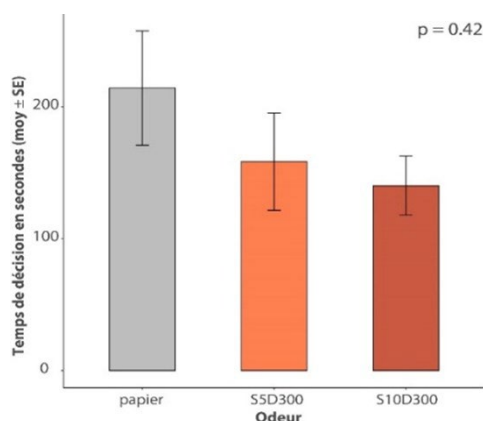


Figure 2 : Temps de prise de décision moyen de *A. bipunctata* dans l'olfactomètre pour chaque source d'odeur. Chaque couleur représente une source d'odeur différente (gris pour le papier filtre, orange pour la formulation 5 % et rouge pour la formulation 10 %).

3.2. Essais en champs de betteraves porte-graines

3.2.1. Comptage de pucerons

Afin d'évaluer l'efficacité de l'association huile paraffinique et mélange kairomonal dans la lutte contre le puceron, des comptages de pucerons verts aptères ont été effectués.

Dans l'essai n°1 (Maves), la pression de puceron était faible à modérée tout au long de l'essai. Cependant, une nette réduction de la pression de population de *Myzus persicae* dans l'ensemble des parcelles traitées a pu être observée en comparaison à la parcelle non traitée. L'application du flonicamide à la date du 25/10 a permis une réduction des populations en comparaison au témoin non traité dès l'application. Les traitements à l'huile de paraffine seule ou associée au mélange kairomonal ont permis de maintenir les populations de puceron sous un seuil acceptable permettant de ne pas intervenir avec un insecticide chimique. Le nombre de pucerons par plante a été maîtrisé, ainsi que le pourcentage de plantes infestées. Une nette réduction du pourcentage de plantes infestées dans la parcelle traitée à l'huile de paraffine en association au mélange kairomonal le plus concentré a été observée, en comparaison aux deux autres traitements (huile de paraffine seule ou associée au mélange kairomonal moins concentré) (fig. 3).

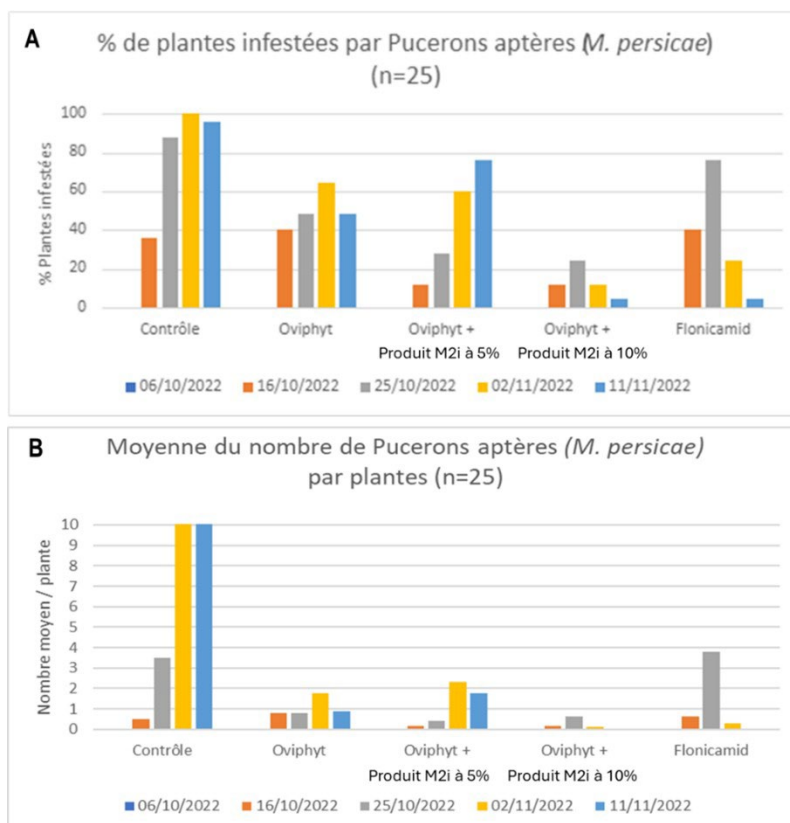


Figure 3 : Résultats des comptages de plantes infectées (A) et de pucerons (B) dans les parcelles de l'essai n°1 (Maves) ; Oviphyt = huile de paraffine ; flonicamid = insecticide homologué

En ce qui concerne l'évaluation de l'efficacité de l'effet « attractif d'auxiliaires » de l'association huile paraffinique et mélange kairomonal par comptage des coccinelles issues d'un élevage, il a été difficile de retrouver les coccinelles relâchées sur les parcelles de l'essai n°1 (Maves) en raison de conditions climatiques défavorables. Une grappe d'œufs a été retrouvée sur la modalité huile de paraffine seule associée au mélange kairomonal à 5 % et une

coccinelle a été observée sur la modalité l'huile de paraffine seule. Ces observations sont aussi potentiellement dues à la faible densité du lâché (environ 1 coccinelle pour 10 à 15 pieds). Cependant la présence d'autres auxiliaires a pu être détectée directement (observation de chrysopes) ou indirectement (observation de momies de pucerons, synonymes de la présence de parasitoïdes) lors des comptages de pucerons. Ces observations restent qualitatives et non quantitatives.

3.2.2. Notation Jaunisse

Enfin, une notation jaunisse a été réalisée au printemps pour l'essai n°1 (Maves), en attribuant à l'œil nu une note de 1 à 9. Cette notation permet d'évaluer l'efficacité de l'effet de limitation de la propagation de la jaunisse par l'association huile paraffinique/mélange kairomonal. La parcelle non traitée a présenté une forte infestation par la jaunisse avec un score très élevé (8.5 sur 9). A l'inverse, il a été observé que la parcelle traitée par la solution huile de paraffine/mélange kairomonal 10 % a permis de contrôler la propagation du virus de la jaunisse de la betterave au même niveau que la parcelle traitée au flonicamide (score de 3 sur 9). Également, la parcelle traitée à l'huile de paraffine seule a obtenu un score plus élevé que lorsque l'huile est associée au mélange kairomonal, avec un score respectif de 6.5 sur 9 et 3 sur 9 (Tableau 2).

Tableau 2 : Résultats de notation jaunisse en fonction du traitement des parcelles de l'essai n°1

Traitements	Matière active	Score Jaunisse
1	Huile de paraffine	6.5
2	Produit M2i à 5%* + huile de paraffine	5
3	Produit M2i à 10%** + huile de paraffine	3
4	Témoin non traité	8.5
5	Témoin producteur (Flonicamid)	3

*Formulation contenant 5% de matière active



**Formulation contenant 10% de matière active

Dans l'essai n°2 (Ymonville), la pression de puceron était faible à modérée tout au long de l'essai. Cependant, une réduction légère à nette de la pression de population de *Myzus persicae* dans l'ensemble des parcelles traitées a pu être observé en comparaison à la parcelle non traitée. L'application du flonicamid à la date du 28/10 a permis une réduction des populations en comparaison au témoin non traité dès l'application. Les traitements à l'huile de paraffine seule ou associée au mélange kairomonal ont permis de contrôler le développement des populations de pucerons dans les parcelles. Dans cet essai, une tendance a été observée montrant un nombre de pucerons par plante inférieur dans les parcelles traitées par la solution huile de paraffine associée au mélange kairomonal concentré à 5 % et à 10 % en comparaison à la parcelle traitée avec l'huile de paraffine seule. La réduction du pourcentage de plantes infestées dans la parcelle traitée à l'huile de paraffine seule et en association au mélange kairomonal ont présenté une légère diminution en comparaison au témoin non traité (fig. 4).

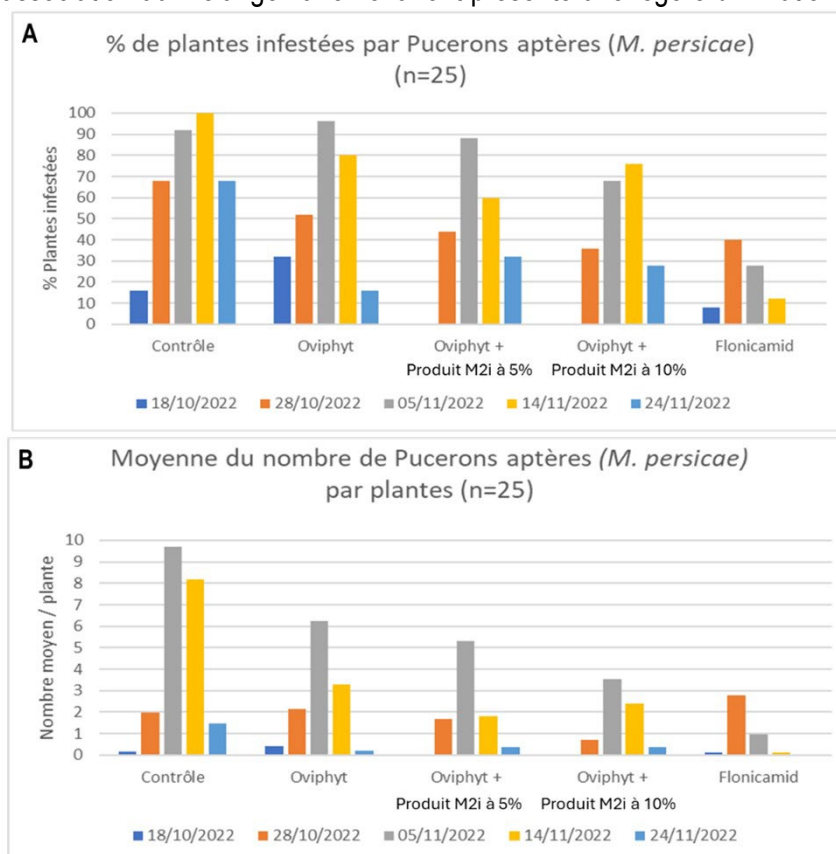


Figure 4 : Résultats des comptages de plantes infectées (A) et de pucerons (B) dans les parcelles de l'essai n°2 (Ymonville) ; Oviphyt = huile de paraffine ; flonicamid = insecticide homologué.

Pour l'essai n°3 (Ymonville), la parcelle a présenté une levée de la culture de betterave porte-graines très hétérogène. Cela a par conséquent créé un effet confondant levée / efficacité des traitements. Les résultats étaient difficilement exploitables et il a été préférable de ne pas conclure sur cet essai.

4. Discussion et conclusion

4.1. Discussion

L'attractivité du produit M2i ainsi que son efficacité aux champs ont pu être évalués avec succès grâce aux différents essais mis en place.

Les tests d'olfactométrie réalisés en laboratoire ont permis d'évaluer l'attractivité des formulations kairomonales sur *Adalia bipunctata*. Les résultats indiquent que la formulation concentrée à 10 % attire significativement les coccinelles, contrairement à la formulation à 5 %, dont l'effet attractif n'est pas significatif. Ces observations sont cohérentes avec la littérature, qui suggère que l'efficacité des kairomones dépend fortement de leur concentration (Vosteen et al., 2016). L'absence d'attractivité du papier filtre seul confirme que l'effet attractif observé est bien dû à la substance active E- β -farnésène. Bien que les temps de prise de décision des coccinelles ne diffèrent pas significativement entre les



modalités, une tendance semble émerger en faveur d'une décision plus rapide en présence de la formulation. Cette attractivité est d'autant plus importante pour la formulation concentrée à 10 %, renforçant l'hypothèse d'une meilleure efficacité à cette concentration.

En conditions terrain, l'association de l'huile de paraffine avec le mélange kairomonal a montré une réduction notable des populations de pucerons verts aptères (*Myzus persicae*) par rapport au témoin non traité. Les essais ont notamment révélé une efficacité supérieure de cette association par rapport à l'utilisation d'huile seule, soulignant l'efficacité du mélange kairomonal. Cette efficacité est d'autant plus soulignée avec une formulation concentrée à 10 % par rapport à celle à 5 %, suggérant une réponse favorable des auxiliaires à des concentrations plus élevées de kairomones. L'association entre huile de paraffine et kairomone permet bien de réduire la pression de ravageur par rapport au témoin non-traité ou à l'huile seule. Dans le cas de l'essai 1, l'association entre huile paraffinique et kairomone à 10% a même ainsi pu ainsi atteindre un niveau d'efficacité similaire aux traitements insecticides à base de flonicamide, pour une pression d'infestation faible à modérée. Cette diminution a permis de maintenir les populations sous un seuil acceptable, évitant ainsi l'utilisation systématique d'un insecticide chimique, ou permettant la réduction significative du nombre de passage d'insecticides chimiques dans la saison. Bien que ces essais n'aient pas été réalisés sous forte pression, les résultats obtenus dans ces conditions sont encourageants et permettent d'envisager avec optimisme des essais en situation de forte pression.

4.2. Conclusion

Ces essais intègrent le projet porté sur 3 années, au cours desquelles de nombreuses solutions à base de sémio-chimiques ont été étudiées tant à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle du champ. De nombreux éléments convergent pour justifier la mise en marché du produit. En effet, les résultats des études d'olfactométrie ont permis de confirmer les substances actives décrites dans la littérature et d'en définir l'ordre de grandeur des doses à considérer. S'en sont suivie des travaux de formulation, qui ont permis de mettre au point des produits stables et durables dans le temps et compatibles avec une application par pulvérisation. Ces travaux ont permis de générer les produits prototypes qui ont pu être testés en champs. Ces essais ont permis de montrer l'effet « booster de biodiversité » par l'augmentation de l'efficacité des produits aphicide utilisés en association, notamment l'huile de paraffine. Cette association permet de maîtriser les populations de pucerons et de limiter la propagation de la jaunisse, offrant ainsi une alternative efficace à l'insecticide chimique. Cette solution est également utilisable en association avec des traitement insecticides chimiques tel que le flonicamide, dans le but d'augmenter son efficacité et de réduire le nombre de passage nécessaires, élément important dans le cadre de la protection intégrée des cultures. En plus de son efficacité, la praticité et la simplicité d'utilisation du produit a été remonté de la part des exploitants l'ayant utilisé lors des essais, par la possibilité de le mélanger à d'autres solutions pulvérisables, rendant son application rapide et économique, et par sa longue rémanence de 3 à 4 semaines.

En complément de ces trois essais, plusieurs expérimentations au champ ont été menées afin d'évaluer différentes modalités d'application du mélange kairomonal. Ces essais ont par exemple porté sur son utilisation en association avec un insecticide à base de flonicamide, ainsi qu'avec des herbicides appliqués parallèlement à un traitement à l'huile de paraffine. Toutefois, en raison d'une pression du ravageur particulièrement faible lors de ces essais, il n'a pas été possible de tirer des conclusions significatives quant à une éventuelle augmentation de l'efficacité des traitements aphicides combinés au mélange kairomonal. Néanmoins, des tendances positives et encourageantes ont tout de même été observées, suggérant une réduction du nombre de pucerons ainsi qu'une augmentation de l'abondance des auxiliaires.

M2i poursuit ses expérimentations et applications sur le terrain en développant davantage les observations auxiliaires. Au vu des résultats positifs obtenus en betterave porte-graines, de nouveaux



essais ont été menés les années suivantes en verger de pommiers afin d'évaluer l'efficacité de cette approche dans un autre contexte cultural, où les pucerons sont également une problématique majeure. Notamment, une campagne d'essai à grande échelle aura lieu en 2025. Le produit sera testé dans différentes conditions et selon différents itinéraires afin de maximiser son efficacité. Ces essais auront lieu en grande cultures (notamment betteraves), mais aussi en arboriculture et maraichage, ou plus spécifiquement pour la simplification des manipulations des élevages en conditions contrôlées.

En conclusion, l'intégration de kairomones dans la gestion des pucerons, combinée à l'utilisation de produits naturels comme l'huile de paraffine, représente une approche novatrice et prometteuse pour limiter les populations de pucerons tout en respectant l'environnement. Son association avec des insecticides chimiques type flonicamide répond également aux problématiques environnementales par la possibilité de réduire le nombre de passage. Les résultats des essais ont montré une réduction des populations de pucerons et de la propagation des maladies virales dans les cultures, ouvrant la voie à des pratiques agricoles plus durables et moins dépendantes des produits chimiques.

Ce produit, attractif de prédateurs et booster de biodiversité, en accord avec la réglementation régissant les microorganismes de biocontrôle, est commercialisable et donc déjà disponible à l'achat pour la filière démontrant ainsi l'apport du PNRI et son aptitude à faire émerger rapidement des solutions commerciales offrant des alternatives aux néonicotinoïdes à la filière betterave. Pour toutes ces raisons nous pouvons considérer que ce projet a été un succès fondateur qui permettra de décliner rapidement ce concept « d'attirer les espèces auxiliaires » dans d'autres problématiques où la biodiversité peut contribuer à la protection des cultures.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Pierre-Antoine BOURDON : <https://orcid.org/0000-0003-1884-137X>

Contributions des auteurs

Damien Rollandez, Johann Fournil, Manon Avignon et Pierre-Antoine Bourdon ont tous contribué à la rédaction de l'article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Références bibliographiques



Dixon, A. F. G. Aphid Ecology: Life Cycles, Polymorphism, and Population Regulation. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 8, 329–353 (1977).

Francis, F., Lognay, G. & Haubruge, E. Olfactory Responses to Aphid and Host Plant Volatile Releases: (E)-Farnesene an Effective Kairomone for the Predator *Adalia bipunctata*. *J. Chem. Ecol.* 30, 741–755 (2004).

Li, J. *et al.* Defense of pyrethrum flowers: repelling herbivores and recruiting carnivores by producing aphid alarm pheromone. *New Phytol.* 223, 1607–1620 (2019).

Rodriguez-Saona, C., Kaplan, I., Braasch, J., Chinnasamy, D., Williams, L., 2011. Field responses of predaceous arthropods to methyl salicylate: A meta-analysis and case study in cranberries. *Biological control* 59, 294–303.

Stökl, J., Brodmann, J., Dafni, A., Ayasse, M. & Hansson, B. S. Smells like aphids: orchid flowers mimic aphid alarm pheromones to attract hoverflies for pollination. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 278, 1216–1222 (2011).

Vosteen, I., Weisser, W. W. & Kunert, G. Is there any evidence that aphid alarm pheromones work as prey and host finding kairomones for natural enemies? : Kairomone function of aphid alarm pheromones? *Ecol. Entomol.* 41, 1–12 (2016).

Pour citer cet article : Damien Rollandez, Manon Avignon, Pierre-Antoine Bourdon, Johann Fournil. Attraction d'insectes auxiliaires contre le puceron vert, vecteur de la jaunisse de la betterave. *Innovations Agronomiques*, 2025, 103, pp.10-19. [10.17180/ciag-2025-vol103-art02](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art02)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Nouveaux éclairages sur les virus responsables de la jaunisse de la betterave sucrière

Véronique BRAULT¹, Martin DRUCKER¹, Quentin CHESNAIS¹, Aurélie MARMONIER¹, Hélène SCHLAEFLI¹, Souheyla KHECHMAR¹, Armelle MARAIS², Thierry CANDRESSE², Amélie MONTEIRO³, Ghislain MALATESTA³, Fabienne MAUPAS³

¹ INRAE, Université de Strasbourg, SVQV, 68000 Colmar, France

² Univ. Bordeaux, INRAE, UMR 1332 BFP, 33882 Villenave d'Ornon, France

³ Institut Technique de la Betterave (ITB), 75008 Paris, France

Correspondance : veronique.brault@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art03>

Résumé

Les jaunisses foliaires de la betterave sont causées par quatre virus qui sont tous transmis par pucerons mais appartiennent à des familles différentes présentant des caractéristiques biologiques différentes. Les modes de transmission varient selon les virus mais l'espèce *Myzus persicae* est vectrice des quatre virus. Le projet Provibe a été conçu afin d'obtenir de nouvelles connaissances sur la biologie des virus responsables de jaunisse et sur leur transmission par pucerons. Dans ce projet, nous confirmons qu'aucun autre virus ne participe à l'étiologie de la maladie. Les multi-infections sont fréquentes, mais en proportions variables selon les années. Elles ne s'avèrent pas plus dommageables que les infections simples sur le rendement des betteraves. A l'inverse, la coexistence des virus dans les betteraves peut avoir des répercussions sur leur transmissibilité par *M. persicae*. Enfin, les analyses fines des séquences virales dans les plantes infectées, présentant ou non des symptômes, ne nous ont pas permis d'identifier des candidats potentiels pour la mise en place d'une méthode de lutte basée sur la protection croisée.

Mots-clés : pucerons, RNAseq, multi-infection, rendement, protection croisée, priming

Abstract: New insights into the viruses responsible for sugar beet yellows

Sugarbeet yellows is caused by four viruses all transmitted by aphids and which belong to different families, displaying different biological characteristics. The transmission mode varies depending on the virus but all are transmitted by the species *Myzus persicae*. The Provibe project was intended to acquire new knowledge on the biology of the four viruses and their transmission by aphids. In this project, we confirmed that no other virus is involved in the etiology of the disease. Multi-infections are frequent but their proportions vary from year to year. They are not more damaging to sugarbeet yield than single infections. Conversely, the coexistence of viruses in sugarbeet can have repercussions on their transmissibility by *M. persicae*. Finally, detailed analysis of the viral sequences in infected plants, symptomatic or not, did not enable the identification of potential candidates for the implementation of a control method based on cross-protection.

Keywords: Aphids, RNAseq, multi-infection, yield, cross-protection, priming

1. Introduction

Les jaunisses foliaires de la betterave sont causées par plusieurs virus qui sont retrouvés seuls ou en mélange au sein d'une même plante. Ces virus sont le virus de la jaunisse modérée de la betterave (beet mild yellowing virus ou BMV) et le virus de la chlorose de la betterave (beet chlorosis virus ou



BChV), membres de la famille des *Solemoviridae* (anciennement *Luteoviridae*) et appartenant au genre *Polerovirus*, le virus de la jaunisse grave de la betterave (beet yellows virus ou BYV) classé dans la famille des *Closteroviridae*, et le virus de la mosaïque de la betterave (beet mosaic virus ou BtMV), un *Potyvirus* (Beuve *et al.*, 2008; Mark Stevens *et al.*, 2005; M. Stevens *et al.*, 2005). Les virus appartenant à ces différentes familles virales se différencient par leur localisation cellulaire. Les polérovirus, ainsi que les clostérovirus, sont restreints aux cellules nucléées et anucléées du phloème, alors que les potyvirus se retrouvent dans tous les types cellulaires. Ces virus sont tous transmis par puceron mais selon des modes de transmission différents qui impliquent des temps d'acquisition, de latence et d'inoculation des particules virales distincts selon les virus (Tableau 1) (Brault *et al.*, 2010 ; Däder *et al.*, 2017). Les polérovirus sont transmis selon le mode circulant et persistant et chez la betterave, l'espèce vectrice principale est *Myzus persicae* ou puceron vert du pêcher. L'espèce *Macrosiphum euphorbiae* est également vectrice des polérovirus, mais avec une efficacité qui semble varier selon le clone de puceron et l'isolat viral, au moins pour le BMVY (Kozłowska-Makulska *et al.*, 2009). Les particules des polérovirus sont acquises après une ingestion de sève phloémienne d'une dizaine d'heures à partir d'une plante infectée. Elles cheminent ensuite dans le tube digestif des pucerons pour être internalisées dans les cellules intestinales qu'elles vont traverser par un mécanisme de transcytose grâce à la présence de récepteurs spécifiques (Mulot *et al.*, 2018). Une fois dans l'hémolymphe du puceron, les polérovirus atteignent les cellules des glandes salivaires qu'ils traversent pour être finalement relargués avec la salive du puceron dans une nouvelle plante. Les clostérovirus, sont transmis selon le mode non-circulant semi-persistant (Tableau 1). Les particules de ces virus sont également efficacement acquises par ingestion de sève phloémienne après une dizaine d'heures. Les virus restent accrochés à l'extérieur des cellules probablement au niveau du cibarium (région antérieure à l'œsophage) et sont perdus au cours des mues (Limburg *et al.*, 1997). Le clostérovirus BYV est efficacement transmis par *M. persicae* et par *Aphis fabae*, une espèce inféodée aux fabacées, avec une efficacité cependant plus faible en conditions contrôlées pour ce dernier (Heathcote and Cockbain, 1964 ; Limburg *et al.*, 1997). Dans le cas de *M. persicae*, il a été montré qu'une seule piqûre au niveau du phloème était suffisante pour l'inoculation du BYV à la betterave (Dusi and Peters, 1999). Enfin, les potyvirus sont transmis selon le mode non-circulant non-persistant. Ce type de transmission ne nécessite que de brèves piqûres du puceron dans les tissus superficiels de la plante (épiderme et mésophylle), et implique un accrochage à l'extérieur des cellules, probablement à l'extrémité des stylets du puceron. L'espèce vectrice préférentielle du BtMV est *M. persicae* mais ce virus peut également être transmis par plusieurs autres espèces telles que *Myzus ascalonicus*, *Acyrtosiphon pisum*, *M. euphorbiae* (Dusi and Peters, 1999). Ces virus sont perdus au cours des mues. Dans la nature, les virus infectant la betterave peuvent se trouver seuls ou en association dans une même plante présentant, ou non, des symptômes (Hossain *et al.*, 2021 ; Wintermantel, 2005).

Tableau 1 : Caractéristiques biologiques et de transmission des virus responsables des jaunisses de la betterave

	Génome	Particule	Mode transmission	Localisation cellulaire dans la plante	Principales espèces vectrices	Temps d'acquisition	Temps de rétention du virus
Polérovirus BMVY & BChV	ARN simple brin, polarité positive	Icosaédrique	Circulant/ Persistant	Cellules du phloème	<i>M. persicae</i> <i>M. euphorbiae</i>	Plusieurs heures	Toute la vie du puceron sans réplication
Clostérovirus BYV	ARN simple brin, polarité positive	Flexueuse filamenteuse	Non-circulant/ Semi-Persistant	Cellules du phloème	<i>M. persicae</i> <i>A. fabae</i>	Minutes/heures	Quelques jours ; perte au cours de la mue



Potyvirus BtMV	ARN simple brin, polarité positive	Filamenteuse	Non- circulant/ Non- Persistant	Toutes les cellules	<i>M. persicae</i> <i>A. fabae</i> <i>M. ascalonicus</i> <i>A. pisum</i> <i>M. euphorbiae</i>	Secondes/Minutes	Minutes à heures ; perte au cours de la mue
-------------------	--	--------------	--	------------------------	---	------------------	---

Pour répondre à la problématique actuelle des dégâts occasionnés par les virus sur la betterave suite à l'interdiction des insecticides néonicotinoïdes, il est essentiel de mieux comprendre la biologie de ces virus. Cette connaissance approfondie permettra d'identifier des cibles pour concevoir des méthodes alternatives de lutte. De plus, une meilleure compréhension de leur biologie contribuera à l'élaboration de protocoles optimisés pour évaluer l'efficacité de ces nouvelles approches. Dans ce contexte, l'objectif du travail conduit dans le cadre du projet Provibe du PNRI a été de confirmer l'identité des virus responsables des jaunisses virales, d'accroître nos connaissances sur certains paramètres de la biologie de ces virus, ainsi que sur leur mode de propagation dans un contexte de multi-infections.

2. Identification des virus responsables des jaunisses de la betterave par séquençage à haut débit

Le premier objectif a été de vérifier que les quatre virus mentionnés ci-dessus sur la base des connaissances antérieures étaient bien les seuls en cause. Soixante-deux betteraves symptomatiques ou non symptomatiques ont été récoltées sur deux ans dans les départements d'Eure et Loire, de Seine et Marne, de Saône et Loire, de l'Aube, du Loiret et de l'Oise. L'analyse par séquençage à haut débit du virome (ensemble des virus présents dans une plante) de ces betteraves a bien confirmé la présence des quatre virus connus pour causer des symptômes de jaunisse foliaire à savoir le BYV, le BChV, le BtMV et, avec une prévalence beaucoup plus faible, le BMV. En plus de ces virus, le virus de la rhizomanie (beet necrotic vein virus, BNYVV) a été retrouvé dans deux plantes ; et la plupart des betteraves ont de plus montré la présence de deux virus non connus pour être pathogènes, le beet cryptic virus 2, et le beet mitovirus 1. La présence du virus de la jaunisse du navet (turnip yellows virus, TuYV) n'a été relevée dans aucune des plantes analysées, indiquant que ce virus ne semble pas être une préoccupation sur betterave dans les conditions françaises actuelles. La comparaison de la séquence des génomes quasi complets des différents isolats viraux identifiés par l'analyse du virome n'a montré qu'une faible variabilité au niveau de la parcelle, ou du territoire pour le BYV, le BChV et le BtMV. Trop peu d'isolats du BMV ont été identifiés pour conclure quant à ce virus, mais sa diversité en France semble également faible. Parmi les quatre virus spécifiquement recherchés, le BYV est celui dont la présence a montré la meilleure corrélation avec les symptômes de jaunisse foliaire. Par ailleurs, il n'a pas été mis en évidence d'aggravation des symptômes foliaires en situation d'infection mixte par plusieurs virus.

3. Répartition des virus dans la plante

La répartition des virus au sein des plantes n'est pas forcément homogène, et leur concentration ou leur présence peut varier selon l'étage foliaire considéré et le stade de développement de la plante au moment de son inoculation par un puceron. Ces données de distribution des virus au sein d'une plante sont importantes afin de guider les échantillonnages pour l'identification des virus au champ et les études épidémiologiques. Afin de suivre la répartition des virus dans la betterave (variété Auckland), les plantes ont été inoculées trois semaines après le semis (au stade deux feuilles F1 et F1' développées et inoculées) avec chacun des virus pris isolément en utilisant des pucerons virulifères de l'espèce *M. persicae*. Quatre semaines plus tard, un test DAS-ELISA a été réalisé. Les résultats sont présentés sur la Figure 1. On remarque que tous les virus sont retrouvés dans toutes les feuilles testées (sept à huit feuilles par plante selon son développement), à l'exception des plus jeunes feuilles des plantes



inoculées par les polérovirus, pour lesquelles le virus n'est pas systématiquement détecté. Pour tous les virus, on observe une accumulation moins importante dans les jeunes feuilles que dans les plus âgées.

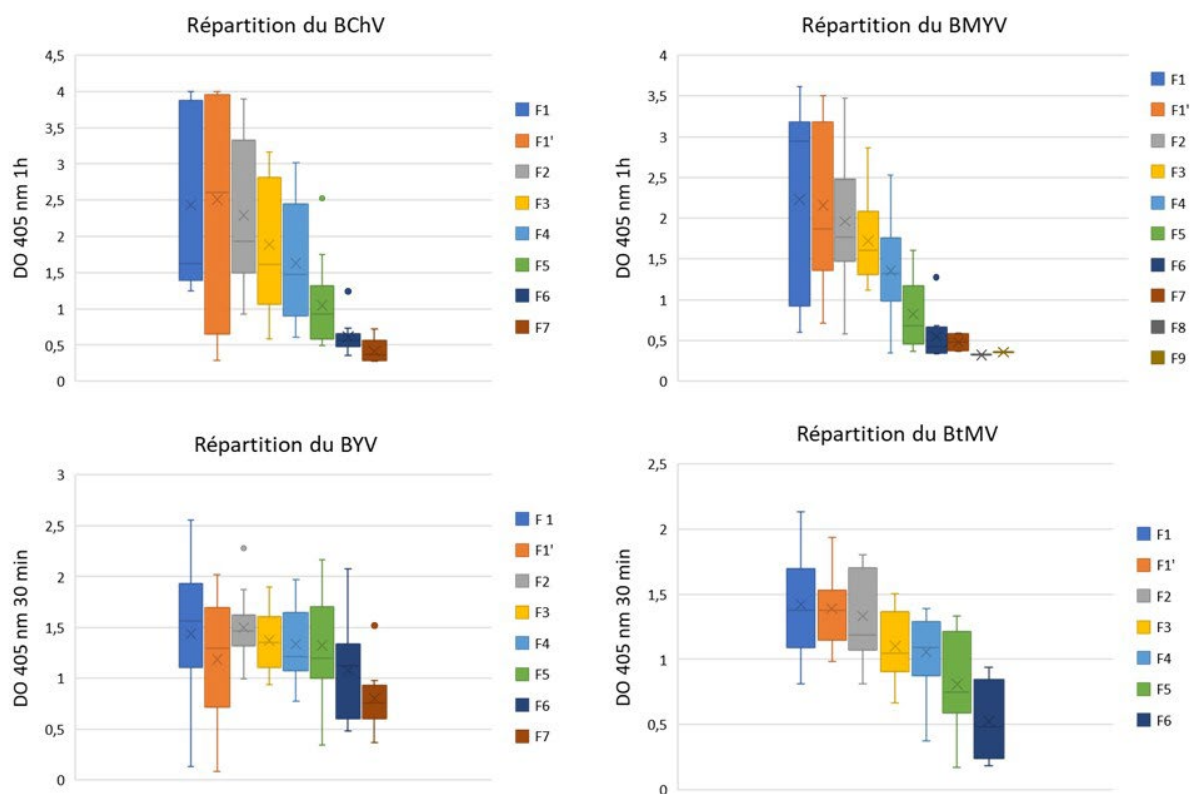


Figure 1 : Détection par analyse DAS-ELISA des virus BChV, BMV, BYV et BtMV dans les différents niveaux foliaires des plantes quatre semaines après l'inoculation des feuilles F1 et F1'. Les données des polérovirus (BMV, BChV) sont indiquées en DO 405 nm après 1h d'incubation en présence du substrat chromogène et celles pour le BYV et le BtMV en DO 405 nm après 30min d'incubation du substrat. Feuilles 1 et 1' : feuilles les plus âgées au moment du test DAS-ELISA ; Feuille 6 à 9 : feuilles les plus jeunes. Chaque diagramme en boîte représente entre 5 et 16 plantes inoculées. Deux expérimentations ont été réalisées pour le BChV et le BMV et une seule pour le BYV et le BtMV.

4. La multi-infection virale de la betterave, une réalité au champ

Afin d'élaborer des solutions efficaces pour lutter contre une maladie virale transmise par vecteur, il est important de récolter des données épidémiologiques. Dans ce but, plusieurs centaines de betteraves prélevées en 2020 et 2021 dans quatre parcelles sur le territoire français et présentant ou non des symptômes de jaunisse, ont été analysées par DAS-ELISA afin d'identifier les virus présents. Le pourcentage de betteraves infectées s'élève à 98,55 % en 2020 et 92,50 % en 2021. Les prévalences des virus sont très différentes selon l'année considérée. Le BYV, seul ou en association avec les autres virus, est majoritaire en 2020 (87,21 %), suivi des polérovirus (77,32 %) et du BtMV (7,56 %) (**Figure 2**). En 2021, les polérovirus sont majoritaires (64,50 %), suivis par le BtMV (22,75 %) et le BYV (21,00 %) (**Figure 2**). Les multi-infections sont fréquentes chaque année (85,75 % en 2020 et 39,25 % en 2021). La multi-infection s'avère donc une réalité au champ en France comme ce qui avait été rapporté à l'étranger dans plusieurs études (Hossain *et al.*, 2021 ; Wintermantel, 2005). L'identification spécifique du BMV ou du BChV a nécessité une étape d'analyse moléculaire supplémentaire. En 2020, 28 plantes infectées par les polérovirus ont été analysées. Parmi celles-ci, 92,9 % se sont révélées infectées seulement par le BChV et 7,1 % des plantes n'étaient infectées que par le BMV, aucune coinfection avec ces deux polérovirus n'a été observée. En 2021, sur les 76 plantes infectées par les



polérovirus analysées, 94,7 % étaient infectées seulement par le BChV seul et 5,3 % par le BMYV seul. A nouveau, aucune co-infection des deux polérovirus n'a été observée.

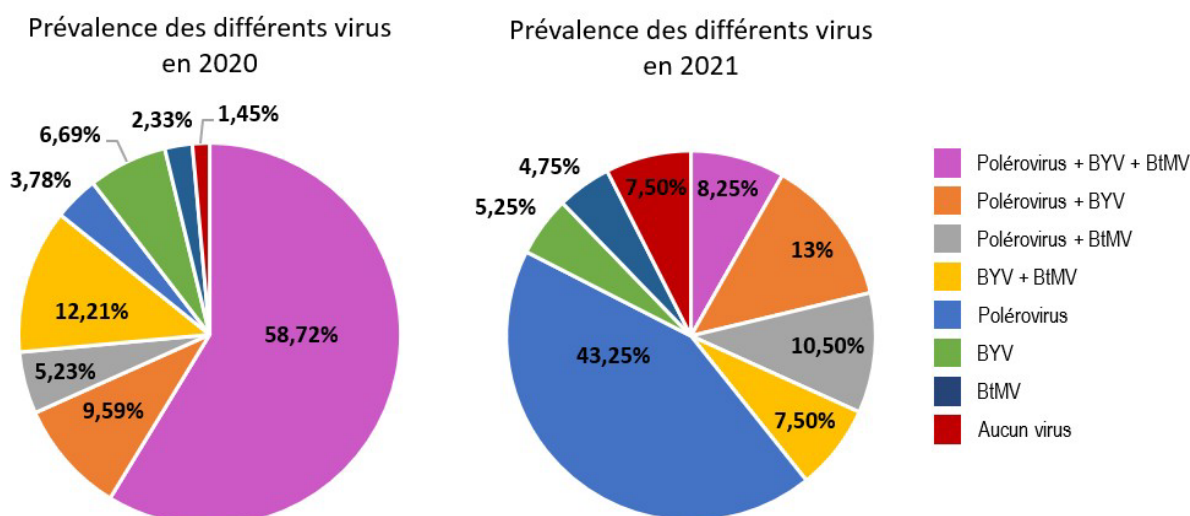


Figure 2 : Prévalence des polérovirus, du BYV et du BtMV, seuls ou en combinaison, en 2020 et 2021 en France. En 2020, 344 échantillons ont été analysés et 400 en 2021. Ces échantillons proviennent de 4 parcelles différentes dans différentes régions productrices. Le test sérologique ne permet pas de différencier le BChV du BMYV et ces deux virus sont regroupés dans la catégorie « Polérovirus ».

En 2021, nous avons analysé la corrélation entre symptômes de jaunisse foliaire et le poids des pivots ou la richesse en sucre. Cette analyse a porté sur les 398 échantillons de betteraves infectées prélevés dans 4 parcelles sur le territoire français, à savoir 80 plantes ne présentant aucun symptôme et 318 plantes avec des symptômes de jaunisse. Comme le montre la **Figure 3**, on observe une diminution significative de 16,5 % du poids du pivot et de 2 % de la richesse en sucre chez les betteraves symptomatiques.

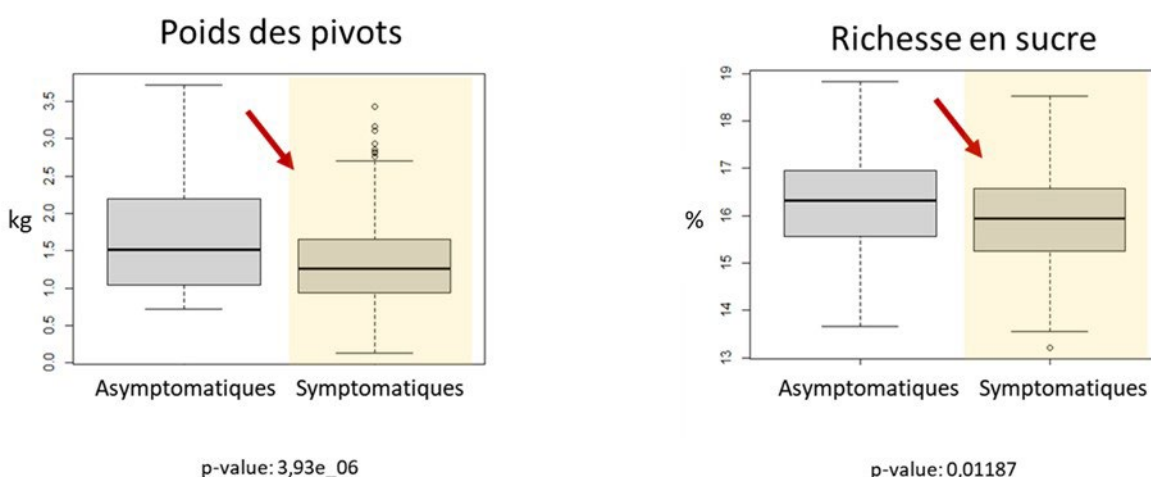


Figure 3 : Impact de la présence de symptômes de jaunisse foliaire sur le poids du pivot et la richesse en sucre. 398 échantillons de betteraves ont été analysés dont 80 asymptomatiques et 318 avec des symptômes de jaunisse.



5. Impact des multi-infections sur le poids du pivot et la richesse en sucre

Afin d'évaluer l'impact des multi-infections sur le poids du pivot et la richesse en sucre, deux essais ont été conduits en 2021 en plein champ, et en 2023 sous tunnels. En 2021, le plan d'expérimentation était constitué de 16 modalités correspondant aux différentes combinaisons virales possibles (virus seuls, virus en co-infection double, triple ou quadruple et témoins non-inoculés). Devant la difficulté à éviter les contaminations croisées, le plan d'expérimentation a été réduit en 2023 en omettant le BMV, peu présent sur le territoire (soit 8 modalités restantes). Les betteraves (variété Auckland) ont été individuellement inoculées par *M. persicae* porteur du BYV, du BMV ou du BChV, et par inoculation mécanique pour le BtMV. Dans le cas des multi-infections avec le BtMV, l'inoculation mécanique a été réalisée une semaine avant les inoculations par puceron. Chaque condition comprenait une trentaine de betteraves. Des tests DAS-ELISA individuels ont été réalisés pour vérifier l'état d'infection des betteraves et, en 2021, le BMV et le BChV ont été regroupés sous la catégorie « polérovirus » dans les analyses. Le poids du pivot et la richesse en sucre ont été mesurés à la récolte (30 betteraves au minimum pour chacune des modalités). En 2021, des observations des symptômes de jaunisse foliaire ont montré qu'à l'exception des plantes infectées par le BtMV seul, pour lesquelles seulement 50 % des plantes infectées ont développé des symptômes de jaunisse, plus de 80 % des plantes infectées par un ou plusieurs virus présentaient des symptômes foliaires (**Figure 4**). Des différences de rendement (poids du pivot et richesse en sucre) ont été observées selon l'année d'analyse et la combinaison virale considérée (**Figure 5**). La seule constante est l'impact majeur du BYV sur la réduction du poids du pivot et la diminution de la richesse en sucre sur les deux années. L'effet négatif des polérovirus sur le poids du pivot observé en 2021, n'est plus observé en 2023, lorsqu'on ne considère que le BChV seul suggérant un effet synergique des deux polérovirus. Le BtMV, seul ou en combinaison avec les autres virus, ne semble avoir qu'un effet limité sur ces deux paramètres agronomiques. Le résultat majeur de ces études est l'absence d'aggravation de la perte du poids du pivot ou de sa richesse en sucre dans le cas des multi-infections, ce qui confirme sur une base beaucoup plus solide les données issues de l'analyse du virome. En effet, aucune multi-infection ne s'avère plus dommageable que l'infection par le BYV seul qui a induit les pertes les plus importantes dans nos études (**Figure 5**). Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux de (Hossain *et al.*, 2021) qui montraient une perte de rendement plus importante dans des betteraves coinfectées par le BChV et le BYV. Cette différence pourrait s'expliquer par les protocoles d'inoculation, des cultivars de betterave ou des conditions agronomiques différant entre les deux études.

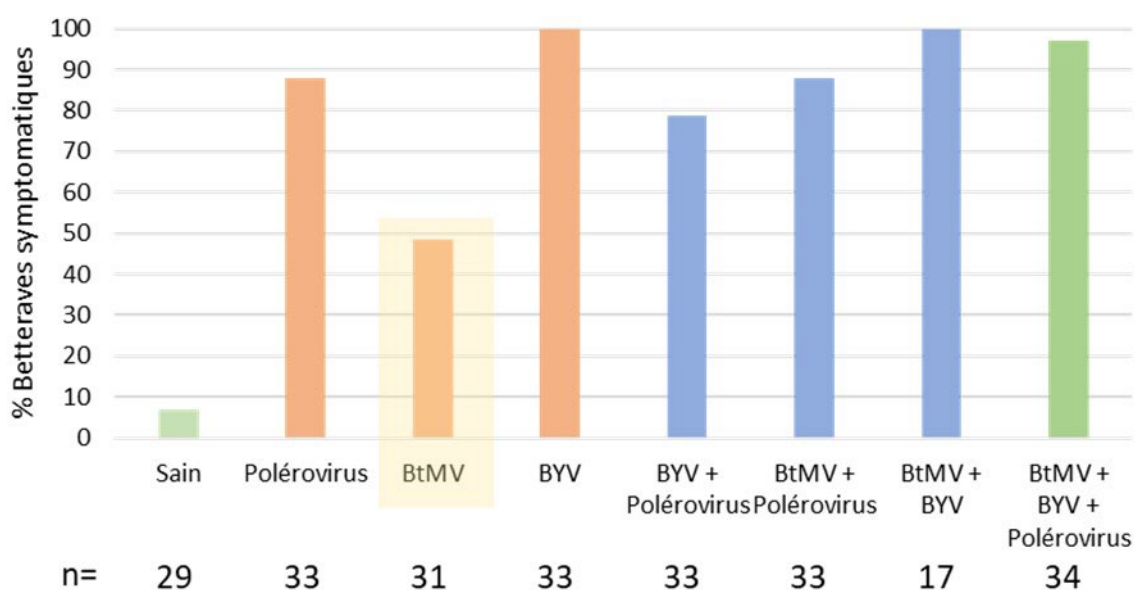


Figure 4 : Effet des infections virales sur l'extériorisation des symptômes de jaunisse foliaire. N = nombre de betteraves analysées et infectées (sauf pour la condition « Sain »).

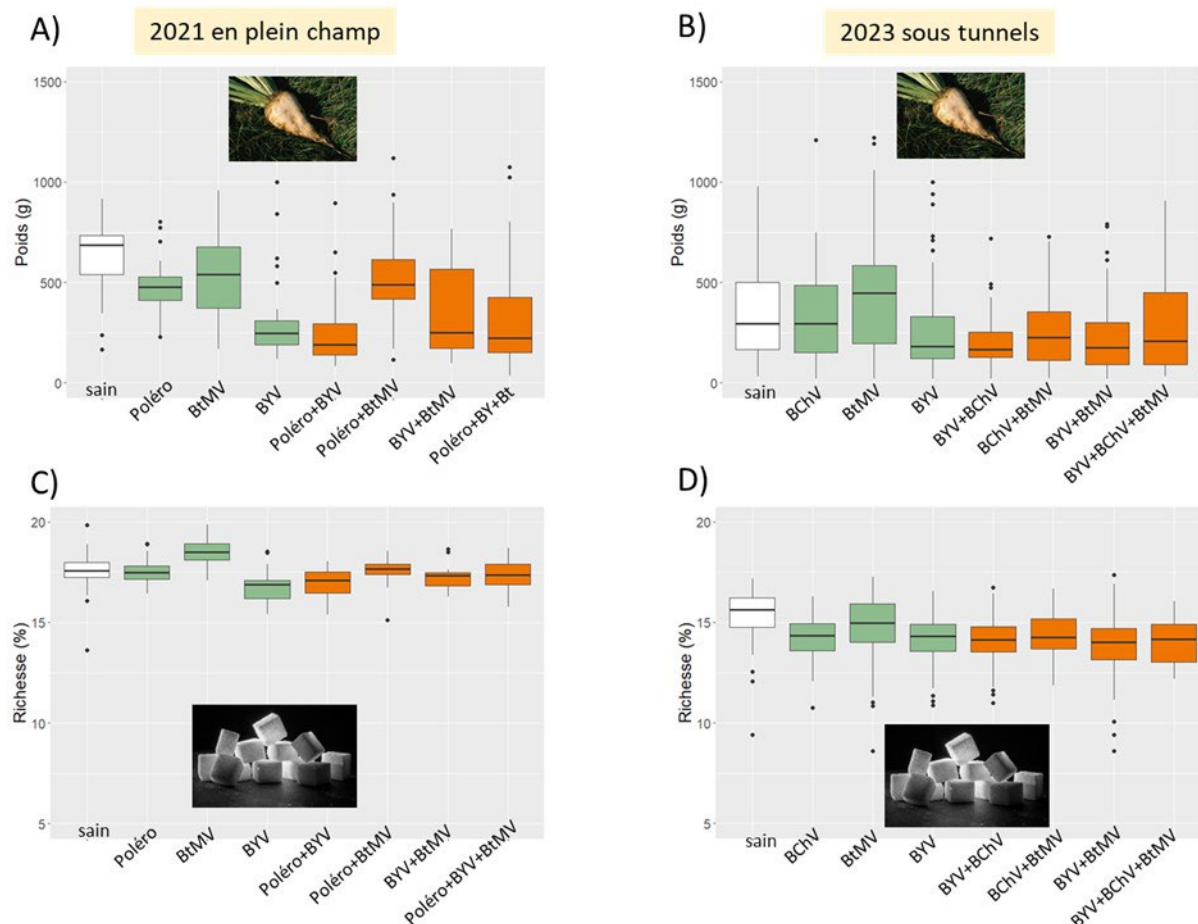


Figure 5 : Effet des infections virales de la betterave sur le poids du pivot (A et B) et sa richesse en sucre (C et D). En 2021, l'essai a été réalisé en plein champ, et en 2023 sous tunnels. Les betteraves de la variété Auckland ont été inoculées individuellement par un (vert) ou plusieurs des 4 virus (orange). En 2021, l'inoculation par le BChV et/ou le BMYV a été regroupée sous le terme « polérovirus ». En 2023, le BChV a été le seul polérovirus inoculé. Chaque histogramme représente entre 26 et 89 betteraves. Poléro : Polérovirus qui regroupe BMYV et BChV.

6. Impact de la multi-infection de la betterave sur la transmission des virus par puceron

La multi-infection virale peut impliquer des interactions entre les virus qui peuvent avoir des conséquences sur leur accumulation et sur l'expression des symptômes qui sont alors qualifiées de synergiques, d'antagonistes ou de neutres selon qu'ils sont aggravés, réduits ou inchangés par rapport aux situations d'infection par un seul virus. La multi-infection peut également induire des changements métaboliques dans la plante avec d'éventuels effets sur le comportement alimentaire des pucerons et donc l'acquisition des virus. La coexistence de plusieurs virus au sein d'une même plante peut donc modifier la transmission des virus par les pucerons. Nous avons analysé la transmissibilité par *M. persicae* des virus présents chez la betterave à partir de plantes mono- ou multi-infectées. Nous avons observé une baisse de l'efficacité de la transmission du BChV lorsque le virus est acquis à partir de plantes co-infectées par le BChV et le BYV, alors que l'efficacité de transmission du BYV n'est pas



affectée (Khechmar *et al.*, 2024). Cette diminution de la transmission du BChV n'est pas liée à une diminution de l'accumulation du virus, ni à une ingestion de sève réduite du puceron à partir des plantes coinfectedes (Khechmar *et al.*, 2024). L'hypothèse avancée pour expliquer ce résultat serait une réduction de la libération des particules virales dans la sève à partir des cellules coinfectedes, réduisant ainsi la quantité de particules de BChV disponibles pour l'acquisition par le puceron. Cette hypothèse devra être confirmée par des expériences complémentaires. D'autres combinaisons virales ont également entraîné une modification de la transmissibilité des virus, à savoir la coinfection de la betterave par les deux polérovirus (BChV et BMV) qui augmente leur transmissibilité, et la coinfection par le BYV et le BtMV qui diminue la transmissibilité du BYV, sans affecter celle du BtMV. Encore une fois, ni l'accumulation des virus dans les plantes coinfectedes, ni le comportement alimentaire des pucerons sur ces plantes ne semblent expliquer ces résultats (Schlaefli *et al.*, 2025 ; Khechmar *et al.*, en préparation).

7. Exploitation des interactions entre les virus pour assurer la protection de la betterave à sucre

La protection croisée est un phénomène dans lequel l'infection des plantes par des isolats faibles, ou atténués, les protègent contre une infection ou une extériorisation de symptômes sévères en cas d'inoculation ultérieure par des isolats agressifs (Ziebell and Carr, 2010). L'absence de développement de symptômes chez certaines betteraves infectées nous a conduit à émettre l'hypothèse que ces plantes asymptomatiques pouvaient être infectées par des isolats faibles pouvant alors conférer à la betterave une protection contre des isolats plus sévères. Le répertoire viral de betteraves présentant ou non des symptômes de jaunisse a donc été étudié afin de tenter d'identifier de potentiels isolats atténués, candidats pour développer une approche de prémunition. Sur la base des observations au champ et des tests sérologiques (DAS-ELISA) et moléculaires (RT-PCR), 31 couples de plantes symptomatiques/asymptomatiques ont été sélectionnés en 2020 ou 2021. L'analyse par séquençage à haut débit Illumina des ARN extraits de ces plantes et la caractérisation des génomes des isolats impliqués n'a pas permis d'identifier de potentiels candidats pour la prémunition. En effet, ces analyses n'ont pas révélé de regroupement des isolats viraux en fonction de la sévérité des symptômes des plantes et aucune séquence virale spécifique n'a pu être attribuée aux isolats présents dans les plantes non-symptomatiques.

La deuxième stratégie que nous avons évaluée a été celle d'une induction des réactions de défense de la betterave par un virus non-hôte pouvant potentiellement conduire à une protection contre un virus hôte. Ce mécanisme de défense peut s'apparenter au mécanisme de « priming » (Conrath *et al.*, 2002). Pour ce faire, nous avons utilisé le TuYV pour lequel nous avons montré, au laboratoire, sa capacité à infecter localement la betterave, mais pas de manière systémique (seule la feuille inoculée est infectée). L'objectif a été de voir si l'infection TuYV restreinte à la feuille inoculée pouvait conduire à une protection contre le BChV, qui est un virus proche du TuYV. Des betteraves de stade deux feuilles (feuilles 1 et 1' présentes) ont été inoculées par le TuYV-FL1 (Veidt *et al.*, 1992) (**Figure 6**). Quatorze jours après l'inoculation du TuYV, des pucerons porteurs du BChV ont été déposés, soit sur les feuilles inoculées par le TuYV (feuilles 1 et 1'), soit sur des feuilles formées après l'inoculation du TuYV (feuilles 2 ou 3) (**Figure 6**). Comme contrôle, des plantes du même stade (5 semaines post-semis) ont été inoculées par le BChV seul sur les feuilles 2 et 3. Les tests DAS-ELISA réalisés sur les jeunes feuilles non-inoculées trois semaines après la seconde inoculation n'ont pas montré d'effet protecteur de la pré-inoculation du TuYV.

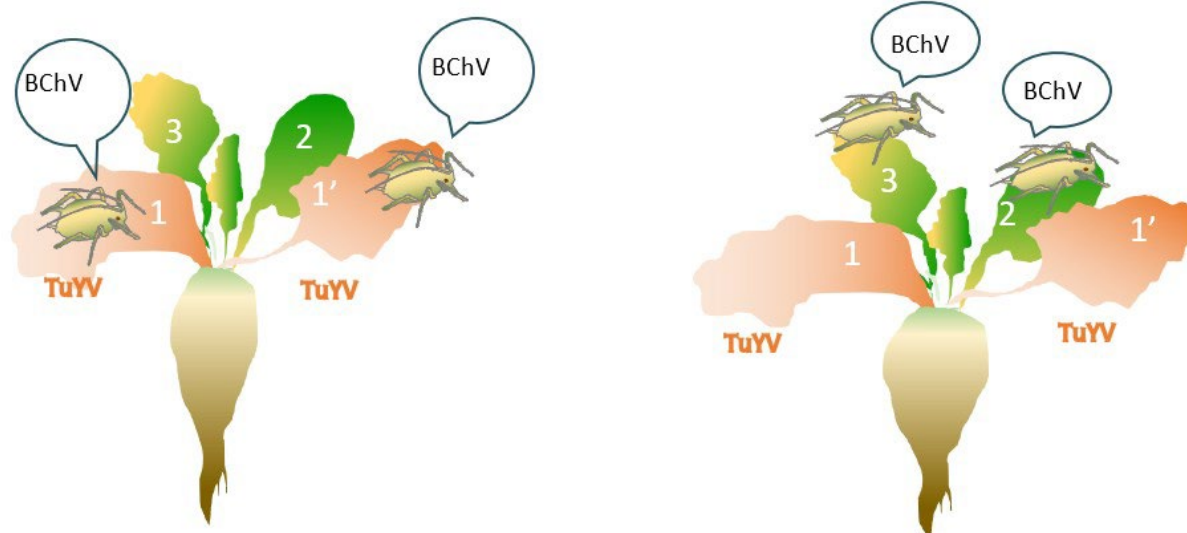


Figure 6 : Schéma expérimental pour tester l'effet d'une pré-inoculation du TuYV sur l'inoculation ultérieure du BChV. Les feuilles F1 et F1' en orange représentent les feuilles inoculées par le TuYV. Les pucerons porteurs du BChV ont été déposés 2 semaines plus tard sur les feuilles orange (F1 et F1') ou vertes (F2 et F3).

8. Conclusions

Les travaux conduits dans le cadre du projet Provibe du PNRI nous ont permis de confirmer la nature des virus responsables des jaunisses foliaires, et d'infirmer l'hypothèse que d'autres virus ou agents viraux (satellites, ARN défectifs...) puissent participer au développement de la maladie : les virus incriminés sont donc bien les deux polérovirus, le BChV et le BMYV (avec une faible prévalence du BMYV en France), le clostérovirus BYV et le potyvirus BtMV. De plus, les résultats obtenus éliminent l'hypothèse d'un rôle significatif du TuYV sur betterave en France. Les séquences génomiques des quatre virus (BChV, BMYV, BYV et BtMV) ne varient que très peu au niveau de la parcelle, comme au niveau du territoire. Les virus se retrouvent dans toutes les feuilles de la betterave lorsque celle-ci est inoculée précocement. Ces virus infectent seuls, ou en association, les betteraves mais la fréquence des multi-infections varie selon les années. Par ailleurs, les multi-infections n'ont qu'un impact mineur sur le rendement par rapport aux infections par les virus seuls. Néanmoins, certaines combinaisons virales peuvent modifier la transmissibilité des virus par le puceron *M. persicae*, ce qui peut potentiellement avoir des répercussions au niveau de la dissémination de la maladie au champ. Les approches de lutte alternative basées sur la protection croisée ou le « priming » ne peuvent être envisagées à ce jour en raison de l'absence d'identification d'espèces virales ou d'isolats potentiellement protecteurs ou stimulateurs des mécanismes de défense de la plante. Globalement, le projet ProViBe a donc permis d'accroître nos connaissances sur le pathosystème betterave/virus/puceron qui seront mises à profit pour identifier, ou évaluer, de nouvelles méthodes de lutte contre ces virus.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.



Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

V. Brault 0009-0007-9524-6693

T. Candresse 0000-0001-9757-1835

A. Marais 0000-0003-2482-1543

Q. Chesnais 0000-0002-0481-2335

M. Drucker 0000-0002-9765-1189

S. Khechmar 0009-0008-3624-9445

Contributions des auteurs

VB, TC, AM Conceptualization; VB Funding acquisition; TC, QC Data curation; VB, TC, QC Formal analysis; HS, AmM, FM, SK Investigation; VB, TC, AM, AuM, AmM, FM, GM, MD Methodology; VB Project administration; AuM Resources; VB, AuM, MD Supervision; VB, TC, AuM, MD Validation; VB, HS, AuM, QC Visualization; VB Writing original draft; VB, TC, AM, AuM, MD, QC Writing- review & editing

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Patricia Guiose (INRAE Colmar) est remerciée pour la gestion administrative du projet. Claire Villeroys (INRAE Colmar) est remerciée pour la production des pucerons nécessaires aux expérimentations. L'unité expérimentale de INRAE Colmar, et plus particulièrement Sylvain Michel, est remercié pour la production des plantes ayant servi aux expérimentations. Clémence Leroy (ITB) est remerciée pour le suivi des essais.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été financé dans le cadre du PNRI Jaunisses de la betterave.

Références bibliographiques

- Beuve, M., Stevens, M., Liu, H.-Y., Wintermantel, W.M., Hauser, S., Lemaire, O., 2008. Biological and Molecular Characterization of an American Sugar Beet-Infecting Beet western yellows virus Isolate. *Plant Dis* 92, 51–60. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-1-0051>
- Brault, V., Uzest, M., Monsion, B., Jacquot, E., Blanc, S., 2010. Aphids as transport devices for plant viruses. *Comptes Rendus Biologies, Les pucerons : modèles biologiques et ravageurs des cultures* 333, 524–538. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.04.001>
- Conrath, U., Pieterse, C.M.J., Mauch-Mani, B., 2002. Priming in plant-pathogen interactions. *Trends Plant Sci* 7, 210–216. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02244-6](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02244-6)



Dáder, B., Then, C., Berthelot, E., Ducouso, M., Ng, J.C.K., Drucker, M., 2017. Insect transmission of plant viruses: Multilayered interactions optimize viral propagation. *Insect Sci.* 24, 929–946. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12470>

Dusi, A.N., Peters, D., 1999. Beet mosaic virus: its Vector and Host Relationships. *J Phytopath.*

Heathcote, G.D., Cockbain, A.J., 1964. Transmission of beet yellows virus by alate and apterous aphids 259–266.

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. <https://doi.org/10.1111/ppa.13306>

Khechmar, S., Chesnais, Q., Villeroy, C., Brault, V., Drucker, M., 2024. Interplay between a polerovirus and a closterovirus decreases aphid transmission of the polerovirus. *Microbiol Spectr* 12, e01115-24. <https://doi.org/10.1128/spectrum.01115-24>

Kozłowska-Makulska, A., Beuve, M., Syller, J., Szyndel, M.S., Lemaire, O., Bouzoubaa, S., Herrbach, E., 2009. Aphid transmissibility of different European beet polerovirus isolates. *European Journal of Plant Pathology* 337–341.

Limburg, D.D., Mauk, P.A., Godfrey, L.D., 1997. Characteristics of Beet Yellows Closterovirus Transmission to Sugar Beets by *Aphis fabae*. *Phytopathology* 87, 766–771. <https://doi.org/10.1094/PHTO.1997.87.7.766>

Mulot, M., Monsion, B., Boissinot, S., Rastegar, M., Meyer, S., Bochet, N., Brault, V., 2018. Transmission of Turnip yellows virus by *Myzus persicae* Is Reduced by Feeding Aphids on Double-Stranded RNA Targeting the Ephrin Receptor Protein. *Front Microbiol* 9, 457. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00457>

Schlaefli, H., Marmonier, A., Khechmar, S., Reinbold, C., Villeroy, C., Chesnais, Q., Drucker, M., Brault, V., 2025. Co-acquisition of two sugar beet poleroviruses by *M. persicae* increased the transmission efficiency of both viruses. *Virology* 610, 110594. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2025.110594>

Stevens, Mark, Freeman, B., Liu, H.-Y., Herrbach, E., Lemaire, O., 2005. Beet poleroviruses: close friends or distant relatives? *Mol Plant Pathol* 6, 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00258.x>

Stevens, M., Patron, N.J., Dolby, C.A., Weekes, R., Hallsworth, P.B., Lemaire, O., Smith, H.G., 2005. Distribution and properties of geographically distinct isolates of sugar beet yellowing viruses. *Plant Pathology* 54, 100–107. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01155.x>

Veidt, I., Bouzoubaa, S.E., Leiser, R.M., Ziegler-Graff, V., Guilley, H., Richards, K., Jonard, G., 1992. Synthesis of full-length transcripts of beet western yellows virus RNA: messenger properties and biological activity in protoplasts. *Virology* 186, 192–200. [https://doi.org/10.1016/0042-6822\(92\)90073-x](https://doi.org/10.1016/0042-6822(92)90073-x)

Wintermantel, W.M., 2005. Co-infection of Beet mosaic virus with Beet Yellowing Viruses Leads to Increased Symptom Expression on Sugar Beet. *Plant Dis* 89, 325–331. <https://doi.org/10.1094/PD-89-0325>

Ziebell, H., Carr, J.P., 2010. Cross-Protection, in: *Advances in Virus Research*. Elsevier, pp. 211–264. [https://doi.org/10.1016/S0065-3527\(10\)76006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-3527(10)76006-1)

Pour citer cet article : Véronique Brault, Martin Drucker, Quentin Chesnais, Aurélie Marmonier, Hélène Schlaefli, et al.. Nouveaux éclairages sur les virus responsables de la jaunisse de la betterave sucrière. *Innovations Agronomiques*, 2025, 103, pp.20-30. [10.17180/ciaq-2025-vol103-art03](https://doi.org/10.17180/ciaq-2025-vol103-art03)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Enseigner-apprendre la transition agroécologique dans l'enseignement agricole : l'exemple des alternatives aux néonicotinoïdes

Christian PELTIER^{1,2}, Samuel QUINTON³

¹ Coordonnateur « Pédagogie et didactique », département Agricultures et transitions, Bergerie nationale Rambouillet – Parc du Château CS 40609 – 78514 Rambouillet, France

² Chercheur en sciences de l'éducation et de la formation, UR-FoAP, L'Institut Agro Dijon – 26 Bd Docteur Petitjean – BP 87999 – 21079 Dijon Cedex, France

³ Enseignant en sciences agronomiques, porteur de projet de développement, EPLEFPA de l'Oise – 6 rue du Dessus de l'Étang – 60600 Airion, France

Correspondance : christian.peltier@bergerie-nationale.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art04>

Résumé

Le Plan national de recherche et d'innovation (PNRI) « betteraves sans néonicotinoïdes » (2020-2023) a constitué une opportunité pour l'enseignement agricole technique de mettre à l'épreuve des manières renouvelées de travailler avec les betteraves et d'enseigner-apprendre les transitions agroécologiques avec l'objet situé « jaunisse de la betterave ».

Les auteurs exposent un dispositif original conjuguant des pratiques agricoles expérimentales sur des parcelles et des séquences pédagogiques interpellant les représentations des apprenants sur la possibilité de cultiver des betteraves sans néonicotinoïdes. Ils ciblent une expérience particulièrement fertile puis en tirent des enseignements transposables et enfin proposent des perspectives pour une pédagogie ancrée.

Mots-clés : agroécologie ; enseignement-apprentissage ; PNRI ; jaunisse de la betterave ; enseignement agricole

Abstract: Teaching and learning about the agro-ecological transition in agricultural education: the example of alternatives to neonicotinoids

The 'neonicotinoid-free beetroot' national research and innovation plan (2020-2023) was an opportunity for agricultural technical education to test new ways of working with beetroot and to teach and learn about agro-ecological transitions with the 'beet yellows'.

The authors describe an original system combining experimental farming practices on plots of land with teaching sequences challenging learners' perceptions of the possibility of growing beet without neonicotinoids. They focus on a particularly fertile experiment, then draw transferable lessons from it, and finally put forward prospects for a grounded pedagogy.

Keywords: agroecology ; teaching and learning ; PNRI ; beet yellow disease ; agricultural education

1. Introduction

Le plan [Enseigner à produire autrement](#) (EPA, 2014-2024) est une orientation politique de premier ordre pour l'enseignement agricole, d'autant qu'il est connecté à la rénovation capacitaire des diplômes. Le PNRI betteraves sans néonicotinoïdes (NNI) y a contribué en mobilisant des établissements d'enseignement et de formation agricole (Peltier, 2023). L'originalité du dispositif mis en œuvre par la



DGER et de la Bergerie nationale¹ a consisté à lier des expérimentations sur les parcelles d'exploitation de lycées et la réalisation de séquences pédagogiques interrogeant les voies possibles d'alternatives aux NNI en corrélation avec les enjeux de EPA. Nos observations ont montré un grand nombre de difficultés ayant trait à différents types de transitions, techniques, didactiques, pédagogiques, organisationnelles, etc., quand les apprenants résistent et que les enseignants sont embarrassés par la complexité de la situation dans laquelle ils se sont embarqués. Notre hypothèse est alors que des outils de navigation sont nécessaires pour tracer des voies en cours de route et les étayer (Fabre, 2011).

Dans cet article, nous poserons d'abord le rôle de « médiateur de transition » de la Bergerie nationale. Ensuite, via la mise en exergue de la riche expérience menée dans un établissement, nous identifierons et qualifierons les difficultés rencontrées et présenterons comment les équipes en établissement, accompagnées, ont élaboré des raisonnements, ont expérimenté des solutions pour y faire face ... d'abord par des tâtonnements dans l'action (conceptualisation dans l'action) puis les ont soumises à la réflexivité du collectif (conceptualisation de l'action) (Pastré, 1999). Nous nous intéresserons ainsi aux conditions de sa transférabilité à d'autres établissements concernés par la culture des betteraves sans NNI. Enfin, nous élargirons notre propos, au-delà du prétexte de l'objet pédagogique problématique en situation qu'a constitué la « jaunisse de la betterave », pour évoquer la nécessaire pratique d'une « pédagogie ancrée » pour répondre aux enjeux actuels de formation.

2. Engagement et accompagnement des établissements

Nous ne revenons pas ici en détail sur les caractéristiques spécifiques de l'engagement de l'enseignement agricole technique pour les transitions et l'agroécologie, de même que sur la démarche déployée dans le cadre du PNRI (Peltier, 2023). Nous rappelons toutefois que le dispositif « EPA enseignement agricole » est un cadre incontournable qui oriente la proposition de travail pour les établissements d'enseignement et de formation agricole engagés dans le PNRI².

2.1. Le PNRI dans le plan stratégique EPA de l'enseignement agricole

Dans le PNRI, la question de l'enseignement-apprentissage de l'agroécologie et des transitions prend une place de choix, non sans difficultés car ce ne sont pas seulement de nouvelles techniques qu'il y a à administrer à des apprenants sur le mode « émetteur-récepteur » (Astolfi, 2010), mais un profond travail à engager sur leurs représentations-obstacles quant à la possibilité de faire de l'agriculture autrement que selon le modèle « agriculture conventionnelle » en usant de mises en situation d'apprentissage où il y a à construire des solutions situées étayées par des savoirs scientifiques et de la pratique (Gaborieau & Vidal, 2022). Ces situations d'apprentissage touchent davantage les apprenants si elles sont ancrées dans le monde du travail qu'ils côtoient, d'où l'importance de leur problématique pour ouvrir des espaces de réflexion et de raisonnement.

2.2. La Bergerie nationale médiateur de transition

La Bergerie nationale, en tant qu'établissement du DNA³, est ici en appui aux 7 établissements engagés. Elle coconstruit un parcours et propose une démarche pour atteindre les objectifs fixés au

¹ La Direction générale de l'enseignement et de la recherche est une direction du ministère en charge de l'agriculture ; la Bergerie nationale de Rambouillet est une des 3 écoles du dispositif national d'appui (DNA) à l'enseignement agricole technique.

² Airion, Brie-Comte Robert, Chauny, Crézancy, Le Neubourg, Rouffach, Tilloy-lès-Mofflaines.

³ Le Dispositif national d'appui aux établissements de l'enseignement agricole technique est chargé par la DGER de venir en appui aux établissements sur des questions pour lesquelles elle le mandate.



sein du PNRI pour l'enseignement agricole. Elle prend particulièrement en charge la partie accompagnement pédagogique visant à formaliser et produire des séquences pédagogiques qui constitueront des livrables pour la communauté éducative. Cet accompagnement s'effectue à distance et lors de séminaires en présentiel : passage de l'expérimentation parcelle à la conception de séquence pédagogique / mise en œuvre de la séquence / analyse de pratique pédagogique pour amélioration en vue d'une seconde mise en œuvre / atelier d'écriture pour regard réflexif sur le vécu et ainsi le transformer en expérience / valorisations. Le chargé de mission de la Bergerie nationale, spécialiste des questions didactiques, des transitions et du développement durable est la ressource principale mobilisée en interface.

Dans la proposition pédagogique de la Bergerie nationale, l'accent est notamment mis sur les représentations et conceptions que portent les apprenants, et sur l'idée qu'au départ d'une situation pédagogique il y a une question sociale que des acteurs se posent afin d'engager un processus d'enquête et d'apprentissage (Dewey, 1993).

Parmi les établissements engagés dans cette proposition pédagogique et didactique, au lycée agricole de l'Oise à Airion un enseignant s'est particulièrement investi dans ce que l'on peut qualifier de « renouvellement d'une pratique enseignante » (Altet, 2003). L'expérience mérite une mise en lumière tant elle peut être inspirante pour la communauté éducative.

3. L'expérience menée dans l'EPLEFPA de l'Oise

L'expérience incarne à la fois un engagement ancien de l'établissement quant au travail pédagogique avec les acteurs et questions territoriaux et un renouvellement de l'engagement et des pratiques enseignantes dont le PNRI a été un déclencheur.

3.1. Le contexte territorial de l'EPLEFPA de l'Oise

L'EPLEFPA de l'Oise se situe à environ 70 km au nord de Paris dans un territoire de grandes cultures avec une importance notable de la betterave sucrière. Il est composé de trois centres :

- **un lycée** comprenant 340 élèves/étudiants et proposant 3 filières bac dont un bac technologique STAV⁴ et 2 BTSA dont un en Agronomie Cultures Durables, ACD⁵ ;
- **un CFA/CFPPA** composé de 200 apprenants répartis sur deux sites (Airion et Beauvais) ;
- **une exploitation agricole** sur deux sites, composée de deux ateliers de production : un atelier de grandes cultures comprenant environ 20 ha en bio et 50 ha en agriculture raisonnée avec les principales cultures classiques du secteur (maïs grain, féverole d'hiver, betterave sucrière, colza et blé tendre d'hiver) ; un atelier de productions animales de volailles de chair bio de 6000 volailles commercialisées en vente directe.

Il est également le siège du CFA Régional des Hauts-de-France.

3.2. Le dispositif technique mis en place

L'exploitation s'est engagée dans le PNRI dès 2021. L'expérimentation avait pour objectif initial de tester l'efficacité de l'association de la betterave avec de l'avoine dans la lutte contre la jaunisse.

⁴ STAV : Sciences et Technologies de l'Agronomie et du Vivant.

⁵ Avant 2023, le BTSA ACD se nommait APV, agronomie et productions végétales. Par commodité d'écriture, nous garderons l'appellation BTSA ACD dans tout l'article.



La conception du dispositif expérimental a évolué au cours des trois années du PNRI. En effet, lors de la campagne 2021, celui-ci a été conçu exclusivement par l'ITB⁶ et mis en application par le personnel de l'exploitation de l'EPLFPA de l'Oise. Très perturbé par la pandémie de Covid-19, cet essai n'a pas été exploité pédagogiquement et a fourni peu de résultats techniques. Deux freins ont ainsi été mis en évidence : la nécessité d'impliquer davantage les enseignants dans la conception du dispositif et les besoins techniques pour assurer le suivi technique des essais.

Lors de la campagne 2022, le directeur de l'exploitation agricole (DEA) a demandé à l'enseignant référent EPA de l'établissement de l'aider à valoriser pédagogiquement ce travail. Le choix s'est assez porté sur la classe de BTS ACD pour mettre en œuvre le protocole expérimental fourni par l'ITB. Les étudiants ont alors répondu aux demandes de l'ITB et commencé à assurer le suivi technique. Au cours du reste de la campagne, celui-ci devait être assuré par un salarié contractuel extérieur recruté uniquement pour cette tâche. Ce suivi a été peu concluant et n'a pas fourni des données agronomiques fiables.

Lors de la campagne 2023, le travail de conception du dispositif expérimental a démarré plus tôt et a été intégré au fonctionnement pédagogique des étudiants en BTSA. Il ne s'agissait plus pour eux d'être de simples exécutants du PNRI, mais de s'approprier la commande et de formuler des propositions de dispositifs intégrant les contraintes du PNRI ainsi que leurs propres attentes. Le dispositif proposé pour la campagne 2023 est donc allé plus loin que le test de l'association plante-compagne et betterave. Il a ainsi intégré en plus le test d'une solution de biocontrôle : la paraffine. Pour obtenir des données expérimentales fiables, le suivi de l'essai a été réalisé par le référent EPA de l'établissement.

Au cours de ces trois campagnes, la conception du dispositif a donc évolué. De l'application descendante d'un protocole fourni par l'ITB, il s'est transformé en co-construction d'un dispositif intégrant à la fois les contraintes du PNRI, celles de l'exploitation agricole et les attentes des référentiels de diplômes et des apprenants. Cette co-construction s'est faite grâce à des allers-retours entre les apprenants, le personnel de l'exploitation agricole et l'ITB. Cette évolution a donné du sens au dispositif pour l'ensemble des acteurs et contribué à l'appropriation du PNRI au sein de l'EPLFPA.

Quelles ont été les clés de cette réussite ? D'abord de prendre en compte deux freins qui sont d'une part la nécessité pour l'enseignant de s'engager dans le projet en dehors de son service classique et d'autre part le besoin de suivre les essais en l'absence des apprenants. Ces freins ont été levés sur l'EPLFPA de l'Oise en permettant d'une part à l'enseignant en charge du projet de bénéficier d'une décharge horaire (référént EPA et volume horaire dédié au PNRI) et en le rémunérant d'autre part pour réaliser le suivi les essais l'été (rémunération fournie par l'exploitation et financée par le PNRI). La levée de ces freins a aidé l'enseignant à s'engager pleinement dans les partenariats liés au PNRI et à faire les liens entre les apprenants, l'exploitation agricole et les partenaires du PNRI. Ces moyens supplémentaires ont sans aucun doute contribué à la réussite de cette expérimentation au sein de l'EPLFPA de l'Oise.

3.3. Une expérience pédagogique spécifique avec des étudiants d'une classe de BTS ACD à mobiliser

Mettre en place un dispositif testant des alternatives aux NNI est certes un défi technique, mais dans le cadre d'un lycée agricole, c'est sans aucun doute aussi un défi didactique et pédagogique.

Ainsi, lors de la campagne 2022, alors que les étudiants de BTS ACD devaient pour la première fois mettre en œuvre le dispositif expérimental, de fortes oppositions se sont manifestées lors des premières séances nécessitant un travail important d'ingénierie pédagogique pour les comprendre et les

⁶ ITB : institut technique de la betterave



surmonter. L'appui de la Bergerie nationale a permis de concevoir un dispositif pédagogique reproductible et efficace pour surmonter ces difficultés. Celui-ci s'articule en quatre temps.

- **Organisation d'un débat mouvant.** Lors de cette séance, les étudiants doivent prendre parti sur des affirmations volontairement provoquantes (telles que « Supprimer les néonicotinoïdes en betterave sucrière est une erreur : on ne change pas une équipe qui gagne » ou « Il n'y a aucune alternative aux néonicotinoïdes en betterave sucrière »). L'objectif est de permettre aux étudiants de s'exprimer qu'ils soient d'accord ou pas avec l'objectif du dispositif.
- **Discussion des arguments échangés à partir d'une bibliographie validée par l'enseignant.** Le travail de synthèse de documents doit permettre aux étudiants d'avoir des éléments pour discuter objectivement des affirmations présentées lors du débat mouvant. Une confrontation est réalisée entre les représentations initiales et celles produites par le travail d'analyse des documents.
- **Co-construction du dispositif expérimental.** Les étudiants travaillent en groupe et apportent leurs idées à partir des informations fournies sur les contraintes de cet essai (souhait de l'exploitation, possibilités techniques fournies par le PNRI, protocole expérimental de l'ITB) et des solutions qu'ils souhaitent tester. Ils rédigent ensuite une synthèse écrite présentant et justifiant leur proposition. L'ensemble des propositions est présenté en réunion au DEA et au salarié réalisant l'implantation des essais. Suite aux échanges ayant lieu au cours de cette réunion, un dispositif expérimental produit de la synthèse réalisée par l'enseignant des différentes propositions faites par les étudiants est choisi pour la campagne.
- **Suivi et exploitation des résultats issus de l'essai.** Le suivi de l'essai est réalisé par les étudiants en début et en fin de campagne (notamment pour estimer le rendement de l'essai). La présentation des résultats auprès des professionnels est un moyen de valoriser leur engagement dans le dispositif et de les professionnaliser.

Initialement réalisé dans le cadre du Module d'Initiative Locale (MIL), le travail réalisé par les étudiants de BTSA a progressivement rejoint le cœur de la formation. Il sert maintenant de support du module M5, Conduite d'expérimentations, et sert à atteindre la capacité C.5.2, Suivre un essai système.

L'efficacité pédagogique de cette séquence repose en partie sur les deux premières parties qui servent à prendre en compte la parole des apprenants de manière à lever les représentations-obstacles qui nuisent aux apprentissages en en faisant des objectifs-obstacles (Martinand, 1986). Cela permet également de personnaliser l'enseignement en tenant compte des freins propres à chaque étudiant. Bien menées, ces deux séances permettent ensuite aux apprenants de s'impliquer personnellement dans l'apprentissage et donc d'atteindre les capacités visées par leur formation.

Pour l'enseignant, l'expérience pédagogique conduite dans le cadre du PNRI a permis de changer de regard sur les apprenants. Considérés initialement comme des spectateurs, ils sont devenus au fur et à mesure des campagnes des acteurs à part entière du dispositif, voire des auteurs (Lange & al, 2010). Les idées qu'ils amènent par leur envie, leur expérience professionnelle et leur imagination conduisent à proposer d'année en année des expérimentations réellement innovantes. Ils deviennent ainsi de véritables ressources pour la construction du dispositif expérimental.

3.4. Une journée « classe ouverte » révélatrice avec une classe de STAV à remobiliser

La réforme de la filière STAV qui a eu lieu en 2020 a mis en difficulté l'équipe pédagogique de l'EPLEFPA. En effet, celle-ci a modifié en profondeur l'architecture de l'évaluation des élèves : les Contrôles en Cours de Formation (CCF) ont été remplacés par le Contrôle Continu (CC) et les épreuves terminales ont évolué avec notamment l'introduction d'un Grand Oral et d'une épreuve de spécialité agronomie-biologie/écologie valorisant la synthèse et l'étude de documents.



Le démarrage du PNRI sur l'EPLFPA a été une opportunité pour surmonter ces difficultés. Une séquence pédagogique a ainsi été construite en lien avec le PNRI. Initiée en cours d'agronomie, celle-ci a pour objectifs de permettre aux élèves d'identifier les enjeux liés à la suppression des NNI en betterave sucrière, de découvrir les alternatives aux NNI testées sur l'EPLFPA et de les discuter. Elle est actuellement intégrée à la plage de pluridisciplinarité du bac STAV.

Le 19 septembre 2023, une classe ouverte a été organisée sur l'EPLFPA pour présenter aux membres du Comité de Pilotage (COPIL) du PNRI la manière dont les travaux effectués dans ce cadre pouvaient être valorisés auprès des apprenants.

Organisée en amont dans le cadre du cours d'agronomie, cette journée a été l'occasion pour les élèves de STAV de valoriser leur travail auprès des membres du COPIL (Haut fonctionnaire, DGER, chercheurs). Co-construite par les élèves, l'enseignant de la classe et le coordonnateur « Pédagogie et didactique » de la Bergerie nationale, elle s'est articulée en deux temps : un premier temps en salle où les élèves ont présenté la séquence pédagogique à laquelle ils ont participé ainsi que les enjeux techniques liés à l'interdiction des NNI ; un second temps sur le terrain où les membres du COPIL ont découvert le dispositif expérimental mis en place pour la campagne 2023.

Ce moment a été l'occasion pour les élèves de valoriser leur implication dans leur formation. Il a permis de donner de la valeur à leur travail. Pour les membres du COPIL, il a été l'occasion de découvrir le fonctionnement des apprenants et de prendre conscience notamment que l'appropriation par les élèves des concepts nécessaires à la mise en œuvre de l'interdiction des NNI ne peut pas se faire sur le mode strictement descendant.

Le PNRI est donc un outil didactique et pédagogique formidable à condition d'engager les apprenants au préalable. Cet engagement passe par différents leviers. Avec les élèves de STAV, le lien réalisé par l'équipe pédagogique avec les objectifs de l'épreuve terminale a donné du sens. Avec les étudiants de BTSA, la prise en compte de leurs représentations-obstacles a permis de rendre ceux-ci acteurs et même auteurs de la conception du dispositif expérimental. La réussite passe aussi par la mise en œuvre de moyens supplémentaires. Pour terminer, il est aussi évident que le nombre d'apprenants à gérer pour l'enseignant est une clé de la réussite. Ainsi la journée du 19 septembre 2023 n'a mobilisé que les 10 élèves de l'option agroéquipement de STAV et non les 26 élèves de la classe avec les deux options.

4. Des enseignements et des expériences transférables

L'expérience pédagogique du PNRI est riche d'enseignements sur la manière d'enseigner-apprendre les transitions et l'agroécologie à partir de sujets difficiles à aborder par les acteurs engagés (apprenants, enseignants, autres parties prenantes des séquences pédagogiques) car ils viennent bousculer des certitudes bien installées dans le large paradigme des Trente Glorieuses toujours bien présent dans les têtes et les pratiques.

4.1. Des dérangements... plus ou moins dépassés

La proposition de la Bergerie nationale a été diversement appréhendée⁷. Certains enseignants n'ont pas été à l'aise avec la posture qui consiste à interroger les représentations et conceptions que portent les apprenants pour ensuite les placer au cœur du dispositif d'apprentissage ; ils préfèrent dérouler un enchaînement d'activités pour par exemple mettre en place un protocole d'expérimentation, faire faire des relevés d'indicateurs identifiés, c'est-à-dire faire exécuter des tâches techniques et analyser des

⁷ Un des sept établissements ne jouera pas le jeu de l'engagement dans la construction de séquences pédagogiques au sein du collectif.



résultats. Cette proposition consiste également à partir d'une **question sociale que des acteurs du territoire se posent** – souvent le directeur d'exploitation de l'établissement d'enseignement et de formation – à **engager un processus d'enquête** (Dewey, 1993). Là encore, cette posture a pu être dérangement pour certains enseignants : il ne s'agissait plus de proposer « un exercice scolaire » dont l'enseignant maîtrise le cadre et le déroulé, mais de s'engager dans un processus itératif où de nombreuses incertitudes existent. Comment la discussion sur la commande avec l'acteur sollicité va-t-elle aboutir ? Comment cette commande va-t-elle devoir être retravaillée avec les apprenants ... clarifiée, et peut-être reformulée au cours de l'enquête, au fur et à mesure de la collecte d'informations pertinentes à son traitement. L'apport souvent magistral de connaissances a été bousculé : des professionnels rencontrés ont apporté des connaissances ; les apprenants sont aussi porteurs de connaissances ... dans les deux cas, ces apports ont été à interroger à la lumière de connaissances scientifiques et de références à d'autres pratiques professionnelles. Des travaux de groupes ont été à envisager ... des échanges inter-groupes également. Les emplois du temps ont dû être aménagés en fonction de la disponibilité des acteurs, pour faciliter les travaux de groupe. Des moments de doute ont été à gérer : besoin d'apports de connaissances à des moments opportuns car les groupes ne progressaient plus dans l'enquête ; rassurance des apprenants qui doutaient de leur capacité à répondre au défi intellectuel proposé, voire au défi psychosocial car il pouvait s'agir de restituer son travail à un public expert. C'est donc toute une ingénierie didactique et pédagogique, plus élaborée que celle liée à la diffusion de connaissances et à la mise en application de celles-ci, qui a été à mettre en œuvre. C'est-à-dire un travail plus exigeant pour l'enseignant qui doit davantage anticiper de possibles « déviations de trajectoire » ... et comment recentrer sur la finalité de l'enquête : raisonner des voies possibles pour une culture des betteraves sucrières alternative à l'utilisation des NNI. Des enseignants n'avaient ainsi pas idée de ce dans quoi ils s'engageaient. Certains ont été débordés par l'ampleur de la tâche et de la mobilisation des compétences nécessaires ... et n'ont pas abouti à une mise en œuvre telle qu'envisagée au moment de sa conception⁸. Enfin, l'étape de valorisation pour diffusion à la communauté éducative conditionnée par une analyse de pratique pédagogique (APP), a posé souci à certains : une APP (Fleury, 2012) ne se limite pas à un échange de pratique ; elle mobilise des outils didactiques issus des sciences de l'éducation et de la formation – ici de la psychanalyse de la connaissance – et une réelle introspection, menée en collectif avec une visée de professionnalisation des enseignants, quant aux savoirs organisateurs en jeu dans les séquences pédagogiques pour que les apprenants s'autonomisent en pensée et en action. La réflexivité permise par l'APP produit un riche matériau pour le témoignage sur l'expérience pédagogique menée⁹.

En fin de course, en fonction de leur culture professionnelle, les enseignants ont exploré, plus ou moins en profondeur, les démarches d'enquête, de problématisation et de conceptualisation. La production de ressources pédagogiques a été selon eux un gain notable en termes de **réflexivité sur leur pratique**. L'attitude des apprenants les a également encouragés à reproduire une telle démarche pédagogique sur d'autres sujets, tant ils s'y sont engagés. L'expérience a donné corps à une des manières d'enseigner autrement tant les modèles descendants ne fonctionnent plus guère, voire plus du tout, avec les apprenants tels qu'ils se présentent aujourd'hui dans les établissements d'enseignement et de formation.

4.2. Des productions réflexives pour la communauté éducative

Dans la plupart des projets de ce type, les productions pour l'enseignement agricole technique relèvent de fiches techniques et de données scientifiques et techniques produites par les chercheurs. Or, quand ils sont mobilisés par des enseignants, ces résultats confortent le plus souvent la réalisation de cours

⁸ A cette étape, un enseignant d'un établissement a « décroché ».

⁹ A cette étape, un autre enseignant d'un autre établissement a « décroché ».



magistraux où ils sont administrés aux apprenants bien loin des postures d'enquête qui les ont vus naître.

C'est justement cet écueil que la Bergerie nationale a voulu éviter en amenant les enseignants à **mettre en œuvre des séquences pédagogiques** où les apprenants sont mis à l'épreuve à la fois de la situation professionnelle concrète de « faire sans les NNI » et de leurs propres représentations/conceptions quant à la possibilité de penser une telle situation inédite. Conçues en collectif, mises en œuvre une première fois par les enseignants dans leur établissement, ces séquences sont analysées en collectif avant d'être reconduites une deuxième année pour plus d'efficacité en termes d'apprentissages. Des ateliers d'écriture sous forme de témoignages réflexifs sont organisés pour valoriser les démarches conduites et les apprentissages permettant aux apprenants de mieux s'y connaître sur la question des betteraves sans NNI tout en entraînant des capacités à atteindre pour l'obtention de leur diplôme désormais capacitaire.

Ces témoignages sont valorisés et rendus accessibles pour la communauté éducative sur le site de l'innovation pédagogique de l'enseignement agricole, POLLEN¹⁰. Des interviews des enseignants permettent en moins de 5 minutes de mettre en valeur les points cruciaux de leur travail à destination de leurs collègues¹¹. Un troisième volet constitué d'un regard scientifique, sous un même format vidéo court, sur ces expériences originales va compléter ce nouveau type de récit réflexif écrit d'une pratique enseignante (Altet, 2003) pour mieux enseigner-apprendre les transitions et l'agroécologie à partir d'expériences inspirantes.

4.3. Des conditions à réunir pour rendre les « innovations » possibles

Selon les dires des enseignants engagés, trois conditions principales ont permis d'emprunter des chemins de traverse par rapport à des pédagogies plus traditionnelles.

La première est d'abord celle de l'**accompagnement**. Le médiateur (la Bergerie nationale) a eu à traiter des situations enseignantes où, d'une part les apprenants, 1- ne connaissaient pas les NNI (en classe de Seconde générale) et étaient donc ouverts à la découverte, et 2- avaient des représentations selon lesquelles il n'était pas possible de faire sans les NNI, et d'autre part des enseignants 3- dans une première phase de leur carrière et donc peu expérimentés face à des situations territoriales complexes à traduire en situation d'enseignement-apprentissage et 4- des enseignants plus expérimentés mais confrontés à des résistances des apprenants qui ne s'ouvraient pas à des savoirs qui ne sont pas ceux avec lesquels ils sont en affinité. L'accompagnement vise donc déjà à prendre en charge ces caractéristiques. Plus largement, il s'agit également de mettre en travail des pratiques enseignantes, soit marquées par une expérience de formation scolaire et universitaire, voire un cursus d'ingénieur, considérées comme transmission d'informations (le processus « enseigner » de Houssaye, 2000), soit marquées par une forte inscription dans l'histoire de l'enseignement agricole : pédagogies transmissives traditionnelles, *behaviorisme* de la pédagogie par objectifs, pédagogie de projet davantage intéressée

¹⁰ [Déconstruire des représentations-obstacles et construire un dispositif expérimental aux alternatives aux NNI en culture de betterave sucrière en BTSA APV \(Airion\)](#), [Identifier les enjeux liés à la suppression des NNI en betterave sucrière et découvrir les alternatives aux NNI testées sur l'EPL de l'Oise en filière STAV \(Airion\)](#), [Des solutions alternatives aux néonicotinoïdes en betterave sucrière : une problématique complexe support de l'option EATDD en classe de Seconde au campus Bougainville \(Brie Comte Robert\)](#), [Adaptations et alternatives aux néonicotinoïdes sur betteraves sucrières avec une classe de BTS ACSE du lycée agro-viticole de Crézancy \(Crézancy\)](#), Réfléchir à des méthodes alternatives à l'utilisation des néonicotinoïdes en production betteravière dans l'Eure avec des élèves de Bac Pro CGEA 1 (Le Neubourg).

¹¹ Retrouvez les vidéos de valorisation des expériences pédagogiques, et plus largement de la participation de l'enseignement agricole au PNRI sur la plateforme ADT de l'enseignement agricole : <https://adt.educagri.fr/acteurs-et-dispositifs/autres-dispositifs-mobilisables/pnri-betterave>.



par la relation entre enseignants et apprenants que par les savoirs en jeu (Fleury, 2004 ; Fleury & Fabre, 2005). L'expérience PNRI a placé l'enquête, la problématisation et la conceptualisation (Fabre, 2005 ; Fabre & Thiévenaz, 2019) au cœur des dispositifs d'enseignement-apprentissage pensés et mis en œuvre par les enseignants.

La deuxième consiste en la possibilité d'**ateliers d'écriture**. Dans d'autres analyses de projet du même genre (CASDAR RESP'HAIES par exemple), nous avons observé la difficulté pour des enseignants de formaliser leurs pratiques de manière réflexive. Ils fonctionnent souvent en activant des savoir-faire, des schèmes laissant peu de place à la réflexivité (Maurice, 2006). Par réflexivité, nous entendons avec Perrenoud (2001) la capacité de réfléchir délibérément sur ses propres pratiques en vue de les améliorer ; nous suivons également Bouissou et Brau-Antony (2005), quand ils mobilisent une approche articulant didactique et psychosociologie pour « *permettre de « penser » autrement la réalité de la pratique professionnelle et de la formation* ». Les enseignants engagés dans le PNRI ont ainsi apprécié de disposer de temps dédiés à l'écriture réflexive de leur vécu afin de mieux pouvoir le transformer en expérience (Pastré, 2013), d'abord pour eux et ensuite pour la communauté éducative. Cet épisode a toutefois inclus le passage obligé par l'étape de l'analyse de pratique pédagogique outillée (Fleury, 2012). Un enseignant nous dit que « *cette phase d'écriture m'a personnellement permis de repenser ma capacité à écrire des séquences pédagogiques. Paradoxalement, si elle a nécessité de ma part du temps et de l'énergie, elle m'a permis de regagner ce temps et cette énergie en capitalisant sur le travail effectué pour le réutiliser les années suivantes. J'ai par ailleurs choisi de généraliser cette analyse réflexive pour d'autres séquences, d'autres classes afin de progresser. Le travail fait sur le PNRI s'est donc généralisé.* »

La troisième est la **reconnaissance par l'Institution** (DGER) que le travail de transformation d'une pratique enseignante nécessite un engagement qui dépasse le temps de travail habituel de l'enseignant et mérite donc gratification, même si celle-ci est davantage symbolique que réellement à la hauteur de l'engagement. Ce dernier concerne les pratiques pédagogiques des enseignants, mais touche également l'image qu'ils se font de leur métier tout autant que leur identité professionnelle (Gaborieau & Peltier, 2024) actuellement chamboulées notamment par la rénovation capacitaire des référentiels de diplôme et EPA. Pour leur engagement – suivi des expérimentations et productions de séquences – les enseignants ont bénéficié d'une gratification d'une heure hebdomadaire sur leur fiche de service.

Rendre explicites des savoirs de transition

Mayen (2013) attire notre attention sur les types de savoirs en jeu dans EPA et pointe notamment les savoirs qu'il nomme de transition. Selon nous, ces savoirs de transition ont à voir avec la capacité réflexive à travailler avec les apprenants, quant aux différentes voies possibles pour mettre en œuvre des systèmes agroécologiques. Et c'est aussi bien le *design* de ces systèmes que leur mise en œuvre au champ ! Il s'agit donc d'abord pour le collectif enseignant de penser le problème de la lutte contre la jaunisse de la betterave sans NNI. Les enseignants, également pour partie en charge du suivi des expérimentations sur les exploitations de leurs lycées, collectent des données et sont au fait de celles collectées ailleurs. Ainsi, au-delà de leur seule expérience, ils sont à même lorsqu'ils se retrouvent en session d'échange de résultats, de conception de séquences puis d'analyse de pratiques pédagogiques, d'identifier avec l'accompagnement de la Bergerie nationale les combinaisons génériquement les plus efficaces et celles adaptées aux situations auxquelles ils sont individuellement confrontés. C'est dans ce collectif, en mobilisant le losange de la problématisation de Fabre (fig. 1), qu'ils ont pu, au vu des données de terrain et de la littérature, identifier 3 critères ultimes – les conditions – du problème : les moyens de lutte (biocontrôle, plantes compagnes, etc.), l'échelle d'action (de la parcelle au paysage) et la combinaison plus ou moins importante de leviers. C'est la mobilisation différentielle de ces conditions qui permet d'envisager des solutions plus ou moins ambitieuses en termes de durabilité des pratiques selon le modèle ESR (Hill & McRae, 1995). Trois hypothèses de solutions se dégagent alors :



1. réduction des doses ou autre(s) molécule(s) (efficacité) ; cette solution n'est en partie pas possible en France car les NNI sont interdits, alors que des produits tels Teppeki et Movento sont utilisés ;
2. utilisation d'un ou plusieurs leviers combinés (sans NNI) à l'échelle de la parcelle ; c'est la solution la plus utilisée lors des expérimentations (mono ou multi leviers) ;
3. utilisation de plusieurs leviers à l'échelle de la parcelle, voire du paysage ; l'échelle du paysage a été peu expérimentée car elle dépasse la logique de la filière betterave et demande des engagements plus importants et complexes (rotations, cohérence des pratiques agricoles à l'échelle minima d'un micro-territoire).

La problématisation ainsi formalisée, et validée auprès du comité technique du PNRI, trace les apprentissages potentiellement réalisables avec les apprenants. Elle offre l'éventail des possibilités techniques d'alternatives aux NNI et rend explicite les raisonnements en jeu pour le choix. Enfin, elle s'appuie sur les résultats de la recherche en cours.

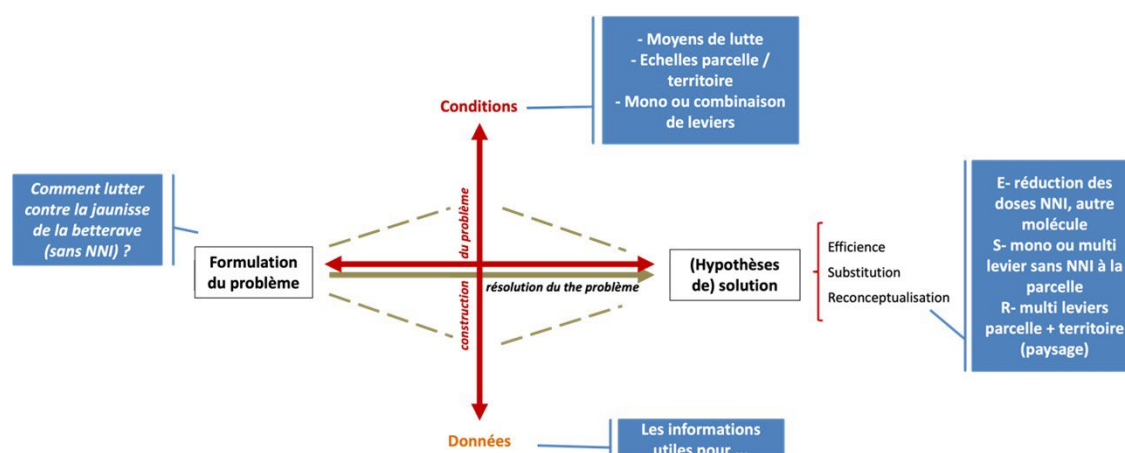


Figure 1 : Problématiser la question de la culture de la betterave (sans NNI)

C'est donc muni de cet instrument que les enseignants reprennent leurs activités où ils peuvent envisager de traiter plus sereinement la question des betteraves sans NNI.

5. Conclusions et perspectives

L'expérience PNRI est à replacer dans des évolutions en cours dans l'enseignement agricole avec le plan EPA et la rénovation des référentiels de diplômes, et plus largement dans un renouvellement des manières de faire société à l'École.

5.1. La jaunisse de la betterave, un prétexte pour enseigner-apprendre les transitions

La « jaunisse de la betterave » est un riche objet en situation pour enseigner-apprendre la transition agroécologique. D'autant plus si un petit collectif d'enseignants de disciplines variées s'en empare, car les objets complexes nécessitent cette diversité pour être pleinement explorés avec des apprenants. Les rénovations de référentiels de diplômes obligent aujourd'hui les enseignants des matières générales à « se mettre au service des disciplines techniques »¹². Par exemple, pour le travail de telles situations territoriales, la présence du géographe – dynamiques sociospatiales, intrication des échelles – est un atout. Il a donc tout son rôle quand il s'agit de passer de l'échelle de la parcelle à celle du

¹² Il y a un réel besoin de formation des équipes pédagogiques sur ce sujet.



territoire¹³ pour envisager les services écosystémiques (ou les « contributions de la nature » selon le rapport Nexus de l'IPBES, 2024) possiblement rendus pour la culture de la betterave sucrière sans NNI. Nous n'avons malheureusement pas rencontré une telle configuration de travail dans les projets PNRI : c'est une voie d'amélioration.

Des recherches ont montré que d'autres objets en situation se prêtent facilement à la démarche des **pédagogies ancrées** : l'ours, le loup, le blaireau (considérés comme des nuisibles), le glyphosate... ou pour être plus « positif » le verger-maraîcher, ... interrogent les manières de travailler contre/avec le vivant, les voies de transition pour le passage d'un paradigme à l'autre.

C'est également un prétexte pour diffuser les résultats au-delà de sa sphère de prédilection. Les apprenants de Samuel ont présenté leurs travaux à d'autres classes ; pourquoi ne pas envisager que le travail sur la betterave inspire les travaux dans d'autres filières via le relai de l'ACTA. La Bergerie nationale a par exemple réalisé trois plateaux télévision avec la chaîne TVAgri diffusée sur YouTube¹⁴ : un moyen d'ouvrir à d'autres publics, de dépasser les frontières ... et pourquoi pas de stimuler de nouveaux projets partenariaux territoriaux.

5.2. De nouveaux types de partenariats entre recherche, développement et formation

La démarche déployée dans l'enseignement agricole avec le PNRI montre les contours d'une conception renouvelée des dispositifs entre recherche, développement, agriculteurs et enseignement agricole. Le premier point de cette configuration nouvelle est que les uns et les autres aient bien conscience de ce qu'implique cette manière de travailler : compréhension partagée des environnements de travail des uns et des autres ; conscience des objectifs d'apprentissage possibles ; conscience des idées que les jeunes tiennent pour vraies ; etc. En ce sens, la journée « Classe ouverte » à Airion avec les différents protagonistes du PNRI (haut fonctionnaire, chercheurs, développeurs, DGER, accompagnateurs ..., apprenants) a été très instructive. Le deuxième point est celui d'enseigner-apprendre les transitions à partir de **situations territoriales authentiques** (Peltier, 2023) que les enseignants doivent parfois ajuster avec les acteurs territoriaux pour qu'elles soient apprenantes. Si elles sont trop éloignées des apprenants, ils ne s'y engageront pas et les apprentissages ne pourront se faire. Le troisième point est celui de la création d'une **intimité collective** entre enseignants et acteurs du territoire pour que la création, ensemble, de situations d'enseignement-apprentissage soit possible.

Ainsi, un nouveau positionnement entre établissement et territoire peut se construire. Jadis, un établissement pouvait se targuer d'être en capacité « d'imposer » des questions qu'il portait au territoire... voire de les traiter seul. Aujourd'hui, quand un établissement se lance dans une telle démarche, il peut peut-être y parvenir mais le plus souvent non car envisager des systèmes complexes en situation d'incertitude demande de combiner des compétences diversifiées. Par contre, être reconnu pour ses compétences à **problématiser** et **conceptualiser** – avec des élèves, étudiants – un sujet vif, à envisager/expérimenter différents types de solutions pour les acteurs du territoire eux-mêmes en quête de solutions, donne crédit et intérêt au partenariat. C'est ainsi que l'EPLEFPA de l'Oise a été

¹³ Le conseil scientifique 2024 de la Bergerie nationale a d'ailleurs traité du sujet de l'écologie en paysages. La publication de ces travaux est à paraître en 2025.

¹⁴ 1- Comment l'Enseignement agricole est intégré dans le PNRI betteraves sans NNI ? - <https://www.youtube.com/watch?v=IAwlg5nrZso&list=PLVLI11EYX0C8zP0JMjyuM6K7hQHU2hfaJ&index=2njou> ; 2- Comment les exploitations de lycées agricoles s'impliquent dans le PNRI betteraves sans NNI ? - <https://www.youtube.com/watch?v=2mZhiq3O4cQ&list=PLVLI11EYX0C8zP0JMjyuM6K7hQHU2hfaJ&index=3> ; 3- Quelles implications pédagogiques pour la réduction des NNI en cultures betteravières ? - <https://www.youtube.com/watch?v=jlvyTj8fkZ8&list=PLVLI11EYX0C8zP0JMjyuM6K7hQHU2hfaJ&index=1>.



sollicité par URBASOLAR pour gérer une vingtaine d'hectares en agrivoltaïsme. De plus, quelques moyens peuvent accompagner le partenariat. Cette mutation interroge tout à la fois les projets d'animation et de développement des territoires de l'enseignement agricole (une de ses 6 missions) et les démarches pédagogiques inter- trans- et a- disciplinaires.

5.3. Un réenchancement de la pratique enseignante par une pédagogie ancrée

L'expérience « PNRI » au plus près des enseignants montre le besoin d'une pédagogie à la hauteur des enjeux actuels à la fois, relatifs aux incertitudes nombreuses qui traversent les sociétés, et internes à l'École dont l'Enseignement agricole. La visée d'une innovation renouvelée, au-delà du paradigme dominant moderne-productiviste (« religion » du progrès, ontologie de la domination, technicisme / technologisme et savoirs scientifiques appliqués, création de besoins) vers un paradigme soutenable/désirable (ménagement du vivant, ontologie de la relation entre « humains » et « non-humains », de la considération (Pelluchon, 2021), savoirs scientifiques et savoirs praticiens situés, amélioration possible du monde pour mieux l'**habiter**) peut la guider. Ce méliorisme engage les organisations dans des pratiques renouvelées : institutionnalisation du changement, valeur donnée au précieux facteur humain (Viveret & Le Doze, 2014), ... La **formation-accompagnement** y est un élément indispensable du changement. Ainsi, plus les solutions envisagées comme alternatives aux NNI, sont le fruit d'interrogations et d'une construction de la part de collectifs diversifiés de parties prenantes de la question, plus elles mettent en avant des échelles qui intègrent de manière systémique sa complexité – travail à l'échelle du paysage par exemple – plus elles ont de chances de s'inscrire dans le paradigme soutenable/désirable émergent.

Enfin, selon nous, c'est une pédagogie ancrée (Peltier, 2023) qui est la mieux à même de prendre en charge un tel processus à la fois d'apprentissage et de changement dans les pratiques professionnelles. L'ancrage est ainsi à considérer à plusieurs niveaux :

- ancrage dans des situations sociales **authentiques** ;
- ancrage dans le **questionnement** ;
- ancrage dans une co-construction des objectifs et objets d'apprentissage avec les parties prenantes (une nécessaire « **intimité collective** » entre enseignants et acteurs territoriaux ; un intérêt partagé) ;
- ancrage dans l'**enquête** (pragmatisme, didactique professionnelle) et dans sa visée capacitante ;
- ancrage dans une **problématisation** de la situation, une **conceptualisation** d'hypothèses de solutions pour une restitution au commanditaire (une **dévolution** de cette situation – moyennant médiation par les enseignants – aux apprenants) ;
- ancrage dans l'**institutionnalisation** des savoirs/démarche en jeu (réflexivité, psychanalyse de la connaissance), **remobilisation** des **savoirs-instruments** co-conçus, appropriés ;
- ancrage dans la soutenabilité des pratiques (**habiter**).

Une telle pédagogie ancrée est également mise à l'épreuve dans d'autres projets actuels tels les CASDAR ACEC, COLOMBE et Perma'Innov¹⁵ animés par la Bergerie nationale où il s'agit de produire des données pour renforcer la pertinence et l'opérativité du concept.

¹⁵ Ces CASDAR concernent le sol vivant (ACEC), le bien-être animal en aviculture (COLOMBE) et le développement de solutions agricoles inspirées de la permaculture (Perma'Innov). Ils envisagent notamment la production de séquences pédagogiques inspirante à partir de situations problématiques territoriales.



Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

PELTIER - 0009-0009-7620-7343

Contributions des auteurs

Co-rédigé par les deux auteurs

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les collègues enseignants qui ont également participé au projet PNRI.

Déclaration de soutien financier

Hormis pour le temps de travail consacré au projet PNRI, les auteurs n'ont pas reçu de soutien financier particulier.

Références bibliographiques

- Altet, M. (2003). Caractériser, expliquer et comprendre les pratiques enseignantes pour aussi contribuer à leur évaluation. *Les dossiers des sciences de l'éducation*, 10, 31-43.
- Astolfi, J.-P. (2010). *L'école pour apprendre. L'élève face aux savoirs*. Paris : ESF.
- Bouissou, C., Brau-Antony, S. (2005). Réflexivité et pratiques de formation. Regards critiques. *Carrefours de l'éducation*, 20, 113-122.
- Dewey, J. (1993). *Logique. La théorie de l'enquête*. Paris : PUF
- Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle*, 38(3), 53-67.
- Fabre, M., Thiévenaz, J. (2019). L'enquête : un concept heuristique pour les sciences de l'éducation et la formation. *Recherche et formation*, 92, 95-104.
- Fleury, B. (2004). L'accompagnement du changement de pratiques pédagogiques. *Penser l'éducation*, 16, 41-53.



- Fleury, B. (2012). L'analyse de pratiques professionnelles dans le monde enseignant : un dispositif de psychanalyse de la connaissance. In : I. Vinatier, *Réflexivité et développement professionnel. Une orientation pour la formation*. Toulouse : Octares.
- Fleury, B., Fabre, M. (2005). Psychanalyse de la connaissance et problématisation des pratiques pédagogiques. La longue marche vers le processus « apprendre ». *Recherche et formation*, 48, 75-90.
- Gaborieau, I., Peltier, C. (2024). «Enseigner à produire autrement», ou comment le travail et l'image des enseignants et formateurs sont bousculés. *Norois*, 271(2), 177-189.
- Gaborieau, I., Vidal, M. (coord.) (2022). *Enseigner à produire autrement. Repères, démarches et outils pour former aux transitions agroécologiques*, collection Praxis. Dijon : Educagri éditions.
- Hill, S.B., McRae, R.J. (1995). Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7(1), 81-87.
- Houssaye, J. (2000). *Le triangle pédagogique. Théorie et pratiques de l'éducation scolaire*. Berne : Peter Lang.
- IPBES (2024). *Affronter ensemble cinq crises mondiales interconnectées en matière de biodiversité, d'eau, d'alimentation, de santé et de changement climatique*. Rapport IPBES.
- Lange, J.-M., Victor, P., & Janner, M. (2010). Vers l'élaboration d'indices, mesure de l'efficacité de l'éducation au développement durable en milieu scolaire. In : *AREF 2010*.
- Maurice, J.-J. (2006). L'expérience de l'enseignant : une réflexivité limitée. *Formation et pratiques d'enseignement en question*, 3, 53-67.
- Martinand, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- Mayen, P. (2013). Apprendre à produire autrement : quelques conséquences pour former à produire autrement. *POUR*, 219, 247-270.
- Pastré, P. (1999). La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives. *Education Permanente*, 139, 13-34.
- Pastré, P. (2013). Le travail de l'expérience. In L. Albarello, J.-M. Barbier, E. Bourgeois, M. Durand (coord.), *Expérience, activité, apprentissage*. Paris : PUF, 93-110.
- Pelluchon, C. (2021). *Les Lumières à l'âge du vivant*. Paris : Le Seuil.
- Peltier, C. (2023). Enseigner-apprendre la réduction des produits phytosanitaires de synthèse. *Innovations agronomiques*, 89, 133-148.
- Peltier, C. (2023). Un objet pédagogique territorialisé pour enseigner les transitions et l'agroécologie. Pour une pédagogie ancrée mobilisant des « jeux authentiques ». *Travail et Apprentissages*, 26(2), 187-207.
- Perrenoud, P. (2001). *Développer la pratique réflexive dans le métier d'enseignant*. Paris : ESF.
- Viveret, P., Le Doze C. (2014). *Vivre à la bonne heure*. Paris : éditions Presses d'Ile de France.

Pour citer cet article : Christian Peltier, Samuel Quinton. Enseigner-apprendre la transition agroécologique dans l'enseignement agricole : l'exemple des alternatives aux néonicotinoïdes. *Innovations Agronomiques*, 2025, 103, pp.31-44. [10.17180/ciag-2025-vol103-art04](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art04)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Solutions de biocontrôle contre *Myzus persicae*

Amélie MONTEIRO¹, Audrey FABAREZ¹, Fabienne MAUPAS¹

¹ ITB (Institut Technique de la Betterave). 45 rue de Naples - 75008 Paris, France

Correspondance : maupas@itbfr.org

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art05>

Résumé

Dans le cadre du projet « Évaluation des produits de biocontrôle » du Plan National de Recherche et d'Innovation (PNRI), un large screening de produits de biocontrôle, principalement à action aphicide, a permis d'identifier des substances actives prometteuses pour lutter contre *Myzus persicae*, le principal vecteur des virus de la jaunisse de la betterave. Au total, 28 substances actives ont été testées en serre, provenant de 33 firmes, en comparaison à l'aphicide conventionnel (flonicamide). Puis, les 10 solutions présentant les meilleures efficacités ont ensuite été évaluées au champ, majoritairement seules ou en combinaison avec la référence chimique à base de flonicamide pour rechercher des stratégies de protection qui viseraient à limiter l'utilisation de produits conventionnels grâce à l'utilisation complémentaire de solutions de biocontrôle. Les essais réalisés sous serre montrent une bonne efficacité des produits de biocontrôle pour limiter le développement des populations de pucerons ou leur dispersion depuis les plantes infectées. Cependant, nos résultats montrent que les valeurs d'efficacité en conditions contrôlées ne sont pas reproductibles au champ. En effet, une chute importante d'efficacité est observée au champ par rapport aux essais conduits sous serre. Néanmoins, des résultats intéressants ont été obtenus avec la maltodextrine et deux essais montrent une potentielle complémentarité entre l'aphicide conventionnel (flonicamide) et le champignon entomopathogène *Lecanicillium muscarium* d'une part, et entre la flonicamide et l'huile de paraffine d'autre part. L'efficacité actuelle de ces produits au regard de leur coût reste souvent insuffisante pour une adoption massive par les betteraviers. Un travail pour préciser le mode d'emploi des produits doit désormais être conduit, pour garantir leur efficacité et faciliter leur adoption.

Mots-clés : biocontrôle, betterave, *Myzus persicae*, jaunisse, PNRI

Abstract: Biocontrol solutions against *Myzus persicae*

The "Evaluation of biocontrol products" project of the French National Research and Innovation Plan (PNRI) aims to identify and evaluate biocontrol products to support pesticide reduction in cropping systems. As part of this project, a broad screening of biocontrol products, mainly with aphicidal action, was conducted to identify promising active substances for controlling *Myzus persicae*, the main vector of sugar beet yellows viruses. The efficacy of biocontrol active substances was first tested in greenhouse conditions (28 active substances from 33 companies), and the 10 best solutions were then evaluated in field trials, alone or in combination with the reference chemical product (flonicamid). Greenhouse experiments showed biocontrol products were highly effective in controlling the development and dispersal of aphid populations, compared to the chemical reference. However, the efficacy observed under controlled conditions was not observed in field trials. The majority of biocontrol active substances show a significant drop in efficacy, except maltodextrin and two combinations between the conventional aphicide and biocontrol active substances: entomopathogenic fungus *Lecanicillium muscarium* + flonicamid and kerosene oil + flonicamid. However, the current efficacy of these products, according to their cost, often remains insufficient for them to be adopted by sugar beet growers.

Keywords: biocontrol solutions, sugarbeet, *Myzus persicae*, beet yellows, PNRI



1. Introduction

La jaunisse de la betterave sucrière est une maladie virale causée en France par un complexe de 4 virus (BYV, BMV, BChV et BtMV) qui sont principalement transmis par *Myzus persicae*, le puceron vert du pêcher (Audran, 2020). Les pertes de rendement occasionnées par cette maladie sont très variables, et dépendent essentiellement du type de virus inoculé et de la date d'inoculation. Plus cette dernière est précoce, et plus la perte de rendement est importante (Smith et Hallsworth, 2008, Stevens et al., 2004, Hossein et al., 2020). Par exemple, au cours des années 1997 à 2000, Stevens et al. (2004) a observé des pertes comprises entre 4 et 27 % pour une inoculation des betteraves au BMV, et de 8 à 24 % pour une inoculation au BChV. Sur le territoire français, en 2020, la perte moyenne de rendement malgré l'utilisation d'aphicides (insecticides ciblant les pucerons) foliaires a été estimée à 30 %, un chiffre considérable qui a positionné la filière betteravière dans une impasse technique pour la gestion de la jaunisse.

Historiquement, les pucerons vecteurs de cette maladie étaient contrôlés par des néonicotinoïdes (NNI) utilisés en traitement de semences. Depuis leur interdiction en 2018, les alternatives employées à ce jour sont des traitements aphicides en végétation (Teppeki® à base de flonicamide et Movento® à base de spirotétramate, ce dernier étant soumis à une demande de dérogation chaque année). Toutefois, ces traitements n'ont pas permis de contrôler suffisamment les populations de pucerons sur l'ensemble du territoire betteravier en 2020. De plus, ces substances actives ne constituent pas des solutions durables : risque d'apparition de résistance (Caddoux et al., 2014 et Williams et al., 1998), arrêt de commercialisation pour le produit à base de spirotétramate, etc.

Depuis 2018, de nombreux travaux ont été initiés pour identifier des solutions alternatives et/complémentaires aux aphicides foliaires pour contrôler suffisamment les populations de pucerons vecteurs en culture et limiter les pertes de rendement. Le programme de recherche le plus important en termes de moyens, est le Plan National de Recherche et d'Innovation (PNRI) initié en 2021, où toutes les solutions potentielles contre la jaunisse ont été évaluées. Parmi ces solutions, les produits de biocontrôle figurent comme l'une des solutions potentielles les plus opérationnelle à ce jour, en partie dû à leur mode d'utilisation qui s'apparente à ce que les agriculteurs connaissent déjà, rendant ainsi leur adoption potentielle facilitée.

Les produits de biocontrôle sont largement travaillés dans plusieurs cultures contre différentes espèces de pucerons vectrices de maladie virale (Kinley et al. 2021). Pour *Myzus persicae*, Lee et al. (2015) a évalué l'effet de plusieurs isolats de champignons entomopathogènes sur la mortalité de *M. persicae*, et qui a pu mettre en évidence l'intérêt de certaines espèces du genre *Lecanicillium*, *Beauveria* et *Metharizium* comme agent de lutte, avec une efficacité de 80 % en conditions de laboratoire. Entre 2018 et 2020, les Instituts Techniques Agricoles se sont regroupés autour d'un projet commun en faveur du biocontrôle : le projet Ecophyto ABCD-B (Thibord, 2024). Les résultats de ce projet, complétés par des essais conduits par l'ITB ont été synthétisés par Laurent et al. (2023). Les résultats de ces travaux ont montré que les produits de biocontrôle testés affichaient une efficacité sur les populations de pucerons plus faible que la référence chimique à base de flonicamide, 14 jours après le traitement. Le produit de biocontrôle qui a montré la meilleure efficacité est celui à base du champignon entomopathogène *Lecanicillium muscarium* avec une efficacité de 40,7 %, mais avec une grande incertitude due au nombre limité d'essais.

C'est avec l'objectif de poursuivre l'acquisition de références que le projet « Évaluation des produits de biocontrôle » du PNRI a été mis en place en 2021. Différentes catégories de produits de biocontrôle ont été testées : substances naturelles ou microorganismes à action aphicide, barrières physiques, stimulateurs de défense des plantes (SDP), macroorganismes ou médiateurs chimiques. Pour les deux premiers types de substances, le principal critère de jugement est la réduction des populations de pucerons. Pour les SDP, l'analyse porte sur la charge virale dans la plante. Cependant, l'évaluation de ces SDP est trop récente à l'Institut Technique de la Betterave (ITB) pour en faire une synthèse. Les



médiateurs chimiques et les macroorganismes n'étant pas adaptés à ce type d'essais sous serre ou en micro-parcelle, ils ont été testés en grandes parcelles dans le réseau des Fermes Pilotes d'Expérimentation (voir article correspondant dans ce journal « Alternatives aux néonicotinoïdes en betteraves sucrières : synthèse de 4 années d'expérimentations »).

L'objectif du travail présenté ici est d'évaluer l'efficacité de différentes substances de biocontrôle, d'abord en serre puis en parcelle expérimentale en comparaison du flonicamide. L'efficacité des substances, seules ou en combinaison avec le flonicamide a été évaluée sur la réduction du nombre de pucerons (produits aphicides) ou sur la limitation de la propagation des pucerons entre plantes (produits répulsifs).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Sélection des produits

Les premières expérimentations ont été faites sous serre pour sélectionner les produits à tester au champ. Les produits ont été sélectionnés :

- à partir de la littérature scientifique. En 2021, la saisine n°2020-SA-0102 relative à « l'efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave » a permis de faire l'inventaire de toutes les connaissances sur les solutions documentées dans la littérature scientifique (Jactel, 2021) ;
- à partir des résultats du projet ABCD-B mené au préalable à l'ITB (Thibord, 2024) ;
- à partir d'une sélection de substances actives issue d'un appel auprès des fabricants volontaires souhaitant tester leurs solutions, grâce à la mobilisation du consortium biocontrôle et biostimulation.

Les meilleurs produits issus des screenings sous serre ont ensuite été évalués au champ en micro-parcelles. Les résultats de pré-screening sous serre ne seront pas présentés dans cet article afin de respecter l'engagement de confidentialité avec les firmes détentrices.

2.2. Protocoles expérimentaux

2.2.1. Mise au point des protocoles sous serre

Deux types de protocoles ont été mis au point sous serre : un protocole pour les produits à mode d'action aphicide et un protocole pour les produits répulsifs.

Protocole pour les produits aphicides

De 2018 à 2022, 43 produits de biocontrôle représentant 28 substances actives ont été évalués. Pour cela, 10 plants de betteraves par modalité ont été inoculées, aux stades 2 feuilles ou 6-8 feuilles, avec 5 pucerons aptères *Myzus persicae* afin d'évaluer l'efficacité des produits pour une application à aux stades critiques d'infection les plus dommageables pour la plante. Les traitements aphicides ont été réalisés le lendemain de l'inoculation, à l'aide d'un banc de pulvérisation permettant de contrôler la quantité de produit apportée et d'avoir une qualité de pulvérisation proche de celle obtenue avec un pulvérisateur d'agriculteur. Le volume de bouillie appliqué était compris entre 150 L/ha et 300 L/ha selon les caractéristiques des produits et les recommandations des firmes. Après le traitement, les pots ont été positionnés dans des cages insect-proof. Des comptages de pucerons ont été réalisés sur chaque betterave 2, 5, 7 et 13 jours après le traitement (+/- 1 jour) pour évaluer la dynamique des pucerons au cours du temps. Pour chaque produit, 10 betteraves individuelles ont été observées.

Protocole pour les produits répulsifs



Pour évaluer l'efficacité des produits de biocontrôle répulsifs, une betterave infestée par 5 aptères de *M. persicae* a été introduite dans chaque cage insect-proof, au centre de 3 pots traités avec 3 solutions répulsives différentes et 1 pot de plante témoin sans traitement. L'objectif était de permettre aux pucerons de la plante infestée de migrer (ou non) vers les autres betteraves. Les traitements ont été réalisés à l'aide du banc de pulvérisation permettant de contrôler la quantité de produit apportée et d'avoir une qualité de pulvérisation proche de celle obtenue avec un pulvérisateur d'agriculteur. Le volume de bouillie appliquée était compris entre 150L/ha et 300L/ha selon les caractéristiques des produits et les recommandations des firmes. Des comptages de pucerons ont été réalisés sur chacune des betteraves, 2, 5, 7 et 13 jours après le traitement (+/- 1 jour) pour évaluer l'efficacité des traitements au cours du temps.

2.2.2. Essais en micro-parcelles

De 2021 à 2023, 7 essais ont été mis en place en micro-parcelles. Ces essais visaient à évaluer l'efficacité des substances actives en conditions proches de conditions habituelles d'usage. Il n'est pas possible de mesurer le développement de la jaunisse avec ce type de dispositif, compte tenu de la forte hétérogénéité des symptômes au sein d'un champ de betterave, nous avons donc caractérisé le développement des populations de pucerons. Les essais ont été conduits en condition d'infestation naturelle de pucerons.

Les traitements ont été réalisés dès que le seuil de 10 % de betterave avec au moins un aptère de *M. persicae* (issu de la colonisation naturelle) était dépassé, ce qui correspond au seuil préconisé pour les traitements par les agriculteurs. Deux traitements, espacés de 7 jours, ont été effectués pour les produits de biocontrôle. La référence chimique à base de flonicamide n'a été appliquée qu'à la date du premier traitement, compte tenu des connaissances antérieures sur sa durée de rémanence d'environ 15 jours (source ITB). Le volume de bouillie appliquée était de 150 l/ha à 300 l/ha, selon les caractéristiques des produits et les recommandations des firmes. Les comptages de pucerons ont été réalisés sur 40 betteraves par modalité et par date, avant les traitements et à 7 et 14 jours après les traitements.

Des échanges réguliers ont eu lieu avec les firmes, au moment de la conception du protocole et lors de l'analyse des résultats, pour intégrer les spécificités des produits et se mettre dans des conditions d'efficacité optimales.

2.2.3. Essais en micro-parcelles

Pour estimer l'efficacité des produits testés, un modèle statistique linéaire généralisé à effets mixtes a été ajusté aux données en tenant compte de la variabilité des effets des traitements entre les sites-années et de l'évolution temporelle du nombre de pucerons verts (distribution de Poisson). Le modèle est basé sur celui utilisé par Laurent *et al.* (2023), mis au point pour évaluer l'efficacité de produits insecticides contre les pucerons. Le modèle inclus des effets fixes (traitement, année par exemple) et l'essai (traitement*site) a été considéré en effet aléatoire. L'efficacité des traitements est estimée par la réduction du nombre de puceron en référence au témoin (traitement de référence ou témoin non traité).

3. Résultats

3.1. Essais sous serre

3.1.1. Produits à action aphicide

L'ITB s'étant engagé dans un contrat de confidentialité avec certaines firmes, les résultats détaillés ne peuvent pas être montrés. En synthèse, aucun produit testé n'est aussi efficace que la référence chimique mais pour certain, la dynamique des populations de pucerons se situe à un niveau intermédiaire entre le témoin non traité et la référence chimique : produits à base d'azadirachtine



A, d'acides gras, huile essentielle d'orange, mélanges d'huiles essentielles, micro-organismes, extrait d'ortie.

Un produit à base d'extraits d'huiles essentielles montre la meilleure efficacité parmi l'ensemble des solutions testées : la population de pucerons par rapport au comptage avant traitement était réduite de 70 % et le niveau de réduction des populations de pucerons était réduit de 80 % par rapport au traitement non traité, 6 jours après le traitement. Les populations repartent ensuite à la hausse au comptage à 13 jours. Parmi les microorganismes, le *Lecanicillium muscarium* a permis de réduire les populations de pucerons d'environ 60 % par rapport au témoin non traité 7 et 13 jours après le traitement. Les produits de biocontrôle restants montrent une efficacité plus faible, pouvant toutefois aller jusqu'à 50 % pour certains, ou aucune efficacité significative.

Les efficacités sont généralement meilleures au stade 2 feuilles qu'au stade 6-8 feuilles des betteraves.

3.1.2. Produits répulsifs

La migration des pucerons depuis la plante infestée est très faible 2 jours après le traitement. Les produits à base de silicates d'aluminium, d'extrait d'ail et d'acide borique semblent avoir un effet répulsif à 7 et 13 jours. Néanmoins, la variabilité dans ces essais est très importante. Des essais méthodologiques seraient nécessaires pour affiner le protocole d'expérimentation et garantir la fiabilité des résultats.

3.1.3. Résultats des essais en micro-parcelles

À la suite des résultats obtenus sous serre, les produits avec une efficacité supérieure ou proche de 50% ont été sélectionnés pour des expérimentations au champ en micro-parcelles :

- la maltodextrine, qui avait montré des résultats prometteurs dans le projet ABCD-B (Thibord, 2024) ;
- *lecanicillium muscarium*, un champignon parasite des pucerons. Il a été testé seul avant 2023 puis en combinaison avec le Teppeki (flonicamide) en 2023, pour prendre le relais de ce dernier en fin de rémanence et quand le développement du champignon est suffisant. Les essais avant 2023 tendaient en effet à montrer une efficacité du champignon deux semaines après son application. Des tests avaient été préalablement réalisés pour vérifier la compatibilité du mélange entre le Teppeki et le *Lecanicillium muscarium* ;
- le produit à base d'extraits d'huiles essentielles qui s'est montré très prometteur sous serre ;
- l'azadirachtine A à deux concentrations ;
- un extrait d'ortie ;
- un acide gras ;
- l'huile essentielle d'orange ;
- l'huile de paraffine ;
- un microorganisme sous numéro ;
- une substance naturelle sous numéro.

Les résultats détaillés sont présentés en figures 1 et 2. Ils prennent en compte les données acquises dans le projet ABCD-B en 2019 et 2020 et les données du PNRI de 2021 à 2023. L'analyse statistique réalisée permet d'évaluer la dynamique des populations de pucerons au cours du temps après le premier traitement, et d'estimer l'efficacité des produits à différents pas de temps. L'effet de l'essai et de l'année a été pris en compte dans l'analyse.

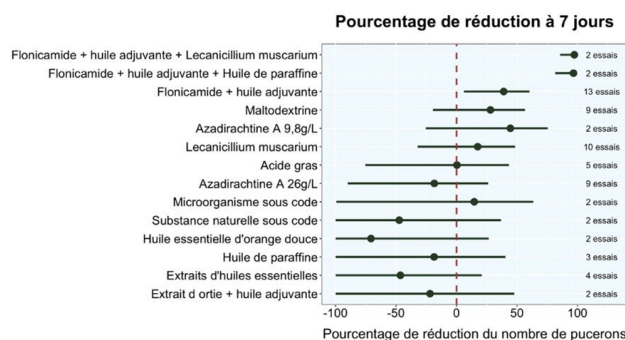


Figure 1 : Efficacité prédite des produits de biocontrôle appliqués deux fois pour réduire l'abondance des pucerons par rapport au témoin non traité, 7 jours après le traitement. Le nombre d'essais inclus dans l'analyse est mentionné à droite de la figure. Lorsque la barre horizontale croise la barre verticale rouge alors l'efficacité du produit est non significative. Ce graphique ne permet pas de comparer les produits testés entre eux.

La figure 1 présente l'efficacité des différents produits testés sur les populations de pucerons verts aptères, 7 jours après le traitement aphicide en parcelle expérimentale. La référence chimique (flonicamide) affiche une efficacité comprise entre 6 et 60 %. Les autres produits ne montrent pas d'efficacité significativement différente du témoin non traité sur les pucerons. Ce résultat peut s'expliquer par le nombre encore trop faible d'essais réalisés car la variabilité (illustrée par la barre d'erreur) est élevée pour la plupart des produits. Les deux combinaisons testées (flonicamide + *Lecanicillium muscarium*, et flonicamide + Huile de paraffine) présentent une efficacité de 96 % et 97 % pour les deux essais réalisés. Ces valeurs élevées d'efficacité semblent intéressantes à valider sur un plus grand nombre d'essais.

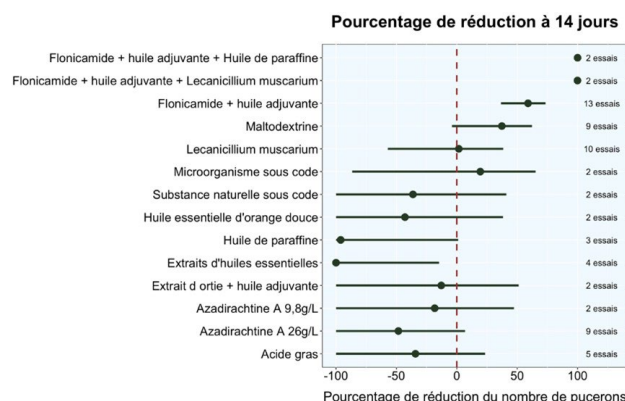


Figure 2 : Efficacité des produits de biocontrôle appliqués deux fois pour réduire l'abondance des pucerons par rapport au témoin non traité, 14 jours après le traitement. Le nombre d'essais inclus dans l'analyse est mentionné à droite de la figure. Lorsque la barre horizontale croise la barre verticale rouge alors l'efficacité du produit est non significative. Ce graphique ne permet pas de comparer les produits testés entre eux.

La figure 2 présente l'efficacité des différents produits testés sur les populations de pucerons verts aptères, 14 jours après le traitement aphicide. A nouveaux les produits de biocontrôle seuls ne montrent pas d'efficacité significativement différente du témoin non traité sur les pucerons. Les combinaisons entre la flonicamide et l'huile de paraffine ou le *Lecanicillium muscarium*, malgré seulement deux essais, ressortent à nouveau avec une très bonne efficacité (100% d'efficacité pour les deux essais et les deux produits).

4. Discussion - Conclusion

Les essais conduits en conditions contrôlées montrent une bonne efficacité des produits de biocontrôle aphicides ou répulsif par rapport au témoin non traité (jusqu'à 80% de réduction du nombre de pucerons 7 jours après pulvérisation et 60% 13 jours après pulvérisation pour *Lecanicillium muscarium*). Les 10 meilleurs produits ont ensuite été testés en conditions proches de celles de la parcelle cultivée. Les efficacités observées au champ sont très inférieures à celles observées en conditions contrôlées sous serre. Une importante variabilité des résultats est observée dans les essais en micro-parcelles selon les sites ou les années. Néanmoins, deux produits de biocontrôle, associé au flonicamide présentent des niveaux élevés de contrôle des populations de pucerons.



Bien que les produits de biocontrôle semblent prometteurs en condition contrôlée, le passage en parcelle modifie de façon importante leur efficacité. Il est nécessaire de mieux comprendre les facteurs de variabilité des résultats observés afin : i) d'amplifier les connaissances sur les produits et les facteurs favorisant leur efficacité et ii) d'optimiser leurs conditions d'applications. Des travaux précédents ont montré que les facteurs environnementaux peuvent influencer l'efficacité des solutions de biocontrôle. En particulier, le champignon *Lecanicillium muscarium* est sensible aux UV (Galvao & Bettiol, 2014) et une hygrométrie élevée est favorable à son développement (Mohammed & Hatcher 2016 ; Kope *et al.*, 2008). Une application en fin d'après-midi pourrait lui permettre de se développer dans des conditions optimales. A l'inverse, la maltodextrine, un polysaccharide, étouffant les pucerons, serait plus efficace dans des conditions sèches, en raison de son mode d'action. Le matériel de pulvérisation peut aussi conditionner l'efficacité des solutions de biocontrôle en augmentant la surface foliaire touchée. Les produits agissant par contact, il y a un enjeu fort de la qualité de la pulvérisation pour atteindre les pucerons cachés dans l'enroulement des feuilles ou les faces inférieures des feuilles (Hauer *et al.* 2017).

Enfin, l'utilisation de techniques de localisation pourrait faire diminuer le coût des produits par 2 ou 3, lorsque les produits sont appliqués à des stades jeunes des betteraves avec une faible couverture foliaire. Les pulvérisateurs proposant des technologies de confinement et de dispersion spécifique du produit (buses à turbulence) permettraient une meilleure application du produit sur les deux faces de la feuille de betterave. C'est dans ces conditions que le coût plus élevé de ces solutions de biocontrôle sera acceptable par l'agriculteur, car leur efficacité reste pour le moment très inférieure à la référence chimique.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Contributions des auteurs

Conception du projet : AM, FM - Expérimentation : AM, AF - Analyse des données : AM, AF - Rédaction du draft : AM, FM - Relecture, finalisation du manuscrit : FM, AF

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des expérimentateurs de l'ITB sur le terrain qui ont mis en place et réalisé les comptages de pucerons.



Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié du soutien financier de France Relance.

Références bibliographiques

- Caddoux L., Micoud A., Barrès B. Résistances des populations de pucerons vert du pêcher (*Myzus persicae*) sur colza en 2014 vis-à-vis des pyrèthrinoides, des néonicotinoïdes et des carbamates. Rapport ANSES, 2014.
- Galvao, J. & Bettiol, W. Effects of UV-B radiation on *Lecanicillium* spp., biological control agents of the coffee leaf rust pathogen. *Tropical Plant Pathology*, 2014, vol. 39, p. 392-400.
- Jactel H., Barrès B., Bonafos R., Desneux N., Escobar-Gutiérrez A., et al. Efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave. [0] Saisine n° 2020-SA-0102, Anses. 2021, 137 p.
- Hauer, M., A. L. Hansen, B. Manderyck, A. Olsson, E. Raaijmakers, B. Hanse, N. Stockfisch and B. Marlander (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.
- Hossain, Roxana, Wulf Menzel, Celin Lachmann, et Mark Varrelmann. 2020. « 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*, novembre, ppa.13306. <https://doi.org/10.1111/ppa.13306>.
- Kope, H. H., Alfaro, R. I., et Lavallée, R. Effects of temperature and water activity on *Lecanicillium* spp. conidia germination and growth, and mycosis of *Pissodes* strobil. *BioControl*, 2008, vol. 53, p. 489-500.
- Laurent A., Favrot A., Maupas F., Royer C., Makowski D. Assessment of non-neonicotinoid treatments against aphids on sugar beets. *Crop Protection*, 2023, 164, (10.1016/j.cropro.2022.106140). (hal-03843130).
- Mohammed, A.A. & Hatcher, P. E. Effect of temperature, relative humidity and aphid developmental stage on the efficacy of the mycoinsecticide Mycotol® against *Myzus persicae*. *Biocontrol Science and Technology*, 2016, vol. 26, no 10, p. 1379-1400.
- Smith H & Hallsworth P. The effects of yellowing viruses on yield of sugar beet in field trials, 1985 and 1987. *Annals of Applied Biology*, 2008, vol 116, p. 503-511. 10.1111/j.1744-7348.1990.tb06633.x.
- Stevens, Mark, Philippa B Hallsworth, et Helen G Smith. 2004. « The Effects of Beet Mild Yellowing Virus and Beet Chlorosis Virus on the Yield of UK Field-Grown Sugar Beet in 1997,1999 and 2000 ». *Annals of Applied Biology* 144 (1): 113-19. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00323.x>.
- Thibord J-B. et al. Protection of straw cereals, sugar beet and oilseed rape against aphid-borne viruses using varietal and biocontrol solutions. *Innovations Agronomiques*, 2024, 89, pp.89-103. (10.17180/ciag-2024-vol89-art08-GB). (hal-04563957)
- Williams, I.S., Haylock, L.A., Dewar, A.M. & Dixon, A.F.G. Selection for a moderately insecticide resistant clone of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on sugar beet in the absence of pesticides. *Bulletin of Entomological Research*, 1998, 88, 653-658.

Pour citer cet article : Amélie Monteiro, Audrey Fabarez, Fabienne Maupas. Solutions de biocontrôle contre *Myzus persicae*. *Innovations Agronomiques*, 2025, 103, pp.45-52. [10.17180/ciag-2025-vol103-art05](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art05)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



Alternative aux néonicotinoïdes en betteraves sucrières : Synthèse de 4 années d'expérimentation

Audrey FABAREZ¹, Paul TAUVEL¹, Ophélie BOLINGUE², Quentin TILLOY³, Damien ANDRIEU⁴, Fabienne MAUPAS¹

¹ Institut Technique de la Betterave (ITB), 75008 Paris, France

² Saint Louis Sucre, 27150 Etrépigny, France

³ Cristal Union, 51110 Bazancourt, France

⁴ Tereos, 62175 Boiry-Sainte-Rictrude, France

Correspondance : a.fabarez@itbfr.org

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art06>

Résumé

Le Programme National de Recherche et d'Innovation (PNRI) vise à identifier des solutions opérationnelles pour gérer la jaunisse de la betterave sucrière. Depuis 2021, plusieurs essais ont été mis en place afin d'évaluer l'intérêt de plusieurs leviers de lutte : plantes de service, médiateurs chimiques, et lâchers d'auxiliaires principalement. Un modèle statistique a permis d'estimer l'efficacité des leviers sur les pucerons lorsqu'ils sont utilisés seuls ou en combinaison avec un traitement aphicide. Les plantes compagnes permettent de réduire les populations de pucerons et les symptômes de jaunisse sur betterave, mais la perte de rendement liée à la concurrence doit être maîtrisée. L'efficacité des médiateurs chimiques et des lâchers d'auxiliaires sur les pucerons est encore en cours d'évaluation.

Mots-clés : Jaunisse, Betterave sucrière, *Myzus persicae*, Leviers, PNRI.

Abstract: Alternative to neonicotinoids in sugar beets: Summary of 4 years of experimentation

The National Research and Innovation Program (PNRI) aims to identify practical solutions for managing yellowing disease in sugar beets. Since 2021, several trials have been conducted to evaluate the effectiveness of different control strategies, mainly including companion plants, chemical mediators, and the release of beneficial insects. A statistical model was used to estimate the effectiveness of these strategies on aphid populations, whether applied alone or in combination with aphicide treatments. Companion plants help reduce aphid populations and yellowing symptoms in sugar beets, but yield loss due to competition must be controlled. The effectiveness of chemical mediators and beneficial insect releases on aphids is still under evaluation.

Keywords: Beet yellows, Sugar beet, *Myzus persicae*, Control strategies, PNRI.

1. Introduction

1.1. Contexte et enjeu autour de la betterave sucrière : déploiement du PNRI

Depuis septembre 2018, l'interdiction des néonicotinoïdes (NNI) en traitements de semences a placé un certain nombre de filières en difficulté pour la gestion des insectes ravageurs. En 2020, la filière de la betterave sucrière a vu ses rendements chuter en partie à cause de la jaunisse, une maladie virale dont le vecteur principal est le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* (Audran, 2020). Ce puceron peut transmettre plusieurs virus responsables de la jaunisse : le Beet Chlorosis Virus (BChV, polérovirus), le



Beet Mild Yellowing Virus (BMV, polérovirus), le Beet Yellows Virus (BYV, clostérovirus) et le Beet Mosaic Virus (BtMV, potyvirus) (Hossain et al., 2021). En réponse à cette situation, un Plan National de Recherche et d'Innovation (PNRI) a été déployé en 2021 pour identifier des solutions opérationnelles pour gérer durablement la jaunisse.

Les alternatives chimiques aux NNI employées à ce jour sont des traitements aphicides en végétation (Teppeki® à base de flonicamide et Movento® à base de spirotétramate, ce dernier étant soumis à une demande de dérogation chaque année). Toutefois, ces traitements n'ont pas permis de contrôler suffisamment les populations de pucerons sur l'ensemble du territoire betteravier en 2020. De plus, ces substances actives ne constituent pas non plus des solutions durables : risque d'apparition de résistance, arrêt de commercialisation pour le produit à base de spirotétramate, etc. Des solutions alternatives sont donc testées dans le cadre du PNRI.

1.2. Les Fermes Pilotes d'Expérimentation (FPE) : une expérimentation à grande échelle

Le réseau des Fermes Pilotes d'Expérimentation est un réseau de parcelles d'agriculteurs réparties dans toutes les régions betteravières visant à évaluer l'efficacité des solutions testées dans le PNRI dans des conditions réelles de production (Figure 1).

Ce réseau a été lancé en 2021 et est coordonné par plusieurs organismes : l'Institut Technique de la Betterave (ITB), les Services Agronomiques de Sucreries (SAS), et les lycées agricoles impliqués dans le projet.

1.3. Les principaux leviers testés contre la jaunisse de la betterave

Quatre leviers principaux sont testés sur le réseau des FPE pour lutter contre la jaunisse de la betterave.

- (1) **Les plantes de service** sont des espèces cultivées avec la betterave sucrière, généralement au début du cycle de la betterave pour limiter les contaminations précoces de pucerons *Myzus persicae*, qui sont les plus préjudiciables pour le rendement. Le mode d'action de ces espèces n'a pas été clairement identifié, mais plusieurs hypothèses sont envisagées. Elles pourraient avoir un effet de camouflage qui diminuerait le contraste avec le sol et perturberait la colonisation par les pucerons, émettre des substances odorantes répulsives, ou favoriser la présence d'auxiliaires en créant un habitat plus diversifié que la culture seule ;
- (2) **Les allomones**, aussi appelées Composés Organiques Volatiles (COV), qui ont un effet répulsif sur la colonisation, perturbent le comportement alimentaire et les capacités de reproduction des pucerons. Des tests au laboratoire ont permis d'identifier plusieurs mélanges de COV qui permettraient de limiter la colonisation du puceron *Myzus persicae* dans les parcelles de betteraves. Ils permettraient de brouiller les informations perçues par le puceron dans l'environnement olfactif et de rendre les plantes hôtes moins détectables ;
- (3) **Une phéromone** est une molécule chimique produite par un organisme, qui induit des réactions comportementales chez les individus de la même espèce. L'utilisation de phéromones pour réduire les populations d'insectes ravageurs a fait ses preuves dans d'autres cultures, notamment sur des lépidoptères en verger avec la confusion sexuelle. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée au puceron *Myzus persicae* en raison de son mode de reproduction par parthénogénèse (reproduction asexuée). Un autre type de phéromone émis par le puceron dans des situations de danger a donc été identifié. En augmentant artificiellement son niveau d'émission, elle pourrait permettre d'attirer les auxiliaires et donc de réduire les populations de pucerons dans une parcelle ;



- (4) Les **lâchers d'auxiliaires** ont pour objectif d'augmenter artificiellement les populations d'insectes prédateurs et parasitoïdes de pucerons dans une parcelle. En effet, leur rôle pour nettoyer les parcelles des pucerons est incontestable mais ils arrivent toujours après les pucerons, ce qui ne permet pas de contrôler la transmission virale. Un enrichissement de la parcelle en auxiliaires est donc évalué, avec un choix d'espèces naturellement présentes dans les parcelles de betterave. Deux espèces de chrysopes *Chrysoperla carnea* et *Chrysoperla lucasina* sont lâchées au stade œuf et/ou au stade larvaire.

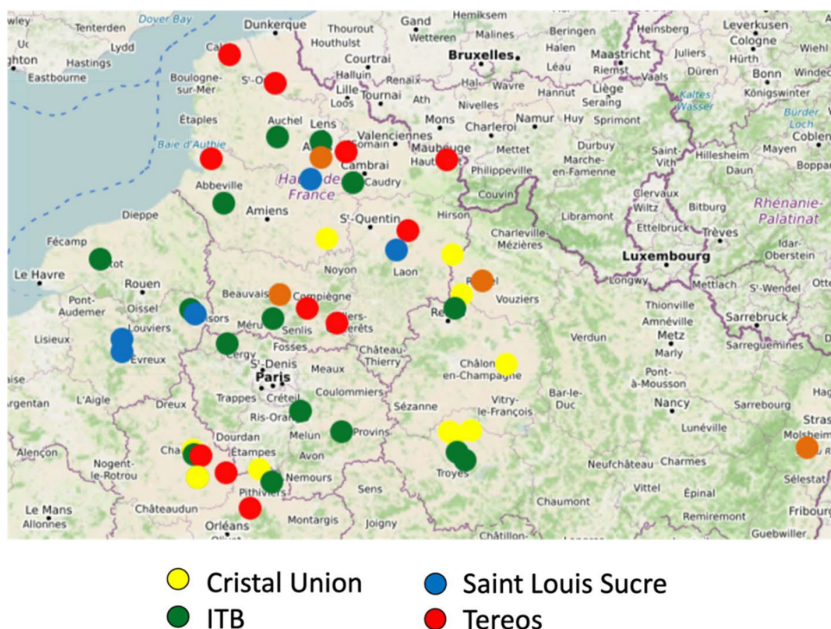


Figure 1 : Cartographie du réseau des Fermes Pilotes d'Expérimentation (FPE).

1.4. Objectif

L'objectif de cet article est de faire la synthèse des essais conduits avec les leviers susmentionnés depuis quatre années dans le réseau de fermes pilotes d'expérimentation, pour identifier des solutions de lutte contre la jaunisse de la betterave sucrière. Les résultats sur les pucerons *Myzus persicae* et sur les symptômes de jaunisse des quatre principaux leviers testés seront donnés. Un focus sur l'impact des plantes de service sur le rendement betteravier sera également illustré. Certaines combinaisons de leviers ont été construites pour obtenir une efficacité supérieure à celle de la stratégie de protection habituelle basée sur l'utilisation d'aphicides.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Conduites et dispositifs expérimentaux

2.1.1. Plantes de service

Plusieurs types d'essais incluant des plantes de service ont été conduits dans les FPE de 2021 à 2024 :

- des essais avec des **plantes compagnes** en microparcelles, pour préciser l'itinéraire technique permettant de limiter la concurrence exercée par les plantes compagnes sur les betteraves avec différentes modalités portant sur les espèces implantées, la densité de semis et le stade des betteraves à la destruction des plantes compagnes (Annexe 1a) ;

- des essais avec des **plantes compagnes**, principalement de l'avoine rude et de l'orge de printemps, semées en bandes, pour évaluer leur effet sur les pucerons et la jaunisse en conditions d'expérimentation en parcelles d'agriculteurs. D'autres espèces (féverole, vesce...) ont été testées. Ces essais déployés à grande échelle permettent de déterminer l'efficacité des différentes espèces, et d'évaluer l'impact de la concurrence sur le rendement betteravier (Annexe 1b) ;
- des essais avec un **semis sous couvert vivant ou mulch**, pour évaluer leur effet sur les pucerons et la jaunisse en conditions d'expérimentation en parcelles d'agriculteurs (Annexe 1c et d).

Le dispositif communément mis en place est un dispositif en bandes de betteraves avec et sans plante compagne (Figure 3). Ce dispositif non randomisé a été choisi pour travailler sur des surfaces significatives et pour simplifier l'implantation des plantes compagnes par l'agriculteur. Cette lacune dans le dispositif est compensée par un nombre important d'essais mis en place.

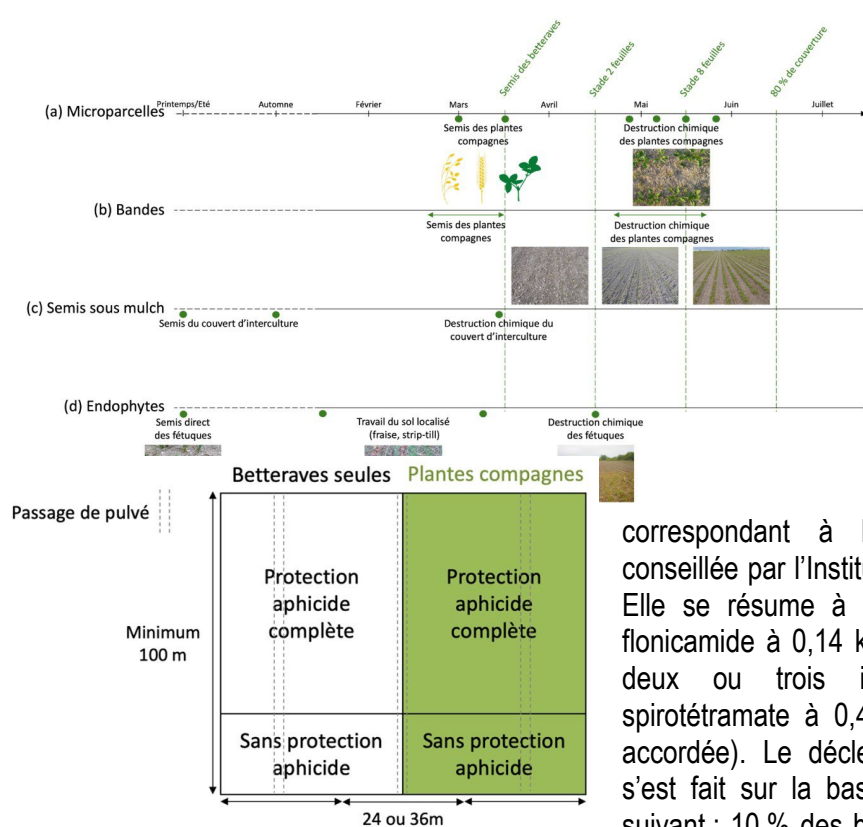


Figure 2 : Schéma des différents itinéraires techniques impliquant des plantes de service, testés sur le réseau des Fermes Pilotes d'Expérimentation du PNRI.

Sur la plupart des essais, le dispositif a été dédoublé pour évaluer l'intérêt des plantes compagnes dans une stratégie de protection aphicide dite complète,

correspondant à la conduite de protection conseillée par l'Institut Technique de la Betterave. Elle se résume à une intervention à base de flonicamide à 0,14 kg/ha, suivie au maximum de deux ou trois interventions à base de spirotétramate à 0,45 L/ha (selon la dérogation accordée). Le déclenchement des interventions s'est fait sur la base du dépassement du seuil suivant : 10 % des betteraves colonisées par des

pucerons verts aptères.

Figure 3 : Dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité des plantes compagnes en combinaison ou non avec une protection aphicide complète.

Plusieurs combinaisons de leviers incluant des plantes compagnes ont été testés dans les FPE pour tenter d'augmenter la protection *vis-à-vis* de la jaunisse et limiter le nombre d'aphicides utilisés tout en maintenant des coûts acceptables. Ainsi, elles ont été croisées avec le champignon entomopathogène *Lecanicillium muscarium* et avec des larves de chrysopes, sous l'hypothèse que les plantes compagnes permettraient de créer un micro-habitat plus favorable au développement du champignon et des auxiliaires.



2.1.2. Médiateurs chimiques : allomones

Les allomones proposées sous forme de granulés par l'entreprise AgriOdor ont été testées dans les FPE en 2023 et 2024 à la suite des travaux conduits dans un projet dédié au sein du PNRI. Ils ont été épandus à une dose de 4 kg/ha avant l'arrivée des premiers vols de pucerons dans la parcelle, soit au stade 2 feuilles naissantes des betteraves au plus tard.

Deux types de dispositifs ont été mis en place selon le risque de jaunisse présumé dans les secteurs géographiques où les essais ont été mis en place.

Pour faciliter la réalisation des traitements aphicide par l'agriculteur, le dispositif utilisé a été pseudo-randomisé. Ainsi, les modalités correspondant aux différents traitements aphicides ne sont pas randomisées mais celles correspondant aux différents traitements AgriOdor le sont (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Dans les secteurs où le risque jaunisse est jugé élevé, les granulés AgriOdor ont été testés en combinaison avec une protection aphicide complète (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.A**) pour voir l'intérêt supplémentaire du levier testé.

Dans les secteurs où le risque jaunisse est jugé modéré à faible, les granulés AgriOdor ont été testés en combinaison avec une protection aphicide incluant l'impasse du premier traitement (T1), pour évaluer l'effet du levier seul en début de cycle de contamination et la pertinence d'une telle stratégie (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.B**).

Des zones tampons d'environ 50 m ont été positionnées entre chaque modalité pour limiter les interférences entre les différentes unités expérimentales.

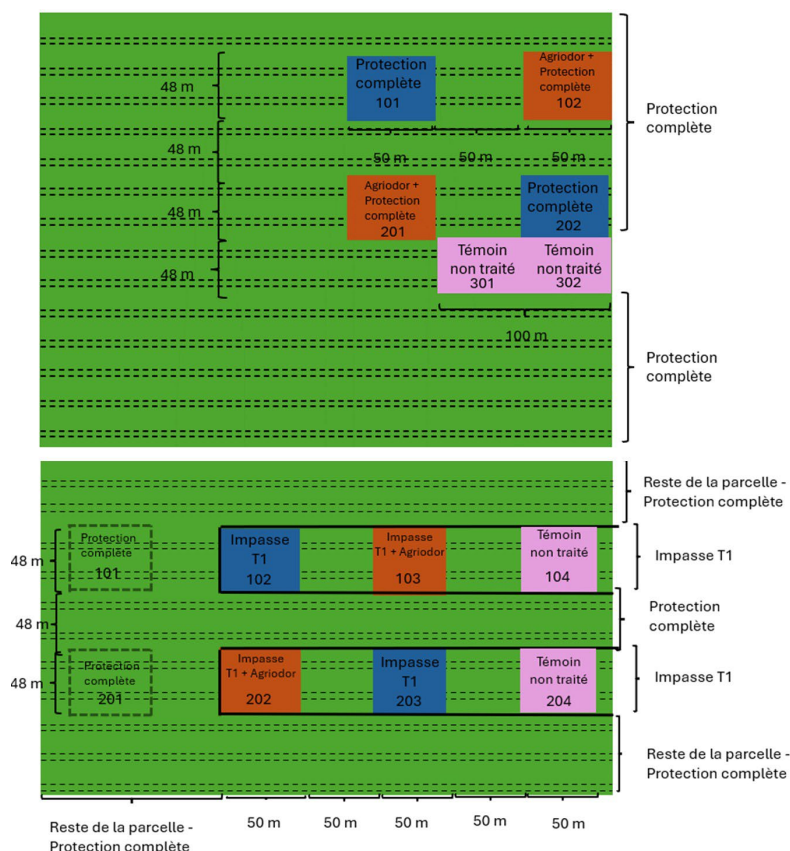


Figure 4 : Dispositifs expérimentaux mobilisés pour évaluer l'efficacité des allomones en combinaison ou non à une protection aphicide complète ou avec une impasse du premier traitement.

2.1.3. Médiateurs chimiques : phéromones

La phéromone a été testée dans les FPE en 2023 et 2024 à la suite des travaux conduits dans un projet dédié au sein du PNRI. La formulation liquide proposée par l'entreprise M2i a été épandue à une dose de 0,5 L/ha, seule et en combinaison avec de l'huile de paraffine à une dose de 15 L/ha, à l'arrivée des premiers pucerons dans la parcelle.

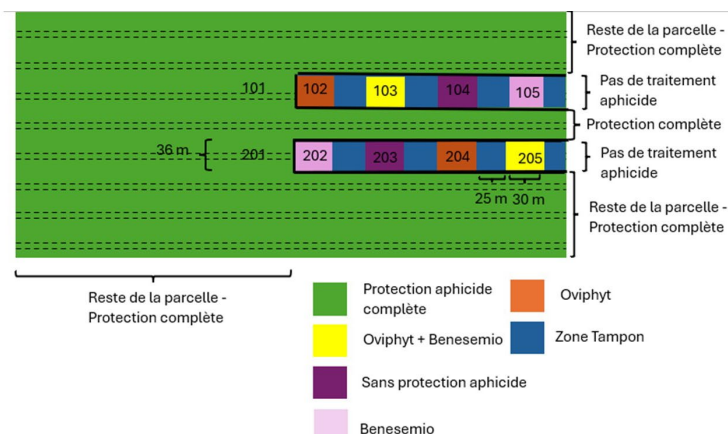


Figure 5 : Dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité des phéromones en combinaison ou non avec de l'huile de paraffine.

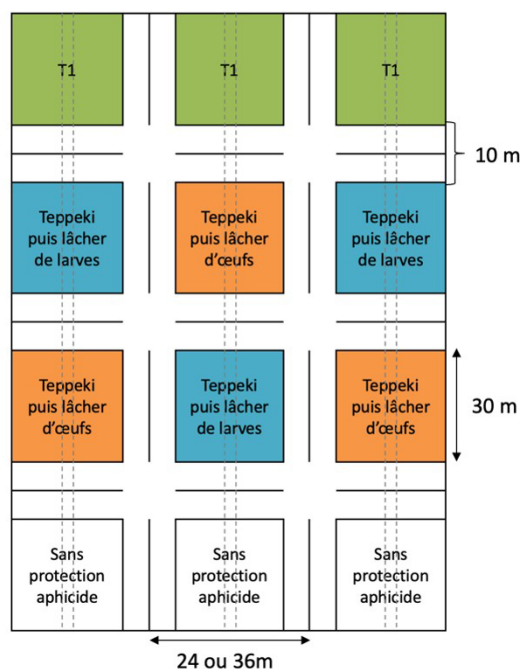
Le dispositif est en blocs complets randomisés avec deux répétitions (

Figure 5). Des zones tampons d'environ 50 m ont été positionnées entre chaque modalité pour limiter les interférences entre les différentes unités expérimentales.

2.1.4. Lâchers d'auxiliaires

Les lâchers d'auxiliaires ont été testés dans les FPE de 2022 à 2024. Deux espèces et deux stades de chrysopes ont été testés : *Chrysoperla lucasina* au stade œufs à une dose de 40 œufs par m² et *Chrysoperla carnea* au stade larvaire à une dose de 4 larves par m².

En 2022, un dispositif très simplifié a été mis en place pour faire la preuve de concept du levier sur pucerons et jaunisse. Il s'agissait d'une zone de 50x50m avec un lâcher d'œufs de chrysopes comparée à une zone de 50x50m sans lâcher de chrysopes. Les résultats encourageants obtenus ont ensuite fait évoluer le dispositif vers un design scientifiquement plus rigoureux. Les premiers résultats ont également fait évoluer la stratégie de protection avec l'inclusion d'un premier traitement aphicide avant le lâcher pour se positionner dans des conditions météorologiques favorables aux auxiliaires.



Pour faciliter la réalisation des traitements aphicides par l'agriculteur, le dispositif utilisé a été pseudo-randomisé. Ainsi, les modalités correspondant aux différents traitements aphicides ne sont pas randomisées mais celles correspondant aux différentes applications de chrysopes le sont (Figure 6).

Figure 6 : Dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité des lâchers de chrysopes.



2.2. Observations

2.2.1. Populations de pucerons

Dans chaque unité expérimentale (= parcelle unitaire définie par un nombre sur les plans détaillés ci-dessus), les pucerons verts (*Myzus persicae*), noirs (*Aphis fabae*), aptères et ailés sont comptés sur 2 rangs x 5 betteraves. Les comptages débutent à l'observation du premier puceron vert dans la parcelle, puis tous les 15 jours, et jusqu'au dernier traitement aphicide. Les observations sont réalisées au centre de chaque unité expérimentale, à au moins 20 m des bords de l'essai.

2.2.2. Symptômes de jaunisse

Avant la récolte, les symptômes de jaunisse sont mesurés selon une échelle de notation de gravité visuelle, complétée par une photographie par drone en cas de difficulté : 0 – 0 % de la surface touchée ; 1 – 1 à 10 % de la surface touchée ; 2 - environ 20 % de la surface touchée ; ... ; 10 – 100 % de la surface touchée. A chaque date d'observation, une note de gravité jaunisse est donnée pour chaque traitement.

2.2.3. Impact sur le rendement

Pour évaluer l'impact des plantes compagnes sur le rendement betteravier, des prélèvements de betteraves, ne présentant pas de symptômes de jaunisse visibles, ont été réalisés dans des zones avec et sans plante compagne, pour chaque espèce de plante compagne testée. Un prélèvement correspond à 4 rangs de betteraves sur 4 m, et 3 à 4 prélèvements (répétitions) espacés de 20 m ont été réalisés dans les deux zones ciblées. La rendement racine (t/ha) et la richesse en sucre (%) ont ensuite été mesurées.

2.3. Analyse des données

2.3.1. Efficacité sur les pucerons verts aptères

Pour estimer précisément l'efficacité des leviers, un modèle statistique linéaire a été ajusté aux données en tenant compte de la variabilité des effets des traitements entre les sites-années et de l'évolution temporelle du nombre de pucerons verts. Le modèle est basé sur celui utilisé par Laurent *et al.* (2023), pour évaluer l'efficacité de produits phytosanitaires contre les pucerons. Il a été adapté afin de pouvoir évaluer l'effet des plantes compagnes, et les résultats de 36 essais factoriels évaluant l'efficacité du Teppeki® (méthode et résultats présentés dans Laurent *et al.*, 2023) ont été ajoutés pour enrichir la base de données. Le modèle statistique estime l'efficacité de chaque traitement (plante compagne et/ou aphicide), l'individu statistique correspond aux unités expérimentales et l'essai a été considéré en effet aléatoire.

2.3.2. Efficacité sur les symptômes de jaunisse

L'efficacité des plantes compagnes sur les symptômes de jaunisse a été calculée pour chaque essai individuellement, et un graphique en boîte à moustache a été réalisé pour synthétiser l'ensemble des essais. L'efficacité est exprimée en pourcentage et correspond à la différence relative de l'intensité des symptômes observés dans les betteraves avec traitement (note_jaun_traitement) par rapport aux betteraves témoin (note_jaun_témoin) :

Efficacité (%) = $(1 - (\text{note_jaun_traitement} / \text{note_jaun_témoin})) \times 100$.

2.3.3. Impact de la compétition sur le rendement des betteraves

La perte de rendement due aux plantes compagnes a été calculée pour chaque essai individuellement, et un graphique en boîte à moustache a été réalisé pour synthétiser l'ensemble des essais. La perte de rendement est exprimée en pourcentage et correspond à la différence relative de rendement entre les



betteraves avec des plantes compagnes (rend_PC) par rapport aux betteraves sans plante compagne (rend_témoin), soit : $\text{Perte (\%)} = (1 - (\text{rend_PC} / \text{rend_témoin})) \times 100$.

Cette perte de rendement a été calculée pour différentes périodes de destruction des plantes compagnes, pour déterminer celle à privilégier.

3. Résultats

3.1. Efficacité des leviers et des combinaisons sur les pucerons verts aptères

L'analyse statistique réalisée permet d'évaluer la dynamique des populations de pucerons au cours du temps après le premier traitement aphicide, et d'estimer l'efficacité de ces leviers à différents pas de temps (Figure 7).

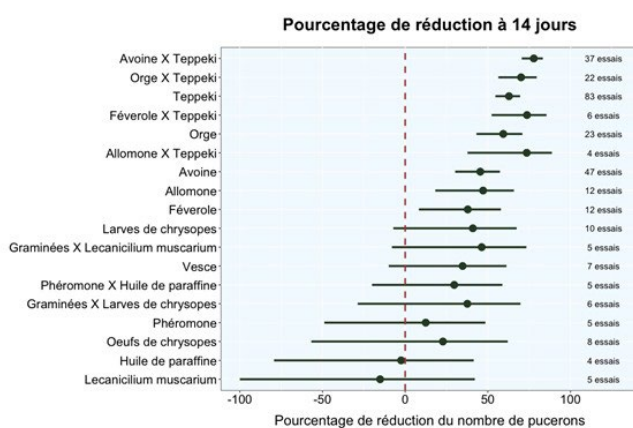


Figure 7 : Efficacité des leviers testés dans le PNRI entre 2021 et 2024 pour réduire l'abondance des pucerons par rapport au témoin non traité, 14 jours après le traitement. Le nombre d'essais inclus dans l'analyse est mentionné à droite de la figure. Lorsque la barre horizontale croise la barre verticale rouge alors l'efficacité du levier est non significative. Ce graphique ne permet pas de comparer les leviers testés entre eux.

Le graphique ci-dessus présente l'efficacité des différents leviers testés sur les populations de pucerons verts aptères, 14 jours après le traitement aphicide. La référence chimique (Teppeki) affiche une efficacité comprise entre 60 et 70 %. Peu de leviers et de combinaisons montrent un effet significatif sur les pucerons. Ce résultat global peut s'expliquer par le faible nombre d'essais réalisés, des conditions d'application non optimisées dans certains essais ou une inefficacité du levier dans les conditions de son usage.

Les graminées en plante compagne permettent une réduction des populations de pucerons verts *Myzus persicae* comprise entre 35 et 60 % pour l'avoine rude et 46 et 73 % pour l'orge de printemps. Ces chiffres ont été obtenus grâce à des essais conduits entre 2021 et 2024 sans protection aphicide pour déterminer l'efficacité du levier seul.

3.2. Efficacité des leviers sur les symptômes de jaunisse

Peu de symptômes de jaunisse ont été observés en 2023 et 2024, mais les observations conduites les années précédentes ont permis de montrer que les graminées (avoine rude et orge de printemps cumulées) en plantes compagnes permettent une réduction des symptômes d'autant plus importante que l'intensité de la maladie dans la parcelle est élevée (Figure 8). En effet, lorsque la sévérité de la jaunisse est inférieure à 2 (soit inférieure à 20 %), la baisse des symptômes liée à la présence des graminées est de 26 % avec une forte variabilité dans les résultats obtenus. Lorsque la sévérité est supérieure ou égale à 2, l'efficacité moyenne est de 44 %, avec trois quarts des situations pour lesquelles l'efficacité est supérieure à 25 %.

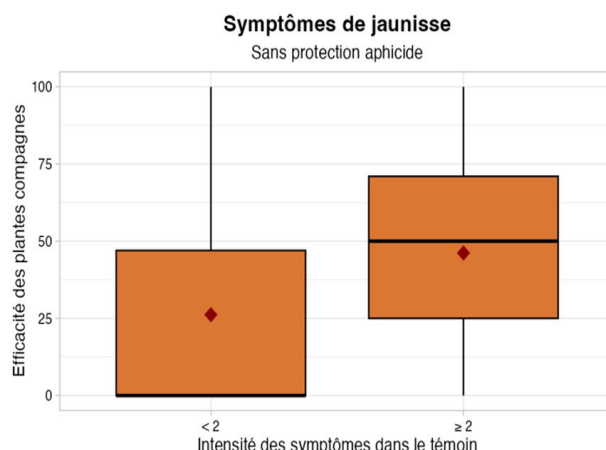
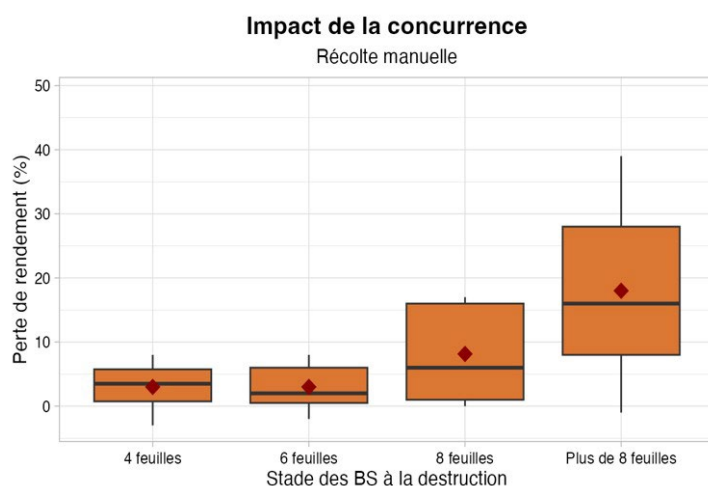


Figure 8 : Efficacité des graminées en plantes compagnes sur les symptômes de jaunisse en fonction de l'intensité des symptômes dans le témoin non traité de l'essai.

Dans les essais testant les médiateurs chimiques et les lâchers d'auxiliaires, les symptômes de jaunisse n'ont pas été suffisamment importants sur un nombre d'essais conséquents pour conduire une analyse des effets sur jaunisse représentative. Ces résultats ne seront donc pas présentés, mais quelques essais avec des différences de symptômes ont encouragé la poursuite des travaux sur ces leviers.

3.3. Impact de la concurrence exercée par les plantes compagnes sur le rendement betteravier

Les plantes compagnes sont présentes en début de cycle de la betterave sucrière, et peuvent concurrencer les betteraves pour les ressources du sol si elles sont maintenues trop longtemps. La concurrence est d'autant plus importante que la destruction des plantes compagnes a été réalisée tardivement (Figure 9). En effet, si une graminée est détruite au-delà du stade 8 feuilles des betteraves, la perte de rendement moyenne est de 18 %.



Une destruction plus précoce permet de réduire l'impact sur le rendement des betteraves, avec une perte de 3 % pour une destruction au stade 4 ou 6 feuilles des betteraves. Les conditions de l'année peuvent également impacter le stade de destruction choisi. Une année sèche favoriserait davantage la concurrence et une destruction au stade 4 feuilles maximum serait à privilégier.

Figure 9 : Impact des graminées en plantes compagnes sur le rendement betteravier selon le stade des betteraves à la destruction de la plante compagne.

4. Discussion

4.1. Plantes de service

Dans les situations sans protection aphicide, les résultats montrent une réduction intéressante des populations de pucerons verts aptères et des symptômes de jaunisse sur betterave en présence



d'avoine rude et d'orge de printemps en plantes compagnes. La protection aphicide a montré une efficacité intéressante à 14 jours après l'application. Lorsqu'elle est combinée à l'avoine rude, l'effet additif de la plante compagne est marginal par rapport au traitement aphicide. Les plantes compagnes pourraient permettre une réduction du nombre de traitements aphicides. C'est une piste qui est actuellement explorée dans les essais grâce à des dispositifs croisant des plantes compagnes avec un programme aphicide incluant une impasse sur le premier traitement, ou avec d'autres leviers. Mais le nombre d'essais est encore trop faible pour en tirer des conclusions solides.

4.2. Allomones

Dans les situations sans protection aphicide, les résultats montrent une réduction intéressante des populations de pucerons verts aptères sur betterave, 14 jours après une application des granulés AgriOdor. Néanmoins, les conditions d'évaluation du levier n'étaient pas optimales en raison d'une faible pression en pucerons en 2023 et 2024. La poursuite des travaux sur ce levier nécessitera de pouvoir l'évaluer dans des conditions où la pression en pucerons et jaunisse est plus importante pour juger de son intérêt dans ces situations. Des essais combinant ce levier à une protection aphicide complète permettront de connaître l'intérêt du levier dans des situations où le risque jaunisse est le plus important.

4.3. Pheromones et lâchers d'auxiliaires

Trop peu d'essais ont été conduits sur ces leviers pour juger de leur efficacité. Comme précédemment, il s'agira dans les travaux à venir de poursuivre la mise en place d'essais dans des conditions d'expérimentation où la pression en pucerons et jaunisse est suffisante pour juger de leur efficacité. Pour le médiateur chimique, un suivi des auxiliaires, et en particulier des coccinelles, sera réalisé pour évaluer l'effet du produit sur la régulation biologique.

5. Conclusion

Les solutions alternatives identifiées montrent une efficacité plus faible que celle des produits aphicides communément utilisés par les betteraviers. Pour certaines, la preuve de concept reste à faire puisque les populations de pucerons observées dans le réseau d'essais ont été globalement faibles lors des campagnes 2023 et 2024.

Le PNRI a été lancé avec l'ambition de renforcer l'efficacité des stratégies de protection, jugée largement insuffisante lors de la campagne 2020 au niveau national, et insuffisante également dans un secteur du Centre – Val de Loire lors des campagnes 2021 à 2024.

L'intégration de ces solutions alternatives dans des stratégies de protection doit donc se raisonner en considérant des combinaisons de leviers techniquement et économiquement viables pour renforcer l'efficacité des stratégies, mais également pour réduire la dépendance des agriculteurs à ces solutions aphicides. Construire et évaluer ces stratégies constitue un des objectifs principaux du PNRI-Consolidé, un programme analogue au PNRI qui s'étale sur trois années d'expérimentation supplémentaires, et dont les premiers résultats issus du réseau de FPE 2024 ont été donnés dans cet article.

Ce programme permettra de statuer sur l'intérêt ou non des solutions pour lesquelles la preuve de concept n'a pas pu être faite. Des produits de biocontrôle sont également évalués dans d'autres projets que le réseau de FPE (projet Biocontrôle-C).

Plus largement, le levier variétal est travaillé sous un angle original dans un autre projet (AGIR - financement ANR Ecophyto Maturation) pour tenter d'identifier des variétés moins appétentes pour les pucerons. Leur intérêt sera également évalué en combinaison avec des plantes compagnes. Ces résultats viendront compléter les solutions de lutte existantes ou potentielles.



Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié du soutien financier de France Relance.

Références bibliographiques

Audran X., 2020. France's Sugar Beet Crop Devastated by Disease—Sugar Industry's Viability Threatened, USDA,

<https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=France%27s%20Sugar%20Beet%20Crop%20Devastated%20by%20Disease%20-%20Sugar%20Industry%27s%20Viability%20Threatened> Paris France 08-11-2020

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. <https://doi.org/10.1111/ppa.13306>

Lai R., You M., Lotz L. A. P. (Bert), Vasseur L., 2011. Response of Green Peach Aphids and Other Arthropods to Garlic Intercropped with Tobacco. *Agronomy Journal*, 103, 856-863. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0404>

Laurent A., Favrot A., Maupas F., Royer C., Makowski D., 2023. Assessment of non-neonicotinoid treatments against aphids on sugar beets. *Crop Protection*, 164, 106140. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106140>

Pour citer cet article : Audrey Fabarez, Paul Tauvel, Ophélie Bolingue, Quentin Tilloy, Damien Andrieu, *et al.*. Alternative aux néonicotinoïdes en betteraves sucrières : Synthèse de 4 années d'expérimentation. *Innovations agronomiques*, 2025, 103, pp.53-63. [10.17180/ciag-2025-vol103-art06](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art06)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.

Construire collectivement des alternatives aux néonicotinoïdes pour la betterave sucrière

Louis BOURDIN¹, Marie-Hélène JEUFFROY¹, Blandine RENAULT¹, Rémy BALLOT¹, Olivier RECHAUCHERE¹, Jean-Marc MEYNARD²

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie, 91120 Palaiseau, France

² Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR SADAPT, 91120 Palaiseau, France

Correspondance : marie-helene.jeuftroy@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art07>

Résumé

Face à l'interdiction des néonicotinoïdes, nous avons conduit une étude agronomique visant à identifier les causes agronomiques (et les pratiques explicatives) responsables des variations d'infestations en pucerons et de gravité de la jaunisse au champ, et à concevoir collectivement des scénarios de gestion de la maladie. En nous appuyant sur des observations d'agriculteurs et de conseillers, sur des données et sur la littérature, nous montrons que le risque jaunisse dépend de 3 facteurs agronomiques majeurs : la distance entre la parcelle de betterave sucrière et les betteraves porte-graines les plus proches ; la concentration de betteraves dans l'environnement de la parcelle ; le stade des betteraves sucrières au moment de l'arrivée des pucerons, fonction de la date de semis et du climat du printemps. Sur la base de ces connaissances et de celles produites dans l'ensemble des projets du Plan National de Recherche et Innovation (PNRI), nous avons conçu collectivement 10 scénarios de gestion de la maladie, certains étant en cours de test.

Mots-clés : traque aux innovations en ferme, diagnostic, atelier de conception, système de culture, betterave porte-graine.

Abstract: Collective design of agronomic practices without neonicotinoids for sugar beet crops

Facing the ban on neonicotinoids, we conducted an agronomic study aimed at identifying the agronomic causes (and explanatory practices) responsible for variations in aphid infestations and severity of yellow disease in the field, and at collectively designing disease management scenarios. Based on farmer and advisor observations, data and literature, we show that the risk of yellow disease depends on 3 major agronomic factors: the distance between the sugar beet plot and the nearest seed beet fields; the concentration of beets in the plot environment; and the stage of the sugar beets at the time of aphid arrival, a function of sowing date and spring climate. On the basis of this knowledge and that produced in all the PNRI projects, we have collectively designed 10 disease management scenarios, some of which are currently being tested.

Keywords: on-farm innovation tracking, diagnosis, design workshop, cropping system, seed beet.

1. Introduction

En 2018, l'usage des néonicotinoïdes en agriculture a été interdit en France. Auparavant, le recours à ces insecticides était quasiment généralisé (hors systèmes en Agriculture Biologique) en traitement de semences de la betterave, pour contrôler les pucerons vecteurs de la jaunisse. Face à l'absence de solutions alternatives connues, nous avons proposé une démarche visant à concevoir et développer des solutions agronomiques reposant sur une combinaison systémique de leviers techniques adaptés à la diversité des situations de production (Meynard *et al.*, 2003 ; Duru *et al.*, 2015 ; Aulagnier & Goulet,



2017). Face au déficit de connaissances disponibles, au début du projet, sur le comportement des pucerons, le développement de la jaunisse, et l'effet de pratiques agronomiques sur ces variables, nous avons privilégié une approche associant agronomie système et conception innovante, valorisant les savoirs des agriculteurs. Ainsi, nous avons cherché à identifier en situations réelles, des pratiques agronomiques ou des états de l'agro-écosystème associés à de faibles infestations, y compris les années à forte pression (2020) ou, au contraire, associés à de fortes infestations, y compris les années à faible pression. Enfin, en mobilisant les connaissances produites sur ces deux axes, ainsi que celles produites dans les autres projets soutenus par le *Plan National de Recherche et Innovation* (PNRI), nous avons mobilisé les principes de la conception innovante (Hatchuel & Weil, 2002) pour construire collectivement des solutions systémiques susceptibles de réduire les pertes sur les cultures.

Notre étude visait donc à (i) identifier les causes agronomiques (et les pratiques explicatives) responsables des variations d'infestations en pucerons et de gravité de la jaunisse au champ, (ii) concevoir collectivement des scénarios de gestion de la maladie, permettant, dans un contexte de production de betterave sans néonicotinoïde, de contrôler les attaques de pucerons et de réduire les pertes de rendement associées aux virus de la jaunisse et (iii) formaliser les connaissances acquises et les scénarios conçus, de manière à les rendre accessibles aux acteurs intéressés par leur mise en œuvre.

2. Matériel et Méthodes

Nous avons mobilisé 3 méthodes complémentaires : la traque aux innovations (Salembier *et al.*, 2021), le diagnostic agronomique (Meynard et David, 1992 ; Doré *et al.*, 2008), et les ateliers de conception innovante (Jeuffroy *et al.*, 2022).

Avant de mettre en œuvre ces méthodes, un premier atelier participatif a mobilisé 4 agriculteurs producteurs de betterave, 6 responsables agronomiques de sucreries, 6 ingénieurs de l'Institut Technique de la Betterave (ITB) régionaux et nationaux, et 5 chercheurs et scientifiques INRAE. Après une phase de partage des connaissances scientifiques disponibles sur les relations qui existent entre les pucerons, la jaunisse, la betterave et les conditions du milieu, un tour de table des participants a permis d'échanger les observations recueillies sur le terrain en 2020 et 2019, et de formuler des hypothèses interprétatives cohérentes avec l'état des connaissances scientifiques.

2.1. Traque aux innovations en ferme

La « traque aux innovations » (Salembier *et al.*, 2016, 2021 ; Verret *et al.*, 2020) vise à repérer et analyser des pratiques rares, conçues et mises en œuvre par les acteurs de terrain (en particulier des agriculteurs dans leur ferme) en vue de produire des connaissances nouvelles, susceptibles d'outiller la conception d'innovations chez d'autres agriculteurs. Dans notre cas, nous avons cherché à repérer des agriculteurs qui mettent en œuvre des pratiques qu'ils jugent efficaces pour réduire les infestations en pucerons, la gravité de la jaunisse au champ et/ou les pertes de rendement causées par la maladie. Nous avons également identifié des pratiques ou des caractéristiques du milieu qui, à l'inverse, seraient, d'après des agriculteurs, favorables aux pucerons et au développement de la virose. Plus précisément, en 2021, en nous appuyant sur une liste de producteurs de betterave sucrière fournie par l'ITB, nous avons recherché : (i) des agriculteurs n'utilisant pas de néonicotinoïdes, relativement épargnés par la jaunisse, (ii) des agriculteurs utilisant des néonicotinoïdes, plus impactés par la jaunisse comparativement aux autres producteurs de la région. Par ailleurs, d'autres agriculteurs innovants ont été progressivement identifiés au cours de la traque grâce à la méthode « boule de neige », en demandant à chaque agriculteur interrogé s'il connaissait des pairs dont les betteraves étaient également peu/fortement touchées par la jaunisse, ou ayant recours à des pratiques innovantes. Ainsi, nous avons réalisé 29 entretiens semi-directifs chez les agriculteurs, 19 en système conventionnel et 10 en Agriculture Biologique, majoritairement à l'automne 2021, en Normandie et Centre-Val de Loire. Des



entretiens ont également été réalisés avec d'autres acteurs de l'interprofession Betterave sucrière : le responsable régional ITB de la délégation Normandie - Val d'Oise, plusieurs conseillers BIO en chambre d'agriculture, les responsables d'une filière betterave-sucre innovante en Hauts-de-France et des ingénieurs réseaux DEPHY. Ces entretiens visaient à décrire les pratiques et les caractéristiques de l'environnement ou de la culture qui, d'après les observations de la personne enquêtée, ont pu expliquer un effet positif ou négatif sur les pucerons ou la jaunisse.

En cohérence avec les propositions méthodologiques de Salembier *et al.* (2021), chaque entretien a d'abord été analysé individuellement, pour formuler les liens possibles entre pratiques et observations de pucerons ou de jaunisse. Puis, dans un second temps, une analyse transversale de l'ensemble des entretiens a été réalisée, en vue d'identifier des points communs entre producteurs, sources d'hypothèses pour le diagnostic agronomique, ou de connaissances expérientielles dont le niveau de preuve augmente avec la répétition des observations. Enfin, les observations rapportées par les agriculteurs innovants ont systématiquement été confrontées à la littérature scientifique disponible sur betterave ou, à défaut, sur d'autres cultures.

2.2. Diagnostic agronomique

N'ayant pas, à notre disposition, de bases de données suffisantes pour les années 2019 et 2020, nous n'avons pas pu appliquer la méthode de diagnostic agronomique décrite par Doré *et al.* (2008) pour expliquer la variabilité des pertes de rendement. Nous avons donc avant tout cherché à tester des hypothèses formulées grâce à la traque : (i) effet de la proximité aux parcelles de betteraves porte-graines présentes en région Centre-Val de Loire, (ii) effet de la concentration de betteraves sucrières dans le paysage et (iii) effet de la date de semis des betteraves sucrières au printemps. Nous avons mobilisé les données des campagnes 2020 (fortes attaques au niveau national), 2021, 2022 et 2023 (ces trois années étant marquées par de plus faibles attaques, les plus fortes étant localisées dans certaines zones, Figure 1), dans les principales régions productrices de betteraves sucrières, c'est-à-dire les régions Centre-Val de Loire, Île-de-France, Bourgogne-Franche-Comté, Normandie, Grand Est et Hauts-de-France¹⁶.

Chaque année, pour chacune des parcelles des jeux de données, plusieurs indicateurs ont été calculés, pour tester les différentes hypothèses formulées à l'issue de la traque. Nous avons estimé la distance à la betterave porte-graines la plus proche en calculant la distance entre les coordonnées géographiques d'une parcelle de betterave sucrière et celles de la parcelle de betterave porte-graines la plus proche. Nous avons également calculé un indice de proximité. Cet indicateur correspond à la moyenne des inverses des distances entre une parcelle de betterave sucrière et la distance de toutes les parcelles de betteraves porte-graines. Nous avons estimé la concentration de betteraves dans le paysage autour d'une parcelle-cible, en calculant, à l'aide du registre parcellaire graphique (RPG), la proportion de la surface agricole utile (SAU) occupée par des parcelles de betteraves non fourragères (code culture BTN) dans un rayon de 5, 10 et 15 kilomètres autour de la parcelle cible. Nous avons déterminé, en nous appuyant sur les données suivies dans le cadre du Réseau de Surveillance Biologique du Territoire et centralisées dans l'outil de saisie et de collecte Vigiculture©, la date et le stade des betteraves au moment où les comptages (effectués en moyenne tous les 8 jours) révèlent, pour la première fois, un pourcentage de plantes avec présence d'aptères supérieur à 10%, seuil correspondant au déclenchement d'une intervention aphicide. Enfin, à partir du RPG de l'année 2020, nous avons caractérisé la fréquence de betterave sucrière dans la SAU de chaque petite région agricole de la zone betteravière. De même, les séquences de cultures sur 6 ans, entre 2015 et 2020,

¹⁶ Le contexte réglementaire a fortement évolué au cours de ces quatre années : néonicotinoïdes interdits jusqu'en 2020, réautorisés à titre dérogatoire en 2021 et 2022, et de nouveau interdits à partir de 2023



ont été reconstituées pour visualiser les territoires caractérisés par un retour fréquent de la betterave dans leurs parcelles.

2.3. Ateliers de conception innovante

Pour concevoir des solutions de gestion des pucerons ou de la jaunisse, nous avons mis en œuvre des ateliers de conception participatifs (Jeuffroy *et al.*, 2022). La conception innovante en ateliers est un processus d'exploration collectif et interactif qui repose sur des allers-retours nombreux et génératifs entre 2 « espaces en expansion » : l'espace des connaissances (le connu) et l'espace des concepts (l'inconnu) (Théorie C-K, Hatchuel et Weil 2002; 2009). Notre objectif était de concevoir des solutions techniques systémiques (combinaisons cohérentes de pratiques et d'infrastructures agroécologiques), visant à contrôler les pucerons et la jaunisse, et à réduire les pertes de rendement associées. Ces ateliers, organisés en 3 sessions tout au long du projet (février 2022, septembre 2022, printemps 2023) se sont appuyés sur les connaissances disponibles dans la littérature, celles produites dans le projet ABC (issues de la traque et du diagnostic), et celles produites par l'ensemble des projets du PNRI.

3. Résultats

3.1. Identification des pratiques influençant les pucerons ou la jaunisse

L'analyse transversale des entretiens réalisés lors de la traque aux innovations a permis de mettre en lumière 5 facteurs ayant, d'après les acteurs enquêtés, une influence sur les attaques de pucerons ou le niveau de jaunisse : la proximité de champs de betterave porte-graine, la concentration de la betterave dans le paysage, la date de semis, la gestion de la fertilisation azotée, le travail du sol. Nous avons, dans un premier temps, confronté les hypothèses émises aux connaissances de la littérature.

De nombreux entretiens effectués en région Centre-Val de Loire ont mentionné un possible effet de la proximité de parcelles de betteraves porte-graines sur les populations de pucerons et la virose. En effet, les betteraves porte-graines de cette région, semées en septembre et récoltées en août de l'année suivante, pourraient constituer un réservoir de pucerons et de virus, susceptible de contaminer les parcelles de betterave sucrière les plus proches, comme indiqué dans des travaux anciens (Ribbands, 1962 ; Watson, 1942 ; Watson *et al.*, 1951). Du Retail (1973) a également décrit que la dissémination des pucerons verts ailés en Beauce s'initiait au départ de parcelles de porte-graines, puis que les pucerons se dispersaient ensuite rapidement, sous l'action des vents dominants, dans les paysages pauvres en éléments semi-naturels. Ces observations sont cohérentes avec des travaux plus récents (Picard *et al.*, 2019), s'appuyant sur des approches de modélisation de la dispersion des pucerons à l'échelle du paysage pour concevoir des stratégies de gestion de la sharka sur Prunus (comprenant la surveillance des vergers, l'arrachage des arbres jugés à risque, des restrictions de plantation, ainsi que le remplacement des vergers sensibles par des variétés résistantes).

Plusieurs acteurs interrogés ont mentionné la moindre fréquence de jaunisse dans des paysages caractérisés par une faible concentration de la betterave. Cet effet de la fréquence d'une même culture dans le paysage sur le niveau de bioagresseurs est bien documenté dans la littérature. Par exemple, Almdal et Costamagna (2023) ont démontré qu'une plus grande diversité de cultures à l'échelle des paysages réduisait la colonisation des pucerons sur le soja, en cohérence avec l'hypothèse de concentration des ressources (Root, 1973) selon laquelle des cultures hôtes concentrées attirent plus de bioagresseurs. De même, Schott *et al.* (2010) ont mis en évidence une corrélation positive significative entre la fréquence du colza dans les petites régions agricoles du bassin de la Seine et l'usage d'insecticides sur ces parcelles.

De nombreux agriculteurs et conseillers ont fait référence à un effet de la date de semis sur la gravité de la jaunisse, mentionnant un effet très variable : certains agriculteurs, sur la base de leurs



observations, ont conclu qu'il vaut mieux semer tard, d'autres que le semis précoce est préférable. Sur une série d'expérimentations réalisées entre 1964 et 1968 en Angleterre, Heathcote (1970) a observé que le pourcentage de betteraves infectées par les pucerons *Myzus persicae* (Sulzer) et *Aphis fabae* (Scopoli) avait tendance à augmenter avec les semis tardifs, mais qu'il existait des variations importantes suivant les années. Selon cet auteur, la période de semis qui expose le plus les betteraves à des attaques de pucerons virulifères dépend de la période de vol des pucerons, elle-même susceptible de varier d'un mois entre années.

Plusieurs agriculteurs enquêtés font état d'observations de populations de pucerons supérieures dans des parcelles fertilisées précocement. D'autres, observant une gravité moindre de la jaunisse sur les parcelles Bio attribuent celle-ci à une nutrition azotée réduite. Les pratiques de fertilisation azotée sont connues pour agir sur les interactions plantes hôtes/ravageurs/auxiliaires (Barbour *et al.*, 1991; Leather, 1994) notamment via une modification de la qualité alimentaire de la sève (ratio Carbone/azote) et une transformation du paysage olfactif (Composés Organiques Volatiles émis par la plante) vécu par les pucerons, rendant ainsi plus attractives les plantes ayant un statut azoté élevé (Ahmed *et al.*, 2019). Dans la littérature, plusieurs auteurs font mention d'un effet de la fertilisation azotée sur les populations de pucerons des céréales (Aqueel & Leather, 2012) ou du colza (Zarghami *et al.*, 2010) : l'augmentation des apports azotés accroît la teneur en azote des plantes et, par suite, la biomasse et la fécondité des pucerons qui s'en nourrissent.

Plusieurs agriculteurs innovants et le responsable du service agronomique d'une sucrerie ont mentionné un effet, sur les pucerons et la jaunisse, du travail du sol en interculture et du mode d'implantation de la betterave sucrière : un travail du sol réduit, laissant en surface des résidus de culture en abondance réduirait la population de pucerons et la jaunisse. La perturbation du repérage de la culture, dans le cas de betteraves semées dans un mulch, phénomène permis par le semis direct ou le strip-till, est également mentionnée dans la littérature. Ainsi, Kennedy *et al.* (1961) indiquent que les pucerons sont capables d'une différenciation primaire entre le ciel et la terre, puis d'une différenciation secondaire entre les plantes et le sol.

Nous avons confronté ces hypothèses issues de la traque et de la bibliographie avec nos propres analyses de données. Nous en décrivons, dans les paragraphes suivants, les résultats les plus marquants.

3.2. Effet de la proximité des parcelles de betteraves porte-graines

En 2020 (année de forte pression jaunisse), mais également les années suivantes (années à faible pression au niveau national), les parcelles du bassin de production les plus touchées par la jaunisse étaient localisées dans une même zone, au Sud du Bassin Parisien (départements de l'Essonne, de l'Eure-et-Loir, du Loir-et-Cher, du Loiret, des Yvelines et de l'Yonne ; Figure 1). Cette région correspond à la seule zone de recouvrement entre l'aire de production de betteraves sucrières et celle de betteraves porte-graines.

Pour chacune des campagnes 2021, 2022 et 2023, on observe effectivement une corrélation significative entre la gravité jaunisse et la proximité à un (A, Figure 2) ou plusieurs (B, Figure 2) champs de betteraves porte-graines. La relation plus faible observée en 2022, par rapport à 2021 et 2023, s'explique par la conjonction entre un faible niveau national d'attaques de pucerons et de jaunisse (cf. infra figure 6) et la forte fréquence de betteraves traitées avec néonicotinoïdes (NNI), en comparaison avec 2021 et 2023. De manière générale, pour ces 3 années, la gravité jaunisse est inférieure à 25% de betteraves touchées au-delà de 10 000 mètres de la parcelle de betterave porte-graines la plus proche et pour un indice de proximité inférieur à 0.002 (Figure 3). En 2020, on observe également une corrélation entre les deux variables, mais la relation est moins forte, en raison d'une gravité de la jaunisse nettement supérieure sur l'ensemble du territoire par rapport à 2021, 2022 et 2023.

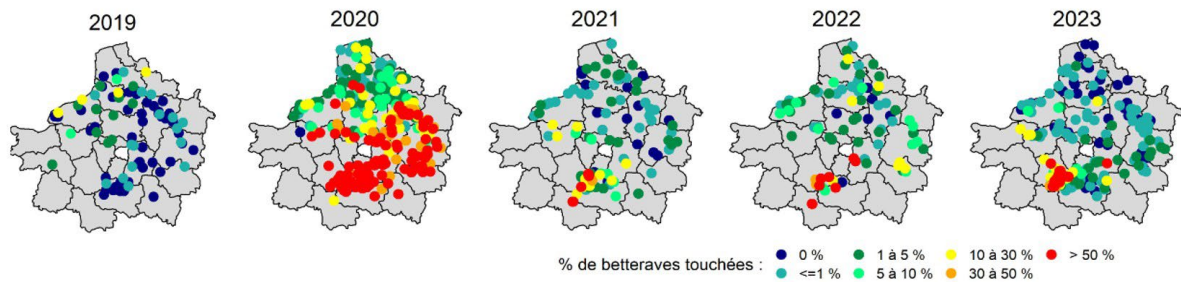


Figure 1 : Niveaux de gravité jaunisse observés sur les parcelles de betteraves sucrières (% de betteraves touchées par la jaunisse) suivies en 2019, 2020, 2021, 2022 et 2023. Source : cartes réalisées par l'ITB à partir de la base de données suivies dans le cadre du Réseau de Surveillance Biologique du Territoire et centralisées dans l'outil de saisie et de collecte Vigiculture®.

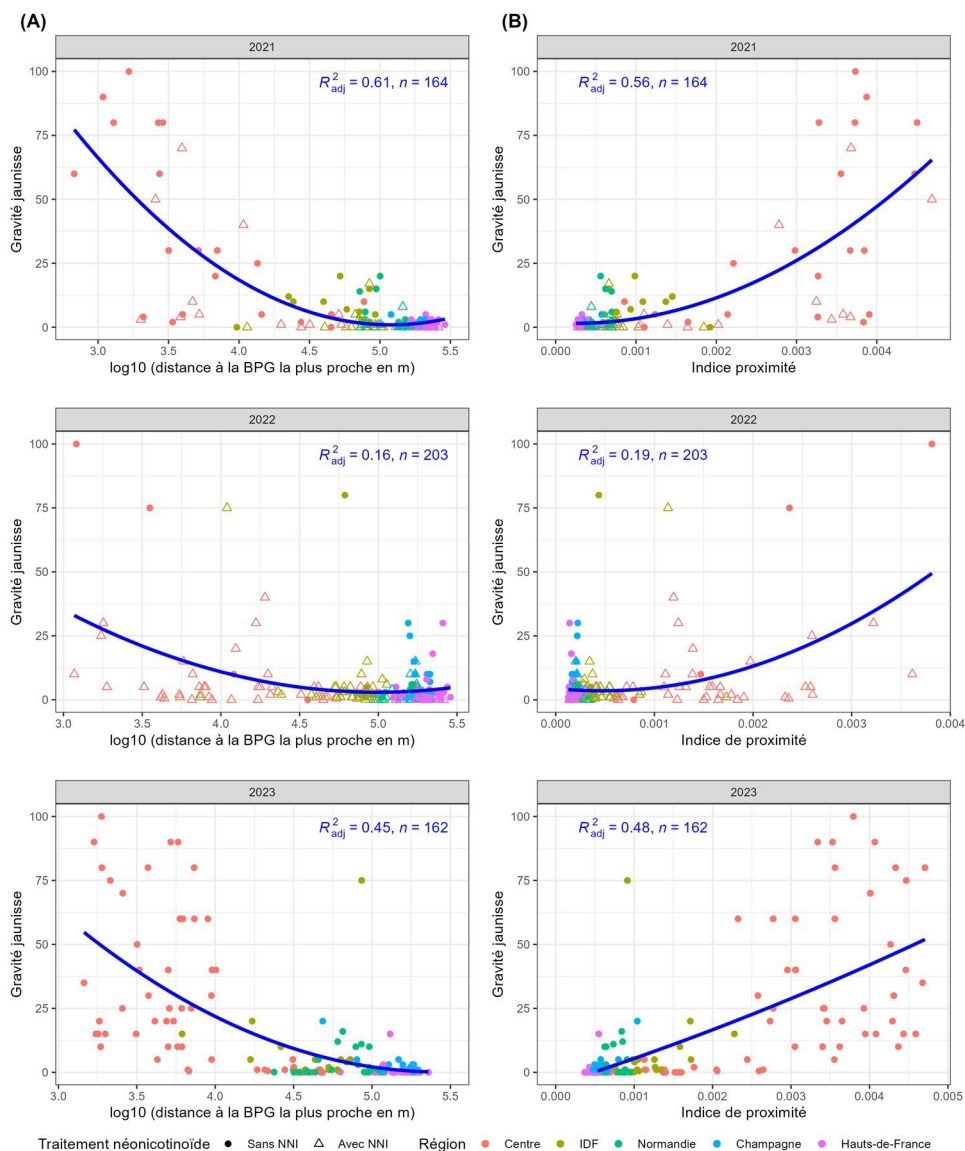


Figure 2 : (A) Relation entre le log10 de la distance à la parcelle de betterave porte-graines (BPG) la plus proche (en mètres), et la gravité jaunisse dans la parcelle, en 2021, 2022 et 2023 ; (B) Relation entre l'indice de proximité, et la gravité jaunisse dans la parcelle, en 2021, 2022 et 2023. Les courbes de tendance ont été tracées sur R à l'aide du package ggplot2 et de la fonction geom_smooth en appliquant la formule $y \sim \text{poly}(x, 2)$. Les étiquettes associées à chacune des courbes ont été générées

avec la fonction `stat_poly_eq` du package `ggpmisc`. Source : données centralisées dans l'outil de saisie et de collecte Vigiculture©.

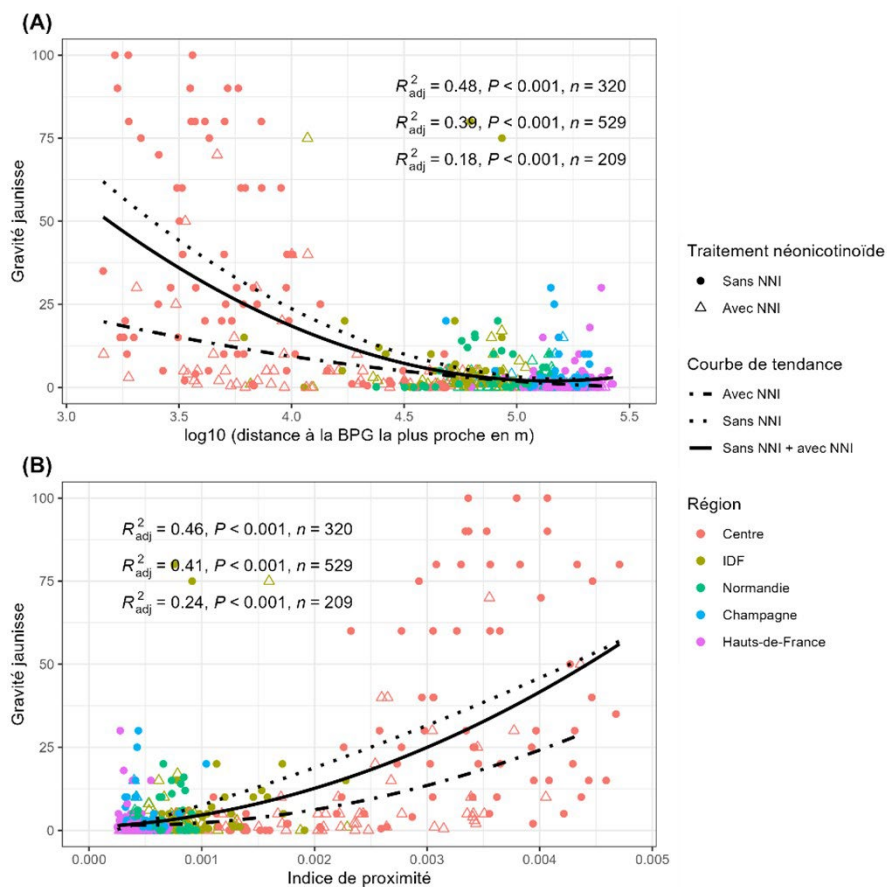


Figure 3 : (A) Relation entre le log10 de la distance à la parcelle de betterave porte-graines (BPG) la plus proche (en mètres), et la gravité jaunisse dans la parcelle, pour l'ensemble des années 2021, 2022 et 2023 ; (B) Relation entre l'indice de proximité, et la gravité jaunisse dans la parcelle, pour l'ensemble des années 2021, 2022 et 2023. Les courbes de tendance ont été tracées sur R à l'aide du package `ggplot2` et de la fonction `geom_smooth` en appliquant la formule `y~poly(x,2)`. Les étiquettes associées à chacune des courbes ont été générées avec la fonction `stat_poly_eq` du package `ggpmisc`. Source : base de données Vigiculture©.

3.3. Effet sur la jaunisse de la concentration spatiale des betteraves sucrières

Certaines régions, au Nord-Est et à l'Est de Paris, productrices historiques de betteraves, se distinguent par une concentration très élevée de betteraves dans le paysage (Figure 4A), dépassant 15 % de la SAU. De manière cohérente, ces mêmes régions sont caractérisées par des retours fréquents de la betterave sur les mêmes parcelles, jusqu'à 1 an sur 2 dans certaines zones (Figure 4B). En croisant ces informations avec les données disponibles de la base Vigiculture© (stade des betteraves à chaque date de comptage de pucerons), nous montrons que la gravité jaunisse sur les parcelles suivies en 2020 est significativement liée au taux d'occupation du sol par la betterave dans un rayon de 5 km autour des parcelles (Figure 5). Pour éviter une confusion d'effet avec les effets de la proximité des betteraves porte-graines, nous avons écarté de l'analyse l'ensemble des parcelles suivies dans les départements sous l'influence potentielle de la zone de production de semence dans le sud Paris : Eure-et-Loir (28), Loir-et-Cher (41), Loiret (45), Yvelines (78), Essonne (95) et Yonne (89). En revanche, pour les années 2021 et 2022, marquées par des pressions pucerons et jaunisse plus faibles, aucune différence significative n'est détectée entre les classes de concentration spatiale des betteraves sucrières.

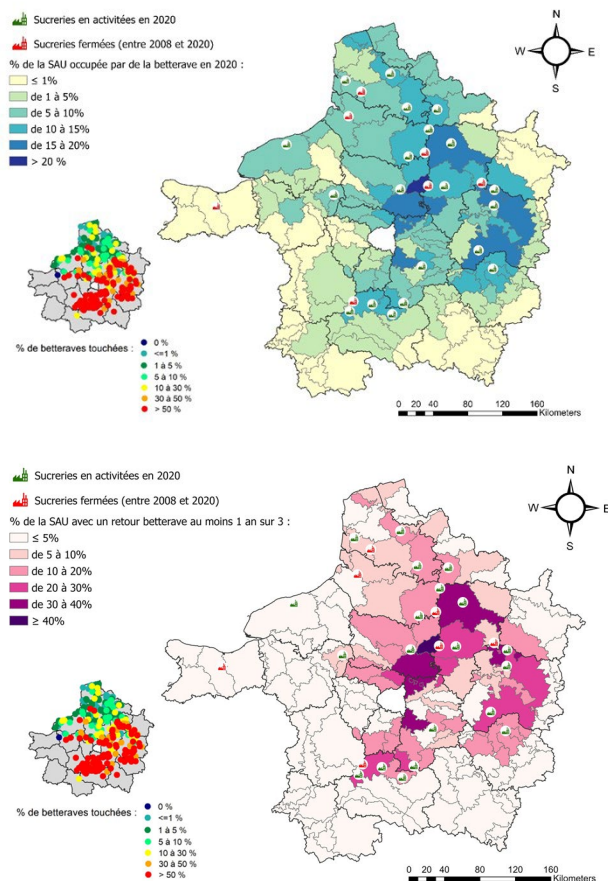
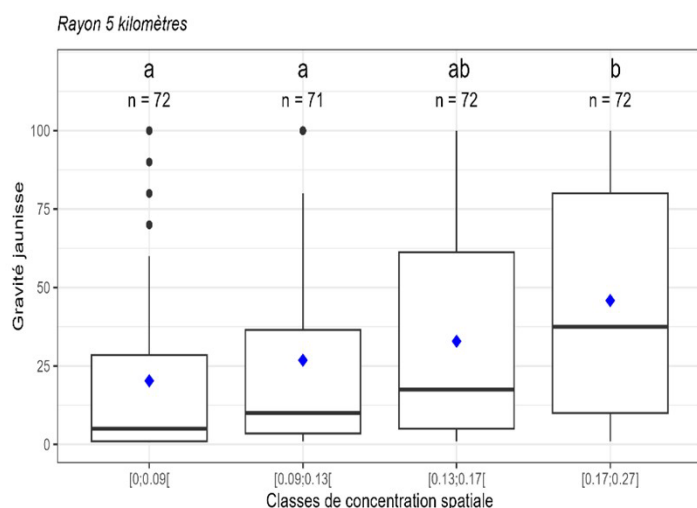


Figure 4 : A/ Part (en %) de la betterave dans la surface agricole utile des petites régions agricoles de la zone betteravière, en 2020 et localisation des sucreries. B/ Part (en %) de la surface agricole utile concernée par un retour de la betterave au moins 1 an sur 3 dans les successions culturales des petites régions agricoles de la zone betteravière, entre 2015 et 2020. Pour les deux cartes, le fond de carte correspond aux petites régions agricoles et aux départements. Source : RPG.



3.4. Effet de la concentration des dates de semis sur la nuisibilité potentielle des pucerons

La distribution des dates de semis sur l'ensemble du bassin de production de betteraves a été très différente entre années. En 2020, grâce à un beau mois de mars, la période de semis des betteraves sucrières a été concentrée entre le 20 et le 30 mars, et ce pour l'ensemble de la zone betteravière : en 6 jours, la moitié des betteraves sucrières de France ont été semées. En 2021, une partie de la sole de betterave a été touchée par deux épisodes de gel tardif (6-7 avril, puis 12-16 avril), entraînant le re-semis d'environ 50 000 ha (13 % des surfaces nationales). En 2022, les semis ont été réalisés tôt (6 jours d'avance sur la moyenne de 5 ans), et les chantiers de semis ont été rapides : en région Centre, 85 % des surfaces étaient semées au 23 mars. L'année 2023, quant à elle, se distingue très nettement des précédentes par un étalement très marqué des semis, du fait de plusieurs épisodes pluvieux qui ont restreint les fenêtres de semis possibles.

Pour chaque année, on a confronté les distributions des dates de semis et des dates d'arrivée des pucerons verts dans les betteraves. En 2020, l'arrivée des pucerons intervient en moyenne 21 jours après que 75 % des surfaces nationales aient été semées, contre 50 jours en 2021, 39 jours en 2022 et 23 jours en 2023, ces 3 années étant caractérisées par un étalement important des dates d'arrivée des pucerons.

En 2020, la conjonction entre la concentration des semis de betteraves et la date d'arrivée très précoce et très homogène des pucerons a eu pour conséquence une uniformité des stades des betteraves au moment de l'arrivée des pucerons et de l'infection virale des betteraves (Figure 6). Près de 90 % des parcelles suivies étaient au stade 2 feuilles à l'arrivée des pucerons, un stade très sensible aux polérovirus (BChV et BMVY) d'après les résultats du projet Provibe. Ces virus ont été retrouvés dans 82 % des échantillons de feuilles prélevées en 2020. En 2023, comme en 2020, les pucerons sont arrivés tôt, 3 semaines après que 75 % des parcelles aient été semées. En revanche, l'étalement plus grand des semis cette année-là a induit une plus grande variabilité dans les stades des betteraves lors de l'arrivée des pucerons : seulement 50 % des parcelles étaient aux stades très sensibles, 1 ou 2 feuilles. Pour les années 2021 et 2022, les pucerons sont arrivés bien plus tard par rapport à la période de semis, laissant plus de temps aux betteraves pour se développer et dépasser les stades les plus sensibles aux virus (15 et 25 % respectivement des parcelles étaient au stade 2 Feuilles en 2021 et 2022).

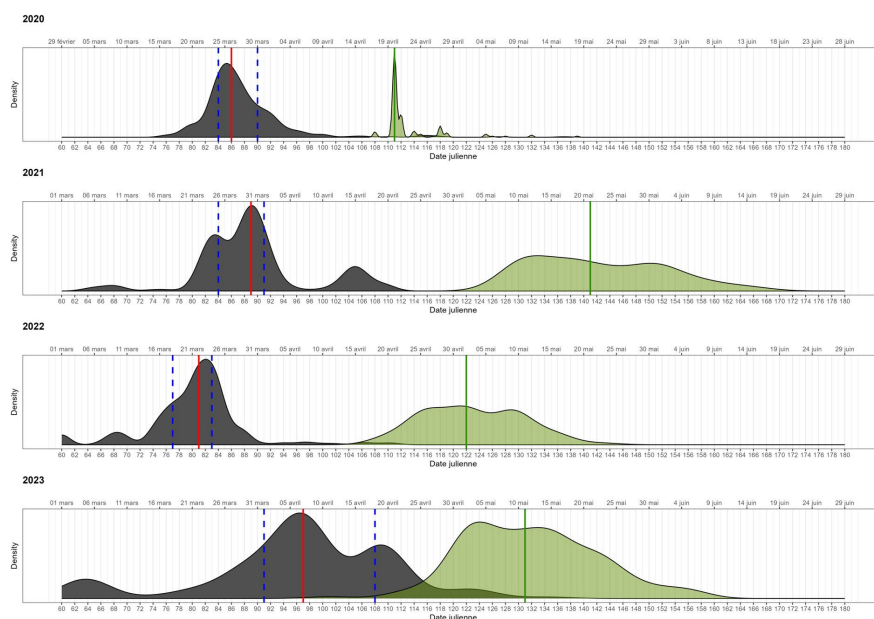


Figure 6 : Représentation de l'étalement des dates de semis des betteraves dans la zone betteravière (gris), réalisée à partir de l'ensemble des parcelles suivies dans la base de données SEPIM disposant d'information sur la date de semis, en 2020 (n = 414), 2021 (n = 257), 2022 (n = 299) et 2023 (n = 296) ; Représentation de la distribution des dates d'arrivée des pucerons verts (vert), réalisée à partir des parcelles suivies dans la base de données SEPIM disposant de comptages pucerons (n =

partir des parcelles suivies dans la base de données SEPIM disposant de comptages pucerons (n =



140), 2021 (n = 81), 2022 (n = 80) et 2023 (n = 136) ; Les tirets bleus représentent le premier et troisième quartiles correspondant respectivement au moment où 25 % et 75 % des parcelles ont été emblavées. Le trait plein rouge représente la médiane, qui désigne le moment où la moitié des parcelles ont été semées. Le trait plein vert correspond à la date d'arrivée médiane des pucerons au niveau national. Source : base de données Vigiculture©.

3.5. Solutions systémiques conçues lors des ateliers de conception

Les 3 sessions d'ateliers ont permis la conception de 10 scénarios, articulant différentes combinaisons de leviers, pour produire des betteraves sans néonicotinoïdes et sans supplément de pesticides (Tableau 1). Ces scénarios sont classés en fonction des échelles auxquelles ils peuvent être mobilisés, avec (i) des scénarios qui combinent des solutions à la parcelle, (ii) un scénario applicable à l'échelle du système de culture, et (iii) d'autres qui impliquent des stratégies à l'échelle du paysage. Ces scénarios sont décrits précisément dans des fiches disponibles sur la plateforme de partage de connaissances GECO

(https://geco.ecophytopic.fr/geco/Concept/Scenarios_De_Gestion_De_La_Jaunisse_Sur_Betteraves_Sucreries).

Certains de ces scénarios sont en cours de test, dans des parcelles d'agriculteurs. Pour la suite du travail, nous proposons que les scénarios servent de support pour aider les acteurs de la recherche et la filière betterave à poursuivre et achever la conception de solutions combinées innovantes.

Tableau 1 : Description des 10 scénarios co-conçus, articulant différentes combinaisons de leviers, pour produire des betteraves sans NNI et sans supplément de pesticides

Scénario	Principe
Cultiver des mélanges de variétés de betteraves tolérantes et/ou résistantes aux pucerons et aux virus de la jaunisse	Cultiver en mélange, dans la parcelle, plusieurs variétés de betteraves tolérantes (capables d'assurer une production satisfaisante malgré leur infection par le pathogène), ou résistantes (capables de limiter l'infection par le pathogène, privilégiées dans les régions avec une pression jaunisse forte par exemple), avec des variétés sensibles (souvent plus productives en l'absence de jaunisse). Parmi les variétés disponibles, certaines variétés tolérantes préservent le potentiel de rendement à 80 % en moyenne en présence de jaunisses virales, par rapport aux variétés sensibles.
Adapter les pratiques de fertilisation azotée et de semis sur betterave sucrière vis-à-vis du puceron	Associer une réduction de la fertilisation azotée apportée précocement, de manière à limiter la quantité d'azote dans les feuilles en début de cycle, avec un choix de la date de semis visant à éviter la conjonction entre l'arrivée des pucerons et la présence de jeunes stades sensibles dans la parcelle. Ce choix peut reposer sur les estimations de vols de pucerons, réalisées par le modèle conçu dans le cadre du projet SEPIM du PNRI.
Combiner des plantes compagnes associées aux betteraves et des infrastructures agroécologiques dans l'environnement de la parcelle	Combiner l'implantation de plantes compagnes, semées en association avec les betteraves, et l'installation de bandes fleuries ou de plantes relais jouant le rôle d'infrastructures agroécologiques (IAE), à l'intérieur (bandes) ou à l'extérieur (bordure) de la parcelle. Les plantes compagnes (avoine rude ou orge) ont pour fonction de perturber le repérage des betteraves par les pucerons, par effet visuel ou olfactif, tandis que les plantes relais sont capables d'héberger des pucerons qu'on ne retrouve pas sur betterave mais qui attirent des auxiliaires généralistes qui prédatent également <i>M.persicae</i> . La mise en œuvre suppose de bien maîtriser la possible concurrence avec la culture et les éventuelles difficultés de leur destruction. Pour la composition des bandes fleuries, on recommande de cibler des mélanges comprenant des espèces avec des dates de floraison précoces correspondant aux périodes d'activité des auxiliaires (mars à juin), par exemple, la pâquerette, la véronique de Perse, le gléchoma faux-lierre et le pissenlit sont capables de nourrir parasitoïdes et syrphes très tôt dans l'année (Gardarin, 2023). Les effets positifs de ce scénario nécessitent que la bande fleurie soit bien développée dès le début du printemps.
Combiner des plantes	Introduire une plante compagne de la betterave, dite répulsive, ayant la propriété



compagnes associées aux betteraves et la mise en place de bandes de plantes attractives pour les pucerons (principe du push-pull)	d'éloigner (push) les pucerons des betteraves (avoine rude par exemple), et une plante-piège ayant la propriété (pull) de les attirer (chou chinois, radis chinois, colza, moutarde et vesce sont en test). La bande de plante piège peut être positionnée soit à l'intérieur, soit en bordure de parcelle.
Associer des bandes attractives pucerons et des infrastructures agroécologiques dans l'environnement de la parcelle	Combinaison d'IAE (bandes fleuries ou bandes de graminées), qui visent à développer les populations d'auxiliaires, et de bandes attractives, qui ont pour objectif d'attirer et de fixer les pucerons qui arrivent dans la parcelle. Ces derniers peuvent ensuite servir de proies pour les auxiliaires favorisés par les IAE. L'efficacité de ces systèmes varie suivant l'agencement spatial des leviers en jeu : sachant que l'effet de telles structures s'exprime sur une distance limitée, placer des IAE et des bandes attractives à des distances répétées dans le champ présente l'avantage de couvrir l'ensemble de la parcelle.
Cultiver des betteraves semées sous-couvert avec un recours au travail du sol réduit	Combiner un travail du sol réduit avec absence de labour et des techniques de semis consistant à planter les betteraves dans un couvert d'interculture en décomposition ou maintenu vivant dans les betteraves. La rupture chromatique induite par l'hétérogénéité à la surface du sol réduit ainsi la capacité des pucerons à détecter visuellement les betteraves. Une fois posé sur une surface lisse (feuille, mulch, bâche plastique), le puceron la sonde et, si celle-ci ne correspond pas à une feuille d'intérêt pour lui, il quitte la parcelle. En revanche, s'il atterrit sur le sol et qu'aucune activité de sondage n'a lieu, il continue à se déplacer vers une surface plus intéressante dans la parcelle.
Combiner des plantes compagnes associées aux betteraves et/ou la diffusion de composés organiques volatiles (COVs) et l'introduction d'auxiliaires dans les betteraves	Combinaisons entre (i) des techniques, COVs répulsifs pour les pucerons ou plantes compagnes (évalués dans le cadre du PNRI par le projet Servir), qui ont pour objectif de ralentir la dynamique de croissance des populations de pucerons en début de cycle des betteraves, avec (ii) des lâchers d'auxiliaires (évalués dans le cadre du PNRI par les projets portés par ChrysControl et Bioligne) qui puissent être réalisés lors de périodes de température plus élevée (plus favorable à l'activité des auxiliaires), et donc avec des ratios pucerons/auxiliaires plus équilibrés. Les auxiliaires testés sont des chrysopes (<i>Chrysoperla carnea</i>) ou des parasitoïdes (<i>Aphidius colemani</i>).
Modifier l'organisation des parcelles en appliquant les principes du strip-cropping	Le strip-cropping est une pratique consistant à cultiver les espèces en bandes alternées consécutives, suffisamment larges pour permettre une culture indépendante (chaque bande étant considérée et traitée comme une parcelle, avec sa propre rotation et itinéraire technique), mais suffisamment étroites pour favoriser la biodiversité et les interactions écologiques entre bandes. Cette pratique perturbe le processus de localisation et de colonisation de la plante hôte par les ravageurs en diluant la présence de betterave à l'échelle d'une parcelle. Par rapport à d'autres formes d'intercropping présentées dans les stratégies précédentes, cette pratique a l'avantage de ne pas avoir recours à la destruction de la plante associée.
Modifier l'organisation spatiale des parcelles au sein des bassins de production betteraviers	Dans ce scénario décliné à l'échelle du paysage, l'innovation consiste à faire évoluer l'organisation des bassins de production en développant la culture de la betterave dans des zones plus étalées qu'aujourd'hui, de manière à réduire la fréquence de betteraves dans le paysage. La diminution de la densité de betterave serait possible soit par la réouverture de sucreries ayant fermé dans les dernières décennies, soit par la création de sucreries ou bioraffineries ayant des caractéristiques nouvelles, plus flexibles, plus petites, voire mobiles.
Organiser l'étalement des dates de semis des betteraves sucrières à l'échelle d'un territoire.	On propose ici d'organiser collectivement l'étalement des dates de semis de betterave, chez les planteurs d'une même zone de production. De la même manière que les groupes sucriers organisent leurs calendriers de récolte, ils pourraient organiser les opérations de semis en planifiant les implantations de betteraves chez les producteurs. L'étalement des dates de semis permettrait de diminuer le risque de voir toutes les parcelles d'un bassin de production uniformément affectées lors de l'arrivée d'une vague de pucerons, et d'éviter des infestations homogènes de jaunisse sur le territoire, limitant ainsi l'impact sur l'alimentation de la sucrerie.



4. Conclusion

En croisant (i) des observations dans les champs, d'agriculteurs ou d'ingénieurs de sucreries, (ii) un diagnostic agronomique basé sur l'analyse quantitative de données, et (iii) des informations de la littérature, nous avons montré que le risque jaunisse dépend de 3 facteurs agronomiques majeurs : la distance entre la parcelle de betterave sucrière et les betteraves porte-graines les plus proches ; la concentration de betteraves dans l'environnement de la parcelle ; le stade des betteraves sucrières au moment de l'arrivée des pucerons, fonction de la date de semis et du climat du printemps. Ces éléments, combinés avec les connaissances produites dans les autres projets du PNRI, ont permis une conception collective de scénarios de gestion de la jaunisse sans néonicotinoïdes. Ces solutions restent à tester à grande échelle, sur le terrain et/ou par modélisation, afin d'évaluer leur efficacité pour la maîtrise de la jaunisse de la betterave sans NNI.

Nous tenons cependant à souligner deux limites de notre étude :

- d'une part, la traque aux innovations n'a pas permis, contrairement à nos hypothèses, de repérer un très grand nombre d'agriculteurs très innovants, développant des systèmes en rupture, éloignés des pratiques courantes en production de betteraves sucrières. Nous attribuons cet échec à la relative homogénéité des modes de culture de la betterave, lié à l'encadrement technique de proximité proposé par les services agronomiques des sucreries, et à la contractualisation entre les planteurs et les usines. Le développement de nouvelles filières (encadré 1), qui diffèrent des filières betterave-sucre dominantes en imposant des contraintes moins fortes aux planteurs, peut constituer un levier et favoriser l'émergence de systèmes innovants ;
- d'autre part, aucune des voies alternatives aux néonicotinoïdes n'explore des solutions de reconception collective touchant à l'organisation des filières. Comme le souligne Trèves (2024), il n'existe pas, dans le monde de la betterave, de structure ayant les compétences adéquates pour analyser les freins sociotechniques au changement ou concevoir des innovations organisationnelles. Pourtant, comme le montre une filière émergente dédiée à la fabrication de sucre et de sirop bio (encadré 1), il existe à ce niveau des marges de manœuvre significatives !

Encadré 1. Une filière Bio innovante en Hauts-de-France

La structuration de la filière betterave-sucre bio innovante dans les Hauts-de-France a été initiée dès 2016 par un réseau d'acteurs souhaitant se démarquer des filières betterave-sucre dominantes en ne s'appuyant pas sur leurs standards.

Dans le but de promouvoir la diversification des cultures, ils ont établi une limite maximale de 20 ha de betteraves sucrières bio produites par exploitation agricole et l'exclusivité des apports à la SCIC mise en place spécifiquement, quitte à repousser la limite du rayon d'approvisionnement à 100 km pour soutenir des producteurs intéressés.

D'autre part, les acteurs du projet ont décidé de s'organiser autour d'un outil de transformation de taille intermédiaire. Le choix de créer une micro-sucrerie a impliqué d'identifier un produit dont le procédé soit suffisamment économe en énergie et rentable économiquement pour cette échelle de production. La fabrication de sirop de betterave est une alternative intéressante au sucre cristal blanc car son procédé a l'avantage de s'affranchir des étapes énergivores de cristallisation, d'essorage et de séchage. Toutefois, face à l'étroitesse du marché du sirop de betterave bio en France, les acteurs se sont tournés vers un autre produit, le sucre de betterave bio complet en poudre. Son procédé, breveté en 2024, s'appuie sur une méthode d'extraction alternative à la diffusion et moins énergivore, et est suffisamment polyvalent pour pouvoir valoriser d'autres cultures de diversification hors campagne betteravière, maximisant ainsi la période d'utilisation de l'outil de transformation.



Ainsi, le réseau d'acteurs qui structure cette filière s'est appuyé sur le développement de plusieurs innovations couplées (Meynard et al., 2017) entre production, transformation et commercialisation, pour développer une filière innovante avec des résultats satisfaisants.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Marie-Hélène JEUFFROY : <https://orcid.org/0000-0003-0520-9172>

Blandine RENAULT : <https://orcid.org/0009-0003-1203-9682>

Jean-Marc MEYNARD : <https://orcid.org/0000-0002-4280-1768>

Olivier RECHAUCHERE : <https://orcid.org/0000-0001-8377-8755>

Contributions des auteurs

Louis BOURDIN : recueil des données, gestion des données, analyse, rédaction ; Marie-Hélène JEUFFROY : conceptualisation, gestion de projet, supervision, rédaction ; Blandine RENAULT : recueil des données, analyse ; Rémy BALLOT : gestion des données, analyse ; Olivier RECHAUCHERE : recueil des données, analyse, rédaction ; Jean-Marc MEYNARD : conceptualisation, supervision, rédaction

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions tous les agriculteurs et ingénieurs de l'ITB et des sucreries qui ont participé à ce travail. Ce travail a été réalisé dans le cadre du réseau IDEAS.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier du Ministère chargé de l'agriculture, dans le cadre du PNRI, plan de relance France 2030.

Références bibliographiques



- Ahmed, N., Darshanee, H. L. C., Khan, I. A., Zhang, Z.-F., & Liu, T.-X. (2019). Host Selection Behavior of the Green Peach Aphid, *Myzus persicae*, in Response to Volatile Organic Compounds and Nitrogen Contents of Cabbage Cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 10, 79. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00079>
- Almdal, C.D., Costamagna, A.C., 2023. Crop diversity and edge density benefit pest suppression through bottom-up and top-down processes, respectively. *Agric. Ecosyst. Environ.* 349, 108447. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108447>
- Aqueel, M.A., Leather, S.R. (2012). Nitrogen fertiliser affects the functional response and prey consumption of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) feeding on cereal aphids. *Annals of Applied Biology*, 160(1), 6-15. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2011.00514.x>
- Aulagnier A., Goulet F. (2017), Des technologies controversées et de leurs alternatives. Le cas des pesticides agricoles en France. *Sociologie du travail*, 59, 3. DOI : 10.4000/sdt.840
- Barbour, J. D., Farrar Jr., R. R., & Kennedy, G. G. (1991). Interaction of fertilizer regime with host-plant resistance in tomato. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 60(3), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1991.tb01549.x>
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M., & Valantin-Morison, M. (2008). Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 151-161. <https://doi.org/10.1051/agro:2007031>
- du Retail, F. (1973). 1. Sur les vols et populations de *Myzus persicae* en 1972. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, 42(10), 59-61. <https://doi.org/10.3406/linly.1973.10032>
- Duru, M., Therond, O., & Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions; A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- Gardarin, A. (2023). Des bandes fleuries diversifiées et pérennes, favorables à la biodiversité et à la lutte biologique.
- Hatchuel, A., Weil, B., 2002. La théorie C-K: Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. In: *La théorie C-K: Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. Colloque " Sciences de La Conception*, Lyon, pp. 1-24.
- Hatchuel, A., Weil, B. (2009). CK Design Theory: An Advanced Formulation. *Research in Engineering Design - RES ENG DESIGN*, 19, 181-192. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Heathcote, G. D. (1970). Effect of Plant Spacing and Time of Sowing of Sugar Beet on Aphid Infestation and Spread of Virus Yellows. *Plant Pathology*, 19(1), 32-39. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1970.tb00975.x>
- Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Lefeuvre, T., Valantin-Morison, M., Colnenne-David, C., Gauffreteau, A., Médiène, S., Pelzer, E., Reau, R., Salembier, C., & Meynard, J.-M. (2022). Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools: Learning from 12 case studies. *European Journal of Agronomy*, 139, 126573. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573>
- Kennedy, J. S., Booth, C. O., & Kershaw, W. J. S. (1961). Host finding by aphids in the field. *Annals of Applied Biology*, 49(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03587.x>
- Leather, S. R. (1994). Life History Traits of Insect Herbivores in Relation to Host Quality. In *Insect-Plant Interactions* (1993). CRC Press.
- Meynard, J.M., Doré, T., Lucas, P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *C.R. Acad. Sci. Biologies*, 326, 37-46.
- Meynard J.M. ; David G. ; 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cah.Agricultures*, 1,9-19.
- Meynard J.M. ; Doré T. ; Lucas P. ; 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *CR Acad Sci. Biologies*. 326, 37-46.



Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Magrini, M.-B., & Michon, C. (2017). Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agricultural Systems*, 157, 330-339. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.002>

Picard, C., Pleydell, D., Rimbaud, L., Picheny, V., Dallot, S., Jacquot, E., Soubeyrand, S., Thébaud, G., 2019. Model-based estimation of aphid dispersal distances and its use to co-optimize sharka management strategies and the allocation of resistant cultivars. 17èmes Rencontres de Virologie Végétale.

Ribbands, C. R. (1962). Control of Virus Yellows in Sugar Beet Crops. *Nature*, 195(4847), Article 4847. <https://doi.org/10.1038/1951230a0>

Root, R.B., 1973. Organization of a Plant-Arthropod Association in Simple and Diverse Habitats: The Fauna of Collards (Brassica Oleracea). *Ecol. Monogr.* 43, 95–124. <https://doi.org/10.2307/1942161>

Salembier, C., Elverdin, J. H., & Meynard, J.-M. (2016). Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>

Salembier, C., Segrestin, B., Weil, B., Jeuffroy, M.-H., Cadoux, S., Cros, C., Favrelière, E., Fontaine, L., Gimaret, M., Noilhan, C., Petit, A., Petit, M.-S., Porhiel, J.-Y., Sicard, H., Reau, R., Ronceux, A., & Meynard, J.-M. (2021). A theoretical framework for tracking farmers' innovations to support farming system design. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 61. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00713-z>

Schott, C., Mignolet, C., & Meynard, J.-M. (2010). Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0334>

Trèves, V. (2024). Comment renforcer la gestion par l'Etat des transitions agroécologiques ? Analyse et reconception des plans français de réduction des pesticides (2007-2023). Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 284 p. + annexes

Verret, V., Pelzer, E., Bedoussac, L., & Jeuffroy, M.-H. (2020). Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design : The case of annual mixtures including a legume crop. *European Journal of Agronomy*, 115, 126018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126018>

Watson, M. A. (1942). Sugar-beet yellows virus : A preliminary account of experiments and observations on its effect in the field. *Annals of Applied Biology*, 29(4), 358-365. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1942.tb06139.x>

Watson, M. A., Hull, R., Blencowe, J. W., & Hamlyn, B. M. G. (1951). The Spread of Beet Yellows and Beet Mosaic Viruses in the Sugar-Beet Root Crop I. Field Observations on the Virus Diseases of Sugar Beet and Their Vectors *Myzus Persicae* Sulz. And *Aphis Fabae* Koch. *Annals of Applied Biology*, 38(4), 743-764. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1951.tb07847.x>

Zarghami, S., Allahyari, H., Bagheri, M. R., & Saboori, A. (2010). Effect of nitrogen fertilization on life table parameters and population growth of *Brevicoryne brassicae*. *Bulletin of Insectology*, 63(1), 39-43.

Pour citer cet article : Louis Bourdin, Marie-Hélène Jeuffroy, Blandine Renault, Rémy Ballot, Olivier Rechauchère, et al.. Construire collectivement des alternatives aux néonicotinoïdes pour la betterave sucrière. *Innovations agronomiques*, 2025, 103, pp.64-78. [10.17180/ciag-2025-vol103-art07](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol103-art07)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.