



anses

Efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Mai 2021



CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 26 mai 2021

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

**relatif à « l'efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les
pucerons de la betterave »***

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

L'Anses a été saisie le 25 juin 2020 par la DGAL pour la réalisation de l'expertise suivante : l'efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

1.1 Contexte

Les pucerons, notamment *Aphis fabae* et *Myzus persicae*, sont très nuisibles pour les cultures de betteraves du fait de leur capacité à transmettre les virus responsables des jaunisses de la betterave. Jusqu'en 2018, la protection phytosanitaire était assurée par le traitement systématique des semences avec des substances actives de la famille des néonicotinoïdes (imidaclopride ou thiaméthoxam seuls, ou imadaclopride associé à la téfluthrine de la famille des pyréthri-noïdes), dont l'effet systémique permettait d'assurer une protection efficace jusqu'à la fin de la période à risques, sans qu'il soit besoin de procéder ultérieurement à un traitement des parties aériennes de la plante.

Cependant, l'interdiction des néonicotinoïdes au 1^{er} septembre 2018 instaurée par la Loi n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a mis fin à cette possibilité d'usage.

* Annule et remplace l'avis du 25 mai 2021. Les modifications sont tracées dans l'annexe 1.

Dans son évaluation du 7 mai 2018 « mettant en balance les risques et les bénéfices relatifs à d'autres produits phytopharmaceutiques autorisés ou des méthodes non chimiques de prévention ou de lutte pour les usages autorisés en France des produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes » réalisée conformément à l'article L. 253-8 du Code rural et de la pêche maritime, l'Anses a recensé les alternatives disponibles au début de l'année 2018 et a calculé des indicateurs de risques et d'efficacité. Selon ce bilan, les alternatives phytopharmaceutiques aux néonicotinoïdes pour le traitement des pucerons de la betterave reposaient exclusivement sur le traitement foliaire avec une substance insecticide de la famille des pyréthrinoïdes, associée le cas échéant au pirimicarbe (famille des carbamates). En ce qui concerne les autres méthodes de lutte potentielles recensées, elles reposaient sur des microorganismes (champignons entomopathogènes), des médiateurs chimiques (issus de composés organiques volatils végétaux), la génétique avec le recours à des variétés résistantes au virus de la jaunisse de la betterave BWYV ou aux pucerons des espèces *M. persicae* ou *A. fabae*, les méthodes culturales (bandes fleuries, réduction de la profondeur et de la fréquence des labours, paillage naturel, cultures intercalaires, etc.) et la stimulation des défenses des plantes (apports d'azote et de soufre, biostimulants, etc.). Aucune méthode physique n'a été recensée.

Sur cette base, aucune dérogation interministérielle n'avait été octroyée pour l'usage de néonicotinoïdes vis-à-vis des pucerons de la betterave.

En 2020, la forte pression de populations de pucerons et la forte pression parasitaire qui en a résulté a conduit à l'octroi d'une dérogation au titre de l'article 53 du règlement 1107/2009 pour autoriser 3 applications foliaires d'un produit insecticide à base de spirotétramate. Cette dérogation permet au besoin de compléter les traitements déjà autorisés, notamment le recours à un produit à base de flonicamide, rendu possible dès le stade 2 feuilles par décision de l'Anses du 29 avril 2020¹.

Pour faire face à une telle situation phytosanitaire en 2021 et pour répondre à la demande des acteurs de la filière de la betterave sucrière, une loi² a été votée le 14 décembre 2020 pour permettre l'utilisation dérogatoire des produits phytopharmaceutiques à base de néonicotinoïdes pour la culture de betterave. Les semences de betterave traitées avec des produits phytopharmaceutiques à base de néonicotinoïdes (imidaclopride ou thiaméthoxame) pourront être utilisées, après reconduction de la dérogation, jusqu'en 2023 au plus tard.

1.2 Objet de la saisine

Afin d'anticiper au mieux les difficultés qui pourraient être de nouveau rencontrées en 2021 et accélérer les travaux de recherche et développement dans les directions les plus prometteuses, il est demandé d'actualiser le bilan comparatif effectué en 2018 sur la base des options actuellement disponibles aux niveaux national et européen.

A cette fin, il est demandé de :

- 1) Faire une synthèse des recherches en cours et des données scientifiques et techniques disponibles dans les différents domaines (pour développer des méthodes

¹ L'Anses a été saisie sur le sujet par la DGAL en 2020

² Loi n°2020-1578 relative aux conditions de mise sur le marché de certains produits phytopharmaceutiques en cas de danger sanitaire pour les betteraves sucrières

- de lutte chimiques, physiques, génétiques, avec des microorganismes ou des macroorganismes, des pratiques culturales, des médiateurs chimiques ou des stimulateurs de défenses des plantes) ;
- 2) Faire des recommandations sur les besoins et les perspectives à court et moyen terme.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

2.1. Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Traitements sur betterave alternatifs aux néonicotinoïdes », rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Risques biologiques pour la santé des végétaux » l'instruction de cette saisine.

La méthodologie mise en œuvre pour la présente l'expertise s'est appuyée sur celle développée lors de la précédente expertise relative à l'évaluation de l'efficacité des méthodes de lutte alternatives aux produits à base de néonicotinoïdes dont le rapport a été publié en 2018. Par ailleurs, le temps imparti pour la réalisation de cette nouvelle expertise et l'ampleur du sujet en termes d'informations à analyser, ont conduit à faire le choix d'exclure du champ de l'expertise l'évaluation de l'impact des alternatives tant pour la santé humaine que pour l'environnement, et notamment vis-a-vis des insectes pollinisateurs.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES pour discussion, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Les travaux d'expertise ont été présentés au CES le 18/11/2020, le 26/01/2021, le 16/03/2021 et le 18/05/2021.

Le rapport produit par le groupe de travail (GT) tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

2.2. Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

Le groupe de travail a basé son évaluation de l'efficacité des traitements alternatifs aux néonicotinoïdes sur une analyse approfondie de la littérature scientifique et également en auditionnant 14 organismes ou entreprises.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ET DU GT

3.1. Méthodologie mise en œuvre par le groupe de travail

3.1.1. Méthodologie mise en œuvre pour la recherche bibliographique

L'objectif visé est d'assurer une traçabilité et une répétabilité de la recherche documentaire réalisée par chaque expert. La recherche bibliographique est réalisée séparément pour chacune des 8 familles de méthodes de lutte identifiées par le GT. Elle est assurée par chaque sous-groupe (2 à 3 experts) constitué à l'occasion.

Le principe de la revue bibliographique approfondie a été adopté par le GT et repose sur i) l'application d'équations de mots-clés (définis par le sous-groupe), si besoin, est dans plusieurs bases de données (Scopus et Web of Science – WoS) et de Google Scholar et ii) l'utilisation de critères d'inclusion et d'exclusion.

La revue bibliographique s'est appuyée sur la démarche PICO dont l'objet est de définir clairement le périmètre de la recherche bibliographique. Le sens de l'acronyme PICO est donné :

- « P » pour la population sur laquelle on cherche à observer un paramètre ou pour laquelle on cherche à trouver une information (ex : betterave) ;
- « I » pour l'intervention sur l'organisme nuisible à laquelle est sujette la population cible (ex : traitement contre le puceron ou le virus responsable de la jaunisse) ;
- « C » pour le comparateur, c'est-à-dire le paramètre choisi pour comparer différentes situations (traitement de référence, traitement de substitution et absence de traitement ; ex : méthode de lutte basée sur des néonicotinoïdes vs méthode de lutte alternative chimique ou non chimique) ;
- « O » pour le résultat de la recherche bibliographique (outcome ; ex : publications portant sur l'efficacité d'une méthode de lutte donnée pour protéger la betterave des attaques de pucerons).

Il est précisé que le périmètre de la recherche bibliographique a pu évoluer sur le choix de la population étudiée, notamment en considérant d'autres cultures concernées par les attaques des pucerons *M. persicae* et *A. fabae*.

Les critères d'exclusion dont l'objectif est de sélectionner les articles pertinents et de qualité scientifique suffisante sont ensuite détaillés. Ils se positionnent sur 2 niveaux de lecture. Les critères d'exclusion sont appliqués sur la base du :

1. Titre et résumé et des mots-clés (critères de pertinence) :
 - Absence de référence explicite aux pucerons et/ou virus associés (I de PICO)
 - Absence de référence explicite à la méthode de lutte ciblée (C de PICO)
2. Contenu de l'article (critères de qualité scientifique)

L'appréciation de la confiance dans l'évaluation de l'efficacité de la méthode de lutte (O de PICO) repose sur des critères de qualité scientifique. Ont donc été exclus les articles présentant :

- Une description insuffisante de la méthode ou du protocole
- Une absence de témoins
- L'existence de facteurs confondants
- Une méthode d'analyse statistique des données inadéquate

3.1.2. Méthodologie générale d'évaluation des méthodes de lutte alternatives

Regroupement des méthodes de lutte en familles :

Une approche générique a été adoptée.

Les 8 familles de méthodes de lutte évaluées par le GT comme alternatives aux néonicotinoïdes sont, pour rappel :

1. Les produits **phytopharmaceutiques à propriétés insecticides** (PPP)
2. La lutte biologique à l'aide de **microorganismes**
3. La lutte biologique à l'aide de **macroorganismes**
4. La lutte biologique à l'aide de **médiateurs chimiques**
5. La lutte par des **méthodes physiques**
6. La lutte par une approche **génétique**
7. Les méthodes de lutte **culturale**
8. La lutte physiologique par **stimulation des défenses des plantes**

Caractérisation de la performance des méthodes de lutte :

La performance des méthodes de lutte a été appréciée selon plusieurs critères, chacun étant ensuite coté selon une échelle semi-quantitative de 1 (niveau faible) à 3 (niveau élevé).

Définition des critères et règles de notation :

Le GT a défini pour chaque méthode de lutte une règle de notation *a priori* sur la base de quatre critères, afin d'aboutir à une évaluation par les experts qui soit reproductible et objective pour l'ensemble des usages considérés.

La performance des méthodes de lutte a ainsi été appréciée selon les critères suivants :

Magnitude de l'efficacité d'une méthode de lutte (critère n°1) : note comprise entre 1 et 3

La magnitude de l'efficacité (synonyme de « niveau » d'efficacité) correspond à la capacité de la méthode à réduire l'intensité et/ou la fréquence des dégâts infligés par les pucerons à la culture ciblée.

- 1 = efficacité potentielle nécessitant des études complémentaires pour être confirmée
- 2 = efficacité prouvée mais insuffisante à elle seule (nécessitant l'usage d'autres méthodes de lutte complémentaires)
- 3 = avérée de la méthode en elle-même

Durabilité de l'efficacité d'une méthode de lutte (critère n°2) : note comprise entre 1 et 3

La durabilité de l'efficacité traduit le risque d'apparition de résistance ou de contournement du mécanisme de régulation des pucerons.

- 1 = risque élevé d'apparition de résistance
- 2 = risque modéré
- 3 = risque faible

Opérationnalité d'une méthode de lutte (critère n°3) : note comprise entre 1 et 3

L'opérationnalité exprime le niveau de disponibilité d'une technique en fonction de sa mise au point, de sa validation au champ et éventuellement de son autorisation de mise sur le

marché (AMM) ou de son inscription aux Catalogues des variétés dans le cas de la lutte génétique.

1 = stade recherche et développement

2 = en application quelque part dans le monde, et en France sur d'autres usages

3 = ayant une AMM pour l'usage « Pucerons de la betterave » en France, ou ayant reçu des dérogations pour cet usage.

Praticité d'une méthode de lutte (critère n°4) : note comprise entre 1 et 3

La praticité décrit la facilité de mise en œuvre de la méthode, en fonction notamment du matériel, du nombre de traitements ou d'interventions, du temps de travail et de la technicité nécessaires.

1 = difficile

2 = moyen

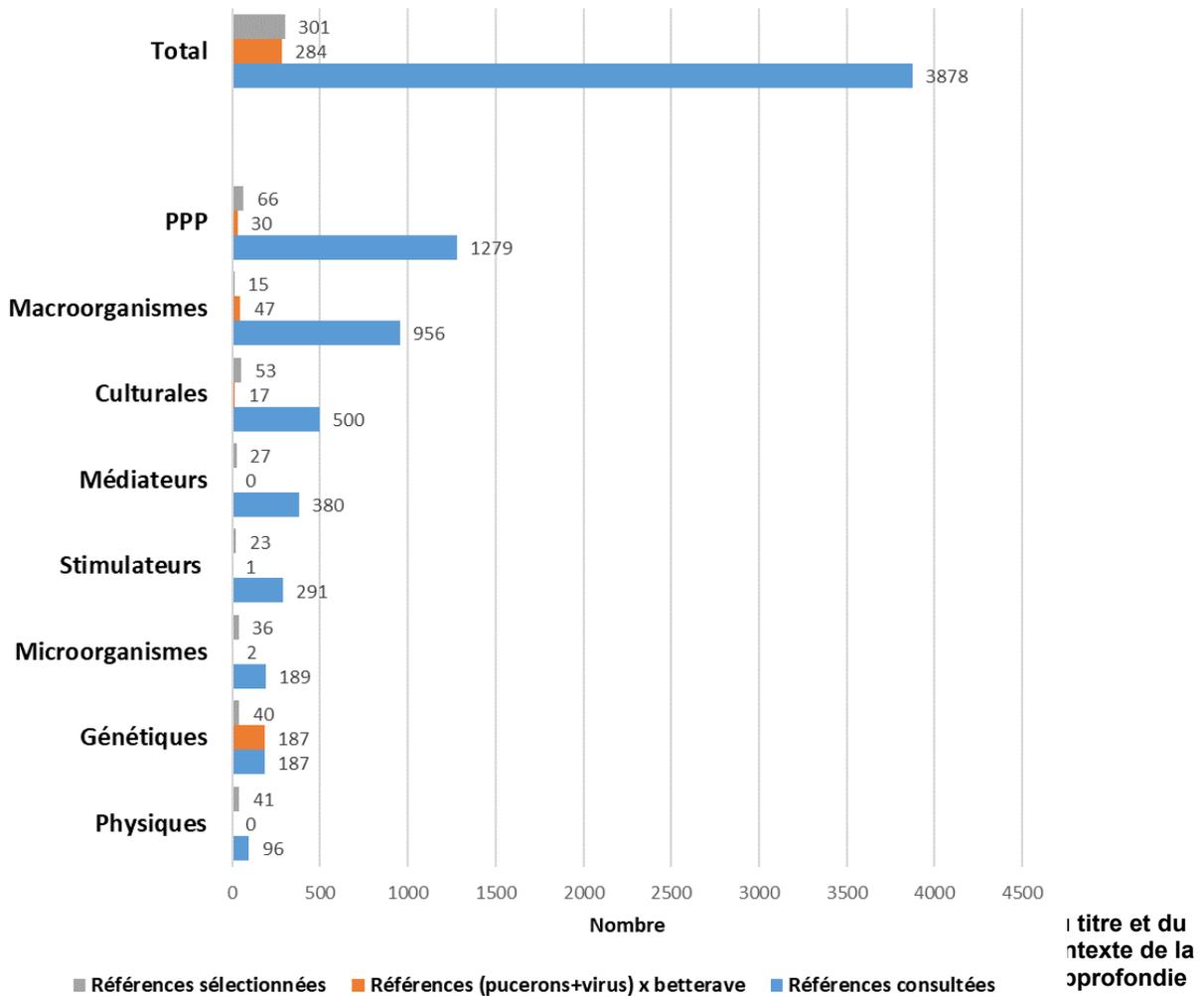
3 = facile

3.2. Synthèse des résultats de l'évaluation des méthodes de lutte alternatives aux néonicotinoïdes contre les pucerons de la betterave

3.2.1. Etendue du champ d'investigation des produits ou méthodes étudiés pour les 8 familles de méthodes alternatives

Nombre de publications scientifiques consultées :

Au total, 3878 références bibliographiques ont été consultées (Fig.1) pour étayer l'analyse de l'efficacité des 8 familles de méthodes alternatives pour la lutte contre les pucerons de la betterave. Parmi celles-ci, seulement 7 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. Exception faite de la méthode de lutte génétique où la recherche bibliographique n'a concerné que la betterave (car il s'agissait d'identifier des perspectives de résistance chez la plante cible), il a été nécessaire d'élargir la recherche bibliographique aux méthodes de lutte contre *Myzus persicae* et/ou *Aphis fabae* dans d'autres cultures ou d'autres contextes. *In fine*, les conclusions de ce rapport s'appuient donc sur 301 publications scientifiques (citées en annexe).



le titre et du
contenu de la
page

Nombre d'options ou produits étudiés par famille de méthodes de lutte alternative :

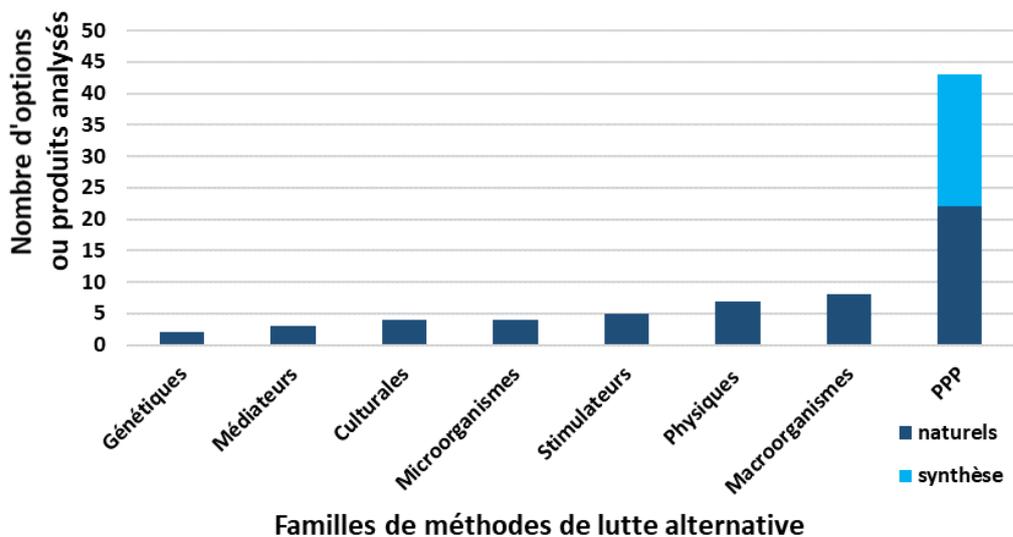


Figure 2 : Nombre d'options ou produits analysés par famille de méthodes alternatives

En outre, le parti a été pris de différencier *a posteriori* les substances actives (SA) des produits phytopharmaceutiques (PPP) de synthèse et les substances d'origine naturelle, c'est-à-dire extraits de plantes ou de microorganismes, comme dans l'étude ANSES précédente sur les alternatives aux néonicotinoïdes en France (ANSES 2018³). L'objectif est de distinguer celles pouvant à terme être utilisées en agriculture biologique ou moins susceptibles de nuire à la santé des hommes et de l'environnement.

Au total, **76 options ou produits** ont été étudiés comme alternatives possibles aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons vecteurs de la jaunisse de la betterave (ou leurs virus associés), avec une répartition hétérogène puisque les produits phytopharmaceutiques alternatifs en constituent la majeure partie (43, dont 21 de synthèse et 22 d'origine naturelle).

3.2.2. Analyse des notes moyennes de critères pour les différentes familles de méthodes de lutte alternative

Le groupe de travail a souhaité analyser globalement, comme lors de la première expertise, les méthodes alternatives par famille de méthode de lutte évaluées selon les 4 critères de performance (efficacité, durabilité, opérationnalité, praticité), en calculant la moyenne des notes attribuées par méthode de lutte, pour chacun des critères. Ce tableau de synthèse (Cf. Tableau 1) reflète un résultat moyenné par famille de méthode mais ne préjuge pas de la possibilité que certaines méthodes de lutte particulières, parmi ces familles, même mal positionnées en moyenne, puissent représenter des alternatives substituables aux néonicotinoïdes (comme en attestent les gammes de variation des notes de critères).

³ Saisine n°2016-SA-0057 : Tome 1 – Identification des alternatives aux usages autorisés des néonicotinoïdes

Tableau 1 : Tableau des moyennes et des gammes de variation de ces moyennes ([min-max]) pour les 4 critères d'évaluation et les 9 familles de méthodes de lutte alternative. Le code couleur va de rouge pour les notes basses (entre 1 et 1,8), orange pour les notes moyennes (1,9 à 2,1) à vert pour les notes les plus élevées (2,2 à 3).

Alternatives	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
Médiateurs	1,0 [1]	3,0 [3]	1,0 [1]	1,0 [1]
Physiques	1,3 [1-2]	3,0 [3]	2,4 [2-3]	2,0 [1-3]
Stimulateurs	1,4 [1-2]	3,0 [3]	2,0 [2]	3,0 [3]
Génétiques	1,5 [1-2]	2,5 [2-3]	2,0 [2]	3,0 [3]
Microorganismes	1,5 [1-2]	3,0 [3]	1,8 [1-2]	2,0 [2]
PPP_naturels	1,9 [1-3]	2,9 [2-3]	1,2 [1-3]	2,2 [2-3]
Macroorganismes	1,9 [1-3]	3,0 [3]	1,3 [1-2]	1,4 [1-2]
Culturelles	2,0 [2]	3,0 [3]	2,5 [2-3]	1,8 [1-3]
PPP_synthèse	2,6 [2-3]	1,9 [1-3]	1,9 [1-3]	2,5 [2-3]

À l'échelle des familles de méthodes alternatives, les notes moyennes de critères permettent de distinguer 5 groupes :

- (1) Les **produits phytopharmaceutiques de synthèse** comme étant en moyenne les plus efficaces mais avec la note de durabilité la plus basse, soulignant le risque important d'évolution de résistance chez les espèces de pucerons concernées. Leur praticité est bonne (pulvérisation) mais leur opérationnalité est modérée car leur autorisation de mise sur le marché nécessite la constitution d'un lourd dossier d'homologation. A noter qu'un certain nombre de produits listés ayant déjà des autorisations sur d'autres usages auraient besoin à court terme d'une dérogation.
- (2) Les **méthodes culturelles** présentent la deuxième meilleure efficacité moyenne, avec une durabilité maximale, une bonne opérationnalité moyenne (la plupart ayant déjà été testées sur d'autres cultures que la betterave) et une praticité faible à modérée du fait de la nécessité de modifier le système de culture et/ou les itinéraires techniques.
- (3) Les **produits phytosanitaires d'origine naturelle, les macroorganismes et les variétés résistantes aux virus (lutte génétique)** présentent un profil similaire aux méthodes culturelles avec en moyenne des efficacités correctes, une très bonne durabilité mais une note moyenne d'opérationnalité faible car nécessitant de plus amples recherches ou des ajustements techniques pour leur application.
- (4) Les **microorganismes, les variétés résistantes aux pucerons, les stimulateurs de défenses des plantes, les méthodes physiques** ont des notes d'efficacité moyenne comparables entre eux et modérées, une bonne durabilité, une note moyenne d'opérationnalité assez bonne et une bonne praticité.
- (5) La lutte par l'utilisation de **médiateurs chimiques** se distingue par la plus faible moyenne d'efficacité, d'opérationnalité et de praticité.

3.2.3. Identification de méthodes alternatives substituables à court terme pour pallier le retrait des néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave :

L'identification des **méthodes alternatives** de lutte **substituables aux néonicotinoïdes**, a été fondée sur les notes de critères d'efficacité, d'opérationnalité et de durabilité.

Les méthodes alternatives retenues disposaient d'une note d'efficacité de 3 (très bonne efficacité en usage seul) ou 2 (bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires) et d'une note de durabilité de 3 (risque faible à nul d'apparition de résistance de la part des insectes ciblés) ou 2 (risque modéré d'apparition de résistance). Cette exigence de durabilité explique l'absence dans notre liste des associations de produits tau-fluvalinate & pirimicarbe et lambda-cyhalothrine & pirimicarbe, qui disposent pourtant d'une AMM pour l'usage « pucerons de la betterave » mais dont l'application répétée a provoqué l'apparition de résistances notables chez ces pucerons (note de durabilité de 1).

Pour identifier celles des méthodes alternatives substituables qui peuvent être mises en œuvre à **court terme**, nous avons choisi un seuil de note d'opérationnalité de 3 (d'ores et déjà disponible en France, notamment appliquée sur d'autres cultures).

Tableau 2 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à court terme.

Famille de méthode alternative	Solution ou méthode	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
PPP_synthèse	Fonicamide	3	2	3	3
PPP_synthèse	Spirotétramate	2	3	3	3
Culturales	Paillage ou mulching	2	3	3	2
Culturales	Fertilisation organique	2	3	3	3

Un total de 4 méthodes ou produits apparaissent suffisamment efficaces, durables, opérationnelles et pratiques pour être rapidement substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave :

- Une substance active de la famille des pyridines-carboxamides, le **fonicamide**, entrant dans la composition d'un produit phytopharmaceutique de synthèse ;
- Une substance active de la famille des kétoénols, relativement efficace, le **spirotétramate**, qui entre dans la composition d'un produit phytopharmaceutique qui a déjà été autorisé par dérogation sur culture de betterave sucrière ;
- Deux méthodes culturales n'impliquant pas de modification drastique du système de culture de la betterave à sucre car fondées sur la modification du mode de fertilisation ou protection des sols : le **paillage**, d'une part, et la **fertilisation organique** à l'aide de vermicompost, d'autre part.

3.2.4. Identification de méthodes alternatives substituables à moyen terme pour remplacer les néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave :

L'identification des **méthodes alternatives** de lutte **substituables à l'usage des néonicotinoïdes**, a été fondée sur les notes de critères d'efficacité et de durabilité.

Les méthodes alternatives retenues disposaient d'une note d'efficacité de 3 (très bonne efficacité en usage seul) ou 2 (bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires) et d'une note de durabilité de 3 (risque faible à nul d'apparition de résistance de la part des insectes ciblés) ou 2 (risque modéré d'apparition de résistance).

Pour identifier les méthodes alternatives substituables qui peuvent être mise en œuvre à **moyen terme**, nous avons retenu celles dont la note d'opérationnalité est de 2, c'est-à-dire disponibles ailleurs qu'en France mais nécessitant des études complémentaires ou une homologation pour leur application sur betterave sucrière en France.

Au total, **18 méthodes ou produits alternatifs substituables** aux néonicotinoïdes à **moyen terme** dans la lutte contre les pucerons de la betterave ont été identifiés :

- **4 produits phytopharmaceutiques de synthèse** à pulvériser
- **3 produits phytopharmaceutiques d'origine naturelle** à pulvériser
- **2 champignons entomopathogènes** à pulvériser sous forme de spores, *Beauveria bassiana* et *Lecanicillium muscarium* ;
- **2 macroorganismes** à lâcher en masse : le prédateur *Chrysoperla carnea* (en particulier sous forme d'œufs) et un parasitoïde Aphidiinae appartenant au genre *Aphidius* ;
- **2 types d'huiles**, organique et minérale, à pulvériser ;
- **2 stimulateurs de défenses des plantes** : l'huile de paraffine et l'Acibenzolar-S-Methyl ;
- **1 méthode génétique** fondée sur le développement de variétés de betteraves résistantes aux virus de la jaunisse ;
- **2 types de méthodes culturales** reposant sur des associations végétales favorisant les effets d'évitement de la plante hôte (betterave) ou le renforcement du contrôle biologique des pucerons par les ennemis naturels (auxiliaires de culture) présents localement.

Tableau 3 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à moyen terme

Famille de méthode Alternative	Solution ou méthode	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
PPP_synthèse	Indoxacarbe	3	2	2	3
PPP_synthèse	Abamectine	2	3	2	3
PPP_synthèse	Benzoate d'émamectine	2	2	2	3
PPP_synthèse	Cyantranilprole	2	2	2	3
PPP_naturels	Huile essentielle d'orange	2	3	2	3
PPP_naturels	Huile de neem / azadirachtine	2	3	2	3
PPP_naturels	Spinosad	2	2	2	2
Microorganismes	<i>Beauveria bassiana</i>	2	3	2	2
Microorganismes	<i>Lecanicillium muscarium</i>	2	3	2	2
Macroorganismes	<i>Aphidius sp.</i>	3	3	2	2
Macroorganismes	<i>Chrysoperla carnea</i>	2	3	2	2
Physiques	Huile minérale	2	3	2	3
Physiques	Huile organique	2	3	2	3
Stimulateurs	Acibenzolar-S-Methyl (ASM)	2	3	2	3
Stimulateurs	Huile de paraffine	2	3	2	3
Génétiques	Variétés résistantes aux virus de jaunisse	2	3	2	3
Culturales	Associations végétales à effet "bottom-up"	2	3	2	1
Culturales	Associations végétales à effet "top-down"	2	3	2	1

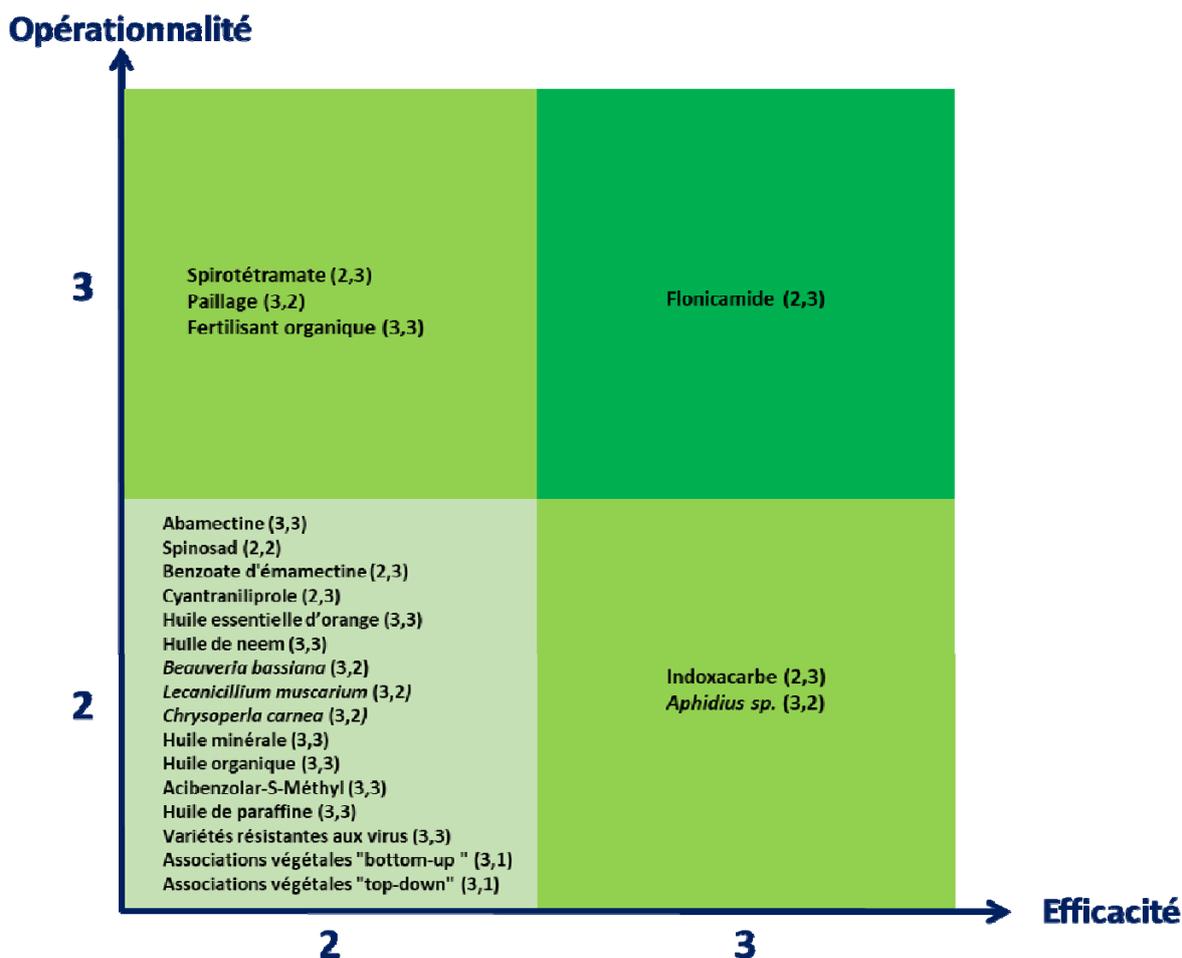


Figure 3 : Position des 22 méthodes ou produits alternatifs substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave en fonction de leur efficacité (2 : bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires, 3 : très bonne efficacité en usage seul) et leur degré d'opérationnalité (2 : disponibles ailleurs qu'en France mais nécessitant des études complémentaires ou une homologation pour leur application sur betterave sucrière en France, donc substituables à moyen terme, 3 : d'ores et déjà disponible en France, notamment appliquée sur d'autres cultures, donc substituable à court terme).

Les chiffres entre parenthèses sont les notes de durabilité (en termes de risque d'apparition de résistance) et de praticité d'emploi.

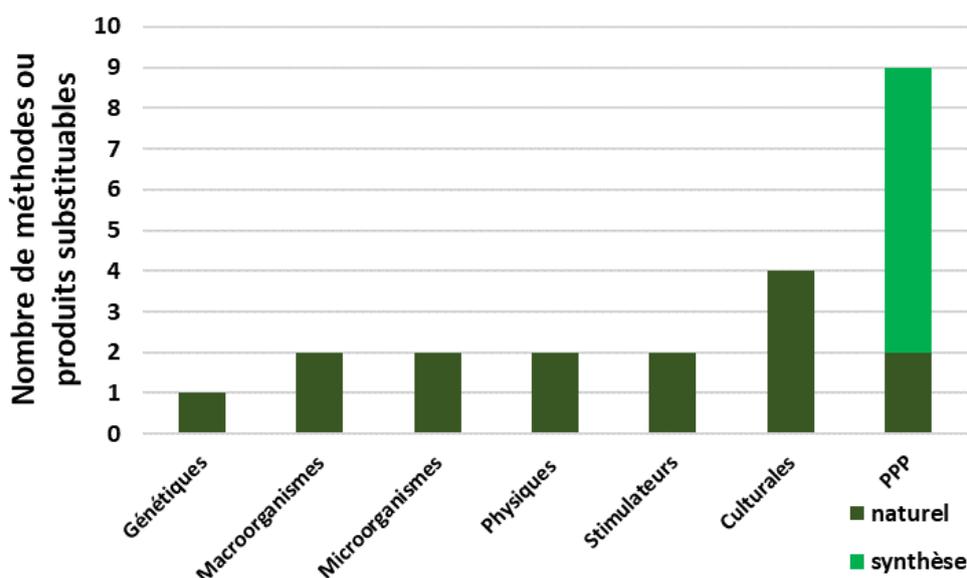


Figure 4 : Nombre de solutions ou méthodes substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave par famille de méthodes ou produits alternatifs (pour un total de 22 solutions alternatives identifiées substituables aux néonicotinoïdes).

3.3. Discussion : Bilan et Perspectives

L'analyse approfondie de la littérature scientifique par le groupe de travail a permis de mettre en évidence **d'importants manques de recherches sur la lutte contre les pucerons de la betterave**. Au total, moins de 10 % des publications sélectionnées sur les méthodes de lutte curative ou préventive contre les pucerons vecteurs de jaunisse *M. persicae* et *A. fabae*, ont été réalisées sur culture de betterave. Ces lacunes tiennent sans doute à la généralisation de l'usage des néonicotinoïdes à partir des années 1990, dont l'efficacité importante en termes de réduction des infestations de pucerons a engendré un désintérêt pour les autres alternatives de lutte. En raison de la toxicité des néonicotinoïdes pour les organismes non cibles et de leur interdiction depuis 2018 bien que bénéficiant d'une dérogation temporaire pour le traitement des semences de betterave sucrière, il convient donc de renforcer les efforts entrepris pour développer des méthodes alternatives d'efficacité analogue et de moindre toxicité pour les organismes non cibles.

Ce rapport montre qu'il existe une large gamme d'options de substitution aux néonicotinoïdes parmi les 8 familles de méthodes de lutte analysées, identifiées sur la base d'une efficacité reconnue contre les deux principaux pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave, ou contre les virus eux-mêmes. **Le principal défi demeure cependant celui de l'adaptation de ces méthodes au cas particulier de la culture de la betterave sucrière dans ses bassins de production en France.**

En amont de l'application des méthodes de lutte alternative, tant l'examen de la littérature scientifique et technique que l'audition des professionnels de la filière ont conduit à identifier **un important besoin de recherche et développement sur les connaissances de base pour l'aide à la décision du traitement phytosanitaire**, en ce qui concerne l'épidémiologie des espèces de pucerons vecteurs (notamment en fonction des conditions climatiques), la caractérisation au champ de la diversité des virus vectorisés et de la charge virale ou encore les relations entre les niveaux d'infestation, le risque de transmission et les

dégâts au champ. Il apparaît en effet nécessaire, pour améliorer l'efficacité des traitements phytosanitaires sur les premières infestations au printemps et réduire les effets indésirables pour la santé de l'environnement et des personnes (notamment des opérateurs), de mettre au point des modèles prédictifs du risque de dégâts de jaunisse afin de limiter les applications dans l'espace et le temps.

Pour plusieurs des méthodes alternatives identifiées dans ce rapport, des défis en termes d'efficacité d'épandage ont été mis en évidence, afin notamment d'améliorer l'efficacité des pulvérisations par rapport aux insectes ciblés. En effet, les pucerons sont la plupart du temps localisés sur la face inférieure des feuilles de betterave, ce qui complique une application directe. Pour l'ensemble des produits ayant une action par contact (hors produits systémiques ou à effet translaminaire), il conviendrait donc de **mobiliser les organismes de recherche en machinisme agricole afin d'améliorer les systèmes de pulvérisation**.

Les points clés sur les intérêts et limites des 8 familles de méthodes alternatives ainsi que les perspectives de recherche et développement sont détaillées dans la partie centrale du rapport (présentant le résultat de l'analyse de la recherche bibliographique et des informations recueillies lors des auditions pour chaque famille de méthodes de lutte) dont les principaux messages sont rappelés ici, selon leur degré d'efficacité et d'opérationnalité :

Les **produits phytopharmaceutiques de synthèse** se présentent comme l'alternative avec la meilleure efficacité au champ, certains sont d'ores et déjà autorisés (produit à base de flonicamide bénéficiant d'une AMM ou le produit à base de spirotétramate ayant bénéficié d'une dérogation). Ils sont de plus facilement utilisables (par pulvérisation). Il convient cependant de rappeler le risque d'évolution de résistance chez les pucerons, qui impose un usage raisonné dans le temps et l'espace, et de souligner l'intérêt de la combinaison ou de l'alternance d'application de différentes substances ayant des modes et sites d'action différents. Il faudrait également évaluer les risques pour la santé humaine et pour l'environnement dans les conditions d'utilisation de ces substances actives en culture de betterave sucrière.

Des **produits phytopharmaceutiques d'origine naturelle** avec une réelle efficacité au champ ont été identifiés (ex. huile de neem, huile essentielle d'orange) et pourraient être rapidement mis à la disposition des agriculteurs. Ils présentent sans doute une moindre rémanence et peut-être un moindre risque pour l'environnement que leurs homologues de synthèse mais ceci demande à être vérifié (par l'exemple l'huile de neem est considérée comme toxique pour les organismes aquatiques). Il est également nécessaire d'en préciser les conditions d'application sur betterave (formulation, dose, rémanence, etc.).

Les **méthodes culturales** apparaissent comme la troisième option la plus prometteuse, combinant une bonne efficacité, une bonne durabilité a priori et pouvant être déployées sans besoin d'AMM. À court terme, elles reposent sur des modifications de la protection des sols et de la fertilisation. À moyen terme, elles supposent la combinaison d'une culture de la betterave avec des plantes de services, réduisant l'accès à la plante hôte ou favorisant l'action des ennemis naturels (auxiliaires des cultures). Leur déploiement nécessite cependant une profonde modification du système de culture, à l'échelle de la parcelle ou du paysage. Des études techniques (avec des « expérimentations – systèmes » notamment) et socio-économiques doivent être entreprises pour permettre leur développement, ce qui nécessitera sans doute plusieurs années.

Des **microorganismes** (champignons ou bactéries entomopathogènes) et des **macroorganismes** (prédateurs et parasitoïdes) ayant une bonne efficacité contre les pucerons ont également été identifiés. Des produits à base de *Lecanicillium muscarium* déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. Les principaux freins à leur application se situent au niveau de la production de masse (en termes techniques et économiques) et de leur application au champ (mode de distribution et dose efficace). Il convient également d'en vérifier la toxicité pour l'environnement et la santé humaine.

Le déploiement de **variétés de betterave sucrière résistantes aux virus** de la jaunisse (plus qu'aux pucerons vecteurs) semble une option très prometteuse, car de nombreux gènes de résistance ont récemment été identifiés. Cette méthode aurait de plus l'avantage de l'efficacité et de la facilité de mise en œuvre, sans impact négatif sur l'environnement. Des obstacles doivent cependant être rapidement levés pour permettre l'introduction de ces gènes de résistance dans des variétés commerciales, notamment en changeant de stratégie de croisements pour bénéficier des ressources génétiques (germoplasme-source) étendues aux espèces sauvages ou variétés anciennes plus riches en gènes de résistance.

L'emploi **d'huiles minérales** (notamment l'huile de paraffine) et **organiques** (ex. huiles végétales) serait aussi à considérer sérieusement car leur emploi est aisé et leur efficacité, combinant différents effets (décapant, dessiccation, asphyxie, parfois élicitation de défenses des plantes), est avérée. Des produits à base d'huiles sont déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages et pourraient être rapidement mobilisables. Ici encore resterait à déterminer les conditions d'application au champ (mode de pulvérisation et dose efficace).

Des études récentes ont identifié des **stimulateurs de défenses des plantes** qui apparaissent efficaces dans les essais en cours, aussi bien contre les pucerons que contre les virus. Des produits à base d'une de ces substances actives (acibenzolar-S-méthyl ou ASM) bénéficient déjà d'une AMM pour d'autres usages et devraient donc être étudiés en priorité en vue de l'extension de leur usage à la culture de betterave.

En revanche, il ne semble pas que les médiateurs chimiques (attractifs ou répulsifs) soient assez efficaces au champ contre les pucerons pour justifier de plus amples études.

Enfin, la plupart des solutions alternatives considérées comme substituables aux néonicotinoïdes ont des efficacités correctes mais la plupart du temps probablement insuffisantes en utilisation seule pour réduire les niveaux de dégâts sous le seuil d'acceptabilité économique. **Il sera donc indispensable de tester des combinaisons de plusieurs de ces méthodes de lutte dans une approche de lutte intégrée permettant d'atteindre une efficacité suffisante et durable.**

3.4. Conclusions du groupe de travail

Après avoir analysé les connaissances scientifiques disponibles sur les méthodes de lutte contre les pucerons de la betterave et leurs virus, le groupe de travail est en mesure d'actualiser les conclusions du précédent rapport de l'ANSES (Risques et bénéfices relatifs des alternatives aux produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes, 2018) en identifiant **des solutions alternatives substituables aux néonicotinoïdes, dans le**

cadre de la lutte contre la jaunisse de la betterave, transmise par les espèces de pucerons *Aphis fabae* et *Myzus persicae*.

Dans son rapport de 2018, l'ANSES avait proposé l'usage de produits phytopharmaceutiques de synthèse jugés efficaces et immédiatement disponibles. L'association de la lambda-cyhalothrine et du pirimicarbe avait été proposée, tout en soulignant le risque d'apparition de résistance. Cette résistance a par la suite été effectivement observée sur le terrain.

Aujourd'hui encore, le groupe de travail propose **en solution de remplacement à court terme : deux produits phytopharmaceutiques de synthèse, le flonicamide et le spirotétramate. Cependant, les experts émettent à nouveau le même message de précaution sur la durabilité des produits phytopharmaceutiques**, tant les risques d'apparition de populations résistantes sont grands à court terme dans le cas d'applications répétées à grande échelle.

Une différence importante avec le rapport précédent réside cependant dans l'identification de **20 solutions alternatives supplémentaires, de nature variée car appartenant à 7 familles de méthodes** de lutte différentes alors que seuls des produits phytopharmaceutiques de synthèse pour l'usage pucerons sur betterave avaient été identifiés lors de la première expertise, offrant donc de nombreuses possibilités de développement pour la culture de la betterave. Cinq de ces méthodes de lutte ne font pas appel à des produits de synthèse (lutte culturale, lutte biologique à l'aide de micro ou macroorganismes, extraits de plantes, sélection variétale).

Cette émergence d'options nouvelles est sans conteste le fruit d'une activité scientifique qu'il convient de soutenir à long terme. En particulier le groupe de travail **suggère 3 axes de recherche et développement :**

1. En amont de l'application des méthodes de lutte elles-mêmes, il est très important d'améliorer **l'épidémiosurveillance** des populations de pucerons et des virus associées dans les cultures de betterave, de développer des **modèles prédictifs** de leur pullulation pour mieux cibler les lieux et dates d'intervention et de développer des **agroéquipements** permettant d'optimiser la qualité d'application des produits (notamment pour atteindre la face inférieure des feuilles).
2. Les 22 méthodes de lutte alternatives identifiées dans ce rapport offrent les meilleures perspectives d'efficacité et de disponibilité pour les agriculteurs dans les prochaines années. L'effort de recherche et développement devrait être surtout concentré sur **la sélection génétique pour la résistance de la betterave aux virus de la jaunisse et sur l'adaptation ou le transfert des autres solutions identifiées sur d'autres cultures, au cas de la betterave sucrière** (à l'exception du flonicamide dont le produit dispose déjà d'une AMM pour un usage sur betterave). Un travail particulier, pour les alternatives se traduisant par l'application d'un produit, devra être fait sur les doses, les fréquences et la répartition spatiale des applications au champ, selon les principes de l'agriculture de précision.
3. Au-delà de l'étude au cas par cas, compte tenu de l'efficacité relative de chaque méthode mais aussi de leur complémentarité, il apparaît judicieux de réfléchir dès maintenant à leur **combinaison dans une approche de lutte intégrée, en les intégrant dans l'itinéraire technique** de la culture de betteraves et **dans la mosaïque paysagère**.

Il n'a pas été possible, dans le temps imparti au groupe de travail, **d'analyser les enjeux socio-économiques** associés aux solutions alternatives à l'usage des néonicotinoïdes sur betterave, ni à leurs **conséquences pour la santé des hommes et de l'environnement**. Il est cependant recommandé que ces différents aspects soient traités dans le cadre de nouveaux travaux d'expertise.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail a été saisie pour identifier, dans un contexte d'autorisations temporaires et dérogatoires d'utilisation de quelques substances actives de la famille des néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave répondant à une nécessité sanitaire, des méthodes ou procédés alternatifs substituables à court et moyen termes, et formuler les recommandations utiles à leur développement puis à leur déploiement.

L'Anses endosse les conclusions du CES « Risques biologiques pour la santé des végétaux ». L'Agence souligne l'intérêt de la mise en œuvre d'une démarche d'analyse approfondie de la littérature scientifique qui a permis, à partir de près de 4000 articles consultés, d'identifier 22 méthodes ou procédés de lutte alternatifs, dont 4 substituables à court terme pour palier le retrait des néonicotinoïdes (dont ceux pour l'usage betterave). L'Anses note que la démarche a nécessité l'élargissement de la recherche bibliographique aux méthodes de lutte contre *Myzus persicae* et/ou *Aphis fabae*, vecteurs du virus responsable de la jaunisse, à d'autres cultures ou d'autres contextes. Ceci traduit un manque de travaux de recherche et développement menés sur les méthodes de lutte curative ou préventive contre ces pucerons sur culture de betterave. Ce manque révèle une fragilité de la filière, par dépendance à une famille unique de moyen de lutte qui n'est plus tenable. L'Agence note une exception pour les travaux, plus nombreux, menés sur l'identification de gènes de résistance contre les pucerons et les virus responsables de la jaunisse.

L'Anses signale également que le temps disponible pour mener la démarche ne lui a pas permis d'inclure dans ce volet d'identification d'alternatives aux néonicotinoïdes, l'impact des solutions efficaces et opérationnelles (à court ou moyen terme) pour la santé humaine et l'environnement. Elle rappelle que les démonstrations afférentes relèvent de la responsabilité de acteurs économiques, en fonction des exigences réglementaires applicables à leur famille. L'Agence sera également attentive, dans ces travaux, à la caractérisation de la durabilité de ces alternatives, eu égard aux risques de développement de résistances.

Les solutions alternatives de natures variées disponibles à court terme (4) et à moyen terme (18) qui ont été identifiées et évaluées substituables aux néonicotinoïdes n'ont vraisemblablement pas le même niveau d'efficacité. La mobilisation de ces méthodes nécessitera, de ce fait, une approche de lutte intégrée pour atteindre une efficacité suffisante.

En complément du déploiement de telles approches intégrées, l'Agence relève enfin l'importance d'améliorer l'analyse quantitative et temporelle des mécanismes d'agression liée aux pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave (dynamique des populations de pucerons, charges virales transmises, ...) pour mieux anticiper les attaques

afin, d'une part, d'accroître l'efficacité des méthodes de lutte et, d'autre part, de minimiser les intrants pour y faire face lorsque la méthode en emploie.

En conséquence, l'Anses recommande qu'un effort de recherche soit porté sur l'épidémiosurveillance et le développement d'outils d'analyse de risque associés.

Dr Roger Genet

MOTS-CLÉS

Néonicotinoïdes, betterave sucrière, *Beta vulgaris*, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, virus, jaunisse, méthodes de lutte, produits phytopharmaceutiques de synthèse et à base de substances naturelles, microorganismes, macroorganismes, médiateurs chimiques, méthodes de lutte physique, méthodes de lutte génétique, méthodes de lutte culturale, stimulateurs de défenses des plantes,

Neonicotinoids, sugar beet, *Beta vulgaris*, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, yellow virus, insecticides, pesticides, biocontrol, microorganisms, predators, parasitoids, , semiochemicals, physical control methods, improved varieties, cultural practices, plant defenses elicitors.

CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2021). Efficacité des traitements alternatifs aux néonicotinoïdes pour lutter contre les pucerons de la betterave. (saisine 2020-SA-0102). Maisons-Alfort : Anses, 132 p.

ANNEXE 1 : SUIVI DES ACTUALISATIONS DE L'AVIS

Date	Page	Description de la modification
26/05/2021	6	La phrase « Parmi celles-ci, seulement 8 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. » est remplacée par la phrase « Parmi celles-ci, seulement 7 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. »
26/05/2021	11	Dans la partie concernant les 18 méthodes ou produits alternatifs substituables aux néonicotinoïdes à moyen terme dans la lutte contre les pucerons de la betterave identifiés, les deux premières lignes : « • 5 produits phytopharmaceutiques de synthèse à pulvériser • 2 produits phytopharmaceutiques d'origine naturelle à pulvériser » sont remplacées par : « • 4 produits phytopharmaceutiques de synthèse à pulvériser • 3 produits phytopharmaceutiques d'origine naturelle à pulvériser »
26/05/2021	11	Dans le tableau 3, la ligne 3 du tableau précédent est déplacée en ligne 7 et dans la colonne « famille de méthode alternative », « PPP_synthèse » est remplacé par « PPP_naturels »
26/05/2021	15	La phrase « Des produits à base de <i>Lecanicillium lecanii</i> déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. » est remplacée par la phrase « Des produits à base de <i>Lecanicillium muscarium</i> déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. »

Efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave

**Saisine « n° 2020-SA-0102 - Efficacité des traitements disponibles pour lutter
contre les pucerons de la betterave »**

RAPPORT d'expertise collective

« Comité d'experts spécialisé Risques biologiques pour la santé des végétaux »

« Groupe de travail Traitements sur betterave alternatifs aux néonicotinoïdes »

Mai 2021

* Annule et remplace le rapport du 25 mai 2021. Les modifications sont tracées dans l'annexe 4.

Citation suggérée

Anses. (2021). Efficacité des traitements alternatifs aux néonicotinoïdes pour lutter contre les pucerons de la betterave. (saisine 2020-SA-0102). Maisons-Alfort : Anses, 132 p.

Mots clés

Néonicotinoïdes, betterave sucrière, *Beta vulgaris*, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, virus, jaunisse, méthodes de lutte, produits phytopharmaceutiques de synthèse et à base de substances naturelles, microorganismes, macroorganismes, médiateurs chimiques, méthodes de lutte physique, méthodes de lutte génétique, méthodes de lutte culturale, stimulateurs de défenses des plantes,

Neonicotinoids, sugar beet, *Beta vulgaris*, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, yellow virus, insecticides, pesticides, biocontrol, microorganisms, predators, parasitoids, , semiochemicals, physical control methods, improved varieties, cultural practices, plant defenses elicitors.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Hervé JACTEL – Entomologie forestière, protection des cultures, biodiversité, analyses multicritère – INRAE

Membres

M. Benoît BARRÈS – Résistance aux pesticides, génétique des populations, écologie et évolution des populations de bioagresseurs – Anses

M. Romain BONAFOS – Entomologie, ravageurs, insectes non cibles, résistances, protection des cultures, méthodes alternatives, effets non intentionnels – Montpellier SupAgro

M. Nicolas DESNEUX – Entomologie, écotoxicologie, lutte intégrée, spécialisation sur les parasitoïdes, écologie des communautés – INRAE

M. Abraham ESCOBAR-GUTIERREZ – Agronomie – INRAE

Mme Myriam SIEGWART – Entomologie, bioinsecticides – INRAE

M. Denis THIERY – Entomologie, écologie, interaction plantes/insectes, gestion des insectes nuisibles pour les plantes, protection des cultures – INRAE

M. François VERHEGGEN – Entomologie, lutte biologique, biologie des insectes, interaction plantes/pathogènes, macroorganismes, protection des cultures – Université de Liège

.....

COMITE D'EXPERTS SPECIALISE

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- Risques biologiques pour la santé des végétaux – 2018/2022

Président

M. Thomas LE BOURGEOIS – Directeur de recherche, CIRAD, UMR botAnique et bioInforMatique de l'Architecture des Plantes

Membres

Mme Marie-Hélène BALESDENT – Directrice de recherche, INRAE de Versailles-Grignon, UR BIOlogie et GEstion des Risques en agriculture

Mme Françoise BINET – Directrice de recherche, CNRS, UMR ECOBIO Rennes

M. Antonio BIONDI – Enseignant-Chercheur, Université de Catagne, Département Agriculture, Alimentation et Environnement, Italie

M. Philippe CASTAGNONE – Directeur de recherche, INRAE PACA, Institut Sophia Agrobiotech

Mme Péninna DEBERDT – Chercheur, CIRAD, UPR HORTSYS

M. Nicolas DESNEUX – Directeur de recherche, INRAE PACA, Institut Sophia Agrobiotech

Mme Marie-Laure DESPREZ-LOUSTAU – Chargée de mission INRAE (Directrice de recherche retraitée)

M. Abraham ESCOBAR-GUTIERREZ – Directeur de recherche, INRAE de Lusignan, UR Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères

M. Laurent GENTZBITTEL – Professeur des Universités, Skolkovo Institute of Science and Technology – Skoltech Moscow

M. Hervé JACTEL – Directeur de recherche, INRAE de Bordeaux, UMR Biodiversité, Gènes & Communautés

M. David MAKOWSKI – Directeur de recherche, INRAE AgroParisTech Paris-Saclay, UMR d'Agronomie

M. Arnaud MONTY – Enseignant-chercheur, Université de Liège - Department BIOSE, Biodiversity and Landscape Unit

Mme Maria NAVAJAS – Directrice de recherche, INRAE Montpellier, UMR CBGP Centre de biologie pour la gestion des populations

M. Xavier NESME – Ingénieur de recherche, INRAE, Centre Auvergne-Rhône Alpes, UMR Écologie microbienne

Mme Marie-Hélène ROBIN – Enseignante/chercheuse, Ecole d'Ingénieurs de Purpan, UMR AGIR

M. Stéphan STEYER – Attaché scientifique, Centre wallon de Recherches Agronomiques, Département Sciences du Vivant, Responsable Virologie Végétale

M. Éric VERDIN – Ingénieur de recherche, INRAE, Centre PACA Avignon, Unité de pathologie végétale

M. François VERHEGGEN – Enseignant-chercheur, Université de Liège - Unité Entomologie fonctionnelle et évolutive

M. Thierry WETZEL – Directeur de recherche, DLR RHEINPFALZ

.....

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

M. Emmanuel GACHET – Coordinateur scientifique – Unité Expertise sur les risques biologiques – Laboratoire de la santé des végétaux

Contribution scientifique

M. Jérôme LAVILLE – Adjoint au Chef de l'Unité des Décisions – Direction des Autorisations de mise sur le marché

M. Patrick LÉBOUCHER – Direction de l'Évaluation des Produits Réglementés, Service des systèmes d'information des produits réglementés

Mme Farida OUADI – Adjointe au Directeur – Direction de l'Évaluation des Produits Réglementés

M. Franck RADET – Évaluateur scientifique – Direction de l'Évaluation des Produits Réglementés, Unité Évaluation de l'Efficacité des Intrants du Végétal

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Organismes de recherche

INRAE

M. Christian HUYGHE – Directeur Scientifique Agriculture INRAE

.....

GEVES - Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes (CTPS)

M. Denis BEGHIN – Secrétaire Technique de la Section « Betteraves et Chicorée industrielle »

Mme Virginie BERTOUX – Secrétaire Générale du CTPS

.....

Instituts techniques

ITB

M. Vincent LAUDINAT – Directeur Général

Mme Fabienne MAUPAS – Directrice Technique et Scientifique

.....

ITAB

Mme Sabine BONNOT – Membre du bureau en charge des dossiers Durabilité-Transitions

.....

Firmes phytopharmaceutiques, de Biocontrôle, d'Obtention de semences et Associations d'Entreprises

CERTIS Europe

M. Gwenaël CHAMPROUX – Directeur Développement France

.....

CORTEVA AGRISCIENCES

M. Antoine ANDRIEUX – Directeur des Affaires Réglementaires

M. Guillaume QUINOT – Expert Technique National pour la betterave

.....

ALPHABIO CONTROL (GROUPE DE SANGOSSE)

M. Guillaume DRUART – Responsable Technique National, vigne, pomme de terre et betterave

Mme Isabelle RETY GUITTON – Directrice R&D et Services Technique et Réglementaire

.....

IBMA France

Mme Céline BARTHET – Présidente

.....

KOPPERT BIOLOGICAL SYSTEMS

M. Frédéric FAVROT – Directeur Général

M. Jonathan GERBORE – Directeur Innovation et Développement

.....

FLORIMOND-DESPREZ

M. Bruno DESPREZ – Président de Florimond Desprez Veuve & Fils

.....

SUMI AGRO

Mme Céline BARTHET – Directrice Développement et Affaires Réglementaires

M. Sébastien BIGA – Directeur Développement

.....

SYNGENTA

M. Léonard BERTHOMIER – Directeur des Affaires Réglementaires

Mme Aurélie BOGERS – Expert Technique National insecticides

M. Xavier CHARON – Directeur Technique et Agriculture Durable

M. Didier LANNOY – Expert Technique National protection de semences

.....

UPL France

Mme Samantha BESSE – Responsable Europe, Développement acaricides, insecticides, nématicides

M. Ludovic CRABOS – Responsable Développement Biostimulants

M. Emilien QUILLIOT – Responsable Technique & Développement

.....

VIVAGRO

M. Maxime LE MOING – Responsable Technique

.....

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	9
Définitions.....	10
Liste des tableaux	11
Liste des figures.....	12
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	13
1.1 Contexte	13
1.2 Objet de la saisine	14
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	14
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts	15
2 Méthodologie mise en œuvre par le groupe de travail.....	16
2.1 Introduction.....	16
2.2 Méthodologie mise en œuvre pour la recherche bibliographique	20
2.3 Méthodologie générale d'évaluation des méthodes de lutte alternatives	22
3 Présentation des résultats de l'évaluation des méthodes de lutte alternatives aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave sucrière	31
3.1 Les produits phytopharmaceutiques à propriétés insecticides (PPP)	31
3.2 Les microorganismes.....	56
3.3 Les macroorganismes.....	62
3.4 Les médiateurs chimiques	68
3.5 Les méthodes physiques	75
3.6 Méthodes génétiques.....	78
3.7 Les méthodes de lutte culturale	82
3.8 Les stimulateurs de défenses des plantes	90
4 Synthèse des résultats de l'évaluation des méthodes de lutte alternatives aux néonicotinoïdes contre les pucerons de la betterave.....	94
4.1 Etendue du champ d'investigation des produits ou méthodes étudiés pour les 8 familles de méthodes alternatives	94
4.2 Analyse des notes moyennes de critères pour les différentes familles de méthodes de lutte alternative (Cf. Annexe 3 pour le détail des notes).....	97
4.3 Identification de méthodes alternatives substituables à court terme pour pallier le retrait des néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave.	98
4.4 Identification de méthodes alternatives substituables à moyen terme pour remplacer les néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave.....	99

5	Discussion : Bilan et Perspectives	103
6	Conclusions du groupe de travail	106
7	Bibliographie	108
7.1	Publications	108
7.2	Normes.....	108
7.3	Législation et réglementation	108
	Annexe 1 : Lettre de saisine	110
	Annexe 2 : Fiches de lecture	112
	Annexe 3 : Matrice d'évaluation des méthodes de lutte	132
	Annexe 4 : Suivi des actualisations du rapport	136

Sigles et abréviations

AMM : autorisation de mise sur le marché

PPP : produit phytopharmaceutique

SDP : stimulateur de défenses des plantes

Définitions

Cultures associées/cultures intercalaires : méthode consistant à associer à une culture principale des plantes d'autres espèces (sans nécessairement qu'elles aient un objectif de production), de façon spatialement alternée à l'échelle du champ. Ce système peut notamment permettre un accroissement de la biodiversité et de la densité d'arthropodes auxiliaires (prédateurs, parasitoïdes) qui serviront alors d'agents de régulation naturelle contre les ravageurs des cultures. Les cultures associées peuvent également émettre des composés olfactifs dans une approche de push & pull associant plantes répulsives (push) et plantes attractives (pull) pour *in fine* éloigner les ravageurs de la culture à protéger.

Espèce multivoltine (ou plurivoltine) : un organisme dont le cycle de vie comporte plusieurs générations par an. Les espèces avec une seule génération par an sont dites mono (ou uni)-voltines.

Intercropping : mélange d'espèces ou de variétés, qui consiste à associer des cultures d'espèce végétales différentes mais toutes d'intérêt agronomique, de façon alternée, à l'échelle du champ (sous-catégorie de cultures associées ou intercalaires).

Kairomone : substance sémiocchimique (molécule ou ensemble de molécules) produite par un être vivant et perçue par des individus hétérosécificiques qui tirent bénéfice de ce signal chimique pour localiser leur proie

Parasitoïde : un organisme (arthropode) qui se développe au stade larvaire sur, ou à l'intérieur d'un autre organisme, son hôte, et qui tue ce dernier à l'issue du développement parasitaire.

Prédateur : un organisme (notamment arthropodes ou vertébrés) qui consomme d'autres organismes pour se développer, se nourrir, ou se reproduire.

Phéromone d'agrégation : molécule (ou ensemble de molécules) produite par un animal et provoquant chez les individus consécificiques qui la perçoivent un comportement d'attraction et d'agrégation.

Phéromone d'alarme : molécule (ou ensemble de molécules) produite par un animal en état de stress et provoquant chez les individus consécificiques qui la perçoivent un comportement de fuite, d'évitement ou d'agression.

Phéromone sexuelle : molécule (ou ensemble de molécules) produite par un animal en condition de reproduction provoquant chez les individus consécificiques qui la perçoivent un comportement d'attraction et d'accouplement.

Plantes de services : plantes installées (ou favorisées) dans les agro-écosystèmes pour apporter des services écosystémiques ; ces plantes peuvent permettre d'accroître la régulation naturelle des ravageurs en favorisant leurs ennemis naturels (par exemple, en apportant des ressources ou des abris pour les ennemis naturels). Elles peuvent également protéger les sols contre l'érosion, améliorer la structure et la fertilité des sols, et/ou apporter des ressources aux pollinisateurs.

Translaminaire : substance active pénétrant dans les tissus de la plante (notamment au travers du limbe des feuilles) sans être redistribuée dans toutes les parties de la plante.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des substances actives formulées dans des produits autorisés en 2020 pour des usages pucerons toutes cultures confondues.....	37
Tableau 2 : Produits à base d'huiles essentielles commercialisées aux Etats-Unis pour lutter contre des pucerons.....	45
Tableau 3 : Substances actives entrant dans la composition de produits ayant des AMM en France.....	49
Tableau 4 : Substances actives n'entrant pas dans la composition de produits ayant des AMM en France.....	52
Tableau 5 : Ratios des composants des phéromones sexuelles.....	69
Tableau 6 : Tableau des moyennes et des gammes de variation de ces moyennes.....	97
Tableau 7 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à court terme.....	99
Tableau 8 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à moyen terme.....	100

Liste des figures

Figure 1: Symptômes de la jaunisse de la betterave	16
Figure 2 : Adulte ailé de <i>Myzus persicae</i> et sa descendance aptères.....	18
Figure 3 : Adulte de <i>Aphis fabae</i>	18
Figure 4 : Cycle de développement d'un puceron hétéroécique	70
Figure 5 : (E)-beta-farnesene, principal composant de la pheromone d'alarme de <i>Myzus persicae</i> et <i>Aphis fabae</i>	71
Figure 6 : Réponses olfactives enregistrées à partir des antennes de <i>Myzus persicae</i> et <i>Brevicoryne brassicae</i> exposées à différentes odeurs de leur plantes hôtes	73
Figure 7 : Structures chimiques des isothiocyanates	73
Figure 8 : Nombre de références bibliographiques consultées	95
Figure 9 : Nombre d'options ou produits analysés par famille de méthodes alternatives	96
Figure 10 : Position des 22 méthodes ou produits alternatifs substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave en fonction de leur efficacité	101
Figure 11 : Nombre de solutions ou méthodes substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave par famille de méthodes ou produits alternatifs.	102

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

Les éléments de contexte et l'objet de la saisine sont une reproduction littérale du texte de la saisine.

1.1 Contexte

Les pucerons, notamment *Aphis fabae* et *Myzus persicae*, sont très nuisibles pour les cultures de betterave du fait de leur capacité à transmettre les virus responsables des jaunisses de la betterave. Jusqu'en 2018, la protection phytosanitaire était assurée par le traitement systématique des semences avec des substances actives de la famille des néonicotinoïdes (imidaclopride ou thiaméthoxam seuls ou imadaclopride associé à la téfluthrine (de la famille des pyréthrinoïdes), dont l'effet systémique permettait d'assurer une protection efficace jusqu'à la fin de la période à risques, sans qu'il soit besoin de procéder ultérieurement à un traitement des parties aériennes de la plante.

Cependant, l'interdiction des néonicotinoïdes au 1^{er} septembre 2018 instaurée par la Loi n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a mis fin à cette possibilité d'usage.

Dans son évaluation du 7 mai 2018 « mettant en balance les risques et les bénéfices relatifs à d'autres produits phytopharmaceutiques autorisés ou des méthodes non chimiques de prévention ou de lutte pour les usages autorisés en France des produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes » réalisée conformément à l'article L. 253-8 du Code rural et de la pêche maritime, l'Anses a recensé les alternatives disponibles au début de l'année 2018 et a calculé des indicateurs de risques et d'efficacité. Selon ce bilan, les alternatives phytopharmaceutiques aux néonicotinoïdes pour le traitement des pucerons de la betterave reposaient exclusivement sur le traitement foliaire avec une substance insecticide de la famille des pyréthrinoïdes, associée le cas échéant au pirimicarbe (famille des carbamates). En ce qui concerne les autres méthodes de lutte potentielles recensées, elles reposaient sur des microorganismes (champignons entomopathogènes), des médiateurs chimiques (issus de composés organiques volatils végétaux), la génétique avec le recours à des variétés résistantes au virus de la jaunisse de la betterave BWYV ou aux pucerons des espèces *M. persicae* ou *A. fabae*, les méthodes culturales (bandes fleuries, réduction de la profondeur et de la fréquence des labours, paillage naturel, cultures intercalaires, etc.) et la stimulation des défenses des plantes (apports d'azote et de soufre, biostimulants, etc.). Aucune méthode physique n'avait été recensée.

Sur cette base, aucune dérogation interministérielle n'avait été octroyée pour l'usage de néonicotinoïdes vis-à-vis des pucerons de la betterave.

En 2020, la forte pression de populations de pucerons et la forte pression parasitaire qui en a résulté a conduit à l'octroi d'une dérogation au titre de l'article 53 du règlement 1107/2009 pour autoriser 3 applications foliaires d'un produit insecticide à base de

spirotetramate. Cette dérogation permet au besoin de compléter les traitements déjà autorisés, notamment le recours à un produit à base de flonicamide, rendu possible dès le stade 2 feuilles par décision de l'Anses du 29 avril 2020.

Pour faire face à une telle situation phytosanitaire en 2021 et pour répondre à la demande des acteurs de la filière de la betterave sucrière, une loi¹ a été votée le 14 décembre 2020 pour permettre l'utilisation dérogatoire des produits phytopharmaceutiques à base de néonicotinoïdes pour la culture de betterave. Les semences de betterave traitées avec des produits phytopharmaceutiques à base de néonicotinoïdes (imidaclopride ou thiaméthoxame) pourront être utilisées, après reconduction de la dérogation, jusqu'en 2023 au plus tard.

1.2 Objet de la saisine

Afin d'anticiper au mieux les difficultés qui pourraient être de nouveau rencontrées en 2021 et accélérer les travaux de recherche et de développement dans les directions les plus prometteuses, il est demandé d'actualiser le bilan comparatif effectué en 2018 sur la base des options actuellement disponibles aux niveaux national et européen.

A cette fin, il est demandé de :

- 1) Faire une synthèse des recherches en cours et des données scientifiques et techniques disponibles dans les différents domaines (pour développer des méthodes de lutte chimiques, physiques, génétiques, avec des microorganismes ou des macroorganismes, des pratiques culturales, des médiateurs chimiques ou des stimulateurs de défenses des plantes) ;
- 2) Faire des recommandations sur les besoins et les perspectives à court et moyen terme.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Traitements sur betterave alternatifs aux néonicotinoïdes », rattaché au comité d'experts spécialisé « Risques biologiques pour la santé des végétaux » l'instruction de cette saisine.

La méthodologie mise en œuvre pour la présente l'expertise s'est appuyée sur celle développée lors de la précédente expertise relative à l'évaluation de l'efficacité des méthodes de lutte alternatives aux produits à base de néonicotinoïdes dont le rapport a été publié en 2018. Par ailleurs, le temps imparti pour la réalisation de cette nouvelle expertise et l'ampleur du sujet en termes d'informations à analyser, ont conduit à faire le choix d'exclure du champ de l'expertise l'évaluation de l'impact des alternatives tant pour la santé humaine que pour l'environnement, et notamment vis-a-vis des insectes pollinisateurs.

¹ Loi n°2020-1578 relative aux conditions de mise sur le marché de certains produits phytopharmaceutiques en cas de danger sanitaire pour les betteraves sucrières

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES pour discussion, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Les travaux d'expertise ont été présentés au CES le 18/11/2020, le 26/01/2021, le 16/03/2021 et le 18/05/2021.

Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence (www.anses.fr).

Le groupe de travail a basé son évaluation de l'efficacité des traitements alternatifs aux néonicotinoïdes sur une analyse approfondie de la littérature scientifique et également en auditionnant 14 organismes ou entreprises.

2 Méthodologie mise en œuvre par le groupe de travail

2.1 Introduction

Le mandat confié au GT comprenait deux objectifs : i) identifier des méthodes de lutte alternatives à l'usage des néonicotinoïdes pour la protection de la betterave sucrière contre les pucerons vecteurs de la jaunisse et ii) évaluer les besoins de recherche et développement pour améliorer ces méthodes alternatives.

Pour atteindre ces objectifs, le GT a élaboré une méthodologie générale pour évaluer de manière cohérente et systématique des méthodes de lutte aux principes très variés, destinées à cibler les pucerons *M. persicae* ou *A. fabae* ou, les virus responsables de la jaunisse (BYV, BMYV, BChV ou BtMV).

La jaunisse de la betterave regroupe un ensemble de maladies caractérisées par des chloroses foliaires. Ces maladies sont dues à des virus transmis par des pucerons. Quatre virus différents sont responsables de ces maladies dont les symptômes sont très proches mais différenciables. Deux espèces de pucerons sont réputées transmettre ces virus : *Myzus persicae* et *Aphis fabae*.



Figure 1: Symptômes de la jaunisse de la betterave (source : ITB)

Stades développement de la plante les plus sensibles

La période à risque pour la betterave commence dès l'apparition des premiers pucerons dans les parcelles, au plus tôt fin avril - début mai, soit à partir du stade 2 feuilles jusqu'à la couverture du sol par les feuilles de betterave, fin juin. Sur des plantes non protégées, la dissémination du virus et des symptômes associés peut continuer jusqu'à la récolte, mais les plantes plus âgées (au-delà du stade 12 feuilles) sont naturellement plus

résistantes aux pucerons et à la transmission virale. Ce phénomène est connu sous le nom de "résistance à maturité". Il impacte notamment la capacité des pucerons à se nourrir et se multiplier sur les plantes, mais ses déterminants sont à ce jour encore mal connus.

Contexte sanitaire de la saison de production 2019-2020

Dans les essais irrigués menés dans le sud de Paris (campagne 2019-2020), la jaunisse était généralisée et imputable à la virose (non à un stress hydrique), avec des pertes de rendement estimées à 30% (voire sur certaines parcelles à 50%) (Audition du CTPS du 06/01/2021).

La crise sanitaire pour la filière betteravière, due à la jaunisse, a été importante. Les incidences sur les rendements en 2020 ont été plus fortes que prévues, ce qui a engendré des incertitudes sur les semis de 2021. Les pertes de rendement ont été en moyenne estimées à 29% sur l'ensemble de la sole française (avec des pics de 70% dans certaines zones fortement touchées) (Audition de Christian Huyghe du 25/02/2021).

Pucerons vecteurs de jaunisse sur la betterave

Les pucerons sont de petits insectes piqueurs suceurs de sève qui appartiennent à la super-famille des Aphidoidea. Ils sont parmi les insectes les plus nuisibles pour les plantes cultivées dans les régions tempérées. En plus d'affaiblir la plante en aspirant sa sève, ils agissent comme vecteurs de virus de végétaux. Environ 5 000 espèces de pucerons ont été décrites, toutes appartenant à la famille des Aphididae. Beaucoup de ces espèces sont des ravageurs de cultures.

De nombreuses espèces de pucerons ont besoin d'une alternance entre au moins deux espèces de plantes hôtes, pour effectuer la totalité de leur cycle biologique, et certaines d'entre elles sont considérées comme des espèces polyphages (dont *M. persicae*). Les pucerons, par leur capacité de reproduction élevée, provoquent souvent des dégâts importants. En raison de leur potentiel évolutif leur permettant de contourner les moyens de lutte (par exemple, sélection de populations résistantes aux insecticides), ils constituent un groupe d'organismes très performant d'un point de vue écologique, et sont ainsi très difficiles à contrôler en agriculture.

Les deux espèces de pucerons vecteurs majoritaires des virus responsables des jaunisses de la betterave sont *Mysus persicae* et *Aphis fabae* (Cf. Figures 2 et 3), même si d'autres espèces peuvent participer de cette vection. Une étude de l'ITB (Institut technique de la betterave) en 2019 montre ainsi que *M. persicae* est l'espèce majoritaire mais que d'autres espèces de pucerons verts peuvent être présents de façon minoritaire. Toutefois, leurs capacités à transmettre des virus n'ont pas été étudiées.

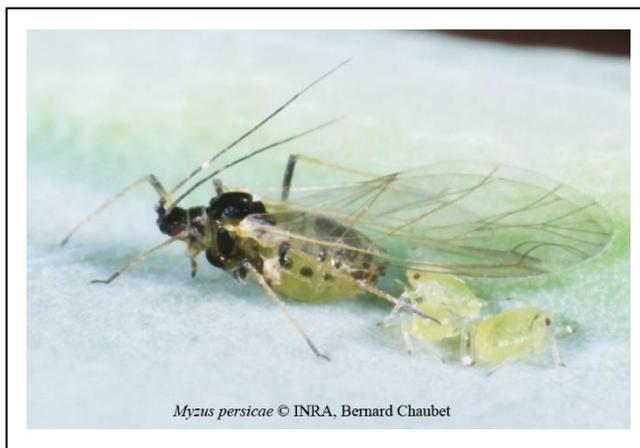


Figure 2 : Adulte ailé de *Myzus persicae* et sa descendance aptères (INRAE - Bernard Chaubet).



Figure 3 : Adulte de *Aphis fabae*

(source : https://www6.inrae.fr/var/internet6_national_encyclopedie_pucerons/storage/images/media/1-copyrights/pucerons-in-vivo/a-b-c-d/aphis-fabae-17-larve-c-900/47304-1-fre-FR/Aphis-fabae-17-larve-C-900.jpg)

Différents types de jaunisses détruisent les betteraves à sucre, la jaunisse grave (causée par une seule espèce virale appartenant la famille des *Closterovirus* : le *Beet yellows virus* (BYV) ; et les jaunisses modérées (causée par deux virus génétiquement proches, de la famille des *Poleovirus* : le *Beet chlorosis virus* (BChV) et le *Beet mild yellowing virus* (BMV), et enfin le *Beet nosaic virus* (BtMV) de la famille des *Potyvirus*.

Selon l'ITB (2019), les virus responsables de la jaunisse modérée (BChV et BMV) ont été détectés dans 93% des échantillons analysés dont 72% pour le seul BChV. Le BYV, responsable de la jaunisse grave, n'a été détecté que dans 7% des échantillons. Un suivi systématique de la présence endémique de la jaunisse est réalisé sur tout le territoire depuis 2010 par le réseau d'observation Vigibet (sur des parcelles non traitées aux néonicotinoïdes). Depuis 2019, ce réseau d'épidémiologie-surveillance a été élargi pour observer la présence de pucerons verts (une nette augmentation de ces insectes a été relevée en 2020 par rapport à 2019). Parallèlement, des enquêtes des pratiques agronomiques sont réalisées chez les agriculteurs pour comprendre les déterminants de la jaunisse.

L'arrivée des premiers pucerons a été précoce en 2020 (dès le mois d'avril) alors que les plants de betterave étaient encore au stade 2 feuilles. Le seuil de traitement a été largement dépassé dès la levée des betteraves (déclenchement d'un traitement dès qu'un puceron vert est présent pour 10 plants).

En 2020, la présence du 4^{ème} virus BtMV a été relevée sur le territoire alors qu'il n'avait pas été signalé depuis longtemps. Les prévalences virales ont évolué entre 2019 et 2020. En 2019, les polérovirus étaient largement majoritaires (69% de BChV et 21% de BMYV) et parallèlement, les co-infections très rares (4%). En 2020, les co-infections étaient majoritaires (45% de polérovirus + BYV + BtMV ; 8,38% de polérovirus + BtMV ; 4,79% de BYV + BtMV). En outre, dans les départements les plus touchés en termes de pertes de rendement, le niveau de co-infections dans les plantes était le plus élevé (ex : dans le Loiret, 60% des betteraves qui étaient infectées, l'étaient par 3 virus).

La cartographie des espèces virales réalisée en 2019 montre clairement l'absence de BtMV cette année-là, les autres virus étaient présents sur l'ensemble des zones de production. Parallèlement, les résultats du suivi des pucerons et des auxiliaires au travers du réseau d'épidémiologie-surveillance montrent que l'arrivée des pucerons a été extrêmement précoce en 2020 (signalement de pucerons dès la mi-avril avec 25% des sites couverts et près de 100% des sites infestés début mai). En comparaison, en 2019 le niveau d'infestation a été plus bas (le maximum d'infestation a concerné environ 60% des sites) et plus tardif (pic atteint 1 mois plus tard par rapport à 2020). L'arrivée des auxiliaires s'est faite environ 6 semaines plus tard pour les 2 années. La question qui est soulevée est donc la suivante : est-il possible d'anticiper et de contrôler des populations importantes de pucerons ? (Audition de Christian Huyghe du 25/02/2021).

Il est rappelé que les périodes à très forte pression virale ont fait leur réapparition en 2020, donc après le retrait des néonicotinoïdes en 2018 (auparavant, les dernières périodes où la jaunisse a été enregistrée se situaient dans les années 1980 - 1990) (Audition de Christian Huyghe du 25/02/2021).

Les quatre virus de la jaunisse sont tous exclusivement transmis par des pucerons vecteurs lorsque ceux-ci piquent les feuilles de betteraves pour y prélever de la sève et donc se nourrir. Le puceron vert du pêcher, *M. persicae*, est le principal vecteur de la jaunisse, car il a de très bonnes capacités de transmission des virus de la jaunisse modérée (BChV et BMYV) comme de celui de la jaunisse grave (BYV). Le puceron noir de la fève, *A. fabae*, est un vecteur secondaire du BYV, mais ne transmet pas le BChV, ni le BMYV. Les mécanismes de transmission du BtMV sont méconnus.

Acquisition, transmission.

Les virus de la jaunisse de la betterave sont naturellement disséminés par les pucerons selon trois modes de transmission :

Transmission non persistante (BtMV) :

- Les pucerons acquièrent le virus en quelques secondes lors de brèves piqûres d'essai sur une plante contaminée qui n'est pas son hôte préférentiel. Le virus reste accroché dans la partie basse du stylet de manière transitoire et ne colonise pas l'insecte. La transmission à une nouvelle plante visitée se traduit par la libération des particules virales lors de nouvelles piqûres d'essai. Les pucerons sont capables de transmettre les virus durant un laps de temps réduit (quelques minutes à quelques heures).
- Ce mode de transmission est peu spécifique et peut impliquer de nombreuses espèces de pucerons.

- Du fait de la courte durée d'acquisition et de transmission, les virus peuvent se disséminer dans la culture sans que l'on observe obligatoirement d'importantes pullulations de pucerons. Des espèces vectrices différentes peuvent successivement coloniser une même parcelle, provenant notamment de plantes cultivées, de plantes sauvages, ou d'adventices situées à proximité de cette parcelle ou plus éloignées (pucerons véhiculés par le vent). Pour assurer une protection efficace contre ces pucerons virulifères, les traitements insecticides doivent donc être renouvelés régulièrement dans la parcelle pendant toute la durée du stade sensible de la plante.

Transmission persistante (BChV, BMVYV)

- Les pucerons acquièrent le virus lors d'une piqûre d'alimentation prolongée (plusieurs heures à plusieurs jours) dans le phloème d'un hôte préférentiel, ici la betterave. Le virus colonise l'ensemble du puceron sans s'y multiplier et le puceron reste infectieux durant toute sa vie.
- Ce mode de transmission implique une interaction spécifique entre le virus et son vecteur : 1-3 espèces de pucerons seulement sont susceptibles de transmettre une espèce virale de ce type.
- Les pucerons installés durablement dans une parcelle de betterave peuvent s'y multiplier abondamment en disséminant le virus. Les traitements des parcelles concernées permettent de cibler la lutte et aboutissent généralement à contrôler efficacement ces maladies virales. Les traitements ciblant les pucerons vecteurs de virus persistants sont donc souvent plus efficaces que les traitements contre les pucerons vecteurs de virus non persistants.

Transmission semi-persistante (BYV)

Ce mode de transmission est intermédiaire entre la transmission non persistante et la transmission persistante. Quelques minutes à quelques heures suffisent pour que le virus soit acquis par le puceron. La transmission n'est possible que durant les 24-48h qui suivent.

Aucun de ces virus n'est transmis à la descendance des pucerons infectés.

2.2 Méthodologie mise en œuvre pour la recherche bibliographique

2.2.1. Principes de la démarche adoptée

L'objectif visé est d'assurer une traçabilité et une répétabilité de la recherche documentaire réalisée par chaque expert. La recherche bibliographique est réalisée séparément pour chacune des 8 familles de méthodes de lutte identifiées par le GT, à savoir les produits phytopharmaceutiques (PPP) à propriétés insecticides, les microorganismes, les macroorganismes, les médiateurs chimiques, les méthodes physiques, les méthodes

génétiques, les pratiques culturales et les stimulateurs de défenses des plantes. Elle est assurée par chaque sous-groupe (2 à 3 experts) constitué à l'occasion.

Le principe de la revue bibliographique approfondie a été adopté par le GT et repose sur i) l'application d'équations de mots-clés (définis par le sous-groupe), si besoin, dans plusieurs bases de données (Scopus et Web of Science – WoS) et de Google Scholar et ii) l'utilisation de critères d'inclusion et d'exclusion.

La revue bibliographique s'est appuyée sur la démarche PICO dont l'objet est de définir clairement le périmètre de la recherche bibliographique. Le sens de l'acronyme PICO est donné :

- « P » pour la population sur laquelle on cherche à observer un paramètre ou pour laquelle on cherche à trouver une information (ex : betterave) ;
- « I » pour l'intervention sur l'organisme nuisible à laquelle est sujette la population cible (ex : traitement contre le puceron ou le virus responsable de la jaunisse) ;
- « C » pour le comparateur, c'est-à-dire le paramètre choisi pour comparer différentes situations (traitement de référence, traitement de substitution et absence de traitement ; ex : méthode de lutte basée sur des néonicotinoïdes vs méthode de lutte alternative chimique ou non chimique) ;
- « O » pour le résultat de la recherche bibliographique (outcome ; ex : publications portant sur l'efficacité d'une méthode de lutte donnée pour protéger la betterave des attaques de pucerons).

Il est précisé que le périmètre de la recherche bibliographique a pu évoluer sur le choix de la population étudiée, notamment en considérant d'autres cultures concernées par les attaques des pucerons *M. persicae* et *A. fabae*.

Les critères d'exclusion dont l'objectif est de sélectionner les articles pertinents et de qualité scientifique suffisante sont ensuite détaillés. Ils se positionnent sur 2 niveaux de lecture. Les critères d'exclusion sont appliqués sur la base du :

1. Titre et résumé et des mots-clés (critères de pertinence) :
 - Absence de référence explicite aux pucerons et/ou virus associés (I de PICO)
 - Absence de référence explicite à la méthode de lutte ciblée (C de PICO)
2. Contenu de l'article (critères de qualité scientifique)

L'appréciation de la confiance dans l'évaluation de l'efficacité de la méthode de lutte (O de PICO) repose sur des critères de qualité scientifique. Ont donc été exclus les articles présentant :

- Une description insuffisante de la méthode ou du protocole
- Une absence de témoins
- L'existence de facteurs confondants
- Une méthode d'analyse statistique des données inadéquate

L'ensemble du processus de la recherche bibliographique est consigné ensuite dans une fiche de lecture type pour chaque famille de méthodes de lutte.

2.2.2. Résultats de la recherche bibliographique

Les résultats de la recherche bibliographique menée par le GT, sont résumés :

- PPP : 1279 références ont été identifiées et 66 ont été sélectionnées ;
- Microorganismes : 189 références ont été identifiées et 36 références ont été sélectionnées ;
- Macroorganismes : 956 références ont été identifiées et 15 références ont été sélectionnées ;
- Médiateurs chimiques : 380 références ont été identifiées et 27 références ont été sélectionnées ;
- Méthodes physiques : 96 références ont été identifiées et 41 références ont été sélectionnées ;
- Méthodes génétiques : 187 références ont été identifiées et 40 références ont été sélectionnées ;
- Méthodes de lutte culturale : 500 références ont été identifiées et 53 références ont été sélectionnées ;
- Stimulateurs de défenses des plantes : 291 références ont été identifiées et 23 références ont été sélectionnées.

2.3 Méthodologie générale d'évaluation des méthodes de lutte alternatives

2.3.1 Principes de la démarche adoptée

Le mandat confié au GT en charge de l'évaluation des alternatives aux néonicotinoïdes utilisés en traitement de semence de betterave, lui attribuait deux missions :

- Dresser la liste des alternatives aux traitements par les néonicotinoïdes par :
 - l'utilisation d'autres produits phytopharmaceutiques
 - d'autres méthodes de lutte
 - des pratiques relatives à la conduite des cultures
- Apprécier la pertinence des alternatives identifiées pour les deux usages des néonicotinoïdes² relatifs à la lutte contre les pucerons sur betterave en termes d'efficacité des traitements ou des méthodes

Dans le cadre de ce mandat, deux objectifs ont été suivis :

- Identifier des méthodes alternatives aux néonicotinoïdes pour la protection de la betterave sucrière contre les pucerons *M. persicae* ou *A. fabae*, autres que celles faisant l'objet d'autorisations de mise sur le marché (déjà identifiées selon les modalités présentées ci-dessus) ; la liste des méthodes alternatives comprend i) les méthodes d'ores et déjà mises en œuvre et ne nécessitant pas d'autorisation particulière, ii) les méthodes à l'état de recherche et

² Betteraves industrielles et fourragères*Trt Part.Aer.*Pucerons / Betterave industrielle et fourragère*Trt Sem.*Ravageurs des parties aériennes

développement ou encore iii) celles qui n'ont pas encore été validées sur la culture considérée mais qui l'ont été sur une autre culture contre les mêmes ravageurs.

- Évaluer l'efficacité des méthodes alternatives à l'usage des néonicotinoïdes pour la protection de la betterave sucrière contre les pucerons *M. persicae* ou *A. fabae* et les virus de la jaunisse associés.

2.3.2 Méthodologie adoptée par le GT

2.3.2.1 Regroupement des méthodes de lutte en familles

Une approche générique a été adoptée.

Les 8 familles de méthodes de lutte évaluées par le GT comme alternatives aux néonicotinoïdes sont, pour rappel :

1. Les produits **phytopharmaceutiques à propriétés insecticides** (PPP)
2. La lutte biologique à l'aide de **microorganismes**
3. La lutte biologique à l'aide de **macroorganismes**
4. La lutte biologique à l'aide de **médiateurs chimiques**
5. La lutte par des **méthodes physiques**
6. La lutte par une approche **génétique**
7. Les méthodes de lutte **culturale**
8. La lutte physiologique par **stimulation des défenses des plantes**

2.3.2.2 Caractérisation de la performance des méthodes de lutte

La performance des méthodes de lutte a été appréciée selon plusieurs critères, chacun étant ensuite évalué (cotation) selon une échelle semi-quantitative de 1 (niveau faible) à 3 (niveau élevé).

Définition des critères et règles de notation

Le GT a défini pour chaque méthode de lutte une règle de cotation *a priori* sur la base de quatre critères, afin d'aboutir à une évaluation par les experts qui soit reproductible et objective pour l'ensemble des usages considérés.

La performance des méthodes de lutte a ainsi été appréciée selon les critères suivants :

Magnitude de l'efficacité d'une méthode de lutte (critère n°1) : note comprise entre 1 et 3

La magnitude de l'efficacité (synonyme de « niveau » d'efficacité) correspond à la capacité de la méthode à réduire l'intensité et/ou la fréquence des dégâts infligés par les pucerons à la culture ciblée.

- 1 = efficacité potentielle nécessitant des études complémentaires pour être confirmée
- 2 = efficacité prouvée mais insuffisante à elle seule (nécessitant l'usage d'autres méthodes de lutte complémentaires)
- 3 = efficacité avérée de la méthode en elle-même

Durabilité de l'efficacité d'une méthode de lutte (critère n°2) : note comprise entre 1 et 3

La durabilité de l'efficacité traduit le risque d'apparition de résistance ou de contournement du mécanisme de régulation des pucerons.

- 1 = risque élevé d'apparition de résistance
- 2 = risque modéré
- 3 = risque faible

Opérationnalité d'une méthode de lutte (critère n°3) : note comprise entre 1 et 3

L'opérationnalité exprime le niveau de disponibilité d'une technique en fonction de sa mise au point, de sa validation au champ et éventuellement de son autorisation de mise sur le marché (AMM) ou de son inscription aux Catalogues des variétés dans le cas de la lutte génétique.

- 1 = stade recherche et développement
- 2 = en application quelque part dans le monde, et en France sur d'autres usages
- 3 = ayant une AMM pour l'usage « Pucerons de la betterave » en France, ou ayant reçu des dérogations pour cet usage.

Praticité d'une méthode de lutte (critère n°4) : note comprise entre 1 et 3

La praticité décrit la facilité de mise en œuvre de la méthode, en fonction notamment du matériel, du nombre de traitements ou d'interventions, du temps de travail et de la technicité nécessaires.

- 1 = difficile
- 2 = moyen
- 3 = facile

Les règles de notation de ces critères ont pris en compte des cas particuliers détaillés ci-dessous.

Définitions et règles de notation des méthodes de lutte

- **Produits phytopharmaceutiques (PPP) autres que ceux à base de néonicotinoïdes**

Il s'agit des produits (ou préparations phytopharmaceutiques) contenant des substances actives insecticides d'origine synthétique ou naturelle (extraits de végétaux, d'animaux, de micro-organismes ou de minéraux). N'ont pas été classés dans cette catégorie tous les produits insecticides y compris ceux bénéficiant d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) composés de bactéries, de champignons ou de virus entomopathogènes (voir lutte à l'aide de microorganismes), et ceux ayant des actions physiques sur les pucerons par axphyxie comme la maltodextrine, les huiles minérales et végétales (voir lutte physique).

Magnitude :

La note concerne uniquement l'efficacité intrinsèque du PPP. Une note 3 a été attribuée par défaut aux PPP possédant une AMM, considérant que tous les produits bénéficiant d'une AMM pour l'usage puceron sur betterave étaient, par définition, suffisamment efficaces selon la grille de notation définie pour ce paramètre. De même, une très bonne efficacité des PPP obtenue sur d'autres cultures a été jugée suffisante sur betterave (note 3). Une note 2 est attribuée lorsque l'efficacité seule du PPP n'est pas suffisante pour atteindre un contrôle suffisant des pucerons sur

betterave. La note 1 est attribuée pour les PPP présentant soit une efficacité faible, soit une efficacité au champ qui n'a pas encore été clairement démontrée. La notation de ce critère ne prend pas en compte les phénomènes de résistance qui ont pu évoluer depuis la délivrance de l'AMM. Ces phénomènes sont pris en compte dans le critère « durabilité ».

Durabilité :

La note de durabilité 1 (fort risque d'apparition de résistance) a été attribuée aux PPP pour lesquels des problématiques de résistance ont déjà été clairement identifiées chez au moins une des deux espèces de pucerons considérées pour cette saisine ou sont fortement suspectés (e.g. résistance démontrée chez une autre espèce de puceron). Cette note concerne également les PPP non autorisés pour un usage sur betterave mais qui appartiennent à une famille déjà gravement affectée par des phénomènes de résistance (ex : pyréthriinoïdes et carbamates). La note 2 est attribuée aux PPP pour lesquels il existe des résistances chez d'autres espèces d'insectes. La note 3 a été attribuée à tous les autres PPP.

Opérationnalité :

Les PPP bénéficiant d'une AMM pour un usage sur pucerons de la betterave sont jugés immédiatement opérationnels par défaut. La note 3 leur a donc été attribuée systématiquement. Les PPP ayant une AMM pour un autre usage, et n'ayant besoin que d'une dérogation pour pouvoir être utilisés ont reçu une note de 2. Enfin, les PPP en cours de développement dans les entreprises phytosanitaires ou faisant l'objet de recherche dans des laboratoires académiques ont reçu la note 1.

Praticité :

En raison de la difficulté d'atteindre les pucerons qui peuvent se cacher sur la face inférieure des feuilles, une note de 3 a seulement été attribuée aux PPP appliqués par fumigation ou par pulvérisation et possédant des propriétés translaminaires. Les PPP pulvérisables mais agissant par contact se sont vus attribuer une note de 2.

• **Microorganismes**

Il s'agit de PPP à base de champignons, bactéries, ou virus entomopathogènes soumis à AMM ainsi que des nématodes entomopathogènes, qui bien que répondant à la réglementation sur les macroorganismes (Décret n°2012-140 relatif aux « conditions d'autorisation d'entrée sur le territoire et d'introduction dans l'environnement de macroorganismes non indigènes utiles aux végétaux, notamment dans le cadre la lutte biologique » – version consolidée au 05 mars 2018) ont été intégrés dans cette catégorie de lutte biologique à l'aide de microorganismes pour des raisons de similitude de mode d'application.

Magnitude :

Les PPP à base de microorganismes bénéficiant d'une AMM ont obtenu une note de 2 ou 3. La magnitude est fixée à 3 si le microorganisme utilisé pour lutter contre le ravageur est jugé efficace sans besoin de recourir à des mesures supplémentaires. La magnitude est fixée à 2 lorsque des mesures complémentaires sont nécessaires.

Durabilité :

De manière générale, les PPP à base de microorganismes (bactéries ou champignons) bénéficiant d'une AMM ont obtenu une note de 3. Lorsque des

résistances à un PPP ont été décrites chez d'autres ennemis des cultures et compte tenu des capacités évolutives de *M. persicae*, une note 2 a été attribuée.

Opérationnalité :

La note 3 a été attribuée aux microorganismes bénéficiant d'une AMM.

La note 1 a été attribuée aux autres microorganismes car la mise sur le marché ou la demande d'introduction d'un organisme nécessite l'instruction d'une demande qui ne pourra vraisemblablement pas aboutir avant plusieurs années.

Praticité :

De manière générale, la pulvérisation de suspension de spores de champignons a été considérée moyennement facile compte tenu de la nécessaire prise en compte des conditions météorologiques lors de l'application (température et humidité) (note 2).

• **Macroorganismes**

Il s'agit d'auxiliaires de cultures (arthropodes prédateurs et parasitoïdes des insectes ou des acariens ravageurs de cultures) répondant à la réglementation sur les macroorganismes (Décret n°2012-140 relatif aux « conditions d'autorisation d'entrée sur le territoire et d'introduction dans l'environnement de macroorganismes non indigènes utiles aux végétaux, notamment dans le cadre de la lutte biologique » – version consolidée au 05 mars 2018).

Magnitude :

Les macroorganismes bénéficiant d'une autorisation ont obtenu la note 2 ou 3. La magnitude a été notée 3 si le macroorganisme utilisé pour lutter contre l'organisme nuisible est considéré efficace sans nécessité de recourir à des mesures complémentaires. Dans le cas d'ennemis naturels révélés par des études scientifiques mais n'ayant pas fait l'objet d'essai au champ pour la lutte, ou ayant montré une faible efficacité, la note 1 a été attribuée.

Durabilité :

De manière générale, les macroorganismes (parasitoïdes ou prédateurs) ont reçu la note 3, le GT ayant considéré très peu probable qu'un insecte ravageur devienne résistant à un ennemi naturel même si cette situation peut se produire (ex. fuite comportementale d'un phytophage ; mécanisme de résistance développé vis-à-vis de certains parasitoïdes par encapsulation de la ponte).

Opérationnalité :

De manière générale, les macroorganismes (parasitoïdes ou prédateurs) bénéficiant d'une autorisation d'introduction volontaire ont reçu la note 3. La note 1 a été attribuée aux autres macroorganismes car la mise sur le marché ou la demande d'introduction d'un macroorganisme pour la lutte biologique nécessite l'instruction d'une demande d'autorisation d'introduction volontaire qui ne pourra vraisemblablement pas aboutir avant juillet 2023.

Praticité :

La praticité des macroorganismes a reçu une note variant de 1 (difficile) à 3 (facile) selon le nombre de macroorganismes à manipuler, la disponibilité en masse, le mode de conditionnement des prédateurs ou parasitoïdes à lâcher.

- **Médiateurs chimiques**

Il s'agit de substances sémi-chimiques regroupant, i) les phéromones (sexuelles et d'agrégation) qui permettent la communication (transmission d'information) entre individus d'une même espèce ; ii) les kairomones (ex. composés volatils issus de plantes) qui permettent la communication entre espèces différentes, au détriment de l'émetteur et au bénéfice du récepteur du signal, et iii) les attractifs alimentaires. Plusieurs méthodes de lutte sont basées sur ces molécules : le piégeage de masse, la méthode « attract and kill » (combinant piégeage par attractant et insecticide), la méthode « push and pull » (combinant un élément répulsif et un élément attractif), et la confusion sexuelle.

Magnitude :

La note 1 a été systématiquement attribuée car aucun médiateur chimique ne dispose d'une AMM pour la lutte contre les pucerons en culture de betterave et qu'aucune publication scientifique ne démontre d'efficacité suffisante de ces produits.

Durabilité :

La note 3 leur a été systématiquement attribuée car aucune résistance aux médiateurs chimiques n'a à ce jour été observée (rapportée dans la pratique ou mentionnée dans la bibliographie).

Opérationnalité :

Les médiateurs chimiques au stade de recherche et développement ont obtenu la note 1 car leur mise sur le marché nécessite l'instruction d'une demande d'AMM qui ne pourra vraisemblablement pas aboutir avant juillet 2023.

Praticité :

Cependant, dans le cas du piégeage de masse, selon le nombre de pièges, la note de praticité est égale à 1 (besoin d'une grande densité de pièges à l'hectare) ou 2 (besoin de peu de pièges à l'hectare).

Dans le cas de la confusion sexuelle, la note de praticité est égale à 3 (quelques dizaines de diffuseurs par hectare) ou 2 (plusieurs centaines par hectare). Pour les produits « push and pull » ou « attract and kill », la note de praticité 1 ou 2 a été attribuée en fonction du nombre de points traités sur la parcelle et de la formulation (médiateurs/insecticides).

- **Méthodes physiques**

Il s'agit des méthodes visant à tuer ou repousser les insectes mais dont le mode d'action n'implique pas de substances actives, de médiateurs chimiques, ou des organismes vivants. Ces méthodes incluent notamment les huiles, les argiles, la maltodextrine, les poudres minérales qui sont soumises au règlement (CE) 1107/2009 avec une AMM au niveau national mais aussi des filets anti-insectes, des pièges passifs ou alimentaires, l'arrachage, la taille, l'assainissement, les méthodes acoustiques, les méthodes thermiques, les méthodes électriques, les méthodes basées sur l'aspiration, et les méthodes de piégeages/répulsions par effet lumineux.

Magnitude :

En règle générale, les méthodes de lutte physique ont obtenu une note entre 1 et 2 car considérées comme rarement efficaces à elles seules pour ne pas nécessiter de mesures de lutte complémentaires.

Durabilité :

Aucune résistance aux méthodes physiques n'étant connue, la note de durabilité a toujours été 3.

Opérationnalité :

Les méthodes de lutte physique ont été considérées comme étant opérationnelles (note 3) lorsqu'elles ne nécessitaient pas une AMM (ex. paillage, bâches en plastique ou pièges jaunes). Les méthodes de lutte nécessitant une extension d'usage, se sont vues attribuer la note 2 leur (ex. huile minérale, huile organique, kaolinite, maltodextrine).

Praticité :

Les méthodes de lutte ont en été considérées très faciles ou faciles (note 3), assez faciles d'usage ou d'application (note 2 liée aux particularités et conséquences d'applications du produit du fait du bouchage des buses, de phénomène d'abrasion, nombre et l'étendue des matériaux de protection), ou difficile (note 1).

- **Méthodes génétiques**

Il s'agit des génotypes, variétés ou cultivars résistants aux pucerons ou aux virus qu'ils transmettent. A l'heure actuelle, aucune variété de betterave résistante ou tolérante aux pucerons ou aux virus n'est encore inscrite au « Catalogue Officiel français des espèces et variétés de plantes cultivées » ou au « Catalogue Officiel européen des espèces et variétés de plantes cultivées » (donc commercialisables en France). Les études menées ces dernières années par le GEVES (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences) sur la résistance des variétés de betterave sucrière aux jaunisses virales n'ont pas encore donné de résultats probants. Nous avons donc donné des notes d'efficacité pour les 2 approches de lutte génétique envisagées (résistance aux pucerons et résistance aux virus) en fonction des résultats obtenus dans les laboratoires de recherche à l'étranger.

Magnitude :

La note 2 a été attribuée aux variétés résistantes au virus car ces dernières, bien qu'efficaces à limiter l'infection virale, ont été testées en conditions expérimentales mais pas en plein champ. La note 1 a été attribuée aux variétés résistantes aux pucerons car ces dernières se sont révélées moins efficaces à limiter les populations de pucerons (que les virus) et elles ont été testées en conditions expérimentales mais pas en plein champ.

Durabilité :

La note 3 a été attribuée pour les variétés résistantes aux virus, considérant que la base génétique de QTL est large moyennant une gestion durable des résistances avec un renouvellement ou des mélanges des variétés.

La note 2 a été attribuée dans le cas des variétés sélectionnées pour leur résistance aux pucerons, considérant que le risque de contournement de la résistance n'est jamais nul, en particulier lorsque la pression de sélection est élevée, par exemple du fait de son large déploiement (utilisation répétée d'une même source de résistance sur de grandes surfaces) et du grand nombre de générations de pucerons (espèces plurivoltines).

Opérationnalité :

La note 2 a été attribuée aux deux approches génétiques. Aucune variété résistante aux pucerons ou aux virus n'est encore inscrite au « Catalogue Officiel français des espèces et variétés de plantes cultivées » ou au « Catalogue Officiel européen des espèces et variétés de plantes cultivées » (donc commercialisables en France) mais les recherches semblent bien avancées dans les laboratoires ou instituts spécialisés.

Praticité :

La note 3 (facile à très facile d'usage) a été attribuée aux deux types de variétés résistantes car il suffit de remplacer une variété par une autre à la saison suivante (la betterave est cultivée en cycle annuel).

- **Méthodes culturales**

Sont regroupées dans ces dernières toutes les méthodes visant au renforcement des processus écologiques naturels permettant une réduction de l'impact des pucerons, *via* une modification de la qualité alimentaire des plantes pour les pucerons (gestion de la fertilisation...), des effets d'interactions entre plantes (par exemple une plante non cible émettant des composés répulsifs vis-à-vis des pucerons d'une culture cible voisine) ou des interactions entre plantes et ennemis naturels des pucerons (par exemple des bandes fleuries offrant habitat et nourriture aux régulateurs (prédateurs et/ou parasitoïdes) des pucerons de la culture cible). Il s'agit donc a priori de méthodes reposant sur une modification de la conduite des cultures (date de semis, travail du sol, rotations, fertilisation, irrigation), ou de l'environnement entourant la culture (haies, bandes fleuries, ...). Il s'agit également des méthodes de protection « par conservation » (de la biodiversité) comprenant l'utilisation de cultures associées intercalaires (« intercropping » ou mélange d'espèces ou de variétés), des bandes enherbées ou fleuries (non récoltées), des haies composites, d'une couverture végétale du sol (mulch vivant), des habitats relais ou de sources d'ennemis naturels à l'échelle de la parcelle ou du paysage.

Magnitude :

De manière générale, les méthodes de luttés culturales ont rarement été considérées comme efficaces à elles seules, nécessitant souvent des mesures de lutte complémentaires (note 2).

Durabilité :

Les méthodes de lutte culturales ne génèrent pas de résistance de la part des pucerons (note de 3).

Opérationnalité :

La note 3 a été attribuée aux méthodes déjà mises en œuvre en France et, à défaut, la note 2 à celles déjà utilisées ailleurs dans le monde. La note 1 a été attribuée aux méthodes faisant l'objet d'études scientifiques et techniques (instituts de recherche, instituts techniques) mais non validées par des essais au champ.

Praticité :

La note 3 a été attribuée à la fertilisation organique. La praticité des méthodes de lutte culturale a été notée le plus souvent à 1 (pour les associations végétales) ou 2 (pour le paillage et le mulching) car elles doivent être intégrées dans les itinéraires techniques de la culture de betterave et/ou nécessitent un ré-aménagement des parcelles ou des paysages.

- **Méthodes par stimulation des défenses des plantes**

Il s'agit de substances ou produits d'origine naturelle ou de synthèse, capables d'induire (ou de préparer à l'induction) chez les végétaux la production de métabolites secondaires de défenses conférant un niveau de résistance aux ravageurs (Cf. Fiche technique d'EcophytoPIC).

Magnitude :

Une note de 1 à 2 a été attribuée aux stimulateurs de défenses des plantes suivant leur niveau d'efficacité observé.

Durabilité :

La note 3 a été attribuée aux stimulateurs de défenses des plantes car aucune résistance à ce type d'induction n'est connue.

Opérationnalité :

Une note de 1 à 3 leur a été attribuée selon l'existence ou le besoin d'une AMM.

Praticité :

Les stimulateurs de défenses des plantes sont considérés très pratiques (note 3) parce qu'ils sont utilisés par pulvérisation ou par amendement des sols (fertilisation organique).

2.3.3. Collecte des données

Les scores des quatre critères de performance ont été renseignés par les experts du GT qui se sont appuyés sur la bibliographie internationale (et le cas échéant la littérature dite « grise ») pour étayer leur avis, une note « consensus » étant validée en séance plénière du GT. La littérature scientifique consultée a permis une appréciation globale de l'efficacité d'une famille de méthodes de lutte et une comparaison entre les familles de méthodes.

En parallèle, le GT a mis en place des auditions des parties prenantes afin que des représentants de la filière de la betterave, des firmes phytopharmaceutiques, du Comité technique de la production de semences et d'INRAE puissent apporter également des informations d'ordre scientifique et/ou technique sur l'existence et l'efficacité de méthodes de lutte opérationnelles ou faisant l'objet de projets de recherche. Ces informations ont contribué à la réflexion du GT et à la documentation de la performance des alternatives aux néonicotinoïdes.

3 Présentation des résultats de l'évaluation des méthodes de lutte alternatives aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave sucrière

Les résultats de l'évaluation des méthodes de lutte sont présentés par famille de méthodes de lutte avec :

- le nombre de références sélectionnées ;
- le résumé des points forts identifiés pour la famille de méthodes de lutte ;
- les perspectives en matière de R&D ;
- une analyse bibliographique consistant en une synthèse des principales informations issues de la littérature scientifique et de la littérature grise ;
- et, le cas échéant, une synthèse des principales informations issues des auditions.

Les fiches de lecture sont présentées en Annexe 2 avec :

- l'équation de mots-clés utilisée et le nombre de références identifiées et sélectionnées ;
- la liste des références bibliographiques sélectionnées.

3.1 Les produits phytopharmaceutiques à propriétés insecticides (PPP)

66 références ont été retenues pour l'analyse.

3.1.1 Résumé des points forts à retenir

- PPP ayant une AMM ou PPP en dérogation pour la lutte contre pucerons sur betterave

Cinq substances actives (SA) ayant des actions toxiques disposent à la date de ce rapport d'une AMM ou d'une dérogation pour la lutte contre les pucerons (*M. persicae* et *A. fabae*) sur betterave : les deux pyréthrinoides lambda-cyhalothrine et tau-fluvalinate, ainsi que le pirimicarbe (carbamates), le flonicamide (composé organique pyridinique) et le spirotétramate (kétoléoles) (ce dernier a disposé d'une dérogation pour usage sur les pucerons de la betterave en 2020). Ces substances actives rentrent dans la composition de PPP qui sont, soit à base d'une seule substance active (cas du flonicamide et du spirotétramate), soit à base d'une association de deux substances actives (cas des associations lambda-cyhalothrine + pirimicarbe et tau-fluvalinate + pirimicarbe).

Les deux pyréthriinoïdes, lambda-cyhalothrine et tau-fluvalinate, sont des composés neurotoxiques ciblant les canaux sodium qui montrent des niveaux d'efficacité satisfaisants contre les pucerons (>75-80%) sur les différentes cultures pour lesquelles ils sont homologués dans des conditions standards. Cependant, leur efficacité contre les pucerons sur betterave est largement en deçà de l'efficacité recherchée dans la lutte contre les vecteurs de viroses sur cette culture. Ceci résulte à la fois de l'omniprésence de populations de pucerons résistantes aux pyréthriinoïdes, ainsi que de la difficulté à atteindre les pucerons situés à la face inférieure des feuilles avec des traitements par pulvérisation. Les pucerons sont souvent logés sur la face inférieure des plants de betterave (Hauer et al. 2017) et les pyréthriinoïdes agissant par contact, leur efficacité est réduite vis-à-vis des pucerons. L'utilisation du pirimicarbe, bien que celui-ci soit à la fois un insecticide systémique et une substance avec un effet fumigant sur les pucerons, présente aussi un problème d'efficacité contre les pucerons vecteurs de viroses sur betterave, du fait d'importants niveaux de résistances à cet insecticide chez les espèces ciblées sur cette culture (problème également de double résistance carbamates/pyréthriinoïdes). Les situations de résistance sont fréquentes et impliquent des mutations sur la cible, et concernent également de la résistance métabolique (Williams et al 1998). Par exemple, en France, le plan de surveillance a pu détecter une proportion non négligeable (>25%) d'individus portant une mutation conférant une résistance de cible à ce carbamate.

En 2020, les deux SA utilisées pour lutter contre les pucerons vecteurs de la jaunisse de la betterave, **le spirotétramate et le flonicamide**, montrent des niveaux d'efficacité satisfaisants contre ces pucerons sur cette culture. Le spirotétramate montre des niveaux d'efficacité comparable aux néonicotinoïdes sur pêcher en Bulgarie (Arnaudov and Petkova, 2020), avec 100% d'efficacité rapportés dans l'essai réalisé sur fraisier dans le cadre de la demande d'extension d'AMM. Le spirotétramate présente aussi une persistance d'action longue (jusqu'à 6 semaines) et il n'y pas de résistance observée au champ jusqu'à présent. Le flonicamide montre une efficacité similaire contre *M. persicae* et *A. fabae* (de l'ordre de 90%) et aucune résistance n'a été rapportée chez ces deux espèces de pucerons pour cette SA. Ces deux SA sont donc les premières alternatives aux néonicotinoïdes viables (d'efficacité comparable aux néonicotinoïdes, Arnaudov and Petkova, 2020). Cependant, une bonne gestion des épidémies virales sur betterave nécessite de contrôler le(s) vecteur(s) de virose(s) de façon efficace dès le début du printemps (communication ITB). Leur utilisation trop tardive en 2020 explique pour partie les pullulations de pucerons (suivies des épidémies de viroses) observées lors de la campagne de 2020.

- PPP ayant une AMM pour la lutte contre pucerons sur d'autres cultures

Les pyréthriinoïdes de synthèse cyperméthrine, deltaméthrine et l'esfenvalérate sont actuellement autorisés pour la lutte contre les pucerons sur grande cultures *p.ex.* céréales et colza, ainsi que sur diverses autres cultures (rosiers, légumineuses, etc.) (ACTA 2021) : ce sont des insecticides à large spectre d'action (inhérent à cette famille chimique). Le niveau d'efficacité de ces composés sur ces cultures est considéré comme moyen à élevé au vu des données d'efficacité rapportées dans les dossiers d'AMM initiaux (75-80% d'efficacité minimum contre les cibles au champ). Cependant, leur usage n'est pas actuellement autorisé sur betterave pour la lutte contre les pucerons (notamment en l'absence de données d'efficacité suffisante sur betterave). De surcroît, les résistances à une SA de cette famille confère le plus souvent une résistance croisée à tout ou partie des SA de cette famille. Les

populations de *M. persicae* sur betterave étant très largement résistantes aux pyréthrinoïdes autorisés en betterave, il est fort probable qu'une autre SA de la même famille n'apportera qu'une efficacité limitée dans la lutte contre les pucerons sur cette culture. De plus, ces composés agissant par contact, leur efficacité sur betterave est réduite car les pucerons sont positionnés sur des zones difficiles d'accès par des traitements conventionnels (face inférieure des feuilles). Pour les mêmes raisons, il est peu probable que les pyréthrines apportent une efficacité suffisante pour être intéressantes dans la lutte contre les pucerons sur betterave.

Plusieurs autres SA sont cependant potentiellement mobilisables dans un laps de temps assez court, via des dérogations d'usage contre pucerons sur betterave, car elles ont déjà des AMM pour d'autres usages et sont efficaces contre les pucerons.

L'abamectine qui appartient à la famille des avermectines, est autorisée en France pour lutter contre des acariens, des mouches, des phytoptes et des thrips (ACTA 2021). Elle agit par ingestion et est translaminaire. Elle montre une bonne efficacité contre les pucerons (réduction de 87% des populations de *Chaetosiphon fragaefolii* à j+12 après traitement sur fraisiers (Fitzgerald 2004).

Les huiles essentielles d'oranger amer (*Citrus aurantium*) et celles à bases d'huile de neem (azadirachtine) ont des propriétés aphicides. Ces huiles sont des aphicides efficaces en applications foliaires : elles peuvent notamment présenter le même niveau d'efficacité que le spirotétramate et le flonicamide contre le puceron *M. persicae* (p.ex. réduction de 75% des populations à 60 g SA/l et 2,4 l/ha avec l'huile essentielle d'orange amer) (Smith et al. 2018). L'efficacité de l'azadirachtine a été démontrée contre ce puceron en serre sur laitue avec des réductions de populations de pucerons pouvant aller jusqu'à 85% à j+18 après traitement et 75% à j+28 (Fournier & Brodeur 2000; Smith et al. 2018). L'azadirachtine peut par ailleurs permettre de réduire la transmission des viroses par *M. persicae* sur culture de tabac (Nisbet et al. 1996). Cependant, il semble que son efficacité contre *M. persicae* dépende largement de la culture traitée (Edelson et al. (2002) ; des essais menés par l'ITB en 2019 et 2020 ont révélé une efficacité médiocre de l'azadirachtine contre les pucerons de la betterave, ainsi que sur les symptômes de jaunisse (communication ITB). Les huiles essentielles de *Citrus* sont déjà commercialisées (ex : usage pucerons sur cultures ornementales) sous diverses formulations.

- Autres substances actives potentiellement d'intérêt et entrant dans la composition d'un produit ayant déjà une AMM

Certaines SA sont autorisées contre d'autres insectes mais sont décrites dans la littérature comme potentiellement efficaces sur *M. persicae*. L'indoxacarbe (oxadiazines) est une SA agissant sur la même cible moléculaire que les pyréthrinoïdes mais sur un site d'action différent. Elle induit une réduction de 97% des populations de *M. persicae* en plein champ de gombo (*Abelmoschus esculentus* – Malvaceae) (Gesraha et Ebeid, 2021), j+7 après le traitement (dose de 150 g/ha) et il n'y pas de résistance connue à cette molécule chez les pucerons. Son utilisation pourrait donc être autorisée à court terme pour la lutte contre puceron sur betterave si des méthodes d'application adaptées sont mises au point.

De la même famille que l'abamectine, le benzoate d'émamectine (avermectines) agit par ingestion et dans une moindre mesure par contact, il possède des propriétés translaminaires et montre une certaine efficacité contre le puceron *M. persicae* sur colza (réduction de 61% des populations à j+3) (Khan et al. 2020). De plus, de nouvelles formulations (par microencapsulation) sont en cours de développement dans le but de

maximiser le rapport bénéfice / risque de cette SA avec un développement de son utilisation contre des pucerons.

D'autres SA comme le spinosad (toxines de *Saccharopolyspora spinosa*) et le cyantraniliprole (ryanoïdes) ont une AMM contre d'autres ravageurs et pourraient représenter des options de lutte intéressantes à moyen ou long terme. Cependant d'importants travaux de R&D devront être menés sur ces SA pour permettre d'atteindre un niveau d'efficacité suffisant contre les pucerons sur betterave (*p.ex.* formulation avec des huiles dans le cas du cyantraniliprole).

- Autres substances actives potentiellement d'intérêt mais n'entrant pas dans la composition d'un produit bénéficiant d'une AMM

Des composés de synthèse ont été étudiés au laboratoire pour leurs propriétés insecticides contre les pucerons. Deux détergents, le SU-120 et le TescaFruta®, peuvent notamment induire jusqu'à 85% de mortalité chez *M. persicae*. Cependant, ces composés agissant par contact, leur utilisation sera potentiellement confrontée aux limitations inhérentes à la difficulté d'atteindre les pucerons cachés sous les feuilles de betterave. D'autres composés tels que la squamocine, l'annonacine, la clonidine, l'acide pyrologneux et les composés pyrazole-carboxamide ont montré une faible efficacité contre les pucerons (<30% de mortalité). En l'état actuel des connaissances, ces composés n'apparaissent pas comme des alternatives viables à moyen et long terme.

Des composés, issus de micro-organismes, apparaissent bien plus prometteurs : un rhamnolipide notamment, le dirhamnolipide, provoque 100% de mortalité en 24h chez *M. persicae* lorsqu'il est appliqué à 100 ppm sur des plants de poivrons en conditions contrôlées (Kim et al. 2011). D'autres composés, aussi issus de micro-organismes, tels que les xantholysines, les acides gras de *Trichoderma*, la quinolactecide et l'oxaline B, induisent entre >82% et 100% de mortalité (suivant le composé considéré) chez *M. persicae* lors d'expositions réalisées au laboratoire. Ces composés, même s'ils sont prometteurs, nécessiteront d'importants travaux de R&D avant de pouvoir être utilisables comme insecticides ; ils ne sont donc pas viables pour une utilisation à court et moyen terme.

De nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'intérêt des huiles essentielles dans la lutte contre les ravageurs des cultures (Isman 2020). Une liste des différents effets de ces huiles contre les pucerons (essais en semi-champ ou au champ) ou traitant spécifiquement de la toxicité de ces huiles contre *M. persicae* et/ou *A. fabae* (essais en laboratoire, en semi-champ et/ou champ) est présentée dans le Tableau 4 en pages 53 à 54. Des mélanges de certaines huiles essentielles sont déjà commercialisés pour lutter contre d'autres ravageurs aux États-Unis (*p.ex.* cochenilles) mais leur efficacité contre les pucerons est globalement insuffisante pour enrayer des populations de *M. persicae* sous serre (Cloyd et al. 2009). L'activité insecticide des huiles essentielles est due en général à la présence de composés mono- et sesquiterpénoïdes. Ces composés sont majoritairement lipophiles et volatils, ils peuvent pénétrer rapidement dans les insectes et interférer avec leurs fonctions physiologiques (Isman 2020). A l'heure actuelle, les huiles essentielles peuvent surtout être utilisées en cultures sous-abris car les conditions de fumigation y sont plus favorables. Des traitements à base d'huiles de chénopode (*Dysphania ambrosioides* - thé du Mexique) (Amaranthaceae) réduisent les populations de *M. persicae* de 75% à +21-28j sur cultures sous serres, (Smith et al. 2018) et de 95% sur verveine sous serre (Chiasson et al. 2004). Des huiles essentielles d'*Eucalyptus* sp. et d'essence de térébenthine

(Turpentine) utilisées en émulsion (à 1%) induisent une réduction de 84% des populations de *M. persicae* sur poivron sous serre (Yankova et al. 2009), et des huiles essentielles de *Mosla chinensis* (Lamiaceae) (herbe médicinale Chinoise) permet de réduire de 88% les populations de *M. persicae* à +7j après traitement de haricot sous serre (Lu et al. 2020). Par ailleurs, des effets répulsifs vis-à-vis des pucerons *M. persicae* et/ou *A. fabae*, allant de 50% à 75%, ont été relevés pour plusieurs huiles essentielles (en conditions de laboratoire), notamment pour *Peganum harmala*, nootkatone (*Citrus x paradisi*), *Pimpinella anisum* et *Mentha spicata* (Dancewicz et al. 2012 ; Salari et al. 2012 ; Teixeira et al. 2014 ; Galisteo et al. 2019). Pour l'ensemble de ces huiles essentielles, il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur de possibles effets translatinaires. L'intérêt des huiles essentielles est leur faible persistance dans l'environnement due à une certaine instabilité. En effet, elles sont rapidement dégradées par la lumière ou les fortes températures (Turek & Stintzing 2013). Enfin, l'utilisation pratique de ces SA comme insecticides à court terme et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D supplémentaires.

A un horizon plus lointain, d'autres SA sont encore en cours de développement par les firmes phytosanitaires pour l'usage pucerons sur betterave.

3.1.2 Perspectives de R&D

- Des progrès importants pourraient venir de l'adaptation du machinisme agricole pour permettre de pulvériser les produits agissant par contact sous les feuilles des plants de betterave où se réfugient les pucerons. Si certaines de ces substances actives agissant par contact semblent prometteuses en laboratoire ou en conditions contrôlées, un usage au champ nécessitera une adaptation des systèmes d'épandage pour rendre plus efficaces les applications foliaires.
- Afin de contrôler les jaunisses de la betterave, il est primordial de maintenir les populations de vecteurs à des niveaux de seuils faibles, et ce dès le tout début de la saison. En effet la phase importante de propagation virale a lieu au moment de la première colonisation de la culture quand les pucerons sont très mobiles. Dans un contexte de changement climatique, il serait très important de pouvoir mettre à jour les connaissances relatives aux cycles biologiques des vecteurs. Cela permettrait d'optimiser le positionnement des traitements et ainsi de maximiser les chances de limiter la transmission des viroses, quel que soit le ou les virus impliqués. Parmi les paramètres cruciaux, on peut par exemple citer la dynamique des populations des espèces de pucerons vectrices (en particulier *M. persicae*), les seuils de nuisibilité pour déclencher les traitements ou encore la mise au point de modèles prédictifs prenant en compte les aspects climatiques.
- Un programme de gestion des résistances généralisé pourrait retarder l'évolution des phénomènes de résistance aux insecticides dans le but de maintenir les efficacités du flonicamide et du spirotétramate à des niveaux acceptables, le temps que la filière betterave trouve des méthodes de luttés alternatives plus durables. Actuellement, il existe un risque important de voir émerger de nouvelles situations de résistance si le contrôle des pucerons repose uniquement sur un nombre restreint de SA.
- La combinaison de l'utilisation de PPP et d'autres techniques alternatives doit être davantage étudiée pour favoriser des synergies entre les méthodes de lutte, et ainsi limiter les pressions de sélection sur les populations de pucerons. Par exemple, l'utilisation combinée de PPP et de macroorganismes est envisageable en respectant

des conditions particulières d'applications et/ou en utilisant des PPP classés « sans risque » pour les macroorganismes. Ceci permettrait notamment aux macroorganismes d'être efficaces contre les pucerons sur betterave en dépit de traitements antérieurs avec un ou plusieurs PPP(s).

- Des études de R&D seront nécessaires pour permettre une utilisation à plus grande échelle de PPP à base de SA issues de micro-organismes et d'huiles essentielles, certaines de ces SA présentant des potentiels extrêmement intéressants pour la lutte contre *M. persicae* et *A. fabae*.

3.1.3 Synthèse de la littérature scientifique

Introduction

Les deux espèces de pucerons qui transmettent majoritairement les virus responsables des jaunisses de la betterave sont *M. persicae* et *A. fabae* qui sont polyphages, notamment la première espèce qui compte plus de 350 plantes hôtes. Les pucerons sont la cible de traitements insecticides sur betterave, ainsi que sur d'autres cultures pour lesquelles d'autres produits sont autorisés. Pour ces derniers, une extension d'usage sur betterave pourrait être obtenue rapidement si un bénéfice potentiel est identifié. Les substances actives (SA) pour lesquelles des produits sont autorisés contre les pucerons sont listées dans le Tableau 1. Une liste complète des SA présentant des propriétés aphicides est fournie à la fin de cette fiche.

Tableau 1 : Liste des substances actives formulées dans des produits autorisés en 2020 pour des usages pucerons toutes cultures confondues (Source E-phy). Les produits autorisés pour usage sur betterave sont indiqués en gras.

Famille chimique	Substance active	Exemple d'usage pucerons	Commentaire
Pyréthriinoïdes et pyréthrinés	lambda-cyhalothrine	Betterave³	Présence de pucerons résistants à ces substances sur de nombreuses cultures en France. Pyréthrinés utilisables en AB*
	tau-fluvalinate		
	cyperméthrine	Céréales à paille, etc.	
	deltaméthrine	Colza, etc.	
	esfenvalérate	Céréales à paille, etc.	
	Pyréthrinés	Poivron, etc.	
Modulateurs de l'organe chordotonal	flonicamide	Betterave	Très utilisé en culture de betterave
Carbamate	pirimicarbe	Betterave³	Présence de pucerons résistants en France
Dérivés d'acide trétramique et tétronique	spirotétramate	Chou (+ betterave)	Dérogation usage betterave en 2020
Extraits de plantes	huile essentielle d'orange	Arbres et arbustes	Utilisable en AB*
	azadirachtine	Concombres et tomates	Utilisable en AB*

* AB : Agriculture Biologique

³ Sur pucerons de la betterave : uniquement en tant qu'association lambda-cyhalothrine + pirimicarbe ou tau-fluvalinate + pirimicarbe

1. Substances actives entrant dans la composition de produits ayant des AMM en France (Cf. Tableau 3, pages 47 à 49)

1.1. Pyréthriinoïdes et Pyréthrines

1.1.1. Lambda-cyhalothrine

Cette SA est actuellement autorisée pour la lutte contre les pucerons de la betterave à travers une association lambda-cyhalothrine + pirimicarbe, et est par ailleurs largement utilisée pour lutter contre de nombreux ravageurs sur d'autres cultures (Tillman and Mulrooney 2000 ; ACTA 2021). C'est un composé neurotoxique qui cible les canaux sodium. Son niveau d'efficacité est considéré comme acceptable avec cependant un risque de résistance assez important (cible et métabolique), car des populations résistantes vis-à-vis des pyréthriinoïdes sont largement répandues dans le cas des pucerons depuis ces quinze dernières années (Roy et al. 2013; Bass et al. 2014). L'évaluation de l'efficacité au champ est basée sur des essais conduits en 1998 (lors du dépôt de demande d'AMM), et indiquant une efficacité de l'ordre de 75-80% contre les pucerons ; cette valeur d'efficacité a été reprise lors du renouvellement d'autorisation de la lambda-cyhalothrine. Par ailleurs, cette SA présente des DL₅₀ très basses et équivalentes pour *M. persicae* et un de ses parasitoïdes (Anjum and Wright, 2016).

Sur betterave, des problèmes d'efficacité contre les pucerons ont été rapportés ; ils résultent de l'omniprésence de populations de pucerons résistantes aux pyréthriinoïdes, ainsi que de la difficulté à atteindre les pucerons, qui sont souvent logés sur la face inférieure des plants de betterave, avec des traitements par pulvérisations, (Hauer et al. 2017). Les pyréthriinoïdes agissant par contact, leur efficacité est réduite lorsque les insectes se positionnent dans des zones refuges difficiles d'accès par pulvérisation.

1.1.2. Tau-fluvalinate

Le tau-fluvalinate est un composé neurotoxique qui cible les canaux sodium. Cette SA est principalement un acaricide très utilisé dans les ruches pour lutter contre le varroa. Elle est cependant autorisée pour une utilisation contre les pucerons de la betterave à travers une association tau-fluvalinate + pirimicarbe (ACTA 2021) et son efficacité est considérée comme satisfaisante contre *M. persicae* en l'absence de populations résistantes. Lors de tests réalisés au champ dans le cadre du renouvellement d'autorisation du tau-fluvalinate, sur 14 essais (2007-2011) l'efficacité était de 49% en moyenne contre *M. persicae* sur colza (l'efficacité était cependant très faible dans certains essais, probablement à cause de populations résistantes). Les tests aux champs ont aussi rapporté une efficacité de 77% contre *A. fabae* sur pois (3 essais réalisés en 2008-2009). Étant donné que des phénomènes de résistance peuvent fortement influencer sur le niveau d'efficacité contre *M. persicae*, une surveillance de cette résistance est obligatoire pour assurer l'efficacité de la lutte avec cette SA. Par ailleurs, le problème inhérent à la difficulté d'atteindre les pucerons situés à la face inférieure des plants de betterave est aussi un facteur de réduction de l'efficacité pour cette culture.

1.1.3. Cyperméthrine et esfenvalérate

La cyperméthrine et l'esfenvalérate sont des composés neurotoxiques (ciblant les canaux sodium) qui sont actuellement autorisés pour la lutte contre les pucerons sur céréales, ainsi que sur diverses autres cultures (rosiers, légumineuses, etc.) (ACTA 2021)

notamment grâce à leur large spectre d'action (inhérent à la famille de composés). Le niveau d'efficacité de la cyperméthrine sur ces cultures est considéré moyen à élevé au vu des données d'efficacité rapportées dans le dossier d'AMM initial (75-80% d'efficacité minimum contre les cibles au champ) mais il n'existe pas de données d'efficacité contre les pucerons sur betterave. L'efficacité au champ de l'esfenvalérate contre les pucerons a été aussi jugée satisfaisante lors de la demande d'AMM initiale (efficacité supérieure à 75%) mais il n'existe pas de détails quant à son efficacité spécifique contre les pucerons *M. persicae* ou *A. fabae*. Les deux composés font face à d'importants niveaux de résistance aux champs (cible et métabolique), ce qui ne plaide pas en faveur de leur utilisation contre les pucerons sur betterave (les populations de *M. persicae* étant largement résistantes aux pyréthriinoïdes).

1.1.4. Deltaméthrine

La deltaméthrine est la SA de référence pour la famille des pyréthriinoïdes, c'est un composé neurotoxique qui cible les canaux sodium. C'est le premier pyrethriinoïde à avoir été mis sur le marché en France en 1978 pour des usages insecticides très variés. Cette SA est largement utilisée pour lutter contre de nombreux ravageurs (coléoptères et chenilles phytophages, pucerons, etc.) sur des cultures variées (céréales, colza, cultures légumières). Elle présente un large spectre d'action et a une efficacité jugée satisfaisante contre les pucerons en plein champ (>75% de mortalité contre le puceron *M. persicae* sur colza) lors des tests d'efficacité réalisés dans le cadre du dossier d'AMM. Comme tous les pyréthriinoïdes, cette SA voit son efficacité largement réduite en présence de populations de pucerons résistantes, ainsi que dans le cas de pucerons pouvant se cacher dans des zones refuges à l'abris des pulvérisations de l'insecticide.

1.1.5. Pyrèthres naturels (pyréthrines)

Les SA contre les insectes appelées pyrèthres naturels sont extraites à partir de plantes de la famille des asteraceae. Ces composés sont des neurotoxiques qui ciblent les canaux sodium. L'efficacité de ces produits est considérée comme acceptable (>50%) d'après les données déposées lors de la demande d'AMM. Ils présentent une faible persistance dans l'environnement : les molécules sont instables à la lumière, à l'air et à l'humidité. Leur spectre d'action est large au sein de l'embranchement des arthropodes. De nos jours, l'utilisation des pyrèthres naturels est autorisée pour lutter contre acariens, aleurodes, chenilles phytophages, cochenilles, pucerons et thrips. Ils ne font pas exception aux problèmes de résistance rencontrés avec la famille chimique des pyréthriinoïdes (communication ITB 2021).

1.2. Pirimicarbe

Le pirimicarbe est l'un des derniers carbamates à être encore sur le marché, il tient sa longévité à sa faible rémanence et son profil moins toxique que les autres inhibiteurs de l'acétylcholinestérase (Jansen et al 2011). C'est un insecticide systémique (par absorption racinaire), par contact avec un effet fumigant. C'est la phase gazeuse de cette substance active qui est efficace contre *M. persicae*, mais la protection ne dure que quelques jours (Hauer et al 2017). Les tests aux champs réalisés dans le cadre de dossiers d'AMM indiquent une efficacité >90% contre *M. persicae* (27 essais sur pêchers, 1994-2008) de l'ordre de 95% contre *A. fabae* (3 essais sur pois, 2008-2009). Cependant, sur colza ou betterave, des pertes d'efficacité ont été enregistrées probablement dues à la présence de populations résistantes ; celles-ci sont fréquentes et impliquent des mutations sur la cible,

ainsi que de la résistance métabolique. En effet, il existe de la résistance via des mécanismes de détoxification connue depuis de nombreuses années chez *M. persicae*, y compris sur des clones prélevés sur betterave (Williams et al 199). En France, le plan de surveillance a pu détecter une proportion de l'ordre de 25% d'individu portant une mutation conférant une résistance de cible à ce carbamate.

1.3. Flonicamide

Le flonicamide est un composé organique pyridinique. Cette SA a un mode d'action spécifique aux insectes piqueurs suceurs. Elle agit sur les organes chordotonaux (action sur les muscles) et induit l'arrêt de la prise de nourriture. Elle a des propriétés systémiques et translaminaire. Elle a une persistance d'environ 3 semaines. La flonicamide est autorisée en France pour lutter contre les pucerons sur betterave et son niveau d'efficacité est considéré comme satisfaisant. Les tests aux champs réalisés sur betterave dans le cadre du dossier d'AMM indiquent une efficacité de 90% contre *M. persicae* (3 essais sur la période de 2010-2012 et 27 essais sur pêchers, sur la période de 1994-2008) et de 90% contre *A. fabae* (11 essais sur la période de 2008-2013). Cependant, en cas de très forte pression parasitaire (comme en 2020) cette efficacité ne suffit pas à limiter suffisamment les populations de pucerons pour endiguer les épidémies virales (Communication ITB 2021). Cette observation corrobore les conclusions de Samara et al. (2021) indiquant qu'aucun des quatre insecticides testés : acétamipride, pymétrozine, λ -cyhalothrine, et flonicamide, ne peut limiter la transmission du virus TuMV par *M. persicae* (27% de réduction de transmission virale au maximum). Par ailleurs, les premiers phénomènes de résistance au flonicamide ont été détectés chez un puceron du pommier, *Dysaphis plantaginea*, dans des vergers français (degré de résistance moyen à ce jour).

1.4. Abamectine

L'abamectine qui appartient à la famille des avermectines, a pour cible d'action les récepteurs GABA, et présente un large spectre d'action : nématocide, acaricide et insecticide. Elle est autorisée en France pour lutter contre des acariens, mouches, phytoptes et thrips sous diverses formulations (ACTA2021). Elle agit par ingestion et est translaminaire. Elle semble montrer une bonne efficacité contre les pucerons (réduction de 87% des populations de *Chaetosiphon fragaefolii* à j+12 après traitement sur fraisiers (Fitzgerald 2004). Par ailleurs, l'utilisation d'acide polylactique (PLA) en tant que polymère et d'acide tannique (TA) pour faciliter l'interaction avec différents substrats donne des résultats intéressants pour lutter contre *M. persicae* (LC₅₀ de 17,38 mg/L et 10,68 mg/L pour Abam-PLA et Abam-PLA-TA respectivement) (Yu et al. 2019). Par ailleurs, Zuo et al. (2016) signale la présence de plusieurs populations de *Rhopalosiphum padi* résistantes à l'abamectine en Chine (jusqu'à 12 fois plus résistantes par rapport à une population sensible).

1.5. Benzoate d'émamectine

De la même famille que l'abamectine, cette SA est autorisée pour lutter contre les lépidoptères. Le benzoate d'émamectine agit par ingestion et dans une moindre mesure par contact, et possède des propriétés translaminaires. Le benzoate d'émamectine semble montrer une certaine efficacité contre le puceron *M. persicae* sur colza (réduction de 61% des populations à j+3) (Khan et al. 2020). De plus, de nouvelles formulations (par

microencapsulations) sont en cours de développement dans le but de maximiser le rapport bénéfique / risque de cette SA avec un développement de son utilisation contre des pucerons. Ces formulations ont été testées contre *M. persicae* et semblent plus efficaces lors de tests au laboratoire (Guo et al 2015). Par ailleurs, une étude au Pakistan signale la présence de populations de *Brevicoryne brassicae* résistantes au benzoate d'émamectine sur colza (jusqu'à 74 fois plus résistantes par rapport à un contrôle) (Ahmad & Akhtar 2013).

1.6. Spirotéramate

De la famille des kétoénoles, cette SA agit comme un inhibiteur d'une enzyme impliquée dans la voie de biosynthèse des lipides. C'est un insecticide systémique qui se déplace dans les vaisseaux du xylème et du phloème et qui agit sur l'insecte après ingestion. Cette SA peut montrer des niveaux d'efficacité comparables aux néonicotinoïdes sur pêcher en Bulgarie (Arnaudov and Petkova, 2020). L'efficacité est jugée satisfaisante, avec 100% d'efficacité rapportée dans l'essai réalisé sur fraisier dans le cadre de la demande d'extension d'AMM. Elle présente aussi une persistance d'action longue (jusqu'à 6 semaines) mais sa vitesse d'action est lente ; ceci réduit de fait son intérêt pour limiter les viroses (transmission possible avant la mort du puceron). Cette SA est déjà largement utilisée en arboriculture fruitière pour lutter contre diverses espèces de pucerons dont *M. persicae*. Elle a fait l'objet d'une dérogation pour un usage betterave en 2020 sans que cela n'ait permis d'endiguer l'épidémie de jaunisse. Des phénomènes de résistance sont possibles, bien qu'ayant été détectés jusqu'à présent uniquement chez des clones d'*Aphis gossypii* obtenus par évolution expérimentale au laboratoire (Peng et al 2016).

1.7. Cyantraniliprole

Il appartient à la famille des anthraniliques diamide et est homologué en France pour différents usages pour lutter contre des thrips, des chenilles phytophages et des mouches. Il agit sur les récepteurs à ryanodine des muscles de l'insecte. Cet insecticide n'a pas montré d'efficacité contre *M. persicae* sur colza (ni sur la virose TuYV largement présente sur colza) lors de tests en plein champ via un traitement de semences (Conrad et al. Cependant, Barry et al. (2014) indiquent que cette SA peut avoir une efficacité intéressante contre ce puceron si elle est formulée avec de l'huile ou sous forme d'émulsion, ce qui lui permet d'avoir une action translaminare. Il n'est pas fait état de résistance au cyantraniliprole dans les populations de *M. persicae* prélevées sur le terrain en Australie et en Europe (Foster et al. 2012 ; De Little et Umina 2017).

1.8. Indoxacarbe

Cette SA de la famille des oxadiazones agit sur la même cible moléculaire que les pyréthriinoïdes mais sur un site d'action différent. L'indoxacarbe induit une réduction de 97% des populations de *M. persicae* en plein champ à j+2 et j+7 après le traitement (à la dose recommandée de 150 g/ha), lors de tests réalisés en Egypte en champs de gombo (*Abelmoschus esculentus*, Malvaceae) (Gesraha et Ebeid, 2021). De surcroît, l'indoxacarbe peut induire des effets sublétaux chez les pucerons exposés (réduction de la longévité et de la fécondité) (test sur *Rhopalosiphum padi*) (Zuo et al. 2016). La sélection de populations résistantes a été observée sur lépidoptères (Cui et al. 2018) mais pas sur puceron pour le moment.

1.9. Extraits naturels et huiles

1.9.1. Huile essentielle d'orange

L'huile essentielle d'oranger amer (*Citrus aurantium*) a des propriétés aphicides quand elle est utilisée sous forme de fumigant. Elle est principalement composée de monoterpénoïdes : Limonène (67,1%), Linalool (8,37%), β -pinène, (4,02%), Myrcène (3,17%), β -Ocimène (2,36%) and α -pinène (1,18%) connus pour avoir des propriétés insecticides. Lorsqu'elle est utilisée à la concentration de 33,33 μ l/l d'air elle tue 60% des *A. fabae* présents. Les courbes dose/mortalité à 24h obtenues sur 4 espèces de pucerons ont des profils habituels pour des insecticides (Chaieb et al. 2018). Ces huiles ne présentent pas de propriétés translaminaires.

En général, les huiles essentielles de *Citrus* sont des aphicides efficaces en applications foliaires : elles peuvent notamment présenter le même niveau d'efficacité contre le puceron *M. persicae* sur cultures florales sous serre (pensée) (réduction de 75% des populations à 60 g ai/l et 2.4l/ha) que le flonicamide et le spirotétramat (Smith et al. 2018). Al-Antary et al. (2018) indique par ailleurs un niveau d'efficacité similaire lorsqu'elle est utilisée à une concentration de 10% (v/v). Ces huiles essentielles de *Citrus* sont déjà commercialisées sous diverses formulations (<https://ephy.anses.fr/substance/orange-oil>).

1.9.2. Huile de neem - azadirachtine

Les produits biocides à base d'huile de neem (azadirachtine) ont aussi été largement étudiés, notamment pour leur potentiel effet aphicide et divers produit commerciaux sont disponibles (<https://ephy.anses.fr/substance/azadirachtin>). L'efficacité de l'azadirachtine sur les pucerons a été démontrée au laboratoire, avec notamment un effet négatif sur la croissance intrinsèque des populations de pucerons (r_m), notamment sur *M. persicae* (Venzon et al. 2007). L'efficacité a par ailleurs été aussi démontrée contre ce puceron en serre sur laitue avec des réductions de populations de pucerons pouvant aller jusqu'à 85% à j+18 après traitement et 75% à j+28 après traitement (Fournier & Brodeur 2000 ; Smith et al. 2018). L'azadirachtine peut par ailleurs permettre de réduire la transmission des viroses par *M. persicae* sur culture de tabac (Nisbet et al. 1996). Cependant, il semble que l'efficacité contre *M. persicae* puisse dépendre de la culture traitée ; Edelson et al. (2002) rapportent une absence d'efficacité à 72h du Neemix® (produit à base d'azadirachtine) (2,5 g/L à 18,7 L/ha) contre *M. persicae* en champ de navet. De surcroît, des essais préliminaires menés par l'ITB en 2019 et 2020 ont révélé une efficacité médiocre de l'azadirachtine contre pucerons de la betterave, ainsi que sur les symptômes de jaunisse (communication ITB). Enfin, des populations résistantes peuvent être sélectionnées lors d'expositions chroniques ; Feng & Isman (1995) rapportent une multiplication par 9 de la résistance à l'azadirachtine chez *M. persicae* après une sélection opérée sur 40 générations.

1.9.3. Spinosad

Le spinosad est un mélange de deux toxines sécrétées par une bactérie actinomycète vivant dans le sol, *Saccharopolyspora spinosa* et est connu pour être efficace contre les lépidoptères, thysanoptères et diptères. Sa cible moléculaire est la même que celle des néonicotinoïdes (récepteurs nicotiniques) mais son site de fixation est différent. Le spinosad présente une efficacité modérée pour la lutte contre les pucerons, avec un maximum de 40% de réduction des populations de *M. persicae* en champs de crucifères (Dively et al. 2020). Une récente étude suggère une possible sélection de populations résistantes de pucerons au spinosad (*Aphis gossypii* en Inde) (George et al. 2019).

2. Substances actives n'entrant pas encore dans la composition de produits autorisés en France (Cf. Tableau 4, pages 52 à 54)

2.1. Composés de synthèse

2.1.1. Détergents

Deux détergents, le SU-120 et le Tecsa (R) Fruta, induisent 70% et 85% de mortalité chez *M. persicae* quand ils sont testés à des concentrations de 2,5% et 5% (respectivement) en pulvérisation en conditions de laboratoire (Curkovic, et al. 2006). Ces produits agissent par contact direct (probablement par étouffement) ce qui pourrait limiter leur utilisation dans le cadre de la lutte contre pucerons sur betterave (pucerons cachés sous les feuilles) en l'absence de méthode de pulvérisation adaptée.

2.1.2. Squamocine et annonacine

La squamocine (une acétogénine d'annonaceae comme *Anona muricata*) est un inhibiteur de la chaîne respiratoire qui montre des propriétés insecticides sur *M. persicae* (Guadano et al. 2000) ; on relève une mortalité de 20% à la dose de 100 µg/cm² ainsi qu'une baisse de fertilité des pucerons (de l'ordre de 50%) à la même dose. L'annonacine est une molécule très proche qui présente quant à elle des propriétés phagorépusives. Des tests pour estimer l'effet mutagène de ces nouveaux inhibiteurs de la chaîne respiratoire ont montré des résultats encourageants (Guadano et al. 2000). Des tests de toxicité sur mammifères et organismes non-cibles seront cependant indispensables pour conclure sur la possibilité d'utilisation de ces molécules comme insecticides car cette classe de composés est connue pour sa forte écotoxicité. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.1.3. Clonidine et analogues

Des composés adrénergiques, tels que la clonidine et ses analogues ont des propriétés insecticides contre *M. persicae* (Creemer et al. 2017). L'un de ces composés a des propriétés insecticides comparables à celles de l'imidaclopride (en termes de toxicité aiguë au laboratoire). Ces composés ne sont pas encore utilisables en agriculture car lorsqu'ils pénètrent dans la plante (exemple du coton), ils se font rapidement piéger dans la vacuole et ne sont donc pas biologiquement disponibles pour agir sur *M. persicae*. Une explication possible de ce phénomène est que le taux de métabolisation et de piégeage de ces SA, dans les vacuoles, est plus rapide que le flux translaminaire (Creemer et al. 2017). L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.1.4. Composés pyrazole-carboxamide

De nouveaux composés de type 1H-pyrazole-5-carboxamide ayant des propriétés insecticides contre *A. fabae* ont été découverts récemment (Huang et al. 2017). L'analogue 9l du 1, 3-diméthyl-N-((2-phenylthiazol-4-yl)méthyl)-1H-pyrazole-5-carboxamide (AN91) présente une activité insecticide comparable à celle du tolfenpyrad, un pyrazole, en terme de toxicité aiguë contre les pucerons au laboratoire. L'action insecticide du AN91 ciblerait principalement la respiration cellulaire. De nombreuses études seront nécessaires sur cette molécule avant d'envisager une possible utilisation en France. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.2. Molécules extraites de micro-organismes

2.2.1. Rhamnolipides

Les rhamnolipides sont des molécules produites par des microorganismes. Le dirhamnolipide, produit par *Pseudomonas* sp. EP-3, est la molécule la plus active parmi celles testées contre *M. persicae* (Kim et al. 2011). Dans cette étude, le surnageant du milieu de culture débarrassé des bactéries et ramené à la dose de 100 ppm de dirhamnolipide, est pulvérisé sur des plants de poivrons infestés de *M. persicae*. Il provoque 100 % de mortalité chez ces pucerons au bout de 24h. Ces molécules sont facilement biodégradables et agissent comme des détergents en modifiant la structure lipidique des membranes cuticulaires des pucerons provoquant ainsi leur déshydratation puis leur mort. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.2.2. Lipopeptides - Xantholysines

Le surnageant d'une culture de bactéries de l'isolat DJ15 du genre *Pseudomonas* a des propriétés aphicides contre *M. persicae* ; il induit 100% de mortalité des pucerons 24h après traitement en conditions de laboratoire (Lim et al. 2017). Les métabolites à l'origine de cette action biologique sont deux lipopeptides, des xantholysines, présentant de fortes activités insecticides. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.2.3. Acides gras de *Trichoderma* sp.

Un extrait d'acides gras du champignon endophytique *Trichoderma* sp. EFI 671, affecte l'alimentation de *M. persicae*. En fonction du solvant choisi, ces extraits repoussent de 77% à 97% des adultes de *M. persicae* au laboratoire. Cet effet est corrélé avec la concentration en linoléate de méthyle et en acide linoléique de ces extraits (Kaushik et al. 2020).

Une autre étude de laboratoire sur les composés constituant les extraits des champignons tropicaux, *Gliomastix maseei* et *Clonostachys rosea* a révélé que leurs acides gras et dérivés ont des activités répulsives sur *M. persicae* (sans données chiffrées). Le 9-octadécénoate de méthyle est le composé le plus actif (Ruiz-Jimenez et al. 2017). Une autre source de composés répulsifs a été trouvée dans une souche d'*Acremonium maseei* CICY026 avec les métabolites hexahydro acrémonintriol et l'acrémone A glucoside étant les plus actifs (Ruiz-Jimenez et al. 2019). L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.2.4. Quinolactecide et oxalicine B

Deux molécules insecticides extraites de deux champignons du genre *Penicillium* ont été identifiées comme efficaces contre *M. persicae* (Abe et al. 2005 ; 2007). La première extraite de *P. citrinum* est la quinolactecide ; elle induit 88% de mortalité à la dose de 250 ppm. La seconde, l'oxalicine B, induit 82% de mortalité à 100 ppm. Cette molécule semble plutôt spécifique car elle n'est pas très active sur les autres bio-agresseurs étudiés : *Plutella xylostella*, *Frankliniella occidentalis*, *Bemisia argentifolii*, *Tetranychus urticae*, *Sphaerotheca fuliginea*, *Botrytis cinerea*. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3. Huiles essentielles et extraits de plantes

A partir de la fin des années 1990, de nombreuses recherches ont été menées sur l'intérêt des huiles essentielles dans la lutte contre les ravageurs des cultures (Isman 2020). Une liste des différentes publications traitant des effets de ces huiles contre les pucerons (essais en semi-champ ou au champ) ou traitant spécifiquement de la toxicité de ces huiles contre *M. persicae* et/ou *A. fabae* (essais en laboratoire, en semi-champ et/ou champ) est présentée dans le Tableau 4 synthétisant l'ensemble des efficacités des SA recensées (à la fin de cette fiche ; Cf. pages 53 et 54). Des mélanges d'huiles essentielles sont déjà largement commercialisés pour lutter contre des ravageurs aux États-Unis (p.ex. cochenilles) mais leur efficacité contre les pucerons est globalement insuffisante pour enrayer des populations de *M. persicae* sous serre (Tableau 2) (Cloyd et al. 2009).

Tableau 2 : Produits à base d'huiles essentielles commercialisées aux États-Unis pour lutter contre des pucerons (Cloyd et al. 2009)

Product trade name ^a	Labeled arthropod pests	AI(s)	Rate
Bug Assassin	Aphids, spider mites, whiteflies	0.52% eugenol, 0.35% sodium lauryl sulfate, 0.15% peppermint oil, and 0.006% citronella oil	RTU
Bugzyme	Aphids, spider mites, whiteflies	0.18% citric acid	RTU
Concern	Mealybugs, mites	96% canola oil	2.0 fl oz/3 quarts (20.8 ml/liter)
Fruit & Vegetable Insect Spray	Aphids, mealybugs, mites, whiteflies	0.40% rosemary oil, 0.30% cinnamon oil, 0.30% clove oil, and 0.30% garlic extract	RTU
GC-Mite	Aphids, mites, thrips	40% cottonseed oil, 20% clove oil, and 10% garlic oil	1.5 fl oz/1.0 gallon (11.7 ml/liter)
Neem Oil	Aphids, mites	70% clarified hydrophobic extract of neem oil	1.0 fl oz/1.0 gallon (7.8 ml/liter)
Organocide	Aphids, mealybugs, spider mites, thrips, whiteflies	92% edible fish oil, 5% sesame oil, and 3% lecithin	2.0 fl oz/1.0 gallon (15.6 ml/liter)
Pyola	Aphids, mealybugs, mites, thrips, whiteflies	89.5% canola oil and 0.5% pyrethrins	2.0 fl oz/3 quarts (20.8 ml/liter)
Sharpshooter	Aphids, mealybugs, mites, whiteflies	10% sodium lauryl sulphate and 5% clove oil	14.0 fl oz/1.0 gallon (109.4 ml/liter)
SMC	Spider mites	94% canola oil, 1% coriander oil, and 5% triethanolamine	5.0 TSP/1.0 quart (26.0 ml/liter)

^a Product manufacturers: Bug Assassin (Light Manufacturing Co., Portland, OR), Bugzyme (Light Manufacturing Co.), Concern (Necessary Organics, Inc.), Fruit & Vegetable Insect Spray (Dr. Earth Co.), GC-Mite (JH Biotech, Ventura, CA), Neem Oil (Lawn and Garden Products, Inc., Fresno, CA), Organocide (Organic Laboratories, Stuart, FL), Pyola (Gardens Alive, Inc., Lawrenceburg, IN), Sharpshooter (St. Gabriel Laboratories, Orange, VA), and SMC (Hydrodynamics International, Inc., Lansing, MI).

2.3.1. Extraits de trichomes de tabac

Des mélanges de 4 composés de type sucrose - esters ont été identifiés à partir d'extraits de feuilles de *Nicotiana glauca*. Ces composés sont des molécules produites dans les trichomes des plantes du genre *Nicotiana*. Ils semblent efficaces contre les nymphes de *M. persicae* lors de tests réalisés en condition de laboratoire (Neal et al. 1994) ; ils ont une efficacité similaire au témoin positif dans l'étude (malathion, un organophosphoré) et semblent avoir une efficacité plus importante que l'huile de neem. Il n'y a pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.2. Huile du thé du Mexique

L'huile du thé du Mexique (*Dysphania ambrosioides*, Amaranthaceae) a aussi démontré une efficacité intéressante contre *M. persicae* sur culture ornementale (pensées) sous serre ; une application sous forme d'émulsion à 16,75% (4,0 L/ha) de *D. ambrosioides*

permet notamment de réduire de 75% les populations de pucerons sous serres à j+21 à j+28 après traitement (Smith et al. 2018). Une réduction de 95% des populations de *M. persicae* a aussi été rapportée culture de verveine sous serre (Chiasson et al. 2004) lors d'un traitement à la concentration de 0,5% SA. Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.3. Galangustine

La Galangustine est un flavonoïde extrait de *Bignonia callistegioides* (Bignoniaceae). Elle a une activité répulsive de l'ordre de 40% pour *M. persicae* (Castillo et al. 2013) ; en conditions de laboratoire, lorsque les pucerons ont le choix entre des feuilles traitées avec ce composé ou non, 71 % préfèrent les feuilles non-traitées contre 29 % les feuilles traitées. Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.4. Huile d'une euphorbe du Brésil

L'euphorbe du Brésil (*Jatropha curcas* - Auphorbiaceae) produit une huile toxique pour *M. persicae* (Holtz et al. 2016). En conditions de laboratoire, cette huile utilisée fraîche à la dose de 2 % induit 98% à 100% de mortalité chez *M. persicae*. Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.5. Extrait de *Sophora alopecuroides*

Sophora alopecuroides (Fabaceae) est une herbe vivace, largement répandue dans le nord-ouest de la Chine, qui est riche en alcaloïdes et présente des effets insecticides (Ma et al. 2018). Ces alcaloïdes sont efficaces contre nombres d'insectes, notamment des Coleoptères, Lépidoptères, et des Hemiptères (pucerons). Les principaux alcaloïdes de ces extraits sont l'alopérine, la matrine, l'oxymatrine, la sophocarpine, la sophoridine, la cytosine et la nicotine. Leur toxicité évaluée au laboratoire (DL50) sur *M. persicae* est respectivement de 0,031 ; 0,072 ; 0,157 ; 0,053 ; 0,046 ; 0,042 et 0,067 µg/puceron (Ma et al. 2018). Il n'y pas de résistance connue (sauf à la nicotine qui est l'un des composants de cette huile essentielle) et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.6. Extrait de graines de *Peganum harmala* (rue de Syrie ou rue sauvage)

Des extraits acétoniques de graines de *Peganum harmala* (Nitrariaceae) ont montré des propriétés intéressantes dans la lutte contre les pucerons. Ces graines sont connues pour être très riches en harmanes, des alcaloïdes qui seraient les principes actifs de ces extraits. Sous forme de mélange, ils sont à la fois répulsifs et toxiques sur *M. persicae*. L'indice de répulsivité à la concentration de 60 mg/mL est de 72% contre *M. persicae* (âgés de 1 à 2 jours), et la mortalité des pucerons 48h après le traitement à cette même concentration est de 90% pour *M. persicae* et 71% pour *A. fabae* (Salari, et al. 2012). Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.7. Nootkatone

Le nootkatone est un sesquiterpénoïde naturel présent dans plusieurs agrumes dont les pamplemousses (*Citrus x paradisi* – Rutaceae) et dans le cyprès de Nootka (*Cupressus nootkatensis* – Cupressaceae). Il présente des propriétés insecticides et répulsives pour les insectes (Karchesy et al. 2018, Panella et al. 2005 ; Handore et al. 2019). Pour améliorer la persistance du nootkatone et diminuer sa volatilité en milieu ouvert, des dérivés de cette molécule ont été créés et testés pour leur activité aphicide (Galisteo et al. 2019). Le dérivé n°20 a montré des activités insecticides intéressantes contre *M. persicae* avec une répulsivité des feuilles traitées (24h après traitement) >70%, à la concentration de 5 mg/mL (50 µg/cm² de feuille) (Galisteo et al. 2019). Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.8. Acides Dicafeoyl

Les acides dicafeoylquinique et dicafeoyltartrique produits par l'artichaut (*Cynara cardunculus* – Asteraceae) présentent des propriétés aphicides (Poessel et al, 2009). Ces molécules sont présentes à des teneurs importantes dans des légumes consommés par l'homme, comme les patates douces (Padda et al. 2008). Elles sont efficaces en laboratoire contre les pucerons en général (DL₅₀ = 0,5 mM) et en particulier sur des souches de *M. persicae* résistantes à des insecticides appartenant aux familles des néonicotinoïdes, des organophosphorés et des pyréthrinoïdes. Pour que ces SA non systémiques expriment leur potentiel aphicide, il faut qu'elles soient ingérées par les pucerons or elles ne pénètrent pas naturellement dans les tissus foliaires. Il n'y pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.9. Extraits de *Tagetes minuta* (Tagète des décombres)

L'exposition aux composés volatiles de *T. minuta* (Asteraceae) induit une diminution de 85% de la reproduction de *M. persicae* et une baisse >90% des populations du puceron à j+4 après traitement (au laboratoire). Les tests ont été réalisés en boîte de Petri par exposition aux vapeurs de l'huile essentielle (1 µL d'huile essentielle par boîte de Petri) (Tomova et al. 2005). Une réduction de la dose à 0,5 µL réduit significativement l'efficacité. Il n'y a pas de résistance connue et pas d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

2.3.10. Huiles essentielles d'*Eucalyptus* sp. Et essence de térébenthine (Turpentine)

Ces huiles essentielles ont été testées en émulsions concentrées à 1% pour lutter contre *M. persicae* sur poivron sous serre. Les populations ont été réduites de 84% après traitement (Yankova et al. 2009). Il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.11. Huiles essentielles de *Thymus vulgaris* et *Pimpinella anisum* (thym et anis)

Lors de tests de choix réalisés en conditions de laboratoire sur disques foliaires (choux) placés dans des boîtes de Petri et préalablement traités avec une solution de *T. vulgaris* (Lamiaceae) ou de *P. anisum* (= *P. aromatica* – Apiaceae) à 0,1%, l'effet répulsif sur *M. persicae* 24h après traitement est de, respectivement, 49% et 75% (Dancewicz et al. 2012). Il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur un possible effet translaminaire.

L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.12. Huiles essentielles de *Lippia origanoides* et *Mentha spicata* (arbuste Brésilien et menthe verte)

Lors de tests de choix réalisés en conditions de laboratoire sur disques foliaires (tomate) placés dans des boîtes de Petri et préalablement traités avec une solution de *Lippia origanoides* (Verbenaceae) ou *Mentha spicata* (Lamiaceae) à 0,5%, l'effet répulsif sur *M. persicae*, 72h après traitement, est de respectivement 36-50% et 28-48% (Teixeira et al. 2014). La mortalité est non significative ou faible (dans le cas des nymphes exposées à *Mentha spicata*). Il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.13. Huiles essentielles de *Mosla chinensis* (herbe médicinale Chinoise)

Lors de tests de choix réalisés sous serre (haricot rouge), un traitement en émulsion de l'huile essentielle de *Mosla chinensis* (Lamiaceae) à 10% (pulvérisation à une dose de 600 l/ha) a permis de réduire de 88% les populations de *M. persicae* j+7 après traitement initial (Lu et al. 2020). Il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.14. Huiles essentielles de *Mentha pulegium* et *Melissa officinalis* (menthe pouliot et mélisse officinale)

Lors de tests de choix réalisés en conditions de laboratoire sur plantes d'aubergine traitées par pulvérisation avec une émulsion d'huiles essentielles de *M. pulegium* ou *M. officinalis* (Lamiaceae) à 0,50 mL/L, des adultes de *M. persicae* ont une réduction de longévité de 79% et 86% (respectivement). De surcroît, ces traitements avec *M. pulegium* ou *M. officinalis* à 0,50 mL/L induisent un quasi-arrêt de reproduction des pucerons exposés (réduction de fécondité de 95% à 100%) (Petrakis et al. 2014). Il n'y a pas de résistance connue ni d'information sur un possible effet translaminaire. L'utilisation pratique comme insecticide à court terme ne semble pas possible sans des travaux de R&D supplémentaires.

2.3.15. Acide pyroligneux - sous-produit de fumée de bois

L'utilisation de sous-produits de fumées de feu de bois, l'acide pyroligneux (80-90 % d'eau + 10-20 % de composés organiques) a été étudiée comme traitement insecticide (Mmojeje and Hornung 2015) ; une efficacité de 20% à 30% sur *M. persicae* au laboratoire est rapportée à la dose de 10% après 48h d'exposition (effet choc et mortalité). L'utilisation pratique comme insecticide à court et moyen terme ne semble pas possible sans d'importants travaux de R&D.

Tableau 3 : Substances actives entrant dans la composition de produits ayant des AMM en France

Composé/ famille	Exemple de produit commercial	Puceron(s) testé(s)	Statut AMM et efficacité	Résistance connue	Translaminare, oui/non	Référence
cyperméthrine / pyréthrinoïdes	Cythrine max	Diverses espèces de pucerons	Autorisé contre puceron sur céréales, diverses légumineuses et rosiers. Défavorable en usage sur betterave car absence de données efficacité (d'après dossier). Niveau d'efficacité jugé de moyen à élevé.	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier AMM
deltaméthrine / pyréthrinoïdes	Decis expert Decis protech	<i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> mais pas sur betterave	A été jugé comme satisfaisant (d'après dossier AMM). Efficacité par principe de 75% (historique)	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier renouvellement
lambda- cyhalothrine / pyréthrinoïdes	Karaté avec technologie Zéon	<i>M. persicae</i>	Niveau d'efficacité considéré comme acceptable avec risque de résistance moyen à fort. L'efficacité est évaluée sur la base d'essais réalisés en 1998 avec pour référence une autre pyréthrinoïde, la deltaméthrine.	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier renouvellement
tau fluvalinate / pyréthrinoïdes	Klartan (ancien nom) Mavrilk Flo	<i>M. persicae</i> et autres pucerons	Niveau d'efficacité considéré comme satisfaisant. Pour essai <i>M. persicae</i> sur colza : 49% en moyenne avec certaines efficacités très faibles (14 essais, 2007-2011) Pour essai <i>A. fabae</i> sur pois : 77% (3 essais, 2008-2009) Surveillance de la résistance pour <i>M. persicae</i> demandée	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier renouvellement
esfenvalérate / pyréthrinoïdes	Mandarin Pro Sumi Alpha	Diverses espèces de pucerons	Niveau d'efficacité jugé satisfaisante, pas d'essais d'efficacité discutés pour <i>M. persicae</i> ou <i>A. fabae</i> . Efficacité par principe de 75% (historique)	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier renouvellement ou extension
pyréthrines / pyréthrines	Kenpyr Pirecris	Diverses espèces de pucerons	Niveau d'efficacité considéré comme acceptable.	<i>M. persicae</i> : très fréquent cible et métabolique	non (contact)	Dossier AMM

pirimicarbe / carbamates	Pirimor G	<i>M. persicae</i> et autres pucerons	Pour <i>M. persicae</i> , les données d'efficacité sont anciennes mais avec des bonnes efficacités (>90%) pour 27 essais sur pêcher entre 1994-2008. Sur colza ou betterave, des pertes d'efficacité ont été enregistrées mais pas de nouvelles données fournies. Pour essai <i>A. fabae</i> sur pois dans un autre dossier : 95% efficacité (3 essais, 2008-2009)	<i>M. persicae</i> : fréquent cible, métabolique existant	oui (systémique par absorption racinaire) + contact + effet fumigant	Dossier renouvellement
indoxacarbe / oxadiazines	Avaunt 150 SC	<i>M. persicae</i>	Réduction de 97% des populations de <i>M. persicae</i> à j+2 et j+7 après traitement (150 g/ha) en champs d'okra	Puceron : non ; Autres : oui (lepidoptères)	oui (systémique)	Gesraha & Ebeid (2021)
spinosad / spynosines	Entrust	<i>M. persicae</i>	Réduction de maximum 40% des populations, au champ (<i>Brassicaceae</i>) (52,7-105,5 g SA/ha)	Possible (cas sur <i>Aphis gossypii</i> en Inde)	non	Dively et al. (2020)
abamectine / avermectines	-	<i>Chaetosiphon fragaefolii</i>	Réduction des populations de 86% à j+12 après traitement en plein champ (sur fraisier) (25 mL/100 L)	Détecté au champ (x12) en Chine (<i>R. padi</i>)	oui	Fitzgerald (2004)
benzoate d'émamectine / avermectines	Proclaim	<i>M. persicae</i>	Réduction de 61% de <i>M. persicae</i> sur colza à j+3 après traitement (200 ml/acre)	Détecté au champ (x74) au Pakistan (<i>B. brassicae</i>)	oui	Khan et al. (2020)
cyantranilprole / diamides	Lumiposa	<i>M. persicae</i>	Pas de réduction des populations du puceron ni des viroses (TuYV) sur colza en plein champ (50 g SA/1.000.000 graines)	Pas détectée	oui (systémique)	Barry et al. 2014 Conrad et al. (2018)
spirotétramate / ketoénols	Movento	Diverses espèces de pucerons dont <i>M. persicae</i>	Niveau d'efficacité considéré comme satisfaisant. 1 essai sur fraise avec 100% d'efficacité	Oui chez <i>Aphis gossypii</i> (évaluée en laboratoire)	oui (systémique)	Dossier extension AMM, Arnaudov and Petkova, 2020
flonicamide / pyridine-carboxamides	Teppeki	<i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> (et d'autres espèces de pucerons)	Niveau d'efficacité considéré comme satisfaisant. Essais sur betterave : <ul style="list-style-type: none"> • <i>A. fabae</i> : 11 essais 2008-2013, aussi bon que la référence pirimicarbe pour une date tardive de notation (90%) (car effet lent du flonicamide) • <i>M. persicae</i> 3 essais 2010-2012, aussi bon que la référence pirimicarbe pour (90%) (car effet lent du flonicamide), mais peu d'essais 	oui première résistance chez <i>Dysaphis plantaginea</i> (FR moyens)	oui (systémique et translaminaire)	Dossier extension AMM

HE de <i>Citrus</i> (<i>d-limonene</i>); <i>Citrus</i> ; Orange douce	Prev-Am®	<i>M. persicae</i>	60 g SA/L (2,4 L/ha) de d-limonène induit une réduction de 75% des populations de pucerons sous serres j+21 à j+28 après traitement ; jusqu'à 70% de mortalité à une concentration de 10% (v/v)	Non renseigné	non	Smith et al. 2018 ; Al-Antary et al. 2018 ; Soares et al. 2019
Huile de neem et azadirachtine	Neemix, BioNeem, etc.	<i>M. persicae</i>	Neemix® (2,5 g/L), testé à 18,7 L/ha mais pas efficace 72h après traitement en champ de colza. 1% (3.0 L/ha) d'azadirachtine permet de réduire de 75% les populations de pucerons sous serre j+21 à j+28 après traitement (culture florale). BioNeem® permet de réduire de 85% les populations de <i>M. persicae</i> sur laitue sous serre (j+18 après traitement).	Oui (<i>M. persicae</i> jusqu'à 9x plus résistant après 40 générations de sélection au laboratoire)	oui	Smith et al. 2018 Fournier & Brodeur 2000

Tableau 4 : Substances actives n'entrant pas dans la composition de produits ayant des AMM en France

Composé/ famille	Puceron(s) testé(s)	Efficacité et statut AMM si disponible hors de France	Résistance connue	Translaminare, oui/non	Reference
Détergent : SU-120	<i>M persicae</i>	70% de mortalité (adultes et juvéniles) en tour de Potter (pulvérisation réaliste au laboratoire) avec une concentration de 2,5%	Non renseignée	non	Curkovic, et al. 2006
Détergent : Tecsa® Fruta	<i>M persicae</i>	85% de mortalité (adultes et juvéniles) en tour de Potter (pulvérisation réaliste au laboratoire) avec une concentration de 5% (70% mortalité à la concentration de 2,5%)	Non renseignée	non	Curkovic, et al. 2006
Acetogenin / Squamocine, annonacines	<i>M persicae</i>	Mortalité de 20% à la dose de 100 µg/cm ² ; baisse de fertilité de 50% à la même dose	non	NA	Guadano et al. 2000
Clonidine et analogues	<i>M persicae</i>	Efficacité comparable à l'imidaclopride mais fugace car rapidement métabolisé/piégée dans la plante	non	oui	Creemer et al. 2017
Composés pyrazole-carboxamides	<i>A fabae</i>	Efficacité comparable au Tolfenpyrad, une SA autorisée au Japon et aux Etats-Unis	non	NA	Huang et al. 2017
Sous-produit de fumée de bois	<i>M persicae</i>	20% de mortalité au bout de 48h à la dose de 10%	non	non	Mmojeje et Hornung 2015
Rhamnolipides	<i>M persicae</i>	100% de mortalité à la dose de 100 ppm au bout de 24h	non	oui	Kim, 2011
Xantholysines /lipopeptides	<i>M persicae</i>	100% de mortalité au bout de 24h du surnageant d'une culture bactérienne	non	oui	Lim et al. 2017
Acide gras de <i>Trichoderma</i> sp.	<i>M persicae</i>	Répulsif de 76,63 à 97,10% (au laboratoire)	non	oui	Kaushik et al. 2020
Quinolactecide et oxalicine B	<i>M persicae</i>	88% de mortalité sur cette espèce de puceron à la dose de 250 ppm ; et 82% de mortalité à la dose de 100 ppm respectivement (au laboratoire)	non	NA	Abe et al. 2007 ; Abe et al. 2005
Extraits de trichomes de tabac	<i>M persicae</i>	Mortalité plus grande que l'huile de neem	non	non	Neal et al. 1994

<i>Dysphania ambrosioides</i> / Thé du Mexique (Amaranthaceae)	<i>M persicae</i>	Une concentration de 16,75% (à 4,0 L/ha) de <i>C. ambrosioides</i> réduit de 75% les populations de pucerons sous serres j+21 à j+28 après traitement	non	non	Smith et al. 2018
Galangustine	<i>M persicae</i>	Répulsive : 71% sur feuilles non traitées 29% sur feuilles traitées (au labo)	non	NA	Castillo <i>et al.</i> , 2013
Huile de <i>Jatropha curcas</i> (Euphorbiaceae)	<i>M persicae</i>	Utilisée fraîche à la concentration de 2%, elle tue 98 à 100% des larves (au laboratoire)	non	NA	Holtz <i>et al.</i> 2016
Extrait de <i>Sophora alopecuroides</i> (Fabaceae)	<i>M persicae</i>	DL50 des principaux composants : alopérine, matrine, oxymatrine, sophocarpine, sophoridine, cytisine et la nicotine : 0,031 ; 0,072 ; 0,157 ; 0,053 ; 0,046 ; 0,042 et 0,067 µg/puceron (au laboratoire)	non (sauf nicotine)	NA	Ma <i>et al.</i> 2018
Extrait de graines de <i>Peganum harmala</i> (Nitrariaceae)	<i>M persicae</i> <i>A. fabae</i>	Répulsivité de 72% sur larves de 1 à 2 jours à la concentration de 60 mg/mL. Mortalité à cette dose de 90% après 48h pour <i>M. persicae</i> et 71% pour <i>A. fabae</i> (au laboratoire)	non	NA	Salari, <i>et al.</i> 2012
Nootkatone	<i>M persicae</i>	Répulsif à 70% immédiatement après contact (à la concentration de 5 mg/ml et 50 µg/cm ² sur feuille)	non	NA	Galisteo et al. 2019
Acides Dicafeoyl	<i>M persicae</i>	Mortalité 100% à 1 mM au bout de 48h sur larves L1	non	non	Poessel <i>et al.</i> 2009
HE de <i>Tagetes minuta</i> (Asteraceae)	<i>M persicae</i> <i>A. pi sum</i> , <i>A solani</i>	Diminution des populations de <i>M. persicae</i> > à 90% en laboratoire (j+4 après traitement)	non	non	Tomova et al. 2005
HE de <i>Pinus</i> sp. et <i>Eucalyptus</i> sp.	<i>M persicae</i>	Mortalité jusqu'à 84% avec un traitement à 1% (émulsion) sur poivron sous serre	non	non	Yankova et al. 2009
HE de <i>Thymus vulgaris</i> (Lamiaceae) et <i>Pimpinella aromaticum</i> (Apiacea)	<i>M persicae</i>	Effet répulsif sur <i>M. persicae</i> 24h après traitement de respectivement 49% et 75% pour <i>T. vulgaris</i> et <i>P. anisum</i> à 0,1% (dilué dans 70% d'éthanol). Tests au labo sur disques foliaires (choux).	non	non	Dancewicz et al. 2012
HE de <i>Lippia origanoides</i> (Verbenaceae) et <i>Mentha spicata</i> (Lamiaceae)	<i>M persicae</i>	Des émulsions (à 0,5%) pulvérisées sur des disques foliaires ont un effet répulsif (de l'ordre de 28-50%) sur <i>M. persicae</i> 72h après traitement (test au laboratoire).	non	non	Teixeira et al. 2014

HE de <i>Mosla chinensis</i> (Lamiaceae) Maxim. Cv. <i>Jiangxiangru</i> ,	<i>M persicae</i>	88% d'efficacité en serre (haricot rouge) à j+7 après traitement, à la concentration de 10% formulé en émulsion (pulvérisation à 600 L/ha).	Non	non	Lu et al. 2020
HE de <i>Mentha pulegium</i> et <i>Melissa officinalis</i> (Lamiaceae)	<i>M persicae</i>	79% à 86% de réduction de la longévité avec 0,50 mL/L de <i>M. officinalis</i> et <i>M. pulegium</i> , respectivement, et 95% à 100% de réduction de la fécondité avec 0,50 mL/L de ces huiles essentielles.	non	non	Petrakis et al., 2014

3.1.4 Informations complémentaires issues des auditions

L'audition de Corteva montre que l'efficacité du Sulfoxaflor (SA assimilée à un néonicotinoïde) semble équivalente au flonicamide qui compose le produit commercial Teppeki (Cf. Tableau 3). Cependant, les producteurs de betterave considèrent le produit Teppeki moins efficace que les néonicotinoïdes.

De manière plus générale, le GT observe le bon positionnement du produit Teppeki dans les tests d'efficacité des produits de biocontrôle présentés par Corteva et Certis Europe. Les producteurs de betterave n'ont pas eu la même perception de l'efficacité du produit Teppeki. Le produit Teppeki ne peut être appliqué qu'une fois par an d'après son AMM, ce qui limite le risque d'apparition de résistance, mais qui ne permet pas de couvrir toute la période de présence des pucerons sur la culture (la rémanence du produit est de 2 à 3 semaines). Cependant la gestion de l'épidémie virale se fait surtout au moment du vol de retour des pucerons au printemps, car ils sont alors très mobiles et peuvent contaminer des plantes à plus grande distance. Selon l'ITB, le produit Teppeki aurait une efficacité suffisante lorsque les populations de pucerons ne sont pas élevées et quand le traitement est positionné tôt dans la saison ce qui n'était pas le cas en 2020 en raison d'un hiver doux qui a entraîné une forte pression parasitaire et la décision permettant d'utiliser le produit Teppeki dès le stade 2 feuilles de la betterave étant arrivée tard (le 28/04/2020) les traitements ont été réalisés bien après l'arrivée des pucerons.

Selon les experts du GT, les modalités d'application du produit Teppeki n'ont pas été établies de façon optimale.

Les experts en charge de la fiche PPP considèrent que les auditions confirment les informations sur les molécules trouvées lors de la recherche bibliographique.

Par ailleurs, le cas du produit CYANTRA (à base de cyantraniliprole) vient conforter la liste dressée par les experts pour des perspectives à moyen terme. De surcroît, un produit à base d'extrait d'ail est à l'étude pour un usage contre les pucerons sur betterave (avec une perspective d'une mise sur le marché pour 2025 au plus tôt).

Les auditions ont aussi mis en évidence plusieurs activités de recherche et développement portant sur la lutte contre les pucerons sur betterave au moyen de PPP : l'IBMA indique que 10 projets de R&D portent sur des substances naturelles pour une utilisation potentielle sur betterave contre les pucerons. Les sociétés UPL et Vivagro ont des projets de développement de produits à base d'huile essentielle d'orange associée ou non à des huiles asphyxiant les pucerons. Enfin, les sociétés AlphaBio Control (une société du Groupe De Sangosse) et Certis Europe ont des projets de développement de produits PPP à base d'acides gras en association éventuellement avec du pyrèthre naturel (pour la société AlphaBio Control).

3.2 Les microorganismes

36 références ont été retenues pour l'analyse.

3.2.1 Résumé des points forts à retenir

La bibliographie scientifique spécifique à la thématique « lutte à l'aide de microorganismes vis-à-vis de *M. persicae* ou d'*A. fabae* sur betterave » est extrêmement limitée pour ne pas dire inexistante : la première équation bibliographique (Cf. Annexe 2) n'a donné aucun résultat et la deuxième équation a abouti à des résultats généraux, difficilement transférables/transposables aux espèces de bioagresseurs d'intérêt pour cette saisine. Ces recherches ont abouti de manière très récurrente à des résultats d'efficacité en laboratoire de *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Bacillus thuringiensis*, *Verticillium lecanii* sur *Pegomyia mixta* / *Tetanops myopaeformis* (mouches de la betterave), *Aphis craccivora* (espèce de puceron très polyphage) ou encore *Scrobipalpa ocellatella* (teigne de la betterave). La troisième équation bibliographique a permis de récupérer des informations sur la lutte à l'aide de microorganismes contre *M. persicae* et *A. fabae* sur d'autres cultures que celle de la betterave. Malheureusement, l'essentiel des données sont obtenues par des essais conduits en laboratoire, et éventuellement des essais sous serre. Une exception concerne une étude d'une souche de *B. bassiana* en essais semi-field (partie de champ couverte par un tunnel) et de plein champ sur culture de choux à partir de l'application de suspensions aqueuses ou bien huileuses de conidies (Michereff Filho et al., 2011).

Des études ont essayé de classer la sensibilité de différentes espèces de pucerons aux différentes espèces de champignons entomopathogènes (e.g. Shah et al 2004; Hesketh et al 2008). Il en ressort qu'*A. fabae* et *M. persicae* semblent être des espèces intermédiaires en termes de sensibilité aux microorganismes de biocontrôle. Cependant, il existe certainement encore beaucoup de diversité insoupçonnée au sein des organismes entomopathogènes comme peut le montrer une étude en Argentine dans laquelle de nombreuses espèces entomopathogènes ont pu être identifiées sur diverses espèces de pucerons (Scorsetti et al 2006). Il n'est donc pas impossible que de nouvelles espèces ou de nouvelles souches plus efficaces soient identifiées dans le futur.

Des produits commerciaux à base de microorganismes sont commercialisés contre les pucerons. En France, il s'agit de Naturalis® à base de *B. bassiana*, sur laitue et chicorée. A l'étranger les produits Botanigard®, à base de *B. bassiana*, Mycotal®, à base de *Lecanicillium muscarium*, et Vertalec®, à base de *Verticillium lecanii* sont employés pour des cultures sous serre, en maraichage et arboriculture. Prince et al. (2020), Mohammed et al. (2016), Yeo et al. (2003), ont caractérisé l'efficacité de ces produits dans des conditions de laboratoire. L'utilisation de ces derniers en grande culture (telle que la betterave) représente un défi car cela nécessite des conditions d'application bien précises afin de favoriser le développement des microorganismes ainsi qu'une très bonne connaissance de la biologie des espèces de bioagresseurs visées pour cibler les stades permettant une efficacité optimale.

L'efficacité générale de ce type d'approche est pour l'instant moindre que les traitements à l'aide de produits de synthèse. Il est également important de souligner que très souvent, l'action entomopathogène des microorganismes prend plusieurs jours et est plus longue que celle de la plupart des insecticides issus de la chimie de synthèse.

Une approche intéressante est l'association d'un insecticide d'origine naturelle comme le pyrèthre, et d'un champignon entomopathogène comme *Metarhizium anisopliae*. L'objectif est d'associer l'action rapide de la substance active avec l'action dans la durée du microorganisme. Des effets additifs ont pu être observés contre *A. fabae* (Fernandez-Grandon et al 2020). Dans le même ordre d'idée, l'association d'un prédateur (*Adalia bipunctata*) et d'un champignon entomopathogène (*Lecanicillium muscarium*) permet de réduire de 90% la population d'*A. fabae* dans des essais de laboratoire (Mohammed 2018), avec des effets limités sur l'insecte prédateur. Les travaux de Rashki et al. (2009) sur les effets mesurés en laboratoire de *B. bassiana* sur les caractéristiques biologiques mais aussi la mortalité d'*Aphidius matricariae*, parasitoïde du puceron vert du pêcher ont mis en évidence la compatibilité de ces deux moyens de lutte contre *M. persicae*, avec un bon positionnement de leur utilisation.

Des isolats et des espèces fongiques non commercialisées mais qui ont fait seulement l'objet d'un criblage d'efficacité en laboratoire sur *M. persicae* et *A. fabae* auraient un intérêt potentiel lié à une efficacité de 90 % en conditions contrôlées. Cependant tout reste à faire en matière de développement.

Par voie de conséquence, la magnitude d'efficacité, de durabilité, d'opérationnalité et de praticité des microorganismes inventoriés (produits commerciaux, isolats ou espèces fongiques d'intérêts) ne sont, dans la plupart des cas, pas maximales.

3.2.2 Perspectives de R&D

La perspective immédiate pour tous les isolats, souches et espèces entomopathogènes serait la réalisation d'études complémentaires comme mentionnées pour les produits commerciaux Botanigard®, Mycotal®, Vertalec® mais également d'autres travaux spécifiques portant sur la formulation, les types d'application, le choix de l'isolat, cela dans le but d'adapter leur utilisation aux grandes cultures en général et plus spécifiquement à la culture de la betterave. A plus long terme, il est envisageable de rechercher de nouvelles espèces ou de nouvelles souches plus efficaces contre *M. persicae* et/ou *A. fabae*, ou plus faciles à utiliser au champ.

En plus des progrès à réaliser sur les souches et les produits, de gros efforts de développement sont à réaliser pour accompagner les agriculteurs dans l'utilisation de ce type de produits qui nécessitent une plus grande technicité pour leur application.

Si plusieurs études explorent la diversité des souches de champignons entomopathogènes, presque rien n'est dit sur la diversité des pucerons testés en laboratoire. On peut supposer que les tests sont réalisés sur des élevages monoclonaux. Cela pourrait être problématique car des émergences de résistances vis-à-vis de souches spécifiques ne sont pas à exclure, à l'image de ce que l'on a observé dans les cas de résistances de lépidoptère à des souches virales. C'est une raison supplémentaire pour effectuer des tests en plein champ.

3.2.3 Synthèse de la littérature scientifique

En préambule, il existe des produits commerciaux en France, ayant une efficacité sur des ravageurs variés, mais non disponibles contre les pucerons. Ils pourraient présenter un réel intérêt contre *M. persicae* et *A. fabae*, sous réserve d'essais qui confirmeraient leurs efficacités. Il s'agit de :

- Preferal® à base de *Isaria fumosorosea* Apopka strain 97, usages contre les aleurodes sous abri uniquement,
- Futureco Nofly WP® et FB FE9901 OD® à base de *Paecilomyces fumosoroseus* strain FE 9901, usages contre les aleurodes sous abri uniquement,
- Bioact Prime® à base de *Paecilomyces lilacinus* strain 251, usages contre les nématodes uniquement via l'irrigation,
- MET52 OD® à base de *Metarhizium anisopliae* en traitement des parties aériennes contre les aleurodes, les acariens et les thrips sur diverses cultures et MET52® GRANULE à base également de *Metarhizium anisopliae* en traitement de sol contre les ravageurs du sol sur petits fruits et cultures ornementales.

Par ailleurs, il existe un produit commercialisé à usage contre les pucerons (sur laitue et chicorée) et qui par conséquent pourrait avoir un intérêt encore plus important que les précédents. Il s'agit de Naturalis®, à base de *B. bassiana*.

3.2.3.1 *Myzus persicae*

A- Produits commercialisés à l'étranger

L'étude de laboratoire de Prince & Chandler (2020) a permis d'évaluer le potentiel entomopathogène de *B. bassiana* (produits commerciaux Botanigard® ES et Naturalis® L), de *Cordyceps fumosorosea* (Preferal® WG) et de *Akanthomyces dipterigenus* (Vertalec®). Il en résulte que Botanigard® s'avère être le plus efficace même si tous les biopesticides ont réduit significativement le nombre de descendants ($P < 0.05$). Une expérience de terrain a permis de confirmer l'efficacité de Botanigard® (réduction des populations de manière significative ($P < 0.05$)).

L'efficacité de Mycotal®, mycoinsecticide à base de *Lecanicillium muscarium* a été évaluée sur la mortalité et la fécondité, en conditions contrôlées de laboratoire (température, hygrométrie).

Il en résulte que la température optimale d'efficacité pour les adultes mais aussi les immatures du troisième et quatrième stade varie entre 20 et 30°C, avec une humidité relative de 55 à 90% (Mohammed et al., 2016). Ces résultats suggèrent que *L. muscarium* est un candidat potentiel de lutte biologique, Cependant il demeure très difficile, d'après ces travaux, de définir des conditions d'utilisation optimales dues à l'amplitude des intervalles.

L'effet de la température sur la croissance, la germination et la pathogénicité de produits commercialisés à base de *B. bassiana* de *Verticillium lecanii* ainsi que d'isolats fongiques (*B. bassiana*, *V. lecanii*, *Metarhizium anisopliae* et *Paecilomyces fumosoroseus*) a été étudiée (Yeo et al., 2003). Il en résulte que la germination de *V. lecanii* (isolat HRI 1.72 soit le produit commercial Vertalec®) a été la plus rapide à 10 °C. C'était aussi le myco-insecticide présentant significativement ($P < 0.05$) la plus grande efficacité à 10, 18 et 23 °C

B- Isolats et espèces fongiques d'intérêts

Les travaux développés par Lee et al. (2015) ont mis en évidence l'efficacité en laboratoire de 3 isolats de *Lecanicillium attenuatum*, 9 isolats de *B. bassiana*, 1 isolat de *M. anisopliae*, 1 isolat de *Metarhizium flavoviride*, 5 isolats de *Purpureocillium lilacinum* et 1 isolat d'*Aspergillus sp.* Il en résulte pour ces 20 isolats que la virulence, la thermotolérance, la tolérance aux UV-B et l'activité au froid sont des facteurs qui influent sur l'efficacité. L'isolat de *Purpureocillium lilacinum* (SD17) serait selon ces auteurs le candidat le plus prometteur, sur la base des facteurs pris en considération.

B. bassiana coloniserait davantage la surface foliaire en étant appliqué par pulvérisation (Allegrucci et al., 2020). En revanche, il n'y a pas de meilleure efficacité avec cette technique en comparaison avec l'immersion de graines ou trempage des racines. Ceci suggère que l'efficacité de l'activité de *B. bassiana* sur le puceron vert n'est pas liée à son mode d'application mais peut-être, à la concentration appliquée. Seules des études complémentaires peuvent le confirmer.

L'étude *in vitro* de la pathogénicité de deux souches de *B. bassiana* (BB-72 et BB-252) et d'une souche de *Lecanicillium lecanii* (V-4) selon trois types d'essais (filtrats et concentrations conidiales différentes ; non filtré, 2 ml de filtrat fongique pour une concentration donnée) a révélé que les deux souches de *B. bassiana* (BB-72 et BB-252) provoquaient respectivement 95 et 91%, de mortalité en comparaison avec la souche de *L. lecanii* (V-4) (87%).

De plus, cette étude met en évidence l'intérêt de combiner les deux souches de *B. bassiana*, plutôt que de les utiliser seules ou bien consécutivement, car combinées, elles engendreraient 94% de mortalité (Nazir et al., 2019).

L'efficacité de l'isolat CG 864 de *B. bassiana* a été démontrée en essais « semi-field » et de plein champ à partir de l'application de suspensions aqueuses ou bien huileuses de conidies (Michereff Filho et al., 2011). Cependant, une réinfestation rapide des parcelles par des pucerons a été observée, ce qui soulève des interrogations sur la persistance de l'efficacité de cette méthode, mais aussi sur la nécessité de la combiner à d'autres.

Quatre isolats de *L. lecanii* ont été sélectionnés afin d'étudier leurs effets sur des stades immatures avec l'établissement de la concentration létale 50 (CL50) ainsi que le temps mortel 50 (TC50). L'isolat ICAL6 engendre la mortalité la plus élevée (95%), les résultats d'efficacité étant supérieurs à ceux obtenus avec le produit commercial Vertalec® (91,6%) (Diaz et al., 2009). Les intervalles de confiance du TC 50 sont importants. Gindin et al. (1994) a obtenu des résultats similaires.

Parmi vingt-trois isolats de *Metarhizium anisopliae*, quatre (ARSEF 759, 4132, 2080 et 576) provoquaient en laboratoire des mortalités comprises entre 91–98%. Ces derniers semblent être de bons candidats dans le développement de nouveaux moyens de lutte (Shan et al., 2010).

L'efficacité d'une souche d'*Isaria fumosorosea* a été testée sur plusieurs espèces de pucerons dont *M. persicae* (Jandric et al., 2014 ; Bugti et al 2017]). Les résultats sont assez variables selon les espèces (de 100% de mortalité à moins de 30%, 9 à 10 jours après exposition). Quatre souches de champignons entomopathogènes (*L. longisporum*, *P. fumosoroseus* et deux souches de *B. bassiana*) se sont révélées d'une moindre efficacité sur *M. persicae* (Hesketh et al., 2008).

3.2.3.2 Aphis fabae

Une étude de 2004 a exploré la diversité de l'espèce entomopathogène *Pandora neoaphidis* contre 7 espèces de pucerons au Royaume-Uni. Celle-ci montre que des souches sont virulentes vis à vis d'*A. fabae* (Shah et al 2004). En 2008, une étude met au point un test biologique standardisé sur *A. fabae* et teste 18 souches de diverses espèces entomopathogène (*B. bassiana*, *Lecanicillium longisporum* et *spp.*, *Paecilomyces fumosoroseus* et *M. anisopliae*). Quatre souches intéressantes sont identifiées dont la plus prometteuse est un *L. longisporum* (suivent un *P. fumosoroseus* et deux souches de *B. bassiana*) (Hesketh et al 2008).

A l'étranger, il existe des produits à base de microorganismes entomopathogènes disponibles et qui ont pu être testés contre *A. fabae* : Bio-Catch® (*Verticillium lecanii*), Priority® (*Paecilomyces fumosoroseus*), Bio-Nematon® (*Paecilomyces lilacinus*), Bio-Magic® (*M. anisopliae*) et Bio-Power® (*B. bassiana*). En laboratoire, ceux-ci montrent tous une bonne efficacité avec une mortalité de 100% après 7 jours (Saruhan et al 2014). Il existe certainement encore beaucoup de diversité insoupçonnée au sein des organismes entomopathogènes comme peut le montrer une étude en Argentine dans laquelle de nombreuses espèces ont pu être identifiées sur diverses espèces de pucerons (Scorsetti et al 2006). Sur *A. fabae*, des effets de 5 isolats de *Lecanicillium muscarium* et d'un isolat de *Simplicillium lamellicola* ont pu être montrés (Saruhan 2018). En Irak, *Lecanicillium lecanii* (= *Verticillium lecanii*) semble montrer une efficacité plus grande contre *M. persicae* (et *Aphis gossypii*) que contre *A. fabae* (et *Macrosiphum euphorbiae*) (Mohammed et al 2018). Plus récemment, 19 espèces différentes de champignons indigènes de la Tanzanie ont été testées au cours d'essais en laboratoire. L'espèce la plus prometteuse semble être *Aspergillus flavus* (S18 et S19), mais des tests sous serre sont encore à réaliser (Boni et al 2020). Une approche intéressante est l'association d'un insecticide d'origine naturelle comme le pyréthre, et d'un champignon entomopathogène comme *M. anisopliae*. L'objectif est d'associer l'action rapide de la substance avec l'action dans la durée du microorganisme. Des effets additifs ont pu être observés contre *A. fabae* (Fernandez-Grandon et al 2020). Dans le même ordre d'idée, l'association d'un prédateur (*Adalia bipunctata*) et d'un champignon entomopathogène (*Lecanicillium muscarium*) permet de réduire de 90% la population d'*A. fabae* dans des essais de laboratoire (Mohammed 2018), avec des effets limités sur l'insecte prédateur. Les effets de microorganismes entomopathogènes plus communément utilisés comme *B. bassiana* sont moins clairs avec la même observation, à savoir une production plus importante de descendants après deux générations (Jensen et al 2019).

3.2.3.3 Autres espèces de pucerons

Il est à noter que d'autres espèces d'*Aphis* ont pu être testées pour leur sensibilité à différents microorganismes. Ainsi l'activité aphicide de *Bacillus thuringiensis* a été évaluée sur *Aphis gossypii*. L'efficacité du Bt est liée également à la souche. Il peut être peu efficace contre les Hemiptères piqueurs-suceurs comme les pucerons. En revanche, une souche particulière (Bt-2) a été isolée et testée sur *A. gossypii* et il semble que celle-ci ait une bonne efficacité à 24H sur les larves de stade 3 par rapport à une autre souche (Btk). Une forte diminution de la fécondité est également observée pour les deux souches (Ajuna et al 2020). Des métabolites secondaires de *B. bassiana* et de *Verticillium alfalfae* ont également montré

une efficacité contre *A. gossypii* (Erol et al 2020). Toujours contre la même espèce de puceron, différentes fractions d'extraits de bactéries du genre *Xenorhabdus* ont montré une efficacité sous serre (Iqbal et al 2020).

Sur *Aphis craccivora*, des tests portant sur des spores de *Lecanicillium lecanii* (= *Verticillium lecanii*) ont été réalisés et semble montrer une certaine efficacité (Reddy and Sahotra 2018). Une amélioration de la culture du champignon est toujours en cours (Reddy and Sahotra 2018). Des tests moins concluants ont été réalisés avec *B. bassiana* et *M. anisopliae* contre *A. craccivora* (Sabry et al 2011). Cependant, des résultats contradictoires pour *B. bassiana* (tests avec les produits Biosect® ou Biover®) ont été obtenus lors d'une autre étude par traitement des nymphes d'*A. craccivora*. Des effets sur la production de descendants après 7 jours ont pu être notamment observés (Zaki and Abdel-Raheem 2010).

L'efficacité d'une souche d'*Isaria fumosorosea* a été testée sur *Tinocallis kahawaluokalani*, *Aphis spiraecola*, *Aphis gossypii* *Aulacorthum solani* et *M. persicae* (Jandricic et al 2014 ; Bugti et al 2017). Les résultats sont assez variables selon les espèces (de 100% de mortalité à moins de 30% 9 à 10 jours après exposition).

Quatre souches (sur les sept isolées en Espagne) de *L. lecanii* (= *Verticillium lecanii*) se sont montrées virulentes contre les larves de *M. persicae*, de *Nasonovia ribisnigri*, de *Macrosiphum euphorbiae* et d'*Aphis gossypii* (Diaz et al 2009). Une extraction de mycélium de *Verticillium lecanii* est également active contre des adultes de *M. persicae*, *A. gossypii* ou *A. pisum* (Gindin et al 1994).

Quatre souches intéressantes de différentes espèces de champignon entomopathogène (*L. longisporum*, *P. fumosoroseus* et deux souches de *B. bassiana*) identifiées par des essais de laboratoires sur *Aphis fabae* ont également été testées sur d'autres espèces avec une dose unique. Du plus sensible au moins sensible, on retrouve *Sitobion avenae* > *M. persicae* = *Acyrtosiphon pisum* = *A. fabae* > *Rhopalosiphum padi* (Hesketh et al 2008).

3.2.4 Informations complémentaires issues des auditions

Les discussions et échanges corroborent les éléments bibliographiques à savoir l'intérêt de *Lecanicillium muscarium* (Mycotal®) bénéficiant d'une AMM sur aleurodes en cultures de tomates, aubergines, concombres, poivrons, fraises, roses, cultures florales et plantes vertes. Une extension d'usage aux pucerons de la betterave sucrière devrait être effective à court terme.

Des travaux de R&D portant sur l'utilisation du microorganisme *B. bassiana* en culture de betterave contre les pucerons, évoqué à de multiples reprises dans la littérature sont en cours. Les auditions conduites n'ont pas permis de mettre en lumière le développement et la commercialisation prochaine d'autres microorganismes.

3.3 Les macroorganismes

15 références ont été retenues pour analyse.

3.3.1 Résumé des points forts à retenir

Aucune espèce de macroorganisme (prédateurs ou parasitoïdes) n'est actuellement utilisable de façon opérationnelle en lâcher inondatif pour la lutte contre les pucerons de la betterave, principalement du fait de l'absence de développement de méthode de lutte basée sur ces organismes dans le contexte de ladite lutte.

3.3.1.1 Prédateurs

La prédation du puceron *Myzus persicae* (Sulzer) sur *Beta vulgaris*, par *Chrysoperla carnea* a été démontrée dans six expérimentations sous serre par Hassan et al. (1985). L'efficacité des « lâchers » au stade œuf du prédateur est à retenir en particulier (Sengonca et al., 1995).

Les prédateurs naturellement présents : *Cantharis lateralis*, *C. rufa* (Coleoptera: Cantharidae), *Coccinella septempunctata*, *C. undecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae), *Pterostichus cupreus*, *Harpalus rufipes*, *Patrobus atrorufus*, *Trechus quadristriatus*, *Bembidion lampros*, (Coleoptera: Carabidae), prélevés directement dans des champs de betterave sucrière puis testés en laboratoire, ont démontrés des capacités de prédation de *M. persicae* (Landis et al., 1997).

L'araignée *Theridion impressum*, présente naturellement sur betterave en Allemagne, diminue significativement (jusqu'à 20%), en laboratoire le taux de croissance des colonies de *M. persicae*. Cette capacité de prédation est réduite au champ du fait de la présence de proies alternatives conduisant à un phénomène de diversion (Schröder et al., 1999).

La lutte biologique par conservation contre les aphides avec des carabidae est un moyen alternatif à explorer (Kromp B., 1999). L'accroissement des populations de cette famille de prédateurs en champ de betterave à sucre pourrait conduire à une réduction des populations de *Myzus persicae* ainsi qu'une réduction notable (mais non significative $P < 0.05$) des viroses sur les betteraves (Dunning et al., 1975). Les carabes peuvent être favorisés par le travail du sol (Wenningher et al., 2020).

La régulation des aphides par conservation des prédateurs coccinellidae, dont *Adalia bipunctata*, est également à explorer (Van Werf W., 1995).

3.3.1.2 Parasitoïdes

Les parasitoïdes de pucerons ont des effets notoires dans la régulation d'*Aphis fabae* et de *M. persicae*, y compris potentiellement sur betterave (Albittar et al. 2016 ; 2019) mais leur action peut être limitée par la présence de prédateurs (prédation intraguilde, Meyhofer et al. 2000 ; Meyhofer 2001) et dépend des conditions de lâchers. Le parasitoïde *Aphidius colemani* apparaît être celui parasitant le plus *M. persicae* et *A. fabae* sur betterave au laboratoire (Albittar et al. 2016 et 2019) bien qu'au champ on retrouve majoritairement le parasitoïde *Lysiphlebus fabarum* sur *A. fabae* (Meyhofer & Hindayana 2000). Il semble que la présence de virus puisse avoir un impact négatif sur les parasitoïdes de pucerons, *p.ex.*

réduction de la taille des adultes, de leur fécondité et de leur réserves lipidiques (avec de possibles effets négatifs sur le service de lutte biologique à moyen terme, Moiroux et al. 2018), bien que ceci ne soit pas systématique (Albittar et al. 2019).

Des travaux en Chine en conditions de plein champ sur cultures du tabac ont mis en évidence la possibilité de lutte biologique inondative contre *M. persicae* par des lâchers du parasitoïde *Aphidius gifuensis* (Yang et al., 2009) ; ce type de lâcher inondatif permet de contrôler le puceron sur de grandes surfaces de tabac sans insecticide (1 million d'ha de tabac couverts).

3.3.2 Perspectives de R&D

3.3.2.1 Prédateurs

La question de l'élevage et du lâcher de certaines espèces de carabidae prédatrices de pucerons pourrait être explorée. La faisabilité technico-économique (production, intérêt des industriels, coût, contrainte d'utilisation, etc....) pourrait être un frein à leur développement.

Le lâcher inondatif de coccinelles *Adalia bipunctata* semble possible pour le contrôle d'aphides en milieu ouvert, mais les résultats sont incertains car ils sont directement dépendants du nombre de prédateurs lâchés, des facteurs climatiques et opérationnels. Cependant, cette espèce d'auxiliaire est déjà produite et commercialisée sur des cultures légumières diversifiées en France.

Le lâcher inondatif des espèces *Chrysoperla carnea* et *C. lucasina* semble une option, mais les facteurs de réussite au champ sont assujettis aux mêmes conditions que celles énumérées pour *A. bipunctata*. Ces espèces sont surtout utilisées en cultures sous abris/sous serres et sont déjà commercialisées en France. L'introduction au stade « œuf » semble opportune pour une meilleure efficacité au champ.

Les espèces *Cantharis lateralis*, *C. rufa* (Coleoptera: Cantharidae), *Coccinella septempunctata*, *C. undecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae), *Pterostichus cupreus*, *Harpalus rufipes*, *Patrobus atrorufus*, *Trechus quadristriatus*, *Bembidion lampros*, (Coleoptera: Carabidae) peuvent réguler au champ les aphides de la betterave sucrière. Les facteurs de réussite sont les mêmes que ceux décrits pour *A. bipunctata* et *C. Carnea/lucasina*. L'utilisation de *C. septempunctata* pourrait être effective rapidement puisque cette espèce est déjà commercialisée en France. En revanche, la faisabilité technico-économique et les conditions d'utilisation sont à définir comme pour tous les autres prédateurs évoqués.

L'utilisation en lâcher de l'araignée *Theridion impressum* semble une option. En revanche, les processus de production et d'utilisation ne sont pas connus, tout comme les conséquences environnementales.

3.3.2.2 Parasitoïdes

Le succès du parasitisme d'*Aphis fabae* par *Lysiphlebus fabarum* est directement dépendant d'une part des conditions de lâchers, des effectifs de parasitoïdes, de la facilité à trouver l'hôte, des conditions climatiques, mais aussi de la présence ou non de prédateurs naturels du parasitoïde. Ce parasitoïde n'est produit et utilisé en lâchers inondatifs nulle part, tout le processus de production ainsi que les conditions d'utilisations sont à mettre au point.

Un même constat s'applique au parasitoïde *Aphidius colemani* qui attaque plus largement *M. persicae* et *A. fabae* sur betterave au laboratoire (Albittar et al. 2016). Cependant, pour ce dernier, il existe des unités de production en Europe et le parasitoïde est déjà largement commercialisé en Europe, avec succès, pour la lutte contre les pucerons en cultures sous serre. Cependant, le coût de production, et donc le coût global de la lutte, reste prohibitif par rapport aux insecticides ; un important travail de R&D devrait être fait pour pouvoir mettre en place une lutte efficace et économiquement viable basée sur la lutte inondative contre les pucerons de la betterave au moyen de parasitoïdes.

En effet, la production de masse d'espèces du genre *Aphidius*, parasitoïde de pucerons, est possible avec un coût maîtrisé, notamment en Chine. Dans ce pays, la lutte biologique inondative avec *Aphidius gifuensis* est utilisée avec succès contre *M. persicae* sur tabac et la production de masse de ce parasitoïde est réalisée directement par les producteurs de tabac (ils possèdent leurs propres unités de production et ne dépendent donc pas des compagnies de lutte biologique). Les lâchers inondatifs doivent être effectués tous les ans. Le degré de protection apporté est du même ordre que des insecticides foliaires lorsque les parasitoïdes sont lâchés à la bonne période (nécessité de R&D pour optimiser la méthode en fonction des cultures).

3.3.3 Synthèse de la littérature scientifique

3.3.3.1 Prédateurs

L'article de Kromp B. (1999) en est le reflet. Il représente une compilation de connaissances sur l'importance des carabidés dans la régulation naturelle des ravageurs mais aussi sur les effets des pratiques culturales (à l'exception des insecticides de synthèse) et des éléments structurels du paysage, sur cette famille de prédateurs.

Ce groupe est composé d'espèces diversifiées et en effectif élevé mais les carabidés sont affectés par l'agriculture intensive. Il a été démontré au champ que ces derniers réduisaient les populations de pucerons des céréales et de la betterave à sucre, au début de leur phase de colonisation. Le cortège d'espèces de prédateurs n'est pas lié à un certain type de culture, mais à la rythmicité de leur mise en place, à la phénologie et au microclimat. Favoriser l'accroissement des populations de carabes pourrait conduire à une réduction des populations de *M. persicae* ainsi qu'à une réduction notable (mais non suffisante) des viroses (Dunning et al., 1975).

Les coccinélidés ont un intérêt manifeste dans la régulation des aphides.

L'article de Vander Werf W. (1995) fait état de deux modèles d'interactions entre les pucerons vecteurs de virus chez la betterave sucrière et le prédateur *A. bipunctata*. Ces modèles sont basés sur la croissance des populations de pucerons et la densité de prédateurs. Dans le premier modèle, le taux d'alimentation des prédateurs est considéré maximal quels que soient les paramètres du ravageur (effectif, capacité de recolonisation). Dans le deuxième modèle, la mortalité par prédation est dépendante de la densité des proies. Selon le premier scénario, une installation suffisamment précoce des pucerons sur betterave peut leur donner une avance dans leur développement, le prédateur aura par conséquent plus de difficulté à les contrôler. Selon le second modèle, les prédateurs peuvent réduire la dynamique des proies, mais l'efficacité de la recherche des pucerons peut diminuer avec le temps à mesure que la surface foliaire augmente. Les observations

réalisées sur le terrain tendent à confirmer plutôt le premier modèle. Cette conclusion reste pour autant provisoire car les taux d'immigration sont inconnus.

Hassan et al. (1985), a démontré le rôle de *Chrysoperla carnea* (Steph.) en tant que prédateur du puceron *M. persicae* sur *Beta vulgaris*. Pour se faire, six expérimentations sous serre ont été mises en place. Six ratios prédateurs/proies ont été testés. Chaque essai s'est poursuivi pendant 4 à 5 mois. Plusieurs lâchers de larves L2 de chrysopes ont été effectués avec les ratios prédateurs/proies de 1/5, 1/10, 1/20, 1/40, 1/50 et 1/60. Une régulation durant 5 à 6 semaines a été possible avec les rapports de 1/5 et 1/10, puis de 3 à 4 semaines pour les ratios de 1/20 et 1/40. Les rapports prédateurs/proies de 1/50 et 1/60, n'ont pas permis d'éliminer les pucerons mais ont considérablement réduit leur nombre. Les betteraves témoins sont mortes pendant les 2 premiers mois d'expérimentations. Les travaux de Sengoca et al. (1995) corroborent ces résultats pour l'espèce *Aphis fabae* avec une utilisation préférentielle en « lâchers » d'œufs de *Chrysoperla carnea*. Divers ratios de prédateurs/proies (1/15, 1/10, 1/5) avaient également été étudiés. Dans des conditions de laboratoire, une réduction des populations de pucerons ne pouvait être obtenue qu'avec un rapport prédateur/proie de 1/5, tandis que les ratios 1/10 et 1/15 entraînaient des dégâts très graves sur les plantes (nombre moyen de 387 pucerons observés par plante). Parmi les œufs « lâchés », 26,1 % d'entre eux ont donné des larves de chrysopes. Dans les conditions de plein champ, un rapport prédateur/proie de 1/5 a assuré une protection satisfaisante des plantes pendant une période d'environ 2 semaines, le nombre moyen d'*A. fabae* par plante étant inférieur à 10. Les autres ratios n'ont pas donné de résultats satisfaisants.

Beta vulgaris peut abriter une diversité d'arthropodes prédateurs, comme ceux évoqués précédemment (Cantharidae, Chrysopidae et Coccinellidae) mais aussi des Carabidae. Landis et al. (1997) ont réalisé un échantillonnage sur parcelle de betteraves sucrières ce qui a permis de confirmer la présence des coccinélidés et en l'occurrence de *Coccinella septempunctata*, *C. undecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae), mais aussi des carabes *Pterostichus cupreus*, *Harpalus rufipes*, *Patrobus atrorufus*, *Trechus quadristriatus*, *Bembidion lampros*, (Coleoptera: Carabidae). La présence de *Cantharis lateralis* et de *C. rufa* (Coleoptera: Cantharidae) a été caractérisée.

Tous ces prédateurs ont été prélevés puis ont été testés en laboratoire afin d'évaluer leurs capacités de régulation. Ils étaient alimentés avec 10 *M. persicae*/jour. Chacune de ces espèces a consommé des pucerons avec des taux variant de 1,7 à 9,2 pucerons/jour. Les résultats de Landis et al. (1997) démontrent une forte capacité de prédation de toutes les espèces. Une prédation précoce, c'est-à-dire au moment de l'installation de *M. persicae*, aurait un impact considérable sur la croissance de la population de pucerons et entraînerait par voie de conséquence une réduction nette de la propagation du virus de la mosaïque jaune (Landis et al., 1997).

L'araignée *Theridion impressum* est présente dans les parcelles de betterave en Allemagne avec une densité d'environ 1,6 femelles par m² dans des champs situés près de Francfort. La capacité de prédation de ce macroorganisme a été étudiée en laboratoire. Les résultats obtenus démontrent qu'elle diminue significativement le taux de croissance des colonies de *M. persicae* jusqu'à -20,5 %. Cependant cette prédation sera moins importante au champ à cause de la présence de proies alternatives (Schröder et al., 1999).

3.3.3.2 Parasitoïdes

De manière générale la lutte inondative avec des parasitoïdes semblent être une voie intéressante à explorer, avec des perspectives prometteuses pour le contrôle des pucerons de la betterave sucrière. Son efficacité est cependant dépendante de bon nombre de conditions opérationnelles mais également de la présence d'autres insectes prédateurs.

Une estimation de la prédation interguildes (un ennemi naturel attaquant un autre ennemi naturel) a été réalisée pour *A. fabae* en présence du parasitoïde *Lysiphlebus fabarum* sur la betterave à sucre en conditions de plein champ. Les pucerons momifiés ont été exposés à des prédateurs présents naturellement sur la parcelle (coccinelidae, chrysopidae...). La durée de survie des parasitoïdes a été estimée sur une durée de 10 jours. Le rôle des proies alternatives sur la survie de *L. fabarum* a également été étudiée en ajoutant aux momies des pucerons non parasités. Quatre à 5 jours suivant l'initiation de l'essai, les prédateurs naturels ont détruit environ 50 % des momies. Les proies alternatives ont réduit le risque de prédation sur les momies de 29 % (Meyhofer et al., 2000).

Des travaux en Chine sur tabac en conditions de plein champ, ont mis en évidence la possibilité de lutte biologique contre *M. persicae* via des lâchers inondatifs du parasitoïde *Aphidius gifuensis* (Yang et al., 2009). Des comparaisons de densités de pucerons mais aussi des dommages sur tabac entre la période avant lâcher (1998-1999), les lâchers en 2000 et 2001, et les années suivantes (jusqu'à 2007), ont été réalisées. Les résultats ont montré que les densités de pucerons et les dégâts sur tabac étaient significativement plus faibles pendant plusieurs années après les lâchers inondatifs de *A. gifuensis*. De plus, le nombre d'applications d'insecticides de synthèse et le coût de la lutte contre *M. persicae* ont significativement diminué les années après lâchers. Cette étude suggère que les lâchers inondatifs d'*A. gifuensis* pourraient être efficaces et durables dans la lutte contre *M. persicae* en plein champs.

Une étude par Wei et al. (2003) suggère que l'élevage de masse du parasitoïde *A. gifuensis* est possible avec un coût relativement maîtrisé. Les auteurs font état d'une production de 5 600 000 momies du parasitoïde en 2001 (sur 2 mois pour la période de lutte cruciale contre *M. persicae*). Par ailleurs, les informations collectées auprès d'experts Chinois du laboratoire du *Enshi Tobacco Company of Hubei province* relèvent que ce moyen de lutte en Chine a un coût d'environ 40 €/ha pour les producteurs, et qu'il est utilisé pour la lutte contre *M. persicae* sur 95% des surfaces de tabac plantées dans ce pays (1,05 million d'Ha en 2018, dont 50% dans la seule province du Yunnan).

3.3.4 Informations complémentaires issues des auditions

Les discussions et échanges corroborent les éléments bibliographiques tels que les coûts élevés de productions mais également la dépendance de l'efficacité sur le terrain, liée au nombre d'individus lâchés pour assurer un contrôle satisfaisant des pucerons sur betterave. Une méthode de lutte basée sur l'utilisation de l'espèce *Chrysoperla carnea* (évoquée plusieurs fois dans la littérature comme agent de lutte potentiel contre les pucerons sur betterave) est en cours développement, et pourrait être commercialisée à court terme pour lutter contre les pucerons sur betterave sucrière. Sa forme d'utilisation serait *a priori* la pulvérisation du stade œuf sur la culture, notamment car cela permet d'envisager des méthodes d'application adaptées et de rendre le coût de stratégies efficaces abordable (par

rapport à l'épandage de larves qui est trop coûteux) en plein champ. Les auditions conduites n'ont pas permis de mettre en lumière le développement et la commercialisation prochaine d'autres macroorganismes. Cependant, IBMA indique que 2 projets de Recherche & Développement menés actuellement par ses adhérents portent sur l'utilisation des macroorganismes pour la lutte contre les pucerons sur betterave (aucune donnée supplémentaire n'a été fournie pour des raisons de confidentialité).

3.4 Les médiateurs chimiques

27 références ont été retenues pour analyse.

3.4.1 Résumé des points forts à retenir

Les médiateurs chimiques sont des molécules naturellement utilisées par les insectes pour se reproduire et localiser leur plante hôte ou leurs congénères. Dès lors, aucune forme de résistance n'a été observée chez les pucerons, et aucune n'est attendue dans le futur.

Les médiateurs chimiques sont fréquemment des molécules volatiles de faible poids moléculaire. Ils sont sensibles à l'oxydation ainsi qu'à la dégradation par les rayonnements ultraviolets. Leur application nécessite donc qu'ils soient encapsulés dans des matrices ou dispositifs qui permettent à la fois leur protection et leur diffusion contrôlée dans l'air. Actuellement, ces dispositifs doivent être placés en champs manuellement.

Les phéromones de pucerons (alarme, sexuelle) et les odeurs de plantes ont été identifiées comme les principaux médiateurs chimiques impliqués dans le comportement de recherche de la plante hôte et d'alimentation des pucerons.

Les études de laboratoire sont très largement majoritaires. Elles démontrent l'efficacité de plusieurs de ces composés sur la modification du comportement (attraction, répulsion) des pucerons, parmi lesquels *M. persicae* et *A. fabae*. Des attractifs (odeurs de plantes) et des répulsifs (odeurs de plantes et phéromone d'alarme) ont été identifiés.

Cependant, aucune étude menée en culture de betterave ne suggère que ces médiateurs chimiques pourraient être utilisés efficacement contre les pucerons infestant cette culture dans un futur assez proche, compte tenu du niveau de réduction des populations requis pour contrôler la jaunisse. Les stratégies de lutte basées sur les médiateurs chimiques et mises en place dans d'autres contextes culturels (e.g. environnements, espèces végétales), ont démontré l'absence d'efficacité ou des niveaux d'efficacité très faibles.

3.4.2 Perspectives de R&D

- Identification de cocktails de médiateurs chimiques, productibles à faible coût, et permettant de réduire fortement la capacité des pucerons à identifier la betterave comme plante hôte.
- Développement de matrices organiques ou non permettant le relargage contrôlé de médiateurs chimiques et applicables au champ à l'aide de machinerie agricole existante. Des systèmes de microencapsulation des phéromones ou la diffusion par des nanotubes de polymères sont ainsi testés.
- L'association d'autres méthodes de lutte à celle par médiateurs chimiques est nécessaire, car cette dernière ne permet de réduire que très partiellement l'abondance de pucerons en culture de betterave.

3.4.3 Synthèse de la littérature scientifique

Plusieurs médiateurs chimiques ont été étudiés dans une optique de contrôle des pucerons, et de *Myzus persicae* et *Aphis fabae* en particulier. Parmi ceux-ci : la phéromone d'alarme, la phéromone sexuelle et les composés volatils organiques produits par les plantes (Vander moten et al 2010; Boullis & Verheggen 2016).

3.4.3.1 Phéromone sexuelle

La (4aS, 7S, 7aR)-nepetalactone et le (1R, 4aS, 7S, 7aR)-nepetalactol sont les deux composants de la phéromone sexuelle qui sont présents dans un large éventail d'espèces de pucerons, dont *Myzus persicae* et *Aphis fabae* (Table 5). Ces composés ont été considérés comme de bons candidats à une stratégie de lutte avec médiateurs chimiques contre les pucerons. Ces composés ont permis de piéger les mâles de plusieurs espèces de pucerons en verger et en champs (Gabrys et al. 1997, Hardie et al. 1994, 1997, Campbell et al. 2003).

De manière intéressante, chez *Megoura viciae* le nepetalactol et la nepetalactone ont des actions inverses. Le nepetalactol agit comme un aphrodisiaque, alors que nepetalactone est attractif (Hardie et al, 1990). Aucune étude ne rapporte une inhibition par confusion sexuelle ou une réduction des populations par piégeage avec ces molécules, seules ou en mélange.

Tableau 5 : Ratios des composants des phéromones sexuelles

Table 1. Ratios of the sex pheromone components (nepetalactone I–V and nepetalactol II–VI) released by oviparae females of several aphid species.

Common name	Species name	Ratio lactone : lactol	Reference
Greenbug	<i>Schizaphis graminum</i> Rondani	1 : 8	Dawson et al. 1988
Damson hop aphid	<i>Phorodon humuli</i>	0 : 1 ^w	Campbell et al. 1990
Vetch aphid	<i>Megoura viciae</i>	5 : 1 to 12 : 1 [*]	Hardie et al. 1990
Pea aphid	<i>Acyrtosiphon pisum</i>	1 : 1	Dawson et al. 1990
Black-bean aphid	<i>Aphis fabae</i>	29 : 1	Dawson et al. 1990
Peach-potato aphid	<i>Myzus persicae</i>	1 : 1.5	Dawson et al. 1990

La plupart des espèces de pucerons qui utilisent des phéromones sexuelles ont des cycles de vie complexes et spécifiques, la fenêtre de temps disponible pour exploiter les effets des phéromones sexuelles des pucerons sur l'accouplement est donc généralement courte. Les essais existants se sont déroulés principalement dans les vergers, en présence de l'hôte principal des espèces de pucerons (Moran 1992). Ainsi, l'utilisation de composés de phéromones sexuelles pourrait être principalement ciblée sur une perturbation de l'accouplement ou pour le piégeage en masse d'espèces de pucerons affectant économiquement les rendements. Une utilisation de ces phéromones peut être envisagée pendant la saison d'automne (partie sexuée du cycle des pucerons), en particulier lorsque plusieurs espèces de pucerons migrent des cultures vers leurs hôtes d'hiver. L'utilisation de phéromones sexuelles peut provoquer un déséquilibre dans le processus d'accouplement, réduisant la production d'œufs et le nombre d'individus nouvellement éclos.

Les pucerons se reproduisent sexuellement en dehors des parcelles de betterave, sur d'autres plantes hôtes. Les pucerons présents sur les plants de betterave ne sont eux que des femelles asexuées, qui ne répondent donc pas à la phéromone sexuelle mâle (Figure 4).

Les phéromones sexuelles de *M. persicae* et *A. fabae* ne semblent donc pas employables pour protéger la betterave.

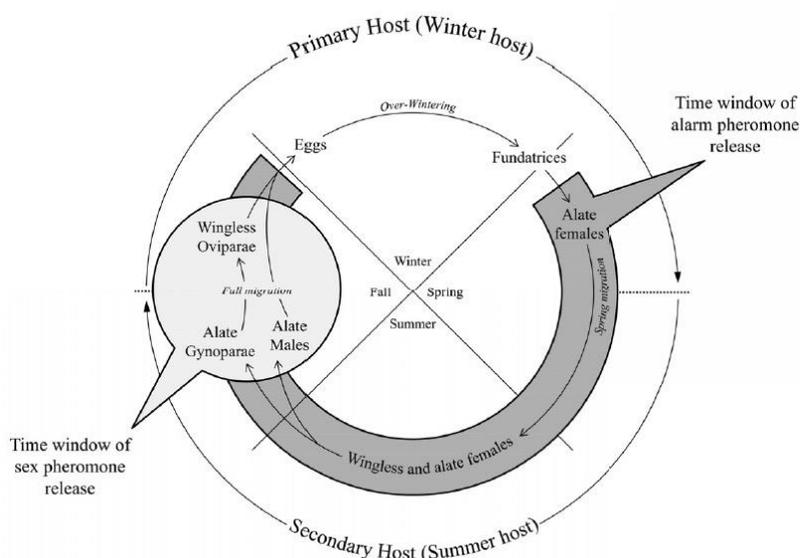


Figure 4 : Cycle de développement d'un puceron hétéroécique (Boullis et al 2016)

3.4.3.2 Phéromone d'alarme

Lorsqu'elles sont menacées par des prédateurs, les colonies de pucerons émettent une phéromone d'alarme qui cause la dispersion de la colonie et la fuite des congénères (Vandermoten et al 2010). Elle consiste en une molécule unique, le (E)-beta-farnesene (Eβf) (Figure 2). Cette phéromone est évaluée depuis plus de 40 ans pour déloger les pucerons de leur plante hôte ou pour attirer les ennemis naturels sur les parcelles traitées. Malheureusement sans succès sur le terrain.

Des expériences sur le terrain ont confirmé le comportement de dispersion des pucerons soumis à leur phéromone d'alarme chez 41 espèces (Xiangyu et al. 2002). Cependant, une fois que les concentrations d'Eβf diminuent, les pucerons ont tendance à réinfester leurs plantes hôtes (Calabrese et Sorensen 1978). Les méthodes d'application de l'Eβf dans les champs de culture ont été diversifiées. L'utilisation d'Eβf synthétique a longtemps été considérée comme difficile, en raison du caractère très instable de cette molécule (Bruce et al. 2005). L'extraction de l'Eβf à partir des huiles essentielles de *Matricaria chamomilla* L. a été proposée comme un moyen peu coûteux d'obtenir cette phéromone de puceron en quantité suffisante pour faciliter l'application sur le terrain (Heuskin et al. 2009) et présenterait une meilleure résistance au contact de l'air par rapport à la chimie de synthèse. Grâce à l'utilisation de dispositifs sémi-chimiques à libération lente (Heuskin et al. 2011), l'Eβf peut également être libéré sur le terrain pendant une période de temps plus longue. Ces essais sont cependant restés peu fructueux.

Kunert et al. (2010) ont souligné que les émissions d'Eβf par des plantes de *A. thaliana* transgéniques émettant de l'Eβf fournissent une protection limitée contre le puceron *M. persicae*. Les auteurs ont suggéré deux explications possibles (i) l'accoutumance à l'Eβf des

pucerons élevés sur ces plantes productrices de E β f, ou (ii) le fait que les pucerons ne pourraient réagir qu'à l'E β f émis par les légumineuses (c'est-à-dire imitant l'émission d'E β f par les pucerons). En revanche, dans des conditions de laboratoire, les pucerons *M. persicae* ont été repoussés par *A. thaliana* génétiquement modifié qui a libéré du E β f (Beale et al. 2006). Ces résultats ont ensuite été étayés par d'autres tests de laboratoire avec une variété de blé transgénique (Pickett et al. 2013). La dernière tentative fut de modifier génétiquement du blé pour qu'il émette de la phéromone d'alarme de pucerons, et repousse ces deniers, mais sans beaucoup de succès sur le terrain (Bruce et al 2016).

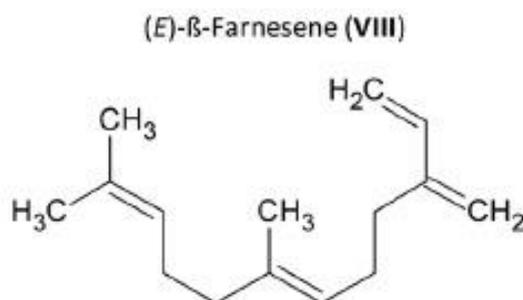


Figure 5 : (E)-beta-farnesene, principal composant de la phéromone d'alarme de *Myzus persicae* et *Aphis fabae*

3.4.3.3 Autres phéromones

En plus des phéromones sexuelles et d'alarme, les pucerons sont également capables de répondre à au moins deux autres groupes de médiateurs chimiques : les phéromones d'agrégation et les phéromones d'espacement (Pettersson et al. 1995). Ces phéromones informent les individus de la même espèce sur la qualité de la plante hôte et leur densité à proximité (Way 1973) et peuvent influencer l'attraction et la répulsion de ceux-ci. Mais aucune application n'a été développée pour lutter contre les pucerons.

3.4.3.4 Composés de plantes

Les pucerons sont également sensibles aux substances sémiocchimiques produites par les plantes. Ils évaluent par leurs systèmes olfactifs (via les cellules réceptrices antennaires) et gustatifs (par l'intermédiaire de cellules réceptrices gustatives sur leur stylet) la qualité des substances chimiques produites par les plantes hôtes et non hôtes. Ainsi, certaines molécules, seules ou en mélange, peuvent ainsi être attractives, répulsives, ou masquent le complexe d'odeurs émises par leur plante hôte. Par exemple *Aphis fabae* utilise les odeurs des plantes de betteraves pour localiser cette plante hôte et s'en nourrir (Alikhan 1960).

Le système de détection olfactif des pucerons est bien caractérisé (e.g. Nottingham et al. 1991), et le rôle joué par les odeurs de plantes dans l'attraction des pucerons est assez bien documenté. Chez les pucerons les antennes filiformes portent des sensilles spécifiques (Rhinaries) et sont remarquablement sensibles aux odeurs de plantes. Plusieurs espèces comme *A. fabae* et *M. persicae* se montrent particulièrement sensibles aux odeurs dérivées des acides gras (C6-C8 aldéhydes et alcools), caractéristiques des feuilles vertes (Visser et Piron, 1995). Les récepteurs antennaires sont aussi très sensibles aux composés terpéniques. La figure 6 liste à titre d'exemple des composés terpéniques très bien détectés par les récepteurs antennaires de *M. persicae*. D'autres composés comme les thiocyanates

sont aussi très bien détectés en particulier par *A. fabae* (Figure 7). Ces composés soufrés sont souvent considérés comme des répulsifs et sont toxiques pour de nombreuses espèces de pucerons généralistes comme *M. persicae* et *A. fabae* (Fahey et al. 2001, Verheggen et al. 2013).

L'utilisation en protection des cultures des odeurs de plantes pour lutter contre les pucerons a été proposée depuis de nombreuses années, sans toutefois donner des résultats probants. L'attraction à distance concerne principalement les formes ailées. Les ailés peuvent donc décider de se poser sur une plante, ou de la quitter, en fonction des odeurs qu'ils détectent. La littérature sur les plantes attractives et répulsives pour les pucerons de la betterave est abondante (qui sont deux espèces généralistes) (Webster 2012). Des mélanges attractifs pourraient être mis en œuvre sur le terrain pour attirer les pucerons en dehors des zones de culture à protéger. Cependant, les produits sémiocchimiques végétaux ont bien souvent des effets différents sur les différentes espèces de pucerons, sur les individus ailés et aptères, les mâles et les femelles, et l'activité de ces produits chimiques varie selon qu'ils sont présentés seuls ou en mélange complexe (Webster et al. 2008b, Webster 2012).

Il existe maintenant un corpus de publications qui montrent chez plusieurs espèces de pucerons que les symbiontes digestifs peuvent modifier le choix de la plante hôte (comportement médié par les médiateurs chimiques) de la plupart des insectes se nourrissant de sève (xylème ou phloème) (Dicke et al. 2010; Chuhe and Thiery., 2014). Il a par exemple été montré qu'*Acyrtosiphon pisum* hébergeait une microflore d'au moins 7 espèces de symbiontes digestifs (Dicke et al. 2010). Ces symbiontes se transmettent via la nourriture lors des premières piqûres. Cependant, même si la communauté scientifique envisage un très fort potentiel en termes de contrôle des populations, actuellement aucune méthode satisfaisante et facile à mettre en œuvre n'existe.

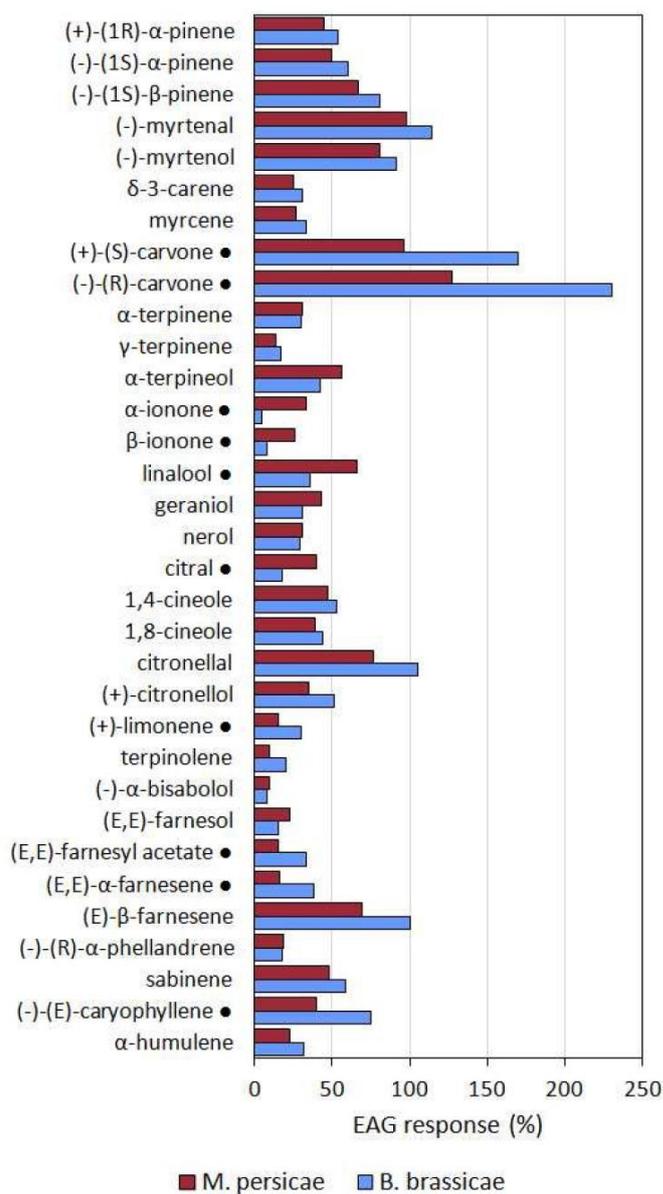


Figure 6 : Réponses olfactives enregistrées à partir des antennes de *Myzus persicae* et *Brevicoryne brassicae* exposées à différentes odeurs de leur plantes hôtes (Visser et Piron, 1996).

ISOTHIOCYANATES

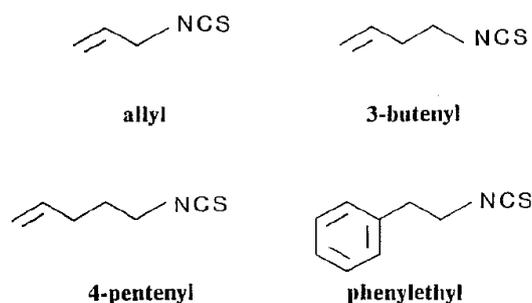


Figure 7 : Structures chimiques des isothiocyanates (Nottingham et al., 1991)

3.4.4 Informations complémentaires issues des auditions

- Aucune phéromone de puceron n'est envisagée, à ce jour, en protection des cultures betteravières contre la jaunisse.
- Certains intervenants mentionnent l'existence de produits en développement qui contiendrait des kairomones, destinées à manipuler le comportement des ennemis naturels de pucerons afin de maintenir ces derniers présents dans un champ.

3.5 Les méthodes physiques

41 références ont été retenues pour analyse.

3.5.1 Résumé des points forts à retenir

Aucun travail destiné à évaluer l'efficacité d'une méthode de lutte physique contre les pucerons en culture de betteraves n'a été identifié

La majorité des travaux identifiés concerne l'emploi d'huile minérale pour le contrôle de pucerons (au sens large) dans diverses cultures, la pomme de terre principalement. L'application de cette huile donne des résultats significatifs, mais doit toujours être complétée par d'autres méthodes de lutte.

Quelques travaux démontrent une efficacité limitée des huiles organiques, du paillage, des argiles et des pièges jaunes.

L'application des huiles organiques ne nécessite pas d'équipements de pulvérisation différents de ceux utilisés pour l'application de produits phytopharmaceutiques. Le type de buse doit toutefois être adapté afin de permettre la dispersion des gouttelettes à taille généralement plus importante.

Ces produits ayant une action physique sur le comportement alimentaire des insectes, aucune forme de résistance n'est attendue.

3.5.2 Perspectives de R&D

Tester l'applicabilité et l'efficacité de l'huile minérale en culture de betteraves pour réduire la dispersion virale.

3.5.3 Synthèse de la littérature scientifique

3.5.3.1 Introduction

La lutte directe contre les insectes ravageurs de cultures sans recours à l'utilisation de produit chimiques est une pratique très ancienne. Autrefois, les moyens de lutte physique étaient les seuls disponibles et efficaces pour la protection de certaines plantes et cultures (Faes et al 1947). Ces méthodes physiques visent à tuer ou repousser les insectes par des actions et des procédés qui n'impliquent pas de substances actives, de médiateurs chimiques ou des organismes vivants. En effet, la lutte physique en protection des plantes regroupe toutes les techniques de lutte dont le mode d'action primaire ne fait intervenir aucun processus biologique ou biochimique (Panneton et al 2000).

Aujourd'hui, ces méthodes incluent notamment :

- l'aspersion des plantes avec des huiles, des argiles, de la maltodextrine, des poudres minérales qui sont soumises au règlement (CE) 1107/2009 avec une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) au niveau national
- l'installation de filets anti-insectes, des pièges passifs ou alimentaires,
- l'arrachage, la taille et l'assainissement,
- les méthodes acoustiques, thermiques, électriques

- les méthodes basées sur l'aspiration,
- les méthodes de piégeages/répulsions par effet lumineux (Vincent et al 2000).

Des méthodes physiques de lutte montrent des degrés variés d'opérationnalité, de praticité et d'efficacité générale qui dépendent du couple culture-ravageur. Pour certaines espèces, ces méthodes peuvent être une alternative viable dans des stratégies de gestion intégrée de ravageurs.

3.5.3.2 Huile minérale horticole (huile de paraffine)

L'huile minérale a été abondamment testée et appliquée en culture de pommes de terre pour protéger celles-ci des virus PVY, transmis par des pucerons (parmi lesquels *Myzus persicae* et *Rhopalosiphum padi*).

Sur la base de la littérature disponible, la protection octroyée par l'huile minérale contre les virus ou les pucerons vecteurs de virus est démontrée en culture de : pommes de terre (e.g. Boiteau et al 2009 ; Fageria et al 2015 ; Galimberti and Alyokhin 2018), tulipes (Karczmarz and Marcinek 2018), pêchers (Samara et al 2016), poivrons (Martin-Lopez et al 2006 ; Yankova et al 2009), pommiers (Fernandez et al 2005), lys, iris et dahlias (Asjes and Blom-Barnhoorn 2001, 2002),

La protection enregistrée par les études consultées reste insuffisante. Des réductions d'incidence de 20 à 30 % sont typiquement observées. A l'unanimité, les auteurs de ces essais soulignent que la protection octroyée par l'huile minérale seule n'est pas suffisante.

Plusieurs études ont testé l'huile minérale en combinaison avec d'autres méthodes de lutte. Il en ressort que :

- l'huile minérale renforce l'efficacité des insecticides foliaires (e.g. Mackenzie et al 2017).
- l'efficacité de l'huile minérale est renforcée lorsqu'elle est combinée à des plantes pièges placées en bordure de champs de pomme de terre (Boiteau et al 2009).

La façon dont l'huile minérale réduit la transmission de virus (PVY de la pomme de terre notamment) n'est pas encore entièrement comprise, bien que certaines propositions aient été faites :

- l'huile minérale interfère avec la liaison des particules virales sur les parois du stylet lorsque les pucerons sondent, ce qui réduit la probabilité pour le puceron d'absorber des particules virales (Boquel et al. 2013);
- elle retarde le début de la pénétration du stylet (Powell et al. 1998);
- elle affecte le comportement alimentaire des pucerons (Ameline et al. 2009);
- elle rend les plantes hôtes peu attractives (Ameline et al. 2009).

3.5.3.3 Huiles organiques

L'application foliaire d'huiles organiques (soja par exemple) permet d'induire une mortalité importante de pucerons, comme *M. persicae*. Ainsi par exemple, en application sur poivron, l'huile de colza induit 83 % de mortalité après 72h (contre 1 % dans les parcelles non traitées). Certaines études donnent des résultats contraires : Par exemple, en culture de nectarine, les huiles organiques n'ont montré aucune efficacité contre les pucerons (Gupta et al 2017).

Dans des essais comparatifs menés en culture de pomme de terre, l'huile organique (huile de colza) a montré une efficacité plus faible que l'huile minérale à protéger les plantes contre le PVY (67 % et 32 % de plantes infectées, respectivement) (Wrodel 2012 ; Rolot et al 2021). Le même constat est fait en culture de poivrons où l'application d'huile de colza seule (69 % après 72h) s'est montrée moins efficace qu'une application d'huile minérale (83 % après 72h) à tuer les pucerons (*M. persicae*) (Martin-Lopez et al 2016). Aucune efficacité n'est démontrée dans cette même étude en application préventive.

3.5.3.4 Argiles

Les kaolins sont des argiles blanches, composées principalement de silicate d'aluminium. Leur application permet de créer une barrière physique sur la plante réduisant la capacité des pucerons à y insérer leur stylet. L'efficacité a été démontrée sur arbres fruitiers (Alins et al 2017) et choux frisés (Pissinati et al 2015) notamment.

Par contre, lors d'essais réalisés en laboratoire sur *Myzus persicae* nourri de choux, l'argile kaolin n'a montré aucune efficacité en termes de réduction d'alimentation et de développement des pucerons (Barker et al. 2007).

3.5.3.5 Paillage

Le paillage permettrait de limiter la capacité des pucerons à identifier visuellement et olfactivement leurs plantes hôtes. Le paillage appliqué dès l'émergence des plantes réduit de 50 % l'incidence du virus PVY en culture de pomme de terre (Kirchner et al 2014). Certaines études mentionnent un effet synergique entre le paillage et l'application d'huile minérale (Dupuis et al 2017 ; Rolot et al 2021), mais d'autres n'observent pas cet effet (Kirchner et al 2014). En production de plantes à fleurs horticoles, le paillage réduit partiellement le taux d'infection des plantes au TBV virus (Wilson 1999).

3.5.3.6 Bâches en plastiques

En Afrique du Sud, l'utilisation de bâches en plastiques placées au pieds de plantes de poivron a réduit le taux d'infection au virus PVY et augmenté le rendement de 32 % (Budnik et al. 1996).

3.5.3.7 Pièges jaunes

En Afrique du Sud, les pièges en plastique collant jaune ont eu un effet bénéfique significatif sur le rendement en poivrons, réduisant l'incidence du virus PVY (Budnik et al. 1996).

3.5.4 Informations complémentaires issues des auditions

Aucune mention n'est faite par les intervenants auditionnés à propos des méthodes de lutte physique suivantes : pièges jaunes, bâches plastiques, paillage, argiles et huiles organiques.

Rien ne semble empêcher l'application de l'huile minérale en culture betteravière. Certains essais menés avec cette huile en culture betteravière suggèrent une efficacité modérée. Certaines options sont en développement afin de valoriser cette huile.

3.6 - Méthodes génétiques -

40 références ont été retenues pour analyse.

3.6.1 Résumé des points forts à retenir

- Aucune variété commerciale de betterave sucrière n'est disponible en France présentant une résistance ou tolérance suffisante contre les pucerons *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, et/ou les virus de la jaunisse associés.
- Pourtant une recherche active dans le domaine de la lutte génétique a été initiée dès les années 60, avec des résultats prometteurs, mais elle a été interrompue avec la généralisation des néonicotinoïdes (presque 100% des semences traitées en France, Hauer et al. 2017). Une reprise des recherches s'est amorcée ces trois dernières années, notamment en France (INRAE, GEVES), mais sans faire encore l'objet de publication scientifique.
- Des gènes de résistance sont connus depuis longtemps chez *Beta vulgaris* et dans le germoplasme de la betterave sauvage (genre *Beta*), aussi bien contre les pucerons que contre les virus de la jaunisse.
- Des QTLs de résistance aux virus de la jaunisse ont été mis en évidence (dans les années 2000), la possibilité de transfert de résistance entre lignées a été démontrée, ouvrant la voie à la sélection génétique pour la résistance, notamment sur la base de marqueurs quantitatifs.
- Des variétés résistantes sont en cours de développement (en France, Royaume-Uni) et des essais au champ sont menés actuellement par des instituts publics et des obtenteurs privés, avec des promesses de mise à disposition à l'horizon 2022.
- La sélection pour la résistance aux virus de la jaunisse semble plus prometteuse que celle pour la résistance aux pucerons car les gènes de résistance contre les virus sont déjà identifiés et le niveau de résistance requis est moindre (pour les pucerons l'efficacité de réduction des niveaux de population doit être proche de 100% pour réduire le risque de transmission des virus).

3.6.2 Perspectives de R&D

- Confirmer l'efficacité au champ des variétés résistantes en cours de développement ou de test, notamment vis-à-vis de chacun des 4 virus de la jaunisse
- Analyser la résistance croisée aux différents virus
- Évaluer les trade-offs entre résistance des variétés de betterave aux virus et/ou pucerons et rendement ou qualité sucrière
- Raisonner la stratégie de déploiement des variétés résistantes (notamment via la diversification et/ou le renouvellement des variétés à l'échelle du champ ou du territoire) pour éviter l'apparition de contournements de la résistance par les pucerons ou les virus.
- Combiner variétés résistantes et autres méthodes de lutte selon l'approche de lutte intégrée (IPM).

3.6.3 Synthèse de la littérature scientifique

Malgré une intense activité de sélection variétale (407 variétés de betteraves sucrières sont inscrites au catalogue du GEVES) aucune variété commerciale résistante au pucerons *M. persicae*, *A. fabae* et/ou aux virus de la jaunisse (virus de la jaunisse modérée, beet mild yellowing virus, BMYV, virus de la chlorose, beet chlorotic virus, BChV et virus de la jaunisse grave, beet yellows virus, BYV) n'est disponible actuellement en France. Des recherches sont en cours, aussi bien dans les instituts techniques publics (GEVES, ITB, dans le cadre du projet CASDAR - Semences « ExTraPol » Expertise sur la Transmission des Polerovirus de la betterave) que dans les entreprises privées (ex. KWS, SV-Agroflash). Des recherches actives sont également menées dans d'autres pays, notamment au Royaume Uni où des variétés résistantes sont promises d'ici 2 ans (*International Sugar Journal*). Ces recherches, initiées dès le début des années soixante dans le monde ont semble-t-il été interrompues avec la généralisation de l'usage des organophosphorés, puis des néonicotinoïdes (Hull, 1965 ; Qi et al 2004).

Beta vulgaris (L) est un complexe de trois sous-espèces (subsp. *adanensis*, subsp. *maritima* et subsp. *vulgaris*) qui s'entrecroisent librement et produisent de descendances fertiles. Par ailleurs, les parents sauvages de la betterave sucrière sont des plantes des genres *Beta* et *Patellifolia* (Andrello et al 2016 ; Frese, 2010). Le genre *Beta* est subdivisé en deux sections : *Beta* section *Beta* et *Beta* section *Corollinae*. Les plantes de la section *Beta* sont les plus proches parentes de la betterave sucrière en termes de génétique et de possibilités de reproduction (Frese 2010). En particulier, la betterave marine *B. vulgaris* subsp. *maritima*, qui appartient à la section *Beta*, est considérée comme l'ancêtre de toutes les betteraves cultivées, y compris de la betterave sucrière (Andrello et al 2016 ; Biancardi et al. 2012). Il existe des hybrides naturels entre les betteraves cultivées et les formes sauvages de *Beta* section *Beta* dans les zones où elles poussent ensemble (Biancardi et al. 2012). Des hybrides entre ces espèces sont également utilisés par les sélectionneurs (van Geyt et al. 1990 ; Frese 2010). La section *Beta* est donc d'un intérêt primordial pour l'amélioration des variétés de betteraves sucrières car les plantes de cette section présentent des caractéristiques potentiellement intéressantes pour améliorer les performances de la betterave sucrière, comme la tolérance au sel, à la sécheresse, au gel et à diverses maladies (van Geyt et al. 1990 ; Biancardi et al. 2012). De fait, des caractères importants de résistance aux maladies, actuellement présents dans les variétés cultivées de betterave, ont été isolés à partir de matériel sauvage (Biancardi et al. 2012).

La plupart des travaux d'amélioration génétique pour contrer les effets de la jaunisse se sont concentrés sur la sélection pour la résistance aux virus. Ainsi, la sélection pour la résistance à la jaunisse chez la betterave sucrière a commencé en Europe en 1948 et en 1957 aux États-Unis (Biancardi et al. 2012). Les plants de *Beta vulgaris* sont connus depuis longtemps pour présenter une large gamme de résistance aux virus BYV (McFarlane et Bennett 1963) et BMYV (Lewellen et Skoyen 1984), sans pour autant manifester de résistance totale (Russel 1964, 1966ab, Hull 1965 ; Lewellen 1973). Ce caractère de résistance est héréditaire (Russel 1966ab). Il ne semble pas exister de résistance croisée aux différents virus de la jaunisse mais des lignées peuvent présenter des résistances combinées aux deux virus (Russel 1964, 1966ab). Le niveau de résistance aux virus ne dépend pas des espèces de pucerons vecteurs (*M. persicae* vs *A. fabae*, Russell 1966ab). Il

existe des corrélations négatives entre caractères de sélection, certaines lignées plus tolérantes aux virus présentant des teneurs en sucre plus faibles (-20 à -40%, Russel 1964). La résistance aux virus est héritable (Lewellen 1973). La sélection génétique pour la résistance aux virus de la jaunisse est donc possible et une première variété résistante (Maris Vanguard) a été déployée au Royaume Uni dès 1966, manifestant un gain de rendement de 20-30% par rapport aux variétés commerciales en présence de virus (Russel 1966b). Cette variété présentait des faibles teneurs en sucre et une faible qualité technologique qui ont fait penser de façon erronée, dans un premier temps, à leur corrélation négative avec la résistance (Lasa Dolhagaray et Romagosa, 1992).

Des sources de résistance aux virus de la jaunisse ont été identifiées chez les espèces sauvage de *Beta* (van Geyt et al. 1990). Il est probable que les virus de la jaunisse ont co-évolué avec les *Beta* spp. Il semble donc logique de rechercher une résistance élevée des plantes hôtes à un ou plusieurs des virus dans le germoplasme primaire et secondaire de la betterave (Lewellen 2000 ; Luterbacher et al. 2004 ; Panella et Lewellen 2007). Le développement de marqueurs moléculaires a ainsi permis d'identifier de nouvelles sources de gènes de résistance aux virus de la jaunisse chez les espèces du genre *Beta* (notamment *B. vulgaris* subsp. *maritima*, Francis et al. 2003). Luterbacher et al. (2004) ont évalué la résistance au BYV dans 597 accessions de *Beta* collectées dans le monde entier et ont identifié des accessions individuelles très résistantes. Environ 15% des accessions se sont avérées très résistantes au BMV et 8% au BYV dans des essais menés en serre (Luterbacher et al. 2004) et des croisements contrôlés ont permis un transfert de résistance au BMV de betteraves sauvages vers la betterave à sucre (Grimmer et al. 2008a). En revanche, peu de recherches ont été effectuées au sein de la sous-espèce *maritima* pour la résistance aux jaunisses (Biancardi et al. 2012). La sélection pour la résistance au BYV à Salinas, en Californie, a été l'un des objectifs à long terme du programme de sélection de la betterave sucrière, qui a commencé en 1957 pour le BYV (McFarlane et Bennett 1963), puis est passé au BWYV (Lewellen et Skoyen 1984), et plus récemment au BChV (Lewellen et al. 1999). Des plantes isolées cultivées dans le champ ont été inoculées avec le BYV, le BWYV et/ou le BChV et sélectionnées sur la base du rendement individuel en sucre et de l'absence de symptômes de jaunissement (Biancardi et al. 2012). La performance et la résistance de ces accessions restent à évaluer en conditions d'utilisation au champ.

Les gènes associés à la résistance commencent à être identifiés par analyse moléculaire (Friesen et al. 2006). Des QTLs de résistance au BYV (Grimmer 2008b) et au BMV (James et al. 2008) ont été identifiés en 2008 ouvrant la voie à l'utilisation de marqueurs moléculaires pour la sélection.

La recherche sur la résistance de betterave sucrière aux pucerons a également débuté dans les années soixante. Certaines lignées de *B. vulgaris* présentent une large variabilité de niveau de résistance aux pucerons *M. persicae* (Lehmann et al. 1983) et *A. fabae* (Dale et al. 1985) et ce caractère est héritable, de type polygénique (Lowe & Russel 1969, Lowe & Singh 1985), justifiant la sélection génétique pour la résistance à ces pucerons chez la betterave sucrière (Lowe 1975). Des méthodes de sélection ont été proposées de longue date combinant tris en serre et essais au champ (ex. Lowe & Singh 1985). Des lignées génétiques de betterave sucrière résistantes aux pucerons ont été identifiées dans le matériel génétique du genre *Beta* (van Geyt 1990 ; Zhang et al. 2008) et les bases

moléculaires de la résistance commencent à être décryptées, notamment celles impliquées dans l'élicitation de défenses des voies métaboliques de l'acide jasmonique, l'acide salicylique et l'éthylène (Zhang et al. 2008). Ces résultats n'ont pas conduit à une application pratique (Biancardi et al. 2012).

3.6.4 Informations complémentaires issues des auditions

Les représentants auditionnés du CTPS et de la société Florimond-Desprez font des constats analogues sur l'existence de gènes de résistance contre les pucerons et les virus de la jaunisse chez la betterave, et indiquent travailler activement sur la sélection génétique mais en appellent à la prudence sur les promesses d'efficacité et à la patience pour la date d'inscription au catalogue de variétés résistantes ou tolérantes.

L'audition du CTPS montre que les moyens dédiés aux tests de résistance des variétés améliorées sont insuffisants (un seul site pour les essais 2019 et 2020, et problème de maîtrise du niveau d'infestation par les pucerons). Le nombre de variétés en développement est supérieur aux capacités de test actuelles du GEVES. Le GT s'interroge sur les raisons qui ont conduit les concepteurs des essais à ne pas adopter une approche multi-sites (sans protection phytosanitaire des parcelles). Des tests de résistance peuvent être conduits sous serre : il n'est pas forcément utile de réaliser les essais en plein champ. La baisse de rendement des variétés testées pour la résistance reste un problème à étudier.

Ensuite, l'audition de la société Florimond-Desprez montre que la littérature scientifique suggère des efficacités meilleures chez les variétés criblées que chez les variétés sélectionnées pour la résistance à la jaunisse chez les obtenteurs privés. Cet écart est sans doute dû à la stratégie d'amélioration de ces derniers, partant du pool de variétés « élites » déjà sélectionnées pour le rendement en sucre, à partir duquel sont recherchées les variétés les plus résistantes. Le GT pense qu'il conviendrait sans doute de repartir d'une base génétique plus large, en puisant notamment dans les germoplasmes sauvages, pour tirer partie de plusieurs sources de résistance et combiner les critères de rendement et ceux de résistance ou tolérance.

Cependant, selon le GT, reprendre un programme de sélection à la base demandera de nombreuses années pour réaliser les croisements d'introgression nécessaires pour augmenter les niveaux de résistance tout en préservant les autres caractères (croissance, rendement en sucre) des variétés commercialisées. De telles variétés pourraient donc être disponibles d'ici 5 à 10 ans dans le meilleur des cas.

3.7 Les méthodes de lutte culturale

53 références ont été retenues pour analyse.

3.7.1 Résumé des Points forts à retenir

- Nous n'avons trouvé que deux études publiées sur la lutte culturale contre les pucerons de la betterave en plein champ. En revanche, des publications sur d'autres cultures montrent que **quatre approches sont prometteuses** pour prévenir les infestations par les deux principales espèces vectrices des virus de la jaunisse, *Aphis fabae* et surtout *Myzus persicae*.
- La première approche ayant montré des résultats significatifs de diminution des populations de *M. persicae* repose sur l'emploi de **paillage** en interligne des rangs de culture, avec des **réductions de l'ordre de 50% des effectifs de pucerons**. Cette action semble renforcée par l'application conjointe d'huile de paraffine.
- La deuxième méthode repose sur une **gestion appropriée de la fertilisation**, passant par une réduction des doses d'engrais chimique azoté et surtout leur **remplacement par des engrais organiques de type vermicompost (ou lombricompost)**, dont les mécanismes d'action paraissent multiples (moindre qualité alimentaire en termes de ratio C/N de la sève et induction des défenses des plantes). Les effets attendus sont d'environ **60% d'efficacité** (en termes de diminution de la densité de pucerons).
- La troisième technique de lutte culturale intéressante se fonde sur une diversification du couvert végétal en utilisant des plantes associées à la culture principale pour interférer sur le comportement de choix et de colonisation des plantes hôtes, suivant le concept de « **résistance par association** » et **ses effets ascendants** (« bottom-up »). Les plantes associées attirent les pucerons loin de la plante cultivée (diversion par des plantes hôtes plus attractives) ou les en éloignent (répulsion ou masquage chimique par des plantes non hôtes des pucerons), les méthodes de push & pull combinant les deux types de plantes. Le taux de réduction des effectifs de pucerons serait de l'ordre de 50% et **l'incidence des virus réduite d'environ 40%**.
- La quatrième méthode de lutte culturale à envisager concerne également la diversification du couvert végétal mais cette fois-ci pour fournir ou améliorer les habitats favorables aux ennemis naturels des pucerons (prédateurs ou parasitoïdes), suivant le concept de « **résistance par association** » et **ses effets descendants** (« top-down ») ou encore de « **lutte biologique par conservation** ». Les plantes associées fournissent en général des ressources alimentaires de complément aux insectes auxiliaires, comme des proies ou hôtes alternatifs, du pollen ou du nectar. Le **taux de réduction des effectifs de pucerons serait de l'ordre de 50%** avec cette méthode.
- Une limite importante de ces techniques de lutte culturale est le **changement d'échelle spatiale**, la plupart des études rapportées ayant été menées dans des petites parcelles, donc de moindre surface que la taille moyenne des champs de betterave à sucre.

- Une autre limite concerne l'identification des espèces végétales permettant d'induire une résistance par association, les études publiées ayant souvent été réalisées dans des conditions pédoclimatiques différentes de celles des bassins de production de la betterave en France. Une attention particulière devra, en outre, être portée au risque que les plantes de services ne puissent elles-mêmes constituer un réservoir d'insectes ravageurs (les légumineuses par exemple pourraient héberger des pucerons comme *A. fabae*), ou devenir envahissantes et préjudiciables à la culture de betterave.

3.7.2 Perspectives de R&D

- La plupart des options de lutte culturale présentées ci-dessus permettent un contrôle important mais sans doute insuffisant si elles sont utilisées seules. Cependant, elles apparaissent clairement complémentaires et compatibles entre elles. Il conviendrait donc de mettre en place des expérimentations – systèmes pour en tester l'effet additif ou synergique, par exemple dans des approches de push – pull combinant différentes espèces de plantes associées.
- Comme exposé plus haut, une recherche des « plantes de services » (attractives ou répulsives pour les pucerons, permettant d'héberger leurs ennemis naturels...) doit être menée pour identifier celles qui combinent efficacité de prévention des attaques de pucerons et bonne capacité de croissance au champ dans les zones de culture de la betterave à sucre.
- Il est probable que la mise en œuvre des solutions de lutte culturale entraîne une certaine baisse du rendement à l'hectare de la betterave, soit par réduction de la fertilisation ou « sacrifice » d'une partie de la surface à cultiver (par exemple pour installer des plantes de service). Mais cette baisse de rendement pourrait être compensée par un moindre coût de traitement (que dans les applications d'insecticides par exemple), une compensation liée à la valeur ajoutée que représenteraient certaines plantes de service, voire une amélioration des conditions environnementales et de la biodiversité. Des études socio-économiques devraient donc être entreprises pour évaluer la pertinence et l'acceptabilité de ces méthodes de lutte culturale.

3.7.3 Synthèse de la littérature scientifique

Wratten et al. (2007) ont listé les principales méthodes de lutte culturale contre les pucerons ravageurs des cultures. Nous reprenons ici leur classification pour synthétiser l'information recueillie sur la lutte culturale contre les pucerons (en grande majorité *Myzus persicae* et quelques fois *Aphis fabae*), sachant que seuls 2 des 53 articles retenus concernent spécifiquement le cas de la betterave à sucre (Landis et al. 1997, El-Fakharany et al. 2012).

3.7.3.1 Application de mulch ou paillage

Dans des essais au champ, le paillage a permis de réduire significativement les infestations de *Myzus persicae* sur chou kale (-75% à -83%, Silva-Filho et al. 2014) et sur pomme de terre (-20%, Dupuis et al. 2017), conduisant à une diminution de l'incidence du virus PVY (-50% à -70%).

Cet effet de protection du paillage est imputé à une diversion de l'atterrissage des pucerons qui seraient attirés par la couleur des paillages (Zanic et al. 2013), une hausse des températures défavorable au développement des pucerons et une induction des défenses des plantes (Silva-Filho et al. 2014).

L'effet de protection du paillage est accentué en combinaison avec une pulvérisation d'huile minérale (huile de paraffine) conduisant à une réduction d'environ 59% de l'incidence du PYV sur pomme de terre avec du Zofal D® (Dupuis et al. 2017) et de -56% à -62% avec du Vazyl® (Rolot et al. 2021), en lien avec une réduction du nombre de *M. persicae* (-42%).

3.7.3.2 Modification de la fertilisation

La fertilisation azotée semble favoriser le développement des populations de pucerons, notamment, *M. persicae*, en raison d'une amélioration de la qualité alimentaire de la sève (teneur en azote, ratio C/N), d'une augmentation de la surface foliaire, de la diminution de la densité de trichomes, voire d'une modification des défenses des plantes (Leite et al. 1999 ; Comadira et al. 2015).

La réduction de la fertilisation azotée s'est traduite par une diminution de la fécondité (environ -30%) de *M. persicae* sur chou (*Brassica oleracea* var. *capitata*) (Stafford et al. 2012), de la survie sur orge (100% de mortalité sur plants carencés, Comadira et al. 2015), et de l'abondance sur plants de pêchers (-62% en réduisant l'apport en azote de 90% ; Rousselin et al. 2016).

La qualité du fertilisant semble également importante, des résultats convergents indiquant une moindre infestation des plantes par les pucerons en cas d'utilisation d'engrais organiques à la place des engrais chimiques. Ainsi les niveaux d'infestation de *M. persicae* étaient significativement moins importants (environ -50%) sur plants de chou ayant reçu du fumier de volaille que ceux fertilisés avec du nitrate d'ammonium (Staley et al. 2010) et de niveau intermédiaire entre plants fertilisés avec du nitrate d'ammonium et non fertilisés (Stafford et al. 2012). De même, le remplacement des engrais azotés chimiques par du vermicompost (amendement organique produit par la transformation de fumiers ou de déchets organiques domestiques par des vers de terre) a permis une réduction des attaques de *M. persicae* de 75-80% sur plants de chou (Arancon et al. 2006 ; Little et al. 2011), et de 50-55% sur plants de concombre et 70% sur plant de tomate (Edwards et al. 2011). Sur culture de poivron, l'apport de vermicompost s'est traduit par une baisse significative du taux de reproduction (environ -66%) et un allongement du temps de développement (environ +40%) de *M. persicae* (Mardani-Talaei et al. 2016). Ces effets du vermicompost sont attribués à une réduction de la disponibilité en azote dans la sève et la production de phénols anti-appétants dans les feuilles (glucosinolates) par activation des défenses des plantes (effet « priming ») par certaines bactéries contenues dans le riche microbiote associé au vermicompost.

3.7.3.3 Associations végétales avec des plantes de service – Plantes pièges ou plantes barrières

Les plantes pièges ou plantes barrières agissent comme des « puits » pour les pucerons, les détournant du champ cultivé. Elles agissent surtout comme habitats « puits » pour les virus non-persistants. Après avoir testé une plante barrière et inoculé son virus (« probing »), le puceron n'est plus infectant pour la plante cible. Elles peuvent aussi agir

comme barrière physique au déplacement des pucerons et au camouflage visuel ou olfactif de la plante cible (Hook et al. 2006).

Un essai au champ mené sur cultures de poivrons entourées de plantes barrières (sorgho, maïs ou vesces) montrent une réduction de 14% à 54% de la transmission du virus PVY par *M. persicae* (Fereris 2000). Des semis de millet (*Pennisetum glaucum*) mis en place au vent dominant, ont agi comme barrière pour bloquer l'arrivée des pucerons sur une culture de citrouille, divisant le taux d'infection par le virus ZYMV par 3 (11% vs 33% ; Coutts et al. 2011).

3.7.3.4 Associations végétales avec des plantes de service – Plantes compagnes à action répulsive contre les pucerons

La pratique de cultures associées (intercropping) consiste à cultiver dans le même champ, sous forme de lignes ou bandes alternées, différentes espèces végétales à bénéfice croisé, notamment de protection sanitaire contre les infestations de ravageurs. Un des mécanismes de cette résistance par association (Barbosa et al. 2009) est la perturbation du processus de localisation et colonisation de la plante hôte (ici l'espèce végétale à intérêt commercial) par des odeurs répulsives ou masquantes émises par les plantes associées, choisies comme non hôtes du ravageur ciblé.

De nombreux essais de cultures associées (ou intercalaires) ont été menés au champ pour la protection phytosanitaire contre *M. persicae* (et *A. fabae* dans une moindre mesure), montrant des effets souvent importants de réduction des abondances de pucerons, imputables à des mécanismes de répulsion (ou évitement par masquage olfactif). Ainsi une association brocoli – légumineuses en plantes de couverture a permis une diminution variant de 50% à 90% de l'abondance de *M. persicae* (Costello et al. 1994). L'association de céréales (orge et blé de printemps) avec le haricot comme plante cible a permis une réduction significative du nombre de plantes infestées et du nombre de pucerons (*A. fabae*) par plante (Hansen et al. 2008). Les monocultures de courgettes ont montré un nombre significativement plus important de plants manifestant des viroses (ZYMV, CMV, et PRSV-W) que des cultures intercalées avec du gombo, du sarrasin, du trèfle ou du chanvre indien. La plus forte efficacité a été obtenue par addition du sarrasin, avec une baisse d'incidence de 50% à 75% (Manhandar et al. 2011). Une culture intercalaire de tabac et d'ail a permis une réduction de 35% à 47% de l'abondance de *M. persicae* sur tabac (Lai et al. 2011), même en cas de forte pression (40 à 50 pucerons/plant de tabac). Les pucerons verts sont arrivés avec 7 jours de décalage dans la polyculture, suggérant une action répulsive de l'ail. L'incidence des virus du tabac CMV, PVY, et TEV a été réduite de 10% à 40% dans les polycultures. Une résistance par association vis-à-vis des individus ailés (-50%) et aptères (-75%) de *M. persicae*, attribuée à des phénomènes de répulsion olfactive, a été observée sur chou commun (*Brassica oleracea*) en association avec la moutarde (*Brassica nigra*), le colza (*Brassica napus*), ou la tomate (*Solanum lycopersicum*) (Le Guigo et al. 2012). Une culture intercalaire de pommes de terre avec des oignons ou de l'ail a entraîné une baisse significative de l'abondance de *M. persicae*, de 46% pour l'association avec l'oignon et de 8% avec l'ail (Ninkovic et al. 2013). L'effet de l'oignon semble imputable à l'émission d'odeurs répulsives. Toujours sur pomme de terre, une culture intercalaire d'avoine ou de féverole a conduit à une réduction d'environ 35% du taux d'incidence du PVY (Dupuis et al. 2017). En culture intercalaire avec oignon, chou, céleri, haricot, carotte ou moutarde, les populations de *M. persicae* se sont révélées significativement plus faibles dans toutes les

polycultures que dans les monocultures de pomme de terre, avec une plus forte réduction (d'environ 50%) dans les combinaisons avec chou, céleri, oignon et moutarde (Sidauruk et al. 2018).

Ces résultats sont confirmés dans des essais en milieu clos. En serre, la culture intercalaire de piment avec le romarin a montré une réduction du nombre de pucerons de -60% (Ben Issa et al. 2016) à -77% (Ben-Issa et al. 2017a) et attribuée à l'émission de composés volatils organiques répulsifs par le romarin (Ben-Issa et al. 2017b). Li et al. (2021) confirment ces résultats sur le même système piment et romarin, avec -60% à -100% d'abondance de *M. persicae* par rapport à la monoculture de piment. L'effet répulsif de plusieurs plantes compagnes a été testé au laboratoire (en olfactomètre) contre *M. persicae*. Une plante particulièrement répulsive a été identifiée : le basilic (*Ocimum basilicum*) (Dardouri et al. 2019a). Deux composés répulsifs en ont été isolés, l'eugénol et le α -farnésène qui est aussi connu comme phéromone d'alarme chez les pucerons. Le romarin s'est révélé également répulsif (Dardouri et al. 2019b) mais moins que le farnésène. Le basilic (*Ocimum basilicum*) et l'œillet d'Inde (*Tagetes patula*) ont été identifiés comme plantes réduisant le risque de multiplication de *M. persicae* sur piment, via une fécondité réduite d'environ -20% et une capacité d'ingestion de sève réduite de -35% à -45%, limitant la production d'œufs par les pucerons (Dardouri et al. 2020).

3.7.3.5 Associations végétales avec des plantes de service – Plantes compagnes favorisant la lutte biologique par conservation

La lutte biologique par conservation repose sur des pratiques culturales permettant de maintenir ou développer des habitats favorables aux populations d'ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes) afin qu'ils contrôlent mieux les insectes ravageurs des cultures.

Les insectes prédateurs (carabes, staphylins, cantharides, coccinelles) jouent un rôle important de régulation biologique des insectes phytophages des cultures. Des expériences d'exclusion de ces ennemis naturels en début de saison de végétation dans des champs de betterave se sont traduites par une importante augmentation (multiplication par deux) des densités de *A. fabae* (Landis et al. 1997). Ces prédateurs étaient plus abondants en bordure de champ qu'à l'intérieur.

Une culture intercalaire de féverole, maïs ou chou a permis une réduction des attaques de *A. fabae* **sur betterave** au champ (-84% avec le maïs, -69% avec le chou, -43% avec la féverole). La culture intercalaire de maïs a entraîné une multiplication par quatre de la densité du prédateur *Chrysoperla carnea* **sur betterave** (El-Fakharany et al. 2012).

Dans un essai en champs de tomates (agriculture biologique), le pourcentage de pucerons (*M. persicae*) parasités était significativement supérieur dans les parcelles bordées d'une bande fleurie, notamment quand elle contenait des plantes à nectar (Balzan et al. 2014). Dans une expérimentation au champ consistant en bandes alternées de culture de brocoli et de végétation herbacée, la densité de *M. persicae* a été réduite de 20% environ et le taux de parasitisme augmenté d'environ 20% (Banks et al. 2016). En culture biologique de tabac, l'installation de bandes fleuries composées de sarrasin pour servir de réservoirs d'ennemis naturels a permis une réduction -25% à -55% des infestations de *M. persicae* (Toennisson et al. 2019). Toujours sur tabac, l'association avec du colza a conduit à une diminution de -30% à -54% des infestations de *M. persicae*, l'incidence de trois virus (CMV, PTY, TEV) a été réduite de -12% à -29% alors que l'abondance du parasitoïde *Aphidius*

gifuensis a augmenté jusqu'à +85% (Lai et al. 2019). Dans un essai au champ, des bandes d'Alysson maritime (corbeille d'argent, *Lobularia maritima*) en fleur installées en bordure de parcelles de radis (*Raphanus sativus*), ont permis de réduire les attaques de *M. persicae* de -57% et d'augmenter l'abondance de prédateurs généralistes (syrphes +50%, coccinelles +33%) (Tiwari et al. 2020).

3.7.3.6 Associations végétales avec des plantes de service – Plantes banques (« banker plants »)

Les plantes banques (« banker plants ») sont des plantes de service permettant la reproduction et le maintien des insectes auxiliaires à des niveaux de densité suffisants pour qu'ils puissent ensuite se déplacer sur le système de culture adjacent et y réguler les attaques des insectes ravageurs (Stenberg et al. 2021). Le système le plus courant de plantes banques associe des céréales infestées par *Rhopalosiphum padi* comme hôte du parasitoïde *Aphidius colemani* qui se reproduit et émerge continuellement pour supprimer les pucerons nuisibles (Frank 2010).

Plusieurs études en serre ont été réalisées pour la lutte contre *M. persicae* avec cette approche (Frank 2010). En serre de production de piment, des plants de féverole infestés du puceron *Megoura viciae* comme hôte relais du parasitoïde *Aphidoletes aphidimyza* ont permis de maintenir les infestations de *M. persicae* à un niveau suffisamment bas pour ne pas nécessiter de traitement chimique (Hansens 1983). En serre de production de roses, des plants de pomme de terre infestés par *Macrosiphum euphorbiae* utilisés comme plantes banques ont permis une forte réduction des attaques de *M. persicae*, se traduisant par une réduction de 75% des pulvérisations d'insecticide (Blümel et al. 1996). En serre de production de poivron, des plants d'orge infestés de *R. padi* ont permis une réduction de 99% des populations de *M. persicae*, avec un taux de parasitisme de 92% (Goh et al. 2001). En serre de production florale, de l'orge infesté par le puceron *R. padi* a été utilisé comme plante banque pour la reproduction de *A. colemani* afin de favoriser son action de parasitisme contre *M. persicae*, réduisant de 99% ses infestations sur marguerites (*Argyranthemum* sp.) (van Driesche et al. 2008). En serre de production de poivron et roquette, de l'avoine infestée de *R. padi* comme hôte de *A. colemani* a permis une réduction forte de *M. persicae* de -90% sur roquette et -66% sur poivron (Andorno et al. 2014). En serre de production de tomate, des plants de soucis (*Calendula officinalis*) ont été utilisés comme ressource florale pour le prédateur *Orius sauteri* (anthocoride) qui a réduit de -90% les infestations de *M. persicae* (Zhao et al. 2016).

En revanche, pour la lutte contre les pucerons *M. persicae* ou *A. fabae*, nous n'avons pas trouvé mention d'essai au champ de la méthode fondée sur les plantes banques.

De même très peu d'études ont porté sur la modification du paysage agricole pour favoriser la lutte biologique contre ces pucerons. La prédation de *M. persicae* (mesurée à l'aide de plantes sentinelles portant des pucerons) s'est révélée plus forte dans des champs de pomme de terre situés dans des paysages plus complexes, intégrant davantage d'habitats naturels (Werling et al. 2010). Plus généralement, l'abondance et la distribution des habitats favorables à l'échelle du paysage se sont avérés être importants pour plusieurs prédateurs et parasitoïdes de pucerons (Wratten et al. 2007).

3.7.4 Informations complémentaires issues des auditions

L'accent est mis par l'ITAB sur la gestion de la fertilisation azotée, les précédents culturaux, la préparation du sol à l'automne et les conditions d'implantation au printemps (la betterave a besoin d'un sol soufflé/aéré).

Une autre voie d'étude proposée par l'ITAB est le suivi des auxiliaires (dont les oiseaux). A cela s'ajoute l'analyse de la taille des parcelles et de l'environnement entourant les parcelles (présence de haies, mosaïque paysagère).

Dans le Programme National de Recherche et d'Innovation pour la recherche de solutions opérationnelles contre la jaunisse de la betterave (PNRI), plusieurs volets s'intéressent aux pratiques agronomiques pour la lutte culturale : i) la recherche de pratiques innovantes (au travers d'interviews d'agriculteurs), ii) le déploiement de plantes de services (en co-cultures avec la betterave ou avec des bandes périphériques aux parcelles) pour favoriser l'installation des pucerons autres que le puceron vert pour pré-positionner les auxiliaires et iii) l'interculture d'une variété de graminée particulière produisant un alcaloïde (ioline) du fait de la présence d'un champignon endophyte (*Neotiphodium uncinatum*) sachant que le puceron vert est très sensible à l'ioline (l'enfouissement du couvert de la graminée libère l'ioline qui est absorbée ensuite par la plante, et fait office de produit systémique mais sa rémanence dans la plante est très faible car la molécule sert de source d'azote).

L'intérêt se porte également sur la mosaïque paysagère : mobilisation et réorganisation de la mosaïque paysagère pour réduire la pression des populations de pucerons grâce à une meilleure régulation biologique (dynamique de réduction de la taille des parcelles : actuellement la taille moyenne des parcelles varie entre 25 et 50 ha).

En résumé, le PNRI a pour objectif une reconception du système de production de la betterave avec une approche de combinaisons des stratégies de lutte (d'où l'intérêt aussi de mobiliser les lycées agricoles dans le programme pour préparer la prochaine génération d'agriculteurs).

Le GT s'interroge sur la manière dont les plantes de service peuvent contrôler les populations de pucerons en les maintenant à une faible densité dans les cultures de betterave. La manière dont la contribution des plantes de service est envisagée est le déploiement intra-parcelle soit sous forme de bandes alternées au sein de la parcelle, soit sous forme de co-culture (intercropping) avec la betterave. Dans un contexte de virose induite par des insectes vecteurs, l'objectif visé est la combinaison de l'emploi de plantes de service favorisant l'arrivée ou le maintien d'auxiliaires, et des variétés de betteraves moins sensibles.

Une autre question du GT porte sur le rôle joué par la fertilisation azotée qui contribuerait à davantage attirer les pucerons sur les parcelles cultivées en conventionnel selon l'ITAB. Le GT souhaite savoir si la fertilisation sera prise en compte par le PNRI. C. Huyghe rappelle que la fertilisation azotée des parcelles de betterave a fortement diminué depuis 1990 (passage de 170 Unités d'azote/ha en moyenne à 102 Unités d'azote/ha aujourd'hui). A ce titre, C. Huyghe considère que cette sous-fertilisation devient un inconvénient en situation parasitaire car la plante n'a pas la capacité de maintenir sa surface foliaire. Parallèlement, C. Huyghe souligne le risque lié aux arrières effets en cas d'apport

d'azote organique qui doit être apporté en plus grande quantité. C. Huyghe indique, pour terminer, qu'aucun projet allant dans ce sens n'a été proposé et ajoute que cette question pourra être étudiée grâce aux parcelles de betterave en Agriculture Biologique qui entreront dans le dispositif expérimental du PNRI.

3.8 Les stimulateurs de défenses des plantes

23 références ont été retenues pour analyse.

3.8.1 Résumé des points forts à retenir

- **Aucun stimulateur de défenses des plantes (SDP) n'est disponible** en France actuellement pour lutter contre les pucerons *Myzus persicae*, *Aphis fabae* et/ou les virus de la jaunisse associée, **en usage sur betterave**
- Cependant, des travaux de recherche récents montrent **l'émergence de nombreuses options de SDP pour la protection des plantes contre le puceron *M. persicae* ou les virus de jaunisse**. Ces stimulateurs ou éliciteurs miment ou activent les voies de biosynthèse des principales phytohormones de défense (acide jasmonique, acide salicylique, éthylène) qui induisent ensuite la production de composés toxiques pour les insectes ou virus, comme les phénols, terpènes, alcaloïdes, etc.
- En particulier, **de très bons résultats ont été obtenus avec un SDP de synthèse disposant d'une AMM et déjà commercialisé, l'ASM (acibenzolar-S-methyl**, de la famille des benzothiadiazole) pour défendre les plantes (tomate, concombre, melon) contre *M. persicae* et contre certains virus, avec des efficacités au champ pouvant aller jusqu'à 90 %.
- **Des résultats prometteurs** pour la lutte contre *M. persicae*, quoiqu'encore limités à des essais au laboratoire ou sous abris, ont été également observés **avec des protéines élicitrices extraites de bactéries ou champignons entomopathogènes**
- **L'huile de paraffine** (ex. Vazyl-Y) semble aussi permettre de fortement réduire la transmission de virus par *M. persicae* via la stimulation des défenses des plantes (en plus d'un effet « mécanique ») mais l'essai a été réalisé sur plants de pomme de terre.
- En revanche les précurseurs de JA (ex. acide jasmonique, cis-jasmone, méthyl-jasmonate), SA (ex. acide salicylique) et le COS-OGA paraissent moins efficaces comme SDP contre *M. persicae*.

3.8.2 Perspectives de R&D

- Tester les SDP prometteurs contre *M. persicae* et les virus de la jaunisse en conditions d'application au champ de betterave.
- Combiner les applications de SDP avec une approche de lutte culturale (agro-écologique) et/ou de lutte biologique car de nombreux auxiliaires des cultures (ex. prédateurs) semblent attirés par les odeurs de plantes stimulées (ex. par le méthyle salicylate).
- Développer des méthodes de production et de pulvérisation ou encapsulation des SDP pour en réduire les coûts et faciliter l'application au champ.

3.8.3 Synthèse de la littérature scientifique

Plusieurs **protéines** agissant comme stimulateur (ou éliciteur) de défenses des plantes ont été isolées de microorganismes dont l'activité entomo-pathogène avait été observée. Ces protéines stimulent les voies de biosynthèse des phytohormones de défenses comme l'acide jasmonique, l'acide salicylique et l'éthylène (qui induisent ensuite la production de composés toxiques comme les phénols, terpènes, alcaloïdes etc.). Ces **protéines** sont notamment la **PeBL1** (Javed et al. 2020a), extraite de la bactérie entomopathogène *Brevibacillus laterosporus*, **PeBC1** (Basit et al. 2019, 2020) extraite de *Botrytis cinerea*, des protéines (Hanan et al. 2020) extraites de *Lecanicillium lecanii*, **PeBb1** (Nazir et al. 2020) extraite de *Beauveria bassiana*, **PeBL1** (Javed et al. 2020b) extraite de *Brevibacillus laterosporus*. A noter que ces protéines peuvent être produites par d'autres bactéries transformées génétiquement, comme *E. coli* (Javed et al. 2020a).

Ces stimulateurs de défenses des plantes n'ont pas encore été testés sur plants de betterave mais tous l'ont été sur *Myzus persicae* sur plants de concombre, haricot, tomate, ou navet. Les tests ont été réalisés en conditions contrôlées, en cage ou serre mais pas au champ, sur plants pulvérisés avec une solution de protéines, avec ensuite infestation par des pucerons. Les effets directs en terme de survie montrent des niveaux moyens à faibles, entre 20 % et 52 % de mortalité induite. Dans tous les cas, la durée de développement des pucerons est prolongée (signe de moins bonne qualité du substrat de développement) et la fécondité réduite. Dans les tests de choix, les plants traités ont été moins colonisés par les pucerons. Les taux de SA, JA et éthylène ont augmenté significativement dans les plants traités et plusieurs gènes de résistance ont été activés, sans effets négatifs pour la croissance des plantes.

Des études ont également été menées avec des **précurseurs de JA ou SA** afin de stimuler les défenses des plantes contre *M. persicae*.

L'application de **cis-jasmone** sur plants de poivron en serre (Dewhirst et al. 2012) n'a pas montré d'effet significatif sur les populations de puceron (*M. persicae*), mais les plants traités ont davantage attiré le parasitoïde *Aphidius ervi*.

Une étude a concerné le traitement de semences de chou (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*), par l'**acide jasmonique** (voie de biosynthèse du JA). La fécondité de *M. persicae* a été réduite de 32 % sur les plants de chou huit semaines après semis (Haas et al. 2018).

Le **cis-jasmone** (micro-encapsulé) a été testé seul ou en combinaison avec le **piperonyl butoxide** (PBO, un agent synergistique des insecticides en inhibant les enzymes de détoxification des insectes) sur plants de poivron au laboratoire (Bingham et al. 2014). La réduction du nombre de pucerons *M. persicae* a été de 0 % avec PBO, 27 % avec le cis-Jasmonate et de 38 % avec la combinaison des deux. Dans un essai au champ, la **combinaison cis-jasmone micro-encapsulé + piperonyl butoxide** a eu une efficacité de 89 % contre *Bemisia tabaci* sur tomates (efficacité de 93 % avec l'imidaclopride, de 71 % avec le cis-jasmone, et de 80 % avec le PBO seul).

L'application d'**acide acétylsalicylique** (précurseur SA) et d'**acide oxalique** sur plants de choux de Bruxelles a été réalisée en serre (Karatolos et al. 2009). Les deux acides ont provoqué la mortalité des pucerons *M. persicae* en application directe sur les insectes mais la pulvérisation sur feuille n'a pas eu d'effet significatif sur la mortalité des pucerons.

Deux éliciteurs de défenses des plantes ont été testés, en serre, sur plants de tomates contre *M. persicae* : **Ethephon** (précurseur éthylène), **méthyle jasmonate** (MJ, précurseur

JA). Seul MJ a induit une réduction du taux d'accroissement des populations de pucerons (doses sublétales) mais il s'est révélé phytotoxique (Boughton et al. 2006).

Des stimulateurs de défenses des plantes de synthèse sont disponibles sur le marché.

Les SDP de la famille des benzothiadiazoles (BTH), ont également été étudiés pour leurs effets similaires aux éliciteurs de la voie de biosynthèse du SA, contre *M. persicae*. Sur plants de tomate ils permettent de réduire la fécondité des pucerons (Boughton et al. 2006). Sur plants de concombre traités au champ en pulvérisation, un **BTH** (ex. forme commerciale BION®) entraîne la réduction de plus de 90 % du nombre de *M. persicae* et augmente la densité de coccinelles prédatrices (Song et al. 2013). Au laboratoire, il induit une défense systémique contre le zucchini yellow mosaic virus (ZYMV), le water-melon mosaic virus (WMV), le cucumber mosaic virus (CMV) et le cucurbit chlorotic yellows virus (CCYV) mais ses effets antiviraux sont modestes au champ (Faoro et al. 2015).

Plus particulièrement, l'acibenzolar-S-methyl (ASM, ex. Actigard®) n'a pas été testé sur *M. persicae*. Sur psylle du poirier, il réduit la survie de 40 % et engendre une baisse de fécondité (Cooper et al. 2015). Sur plants de melon, en serre, il diminue la sévérité des symptômes de Cucurbit yellow stunting disorder virus (CYSDV) de 20 % (Kenney et al. 2020). Les plants traités sont aussi moins choisis par les pucerons *Aphis gossypii* (réduction du risque d'acquisition). Des essais au champ sur tomate ont démontré une réduction de la sévérité des symptômes du virus des feuilles jaunes en cuillère, dus au Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV) d'environ 50 % au champ quand l'incidence était modérée (Monci et al. 2019). Sur *Datura stramonium* et *Nicotiana benthamiana* en serre, l'application d'ASM contre le iris yellow spot virus (IYSV) induit une réduction d'environ 50 % de la sévérité des symptômes (Tripathi et al. 2015). Toujours en serre, l'application d'ASM sur plants de melon contre le cucurbit chlorotic yellows virus (CCYV) s'est traduite par une réduction de plus de 95 % de l'expression du virus dans les plants traités de façon préventive (Takeshita et al. 2013).

L'huile de paraffine Vazyl-Y a aussi des propriétés de stimulation des défenses des plantes. Elle permet de fortement réduire (- 87 %) la transmission du virus PVY par *M. persicae* sur plants de pomme de terre, via une induction des gènes de défenses des plantes (Khelifa et al. 2017).

Le **COS-OGA** (ChitoOlygoSaccharides et OligoGAlacturonides) est une molécule naturelle fabriquée à partir de pectine (OGA) extraite de pelure d'agrumes ou de pommes tandis que le chitosan (COS) provient de carapace de crustacés. Ce produit est commercialisé comme stimulateur de défenses des plantes mais seuls ses effets sur les organismes phytopathogènes (ex. *Phytophthora sp.* de la tomate, *Phytophthora infestans* de la pomme de terre) sont rapportés dans la littérature (Guarnizo et al. 2020).

Les effets du **soufre (S)** et de l'azote (**N**) sur la croissance des plantes et les infestations de pucerons (*A. fabae*) ont été étudiés sur de jeunes plants de betteraves sucrières (Zelena et al. 2011). La fertilisation à l'azote a considérablement amélioré la reproduction des pucerons, l'ajout de soufre a réduit cet effet d'environ 30 %. L'effet positif

du S sur la résistance des plantes aux pucerons ne s'est manifesté que dans les betteraves sucrières alimentées en N.

3.8.4 Informations complémentaires issues des auditions

L'entreprise Syngenta développe un stimulateur de défense des plantes (SDP). Son positionnement est préventif avec un traitement précoce. Son développement est prévu à la fois pour le traitement de semences et en application foliaire. Il a un impact très faible sur les auxiliaires et les pollinisateurs.

Les résultats de la première année d'expérimentation en traitement de semences contre les virus de la jaunisse nanisante de l'orge (JNO) montrent une efficacité à des doses très faibles. Des essais sont en cours sur betterave contre la jaunisse de la betterave en traitement de semences. Un dépôt de dossier pour la betterave est prévu à moyen terme.

La société UPL a un projet de SDP avec un effet virucide et contre les pucerons mais l'entreprise n'a pas souhaité préciser sa nature.

4 Synthèse des résultats de l'évaluation des méthodes de lutte alternatives aux néonicotinoïdes contre les pucerons de la betterave

4.1 Etendue du champ d'investigation des produits ou méthodes étudiés pour les 8 familles de méthodes alternatives

4.1.1. Nombre de publications scientifiques consultées

Au total, 3878 références bibliographiques ont été consultées (Fig.8) pour étayer l'analyse de l'efficacité des 8 familles de méthodes alternatives pour la lutte contre les pucerons de la betterave. Parmi celles-ci, seulement 7 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. Exception faite de la méthode de lutte génétique où la recherche bibliographique n'a concerné que la betterave (car il s'agissait d'identifier des perspectives de résistance chez la plante cible), il a été nécessaire d'élargir la recherche bibliographique aux méthodes de lutte contre *Myzus persicae* et/ou *Aphis fabae* dans d'autres cultures ou d'autres contextes. *In fine*, les conclusions de ce rapport s'appuient donc sur 301 publications scientifiques (citées en annexe).

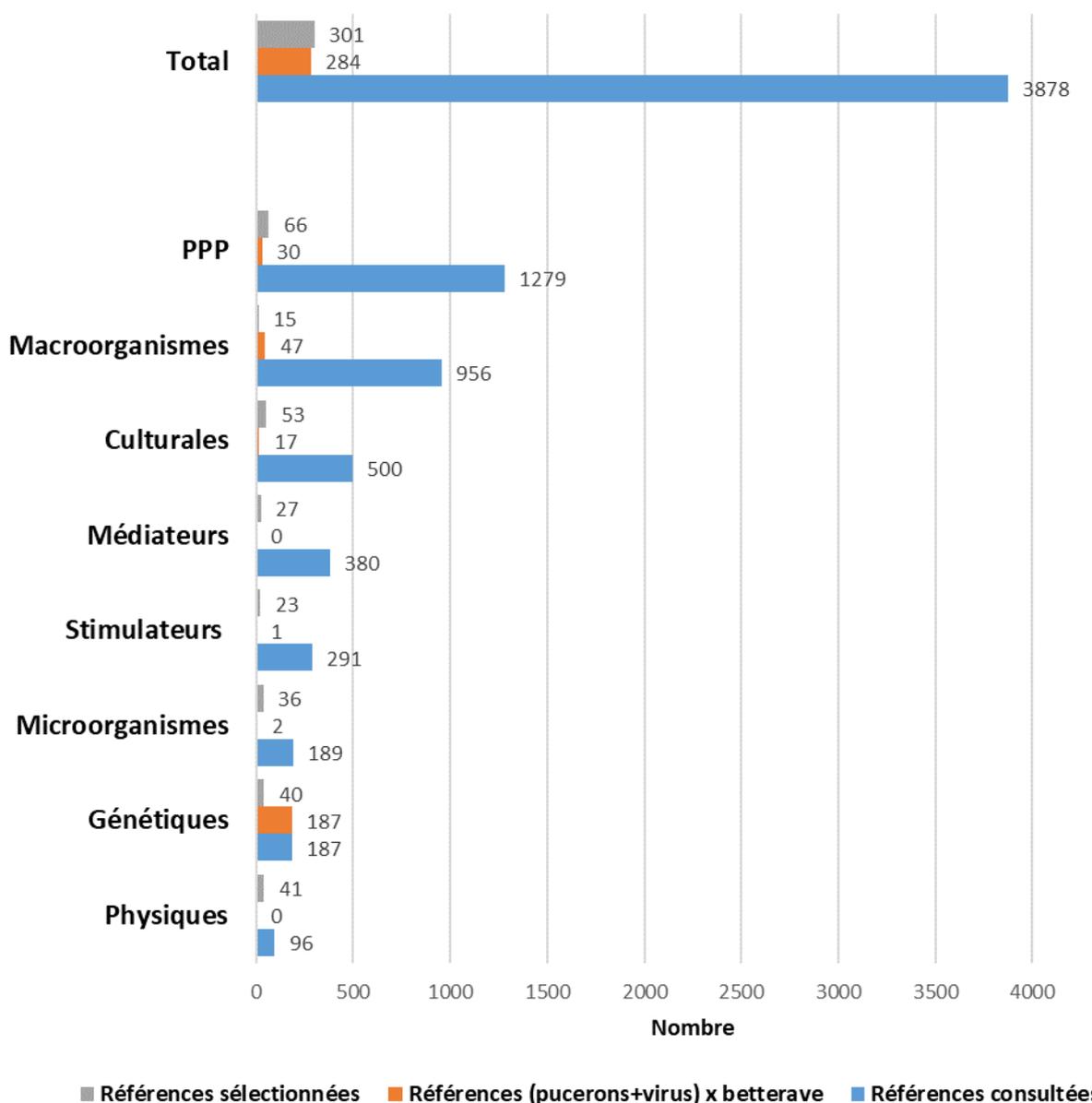
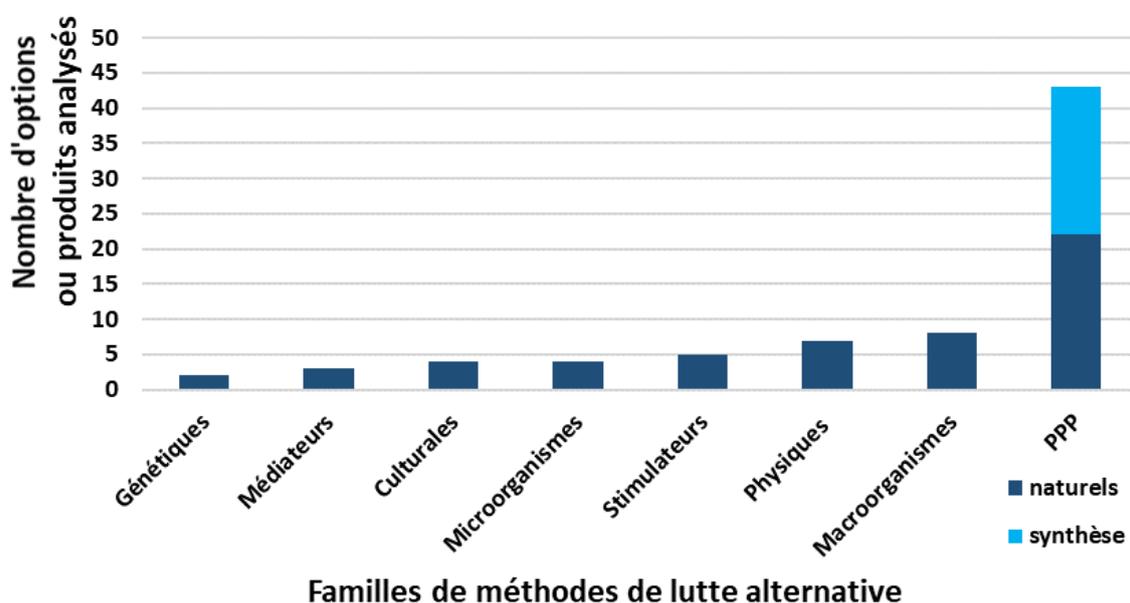


Figure 8 : Nombre résumé, le nombre de culture de betterave (en gris).

Pour préparer scientifique, les experts, pour un accompli par ce travail a auditi

4.1.2. Nombre d'options ou produits étudiés par famille de méthodes de lutte alternative



Nous avons en outre pris le parti de différencier *a posteriori* les SA des produits phytopharmaceutiques (PPP) de synthèse et les substances d'origine naturelle, c'est-à-dire extraits de plantes ou de microorganismes, comme dans l'étude ANSES précédente sur les alternatives aux néonicotinoïdes en France (ANSES 2018⁴). L'objectif est de distinguer celles pouvant à terme être utilisées en agriculture biologique ou moins susceptibles de nuire à la santé des hommes et de l'environnement.

Au total, **76 options ou produits** ont été étudiés comme alternatives possibles aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons vecteurs de la jaunisse de la betterave (ou leurs virus associés), avec une répartition hétérogène puisque les produits phytopharmaceutiques alternatifs en constituent la majeure partie (43, dont 21 de synthèse et 22 d'origine naturelle).

⁴ Saisine n°2016-SA-0057 : Tome 1 – Identification des alternatives aux usages autorisés des néonicotinoïdes

4.2 Analyse des notes moyennes de critères pour les différentes familles de méthodes de lutte alternative (Cf. Annexe 3 pour le détail des notes)

Le groupe de travail a souhaité analyser globalement, comme lors de la première expertise, les méthodes alternatives par famille de méthode de lutte évaluées selon les 4 critères de performance (efficacité, durabilité, opérationnalité, praticité), en calculant la moyenne des notes attribuées par méthode de lutte, pour chacun des critères. Ce tableau de synthèse (Cf. Tableau 6) reflète un résultat moyenné par famille de méthode mais ne préjuge pas de la possibilité que certaines méthodes de lutte particulières, parmi ces familles, même mal positionnées en moyenne, puissent représenter des alternatives substituables aux néonicotinoïdes (comme en attestent les gammes de variation des notes de critères).

Tableau 6 : Tableau des moyennes et des gammes de variation de ces moyennes ([min-max]) pour les 4 critères d'évaluation et les 9 familles de méthodes de lutte alternative. Le code couleur va de rouge pour les notes basses (entre 1 et 1,8), orange pour les notes moyennes (1,9 à 2,1) à vert pour les notes les plus élevées (2,2 à 3).

Alternatives	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
Médiateurs	1,0 [1]	3,0 [3]	1,0 [1]	1,0 [1]
Physiques	1,3 [1-2]	3,0 [3]	2,4 [2-3]	2,0 [1-3]
Stimulateurs	1,4 [1-2]	3,0 [3]	2,0 [2]	3,0 [3]
Génétiques	1,5 [1-2]	2,5 [2-3]	2,0 [2]	3,0 [3]
Microorganismes	1,5 [1-2]	3,0 [3]	1,8 [1-2]	2,0 [2]
PPP_naturels	1,9 [1-3]	2,9 [2-3]	1,2 [1-3]	2,2 [2-3]
Macroorganismes	1,9 [1-3]	3,0 [3]	1,3 [1-2]	1,4 [1-2]
Culturelles	2,0 [2]	3,0 [3]	2,5 [2-3]	1,8 [1-3]
PPP_synthèse	2,6 [2-3]	1,9 [1-3]	1,9 [1-3]	2,5 [2-3]

À l'échelle des familles de méthodes alternatives, les notes moyennes de critères permettent de distinguer 5 groupes :

- (1) Les **produits phytopharmaceutiques de synthèse** comme étant en moyenne les plus efficaces mais avec la note de durabilité la plus basse, soulignant le risque important d'évolution de résistance chez les espèces de pucerons concernées. Leur praticité est

bonne (pulvérisation) mais leur opérationnalité est modérée car leur autorisation de mise sur le marché nécessite la constitution d'un lourd dossier d'homologation. A noter qu'un certain nombre de produits listés ayant déjà des autorisations pour d'autres usages n'auraient besoin à court terme que d'une dérogation.

- (2) Les **méthodes culturales** présentent la deuxième meilleure efficacité moyenne, avec une durabilité maximale, une bonne opérationnalité moyenne (la plupart ayant déjà été testées sur d'autres cultures que la betterave) et une praticité faible à modérée du fait de la nécessité de modifier le système de culture et/ou les itinéraires techniques.
- (3) Les **produits phytosanitaires d'origine naturelle, les macroorganismes et les variétés résistantes aux virus (lutte génétique)** présentent un profil similaire aux méthodes culturales avec en moyenne des efficacités correctes, une très bonne durabilité mais une note moyenne d'opérationnalité faible car nécessitant de plus amples recherches ou des ajustements techniques pour leur application.
- (4) Les **microorganismes, les variétés améliorées pour la résistance aux pucerons, les stimulateurs de défenses des plantes, les méthodes physiques** ont des notes d'efficacité moyenne comparables entre eux et modérées, une bonne durabilité, une note moyenne d'opérationnalité assez bonne et une bonne praticité.
- (5) La lutte par l'utilisation de **médiateurs chimiques** se distingue par la plus faible moyenne d'efficacité, d'opérationnalité et de praticité.

4.3 Identification de méthodes alternatives substituables à court terme pour pallier le retrait des néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave.

Pour identifier des **méthodes alternatives** de lutte **substituables à l'usage des néonicotinoïdes**, nous nous sommes fondés sur les notes de critères d'efficacité, d'opérationnalité et de durabilité.

Nous avons retenu les méthodes alternatives dont la note d'efficacité était de 3 (très bonne efficacité en usage seul) ou 2 (bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires) et la note de durabilité de 3 (risque faible à nul d'apparition de résistance de la part des insectes ciblés) ou 2 (risque modéré d'apparition de résistance). Cette exigence de durabilité explique l'absence dans notre liste des associations de produits tau-fluvalinate & pirimicarbe et lambda-cyhalothrine & pirimicarbe qui disposent pourtant d'une AMM pour l'usage « pucerons de la betterave » mais dont l'application répétée a provoqué l'apparition de résistances notables chez ces pucerons (note de durabilité de 1).

Pour identifier les méthodes alternatives substituables qui peuvent être mises en œuvre à **court terme**, nous avons choisi un seuil de note d'opérationnalité de 3 (d'ores et déjà disponible en France, notamment appliquée sur d'autres cultures).

Tableau 7 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à court terme.

Famille de méthode alternative	Solution ou méthode	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
PPP_synthèse	flonicamide	3	2	3	3
PPP_synthèse	spirotétramate	2	3	3	3
Culturales	Paillage ou mulching	2	3	3	2
Culturales	Fertilisation organique	2	3	3	3

Un total de 4 méthodes ou substances actives apparaissent suffisamment efficaces, durables, opérationnelles et pratiques pour être rapidement substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave :

- Une substance active de la famille des pyridines-carboxamides, le **flonicamide**, entrant dans la composition d'un produit phytopharmaceutique de synthèse ;
- Une substance active de la famille des kétoénoles, relativement efficace, le **spirotétramate**, qui entre dans la composition d'un produit phytopharmaceutique qui a déjà été autorisé par dérogation sur culture de betterave sucrière ;
- Deux méthodes culturales n'impliquant pas de modification drastique du système de culture de la betterave à sucre car fondées sur la modification du mode de fertilisation ou protection des sols : le **paillage** d'une part, et la **fertilisation organique** à l'aide de vermicompost d'autre part.

4.4 Identification de méthodes alternatives substituables à moyen terme pour remplacer les néonicotinoïdes dans la lutte contre les pucerons de la betterave.

Pour identifier des **méthodes alternatives** de lutte **substituables aux néonicotinoïdes**, nous nous sommes fondés sur les notes de critères d'efficacité et de durabilité.

Nous avons retenu les méthodes alternatives dont la note d'efficacité était de 3 (très bonne efficacité en usage seul) ou 2 (bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires) et la note de durabilité de 3 (risque faible à nul d'apparition de résistance de la part des insectes ciblés) ou 2 (risque modéré d'apparition de résistance).

Pour identifier les méthodes alternatives substituables qui peuvent être mise en œuvre à **moyen terme**, nous avons retenu celles dont la note d'opérationnalité est de 2, c'est-à-dire disponibles ailleurs qu'en France mais nécessitant des études complémentaires ou une homologation pour leur application sur betterave sucrière en France.

Au total, **18 méthodes ou produits alternatifs substituables** aux néonicotinoïdes à **moyen terme** dans la lutte contre les pucerons de la betterave ont été identifiés :

- **4 substances actives** à pulvériser (indoxacarbe, abamectine, benzoate d'émamectine, cyantraniliprole)
- **3 substances d'origine naturelle** à pulvériser (spinosad, huile essentielle d'orange, huile de neem)

- **2 champignons entomopathogènes** à pulvériser sous forme de spores, *Beauveria bassiana* et *Lecanicillium muscarium* ;
- **2 macroorganismes** à lâcher en masse : le prédateur *Chrysoperla carnea* (en particulier sous forme d'œufs) et un parasitoïde Aphidiinae appartenant au genre *Aphidius* ;
- **2 types d'huiles**, organique et minérale, à pulvériser ;
- **2 stimulateurs de défenses des plantes** : l'huile de paraffine et l'Acibenzolar-S-Methyl ;
- **1 méthode génétique** fondée sur le développement de variétés de betteraves résistantes aux virus de la jaunisse ;
- **2 types de méthodes culturales** reposant sur des associations végétales favorisant les effets d'évitement de la plante hôte (betterave) ou le renforcement du contrôle biologique des pucerons par les ennemis naturels (auxiliaires de culture) présents localement.

Tableau 8 : Liste des méthodes et solutions comme alternatives substituables à moyen terme

Famille de méthode Alternative	Solution ou méthode	Efficacité	Durabilité	Opérationnalité	Praticité
PPP_synthèse	indoxacarbe	3	2	2	3
PPP_synthèse	abamectine	2	3	2	3
PPP_synthèse	benzoate d'émamectine	2	2	2	3
PPP_synthèse	cyantraniliprole	2	2	2	3
PPP_naturels	Huile essentielle d'orange	2	3	2	3
PPP_naturels	Huile de neem / azadirachtine	2	3	2	3
PPP_naturels	spinosad	2	2	2	2
Microorganismes	<i>Beauveria bassiana</i>	2	3	2	2
Microorganismes	<i>Lecanicillium muscarium</i>	2	3	2	2
Macroorganismes	<i>Aphidius sp.</i>	3	3	2	2
Macroorganismes	<i>Chrysoperla carnea</i>	2	3	2	2
Physiques	Huile minérale	2	3	2	3
Physiques	Huile organique	2	3	2	3
Stimulateurs	Acibenzolar-S-Methyl (ASM)	2	3	2	3
Stimulateurs	Huile de paraffine	2	3	2	3
Génétiques	Variétés résistantes aux virus de jaunisse	2	3	2	3
Culturales	Associations végétales à effet "bottom-up"	2	3	2	1
Culturales	Associations végétales à effet "top-down"	2	3	2	1

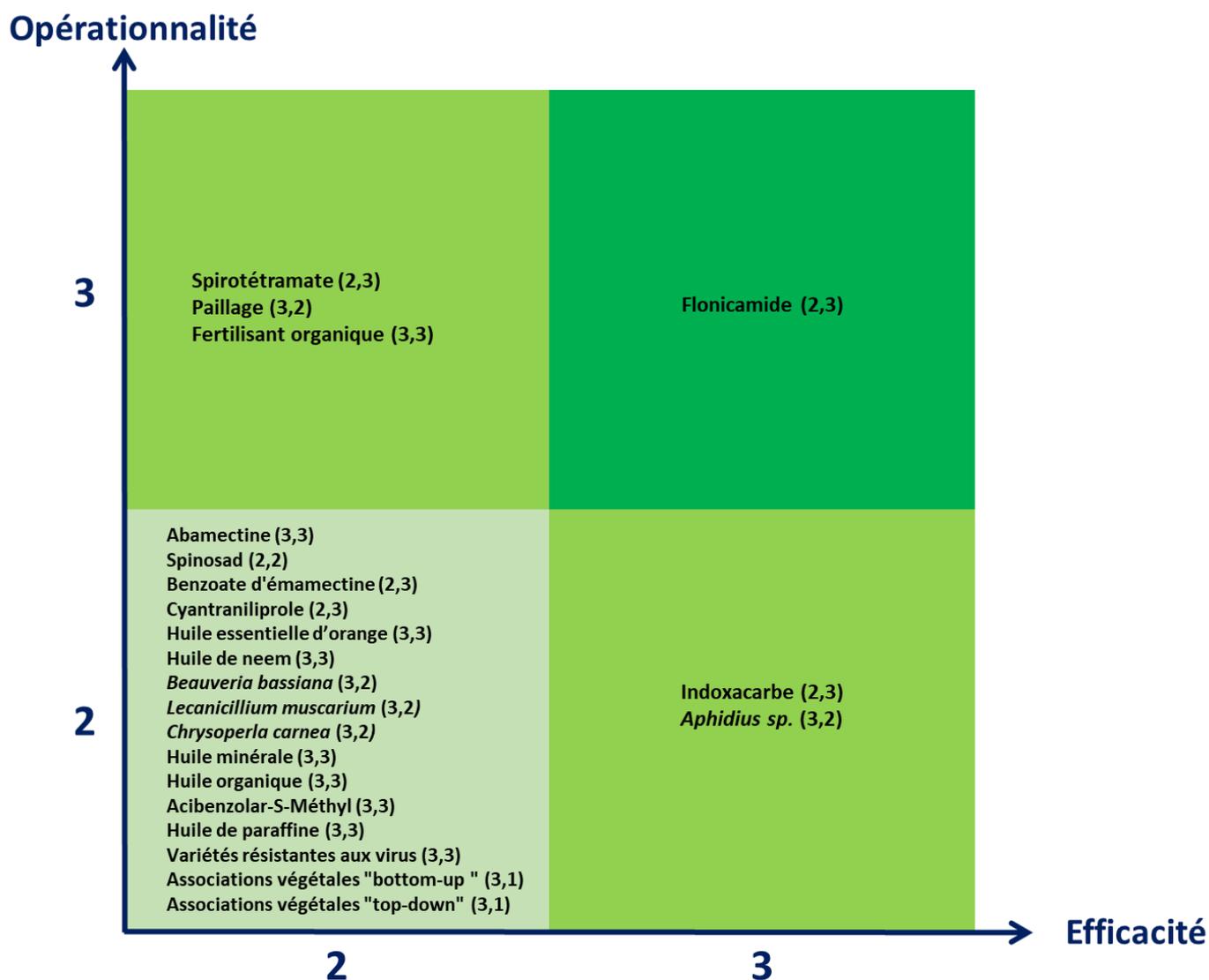


Figure 10 : Position des 22 méthodes ou produits alternatifs substituables aux néonicotinoïdes pour la lutte contre les pucerons de la betterave en fonction de leur efficacité (2 : bonne efficacité mais nécessitant l'application de méthodes complémentaires, 3 : très bonne efficacité en usage seul) et leur degré d'opérationnalité (2 : disponibles ailleurs qu'en France mais nécessitant des études complémentaires ou une homologation pour leur application sur betterave sucrière en France, donc substituables à moyen terme, 3 : d'ores et déjà disponible en France, notamment appliquée sur d'autres cultures, donc substituable à court terme).

Les chiffres entre parenthèses sont les notes de durabilité (en termes de risque d'apparition de résistance) et de praticité d'emploi.

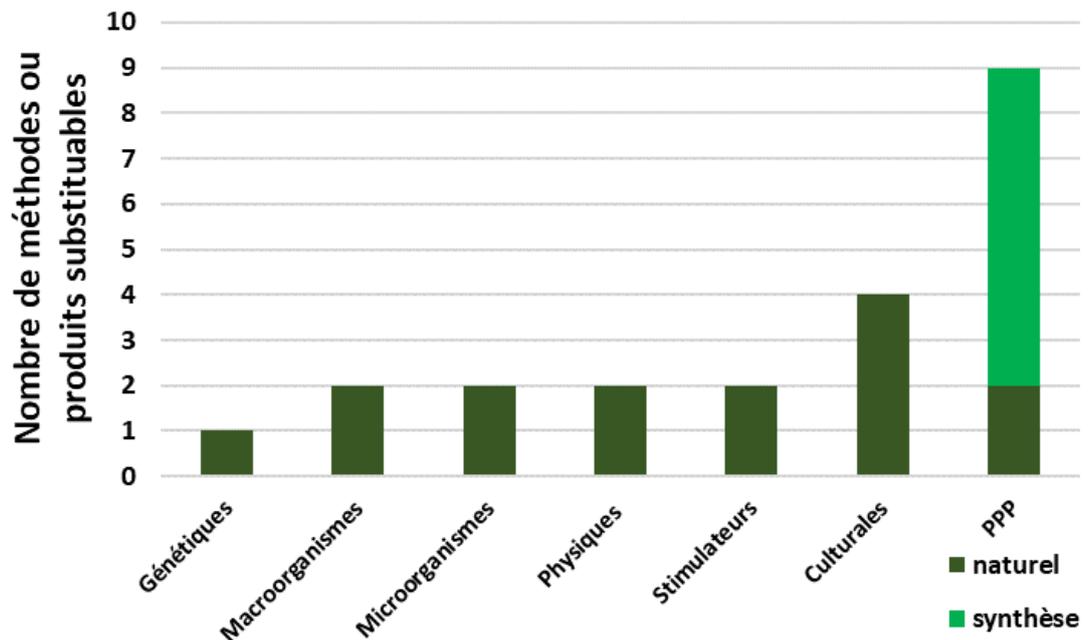


Figure 11
puceron.

alternatives substituables aux néonicotinoïdes identifiées).

5 Discussion : Bilan et Perspectives

L'analyse approfondie de la littérature scientifique par le groupe de travail a mis en évidence **d'importants manques de recherches sur la lutte contre les pucerons de la betterave**. Au total, moins de 10 % des publications sélectionnées sur les méthodes de lutte curative ou préventive contre les pucerons vecteurs de jaunisse *M. persicae* et *A. fabae*, ont été réalisées sur culture de betterave. Ces lacunes tiennent sans doute à la généralisation de l'usage des néonicotinoïdes à partir des années 1990, dont l'efficacité importante en termes de réduction des infestations de pucerons a engendré un désintérêt pour les autres alternatives de lutte. En raison de la toxicité des néonicotinoïdes pour les organismes non cibles et leur interdiction depuis 2018, bien que bénéficiant d'une dérogation temporaire pour le traitement des semences de betterave sucrière, il convient donc de renforcer les efforts entrepris pour développer des méthodes alternatives d'efficacité analogue et de moindre toxicité pour les organismes non cibles.

Ce rapport montre qu'il existe une large gamme d'options de substitution aux néonicotinoïdes parmi les 8 familles de méthodes de lutte analysées, identifiées sur la base d'une efficacité reconnue contre les deux principaux pucerons vecteurs des virus de la jaunisse de la betterave, ou contre les virus eux-mêmes. **Le principal défi demeure cependant celui de l'adaptation de ces méthodes au cas particulier du système de culture de la betterave sucrière dans ses bassins de production en France.**

En amont de l'application des méthodes de lutte alternative, tant l'examen de la littérature scientifique et technique que l'audition des professionnels de la filière ont conduit à identifier **un important besoin de recherche et développement sur les connaissances de base pour l'aide à la décision du traitement phytosanitaire**, en ce qui concerne l'épidémiologie des espèces de pucerons vecteurs (notamment en fonction des conditions climatiques), la caractérisation au champ de la diversité des virus vectorisés et de la charge virale, ou encore les relations entre les niveaux d'infestation, le risque de transmission et les dégâts au champ. Il apparaît en effet nécessaire, pour améliorer l'efficacité des traitements phytosanitaires sur les premières infestations au printemps et réduire les effets indésirables pour la santé de l'environnement et des personnes (notamment des opérateurs), de mettre au point des modèles prédictifs du risque de dégâts de jaunisse afin de limiter les applications dans l'espace et le temps.

Pour plusieurs des méthodes alternatives identifiées dans ce rapport, des défis en termes d'efficacité d'application ont été mis en évidence, afin notamment d'améliorer l'efficacité des pulvérisations par rapport aux insectes ciblés. En effet, les pucerons sont la plupart du temps localisés à la face inférieure des feuilles de betterave, ce qui complique une application directe. Pour l'ensemble des produits ayant une action par contact (hors produits systémiques ou à effet translaminaire), il conviendrait donc de **mobiliser les organismes de recherche en machinisme agricole afin d'améliorer les systèmes de pulvérisation.**

Les points clés sur les intérêts et limites des 8 familles de méthodes alternatives ainsi que les perspectives de recherche et développement sont détaillées dans la partie centrale

du rapport (présentant le résultat de l'analyse de la recherche bibliographique et des informations recueillies lors des auditions pour chaque famille de méthodes de lutte) mais rappelons ici les principaux messages, les solutions étant présentées selon leur degré d'efficacité et d'opérationnalité :

Les **produits phytopharmaceutiques de synthèse** se présentent comme l'alternative avec la meilleure efficacité au champ, certains sont d'ores et déjà autorisés (produit à base de flonicamide bénéficiant d'une AMM ou produit à base de spirotétramate ayant bénéficié d'une dérogation). Ils sont de plus facilement utilisables (par pulvérisation). Il convient cependant de rappeler le risque d'évolution de résistance chez les pucerons, qui impose un usage raisonné dans le temps et l'espace, et de souligner l'intérêt de la combinaison ou de l'alternance d'application de différentes substances actives ayant des modes et sites d'action différents. Il faudrait également évaluer les risques pour la santé humaine et pour l'environnement dans les conditions d'utilisation de ces substances actives en culture de betterave sucrière.

Des **produits phytopharmaceutiques d'origine naturelle** avec une réelle efficacité au champ ont été identifiés (ex. huile de neem, huile essentielle d'orange) et pourraient être rapidement mis à la disposition des agriculteurs. Ils présentent sans doute une moindre rémanence et peut-être un moindre risque pour l'environnement et la santé humaine que leurs homologues de synthèse mais ceci demande à être vérifié (par l'exemple l'huile de neem est considérée comme toxique pour les organismes aquatiques). Il est également nécessaire d'en préciser les conditions d'application sur betterave (formulation, dose, rémanence, etc.).

Les **méthodes culturales** apparaissent comme la troisième option la plus prometteuse, combinant une bonne efficacité, une bonne durabilité a priori et pouvant être déployées sans besoin d'AMM. À court terme, elles reposent sur des modifications de la protection des sols et de la fertilisation. À moyen terme, elles supposent la combinaison d'une culture de la betterave avec des plantes de services, réduisant l'accès à la plante hôte ou favorisant l'action des ennemis naturels (auxiliaires des cultures). Leur déploiement nécessite cependant une profonde modification du système de culture, à l'échelle de la parcelle ou du paysage. Des études techniques (avec des « expérimentations – systèmes » notamment) et socio-économiques doivent être entreprises pour permettre leur développement, ce qui nécessitera sans doute plusieurs années.

Des **microorganismes** (champignons ou bactéries entomopathogènes) et des **macroorganismes** (prédateurs et parasitoïdes) ayant une bonne efficacité contre les pucerons ont également été identifiés. Des produits à base de *Lecanicillium muscarium* déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. Les principaux freins à leur application se situent au niveau de la production de masse (en termes techniques et économiques) et de leur application au champ (mode de distribution et dose efficace). Il convient également d'en vérifier la toxicité pour l'environnement et la santé humaine.

Le déploiement de **variétés de betterave sucrière améliorées pour la résistance aux virus** de la jaunisse (plus qu'aux pucerons vecteurs) semble une option très prometteuse, car de nombreux gènes de résistance ont récemment été identifiés. Cette méthode aurait de plus l'avantage de l'efficacité et de la facilité de mise en œuvre pour les agriculteurs, sans impact négatif sur l'environnement. Des obstacles doivent cependant être

rapidement levés pour permettre l'introduction de ces gènes de résistance dans des variétés commerciales, notamment en changeant de stratégie de croisements pour bénéficier des ressources génétiques (germoplasme-source) étendues aux espèces sauvages ou variétés anciennes plus riches en gènes de résistance.

L'emploi **d'huiles minérales** (notamment l'huile de paraffine) et **organiques** (ex. huiles végétales) serait aussi à considérer sérieusement car leur emploi est aisé et leur efficacité, combinant différents effets (décapant, dessiccation, asphyxie, parfois élicitation de défenses des plantes), est avérée. Des produits à base d'huiles sont déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages et pourraient être rapidement mobilisables. Ici encore resterait à déterminer les conditions d'application au champ (mode de pulvérisation et dose efficace).

Des études récentes ont identifié des **stimulateurs de défenses des plantes** qui apparaissent efficaces dans les essais en cours, aussi bien contre les pucerons que contre les virus. Des produits à base d'une de ces substances actives (acibenzolar-S-méthyl ou ASM) bénéficient déjà d'une AMM pour d'autres usages et devraient donc être étudiés en priorité en vue de l'extension de leur usage à la culture de betterave.

En revanche, il ne semble pas que les médiateurs chimiques (attractifs ou répulsifs) soient assez efficaces au champ contre les pucerons pour justifier de plus amples études.

Enfin, la plupart des solutions alternatives considérées comme substituables aux néonicotinoïdes ont des efficacités correctes mais la plupart du temps probablement insuffisantes en utilisation seule pour réduire les niveaux de dégâts sous le seuil d'acceptabilité économique. **Il sera donc indispensable de tester des combinaisons de plusieurs de ces méthodes de lutte dans une approche de lutte intégrée permettant d'atteindre une efficacité suffisante et durable.**

6 Conclusions du groupe de travail

Après avoir analysé les connaissances scientifiques disponibles sur les méthodes de lutte contre les pucerons de la betterave et leurs virus, le groupe de travail est en mesure d'actualiser les conclusions du précédent rapport de l'ANSES (Risques et bénéfices relatifs des alternatives aux produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes, 2018) en identifiant **des solutions alternatives substituables aux néonicotinoïdes, dans le cadre de la lutte contre la jaunisse de la betterave, transmise par les espèces de pucerons *Aphis fabae* et *Myzus persicae*.**

Dans son rapport de 2018, l'ANSES avait proposé l'usage de produits phytopharmaceutiques de synthèse jugés efficaces et immédiatement disponibles. L'association de la lambda-cyhalothrine et du pirimicarbe avait été proposée, tout en soulignant le risque d'apparition de résistance. Cette résistance a par la suite été effectivement observée sur le terrain.

Aujourd'hui encore, le groupe de travail propose **en solution de remplacement à court terme : deux produits phytopharmaceutiques de synthèse, le flonicamide et le spirotétramate. Cependant, les experts émettent à nouveau le même message de précaution sur la durabilité des produits phytopharmaceutiques**, tant les risques d'apparition de populations résistantes sont grands à court terme dans le cas d'applications répétées à grande échelle.

Une différence importante avec les résultats du rapport précédent sur l'usage « betterave » réside cependant dans l'identification de **20 solutions alternatives supplémentaires, de nature variée car appartenant à 7 familles de méthodes** de lutte différentes, offrant donc de nombreuses possibilités de développement pour la culture de la betterave. Cinq de ces méthodes de lutte ne font pas appel à des produits de synthèse (lutte culturale, lutte biologique à l'aide de micro ou macroorganismes, extraits de plantes, sélection variétale).

Cette émergence d'options nouvelles est sans conteste le fruit d'une activité scientifique qu'il convient de soutenir à long terme. En particulier le groupe de travail **suggère 3 axes de recherche et développement :**

1. En amont de l'application des méthodes de lutte elles-mêmes, il est très important d'améliorer **l'épidémiosurveillance** des populations de pucerons et des virus associées dans les cultures de betterave, de développer des **modèles prédictifs** de leur pullulation pour mieux cibler les lieux et dates d'intervention et de développer des **agroéquipements** permettant d'optimiser la qualité d'application des produits (notamment pour atteindre la face inférieure des feuilles).
2. Les 22 méthodes de lutte alternatives identifiées dans ce rapport offrent les meilleures perspectives d'efficacité et de disponibilité pour les agriculteurs dans les prochaines années. L'effort de recherche et développement devrait être surtout concentré sur **la sélection génétique pour la résistance de la betterave aux virus de la jaunisse et sur l'adaptation ou le transfert des autres solutions identifiées sur d'autres**

cultures, au cas de la betterave sucrière (à l'exception du produit contenant le flonicamide comme substance active qui dispose déjà d'une AMM pour un usage sur betterave). Un travail particulier, pour les alternatives se traduisant par l'application d'un produit, devra être fait sur les doses, les fréquences et la répartition spatiale des applications au champ, selon les principes de l'agriculture de précision.

3. Au-delà de l'étude au cas par cas, compte tenu de l'efficacité relative de chaque méthode mais aussi de leur complémentarité, il apparaît judicieux de réfléchir dès maintenant à leur **combinaison dans une approche de lutte intégrée, en les intégrant dans l'itinéraire technique** de la culture de betteraves et **dans la mosaïque paysagère**.

Il n'a pas été possible, dans le temps imparti au groupe de travail, **d'analyser les enjeux socio-économiques** associés aux solutions alternatives à l'usage des néonicotinoïdes sur betterave, ni à leurs **conséquences pour la santé des hommes et de l'environnement**. Nous recommandons cependant que ces différents aspects soient traités dans le cadre de nouveaux travaux d'expertise.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 10 mai 2021

Date de validation du rapport d'expertise collective par le Comité d'experts spécialisé Risques biologiques pour la santé des végétaux : 18 mai 2021

7 Bibliographie

7.1 Publications

Cf. Annexe 2

7.2 Normes

AFNOR. 2003. NF X 50-110 *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. AFNOR (indice de classement X 50-110).

7.3 Législation et réglementation

Directive 2000/29/CE du Conseil Européen du 8 mai 2000 concernant les mesures de protection contre l'introduction dans la Communauté d'organismes nuisibles aux végétaux ou aux produits végétaux et contre leur propagation à l'intérieur de la Communauté. Journal Officiel des Communautés européennes.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

A 6 D G D P R O S 9 3 2020-SA-0102



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**

*Élevé
Égalité
Futurité*

**Direction générale de
l'alimentation**

COURRIER ARRIVÉ

- 6 JUIL. 2020

DIRECTION GÉNÉRALE

Monsieur le Directeur général
Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 MAISONS ALFORT CEDEX

Bruno Ferreira
Directeur général de l'alimentation
Réf : BIB/2020- 102

Paris, le 25 juin 2020

Objet : Saisine relative aux risques et à l'efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave.

Les pucerons, notamment *Aphis fabae* et *Myzus persicae*, sont très nuisibles pour les cultures de betteraves du fait de leur capacité à transmettre les phytovirus responsables de la jaunisse virale. Jusqu'en 2018, la protection phytosanitaire était assurée par le traitement systématique des semences avec une substance de la famille des néonicotinoïdes, dont l'effet systémique permettait d'assurer une protection efficace jusqu'à la fin de la période à risques, sans qu'il soit besoin de procéder ultérieurement à un traitement des parties aériennes de la plante.

Cependant, l'interdiction des néonicotinoïdes au 1^{er} septembre 2018 instaurée par la Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a mis fin à cette possibilité.

Dans son évaluation du 7 mai 2018 « mettant en balance les risques et les bénéfices relatifs à d'autres produits phytopharmaceutiques autorisés ou des méthodes non chimiques de prévention ou de lutte pour les usages autorisés en France des produits phytopharmaceutiques comportant des néonicotinoïdes » réalisée conformément à l'article L. 253-8 du Code rural et de la pêche maritime, l'Anses a recensé les alternatives disponibles au début de l'année 2018 et a calculé des indicateurs de risques et d'efficacité.

Selon ce bilan, les alternatives phytopharmaceutiques aux néonicotinoïdes pour le traitement des pucerons de la betterave reposaient exclusivement sur le traitement foliaire avec une substance de la famille des pyréthrinoïdes, associée le cas échéant au pirimicarbe (carbamate). En ce qui concerne les autres méthodes de lutte, elles reposaient sur les micro-organismes (champignons entomopathogènes), les médiateurs chimiques (phéromones répulsives d'origine végétale), la génétique avec le recours à des variétés résistantes aux virus BWYV, les méthodes culturales (bande fleuries, réduction de la profondeur et de la fréquence des labours, paillage naturel, cultures intercalaires etc.) et la stimulation de la défense des plantes (apports d'azote et de soufre, biostimulants etc.). Aucune méthode physique n'a été recensée.

Pour chacune de ces méthodes, l'Anses a évalué 4 critères liés à l'efficacité (magnitude de l'efficacité, durabilité de l'efficacité, opérationnalité de la méthode de lutte et praticité de la mise en œuvre) en les affectant d'une note allant de 0 à 3,

En ce qui concerne les risques liés aux traitements phytopharmaceutiques, l'Anses a calculé 8 indicateurs de risque pour chaque substance autorisée, se décomposant en 2 indicateurs de risque pour la santé humaine (exposition alimentaire et exposition non alimentaire) et 6 indicateurs de risque pour l'environnement (organismes du sol, organismes aquatiques, abeilles, oiseaux, mammifères, eaux souterraines).

Sur cette base, aucune dérogation interministérielle n'a été octroyée pour le traitement des pucerons de la betterave.

En 2020, la forte pression parasitaire a rendu nécessaire l'octroi d'une dérogation au titre de l'article 53 du règlement 1107/2009 pour autoriser 3 applications d'un produit à base de spirotetramat. Cette dérogation permet au besoin de compléter les traitements déjà autorisés, notamment le recours à un produit à base de flonicamide, rendu possible dès le stade 2 feuilles par décision de l'Anses du 29 avril dernier.

Afin d'anticiper au mieux les difficultés qui pourraient être de nouveau rencontrées l'année prochaine et accélérer les travaux de recherche et développement dans les directions les plus prometteuses, je vous remercie de bien vouloir actualiser le bilan comparatif effectué en 2018 sur la base des options actuellement disponibles tant au niveau national qu'europpéen.

Vous ferez la synthèse des recherches en cours et des données scientifiques et techniques disponibles dans les différents domaines, et vous ferez part de vos recommandations sur les besoins et perspectives à court et moyen termes.

Je vous saurais gré de bien vouloir rendre votre avis pour le 31 octobre 2020.

Le Directeur général de l'alimentation



Bruno FERREIRA

Direction générale de l'alimentation
251 rue de Vaugrard
75 732 PARIS CEDEX 15
Tél : +33 1 49 55 58 11
Mél : bruno.ferreira@agriculture.gouv.fr

Annexe 2 : Fiches de lecture

- Fiche de lecture sur les produits phytopharmaceutiques à propriétés insecticides -

Référence :

REF	PICO 01
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte à l'aide de produits phytopharmaceutiques (PPP) pour lutter contre les pucerons <i>Myzus persicae</i> et <i>Aphis fabae</i> (ou les virus responsables de la jaunisse) sur betterave?</p>	

Equation de Mots-clés :

(*Myzus persicae* OR *Aphis fabae*) AND (pesticide OR insecticide) AND (Sugar beet)

15 Documents récupérés de WoS

30 Documents récupérés de Scopus

(*Myzus persicae* OR *Aphis fabae*) AND (pesticide OR insecticide)

1279 Documents récupérés de Web of Science

890 Documents récupérés de Scopus

66 documents retenus pour analyse

1. Abe, M, Imai, T, Ishii, N, Usui, M, Okuda, T, Oki, T (2007). Isolation of an insecticidal compound oxalicine B from *Penicillium* sp. TAMA 71 and confirmation of its chemical structure by X-ray crystallographic analysis. *J. Pestic. Sci.*, 32(2), 124-127.
2. Abe, M., Imai, T., Ishii, N., Usui, M., Okuda, T., Oki, T. (2005). Quinolactacide, a new quinolone insecticide from *Penicillium citrinum* Thom F 1539. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 69, 1202–1205.
3. ACTA (2021) Index phytosanitaire ACTA- 2021, Editions ARVALIS, 1060pp.
4. Ahmad, M., Akhtar, S., 2013. Development of insecticide resistance in field populations of *Brevicoryne brassicae* (Hemiptera: Aphididae) in Pakistan. *J. Econ. Entomol.* 106, 954-958.
5. Al-Antary, Tawfiq M, Mazen A Ateyyat, Idres H Belghasem, Salaheddin A Alaraj, et al. (2018). Aphicidal activity of orange oil to the green peach aphid *Myzus persicae* Sulzer (Homoptera: Aphididae). *Fresenius Environmental Bulletin* 27:1038-1042.
6. Anjum, F., Wright, D. (2016). Relative toxicity of insecticides to the crucifer pests *Plutella xylostella* and *Myzus persicae* and their natural enemies. *Crop Protect.* 88:131-136.
7. Arnaudov V, Petkova R (2020) Spirotetramat (Movento®): new systemic insecticide for control of green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer)(Hemiptera: Aphidae) on peach. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 26:431-434.
8. Barry JD, Portillo HE, Annan IB, Cameron RA, Clagg DG, Dietrich RF, Watson JW, Leighty RM, Ryan DL, McMillan JA, Swain RS, Kaczmarczyk RA (2014) Movement of cyantraniliprole in plants after foliar applications and its impact on the control of sucking and chewing insects. *Pest Manag Sci* 71:395–403.
9. Bass, C, Puinean, AM, Zimmer, CT, et al. (2014). The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology* 51: 41-51.
10. Castillo, L., Díaz, M., González-Coloma, A., Rossini, C. (2013). Differential activity against aphid settling of flavones obtained from *Clytostoma callistegioides*(Bignoniaceae). *Ind. Crops Prod.* 44, 618–621.
11. Chaieb I, Zarrad K, Sellam R, Tayeb W, Hammouda AB, Laarif A, Bouhachem S (2018) Chemical composition and aphicidal potential of *Citrus aurantium* peel essential oils. *Entomol Gen* 37:63–75.
12. Chiasson H, Vincent C, Bostanian NJ (2004) Insecticidal properties of a *Chenopodium*-based botanical. *J Econ Entomol* 97(4):1378–1383.
13. Cloyd RA, Galle CL, Keith SR, Kalscheur NA, Kemp KE (2009) Effect of commercially available plant-derived essential oil products on arthropod pests. *J Econ Entomol* 102:1567–1579
14. Conrad N, Brandes M, Will T, Verreet JA, Ulber B and Heimbach U, (2018) Effects of insecticidal seed treatments and foliar sprays in winter oilseed rape in autumn on insect pests and TuYV infection. *J Plant Dis Prot* 125: 557– 565.
15. Creemer, L. C.; Giampietro, N. C.; Lambert, W.; Yap, M. C.; deBoer, G. J.; Adelfinskaya, Y.; Castetter, S.; Wessels, F. J. (2017). Pro-insecticidal approach towards increasing in planta activity. *Pest Manage. Sci.* 73:752– 760

16. Cui L, Wang Q, Qi H, Wang Q, Yuan H, et al. (2018) Resistance selection of indoxacarb in *Helicoverpa armigera* (Hübner)(Lepidoptera: Noctuidae): cross-resistance, biochemical mechanisms and associated fitness costs. *Pest management science* 74: 2636–2644.
17. Curkovic, T., J. Araya, C. Canales, Medina, A (2006). Evaluation of two agriculture detergents as control alternatives for green peach aphid and twospotted spidermite, two pests affecting peach orchards in Chile. *Acta Horticulturae*, 713:405-408.
18. Dancewicz, K., Kordan, B., Szumny, A. & Gabrys, B. (2012): Aphid behaviour-modifying activity of essential oils from Lamiaceae and Apiaceae. – *Aphids and other hemipterous insects* 18: 93-100.
19. De Little SC and Umina PA, (2017) Susceptibility of Australian *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) to three recently registered insecticides: spirotetramat, cyantraniliprole, and sulfoxaflor. *J Econ Entomol* 110: 1764-1769.
20. Dively, GP, Patton, T, Barranco, L. et al. (2020). Comparative Efficacy of Common Active Ingredients in Organic Insecticides Against Difficult to Control Insect Pests. *Insects* 11:614.
21. Edelson, J., Duthie, J., & Roberts, W. (2002). Toxicity of biorational insecticides: activity against the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer). *Pest Management Science*, 58, 255–260.
22. Feng R, Isman M (1995) Selection for resistance to azadirachtin in the green peach aphid, *Mysus persicae*. *Experientia* 51:831–833.
23. Fitzgerald, J (2004) Laboratory bioassays and field evaluation of insecticides for the control of *Anthonomus rubi*, *Lygus rugulipennis* and *Chaetosiphon fragaefolii*, and effects on beneficial species, in UK strawberry production. *Crop Protection* 23:801-809
24. Foster SP, Denholm I, Rison JL, Portillo HE, Margaritopoulos J, Slater R (2012) Susceptibility of standard clones and European field populations of the green peach aphid, *Myzus persicae*, and the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), to the novel anthranilic diamide insecticide cyantraniliprole. *Pest Manag Sci* 68:629-633.
25. Fournier, V., et J. Brodeur. (2000). Dose-Response Susceptibility of Pest Aphids (Homoptera: Aphididae) and Their Control on Hydroponically Grown Lettuce with the Entomopathogenic Fungus *Verticillium Lecanii*, Azadirachtin, and Insecticidal Soap. *Environmental Entomology* 29:568-578.
26. Galisteo Pretel, A.; Pérez Del Pulgar, H.; Olmeda, A.S.; Gonzalez-Coloma, A.; Barrero, A.F.; Quílez Del Moral, J.F. (2019). Novel Insect Antifeedant and Ixodical Nootkatone Derivatives. *Biomolecules* 9:742.
27. George, A., Rao, C.N., Rahangadale, S., (2019). Current status of insecticide resistance in *Aphis gossypii* and *Aphis spiraecola* (Hemiptera: Aphididae) under central Indian conditions in citrus. *Cogent Biol* 5 (1), 1660494.
28. Gesraha M. A. & Amany R. Ebeid (2021) Impact of indoxacarb and sulphur formulation on aphid and three specific predators in Okra fields. *Bulletin of the National Research Centre*, 45:10.
29. Guadaño A, Gutiérrez C, de la Peña E, Cortes D, González-Coloma A (2000) Insecticidal and mutagenic evaluation of two annonaceous acetogenins. *J Nat Prod* 63:773–776
30. Guo MF, Cai ZB, Zhang ZC, Zhu MH (2015) Characterization and lubrication performance of diesel soot nanoparticles as oil lubricant additives. *RSC Adv* 5:101965–101974
31. Handore, K.L.; Kalmode, H.P.; Sayyad, S.; Seetharamsingh, B.; Gathalkar, G.; Padole, S.; Pawar, P.V.; Joseph, M.; Sen, A.; Reddy, D.S. (2019). Insect-repellent and mosquitocidal effects of noreremophilane- and nardoaristolone-based compounds. *ACS Omega* 4:2188-2195.
32. Hauer, M., Hansen, A.L., Manderyck, B., Olsson, Å., Raaijmakers, E., Hanse, B. et al. (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
33. Holtz, AM, Marchiori, JJD, Franzin, ML, de Paulo, HH, Botti, JMC, Coffler, T (2016). *Myzus persicae* management potential using *Jatropha curcas* oil stored in different packages. *Revista Agrogeoambiental* 8: 41-50.
34. Huang MZ, Huang DL, Liu AP, Liu XP, Chen XY, Liu WD, Pei H, Sun J, Yin DL, Wang XQ (2017) Design, synthesis and biological evaluation of 1H-pyrazole-5-carboxamide derivatives as potential fungicidal and insecticidal agents. *Chem Pap* 71:2053–2061.
35. Isman, M. B. (2020). Botanical insecticides in the twenty-first century - Fulfilling their promise? *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249
36. Jansen, J. P., T. Defrance, et A. M. Warnier. (2011). Side Effects of Flonicamide and Pymetrozine on Five Aphid Natural Enemy Species. *BioControl* 56:759-770.
37. Karchesy JJ, Kelsey RG, González-Hernández MP (2018) Yellow-cedar, *Callitropsis* (*Chamaecyparis*) *nootkatensis*, secondary metabolites, biological activities, and chemical ecology. *J Chem Ecol* 44:510–524.
38. Kaushik, N, Diaz, CE, Chhipa, H, Julio, LF, Andres, MF, Gonzalez-Coloma, A (2020) Chemical Composition of an Aphid Antifeedant Extract from an Endophytic Fungus, *Trichoderma* sp. EFI671. *Microorganisms* 8(3): 420.
39. Khan, RA; Naveed, M (2020) Incidence of green peach aphid, *Myzus persicae* on Brassica crop and its chemical control in the field. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 26:585-589
40. Kim, SK; Kim, YC; Lee, S; Kim, JC; Yun, MY; Kim, IS (2011). Insecticidal Activity of Rhamnolipid Isolated from *Pseudomonas* sp EP-3 against Green Peach Aphid (*Myzus persicae*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:934-938.
41. Lim DJ, Yang, SY, Noh, MY, Lee, CW, Kim, JC, Kim, IS (2017) Identification of lipopeptide xantholysins from *Pseudomonas* sp. DJ15 and their insecticidal activity against *Myzus persicae*. *Entomol Res* 47:337–343.

42. Lu, X.; Weng, H.; Li, C.; He, J.; Zhang, X.; Ma, Z. (2020). Efficacy of essential oil from *Mosla chinensis* Maxim. cv. Jiangxiangru and its three main components against insect pests. *Ind. Crop. Prod.* 147:112237.
43. Ma T, Yan H, Shi X, Liu B, Ma Z, Zhang X (2018) Comprehensive evaluation of effective constituents in total alkaloids from *Sophora alopecuroides* L. and their joint action against aphids by laboratory toxicity and field efficacy. *Ind Crop Prod* 111:149–157
44. Mmojieje, J., Homung, A., (2015). The potential application of pyroligneous acid in the UK agricultural industry. *J. Crop Improve.* 29, 228–246.
45. Neal JW Jr, Buta JG, Pittarelli GW, Lusby WR, Benz JA, 1994. Novel sucrose esters from *Nicotiana glauca*: effective biorationals against selected horticultural insect pests. *J. Econ. Entomol.* 87, 1600– 1607.
46. Nisbet, A.J., J.A.T. Woodford, et R.H.C. Strang. (1996). The Effects of Azadirachtin on the Acquisition and Inoculation of Potato Leafroll Virus by *Myzus persicae*. *Crop Protection* 15 :9 14.
47. Padda, M. S., Picha, D. H. (2008). Quantification of phenolic acids and antioxidant activity in sweetpotato genotypes. *Scientia Horticulturae*, 119(1):17-20.
48. Panella, N.A., Dolan, M.C., Karchesy, J.J., Xiong, Y., Peralta-Cruz, J., Khasawneh, M., Maupin, G.O., (2005). Use of novel compounds for pest control: insecticidal and acaricidal activity of essential oil components from heartwood of Alaska yellow cedar. *J. Med. Entomol. Suppl.* 42, 352–358.
49. Peng, T., Pan, Y., Yang, C., Gao, X., Xi, J., Wu, Y., Huang, X., Zhu, E., Xin, X., Zhan, C., & Shang, Q. (2016). Over-expression of CYP6A2 is associated with spirotetramat resistance and cross-resistance in the resistant strain of *Aphis gossypii* glover. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 126, 64–69.
50. Petrakis, E. A., Kimbaris, A. C., Perdakis, D. C., Lykouressis, D. P., Tarantilis, P. A., & Polissiou, M. G. (2014). Responses of *Myzus persicae* (Sulzer) to three Lamiaceae essential oils obtained by microwave-assisted and conventional hydrodistillation. *Industrial Crops and Products*, 62, 272–279.
51. Poessel, JL, Collet MH, Noel Y, Rahbe E. (2009) Method for preparing dicaffeoylquinic acids and use thereof in combating aphids. Brevet WO 2009/095624. A2. 2009
52. Roy, L, Fontaine, S, Caddoux, L, Micoud, A, Simon, JC. (2013). Dramatic Changes in the Genotypic Frequencies of Target Insecticide Resistance in French Populations of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) Over the Last Decade. *J Econ Entomol* 106:1838-1847
53. Ruiz-Jiménez AL, González-Coloma A, Andrés-Yeves MF, Ruiz-Sánchez E, Heredia G, Peraza-Sánchez SR, Medina-Baizabal IL, Reys-Estebanez M, Canto-Canché B, Gamboa-Angulo M (2017). Insect deterrent and nematocidal screening of microfungi from Mexico and anti-aphid compounds from *Gliomastix masseei*. *Rev Argent Microbiol* 49:83–92.
54. Ruiz-Jimenez, AL, Ruiz-Sanchez, E, Heredia, G, Tapia-Tussell, R, Gonzalez-Coloma, A et al. (2019). Identification of Insect-Deterrent Metabolites from *Acremonium Masseei* Strain CICY026, a Saprophytic Fungus from a Sinkhole in Yucatán. *Microorganisms* 7(12):712.
55. Salari, E., Ahmadi, K., Dehyaghobi, R.Z., et al., 2012. Toxic and repellent effect of harnal (*Peganum harmala* L.) acetone extract on several aphids and *Tribolium castaneum* (Herbst). *Chil. J. Agric. Res.* 72, 147–151.
56. Samara, Rana, Thomas D Lowery, Lorne W Stobbs, Patricia M Vickers, et Lori A Bittner. (2021) Assessment of the effects of novel insecticides on green peach aphid (*Myzus persicae*) feeding and transmission of Turnip mosaic virus (TuMV). *Pest Management Science* 77:1482-1491.
57. Smith GH, Roberts JM, Pope TW (2018) Terpene based biopesticides as potential alternatives to synthetic insecticides for control of aphid pests on protected ornamentals. *Crop Protection* 110:125–130
58. Teixeira et al. (2014). Essential Oils from *Lippia organoides* Kunth. and *Mentha spicata* L.: Chemical Composition, Insecticidal and Antioxidant Activities. *American Journal of Plant Sciences* 5:1181-1190
59. Tillman, P. G., & Mulrooney, J. E. (2000). Effect of selected insecticides on the natural enemies *Colleomegilla maculata* and *Hippodamia convergens* (Coleoptera: Coccinellidae), *Geocoris punctipes* (Hemiptera: Lygaeidae), and *Bracon mellitor*, *Cardiochiles nigriceps*, and *Cotesia marginiventris* (Hymenoptera: Braconidae) in cotton. *Journal of Economic Entomology*, 93, 1638–1643
60. Tomova, BS; Waterhouse, JS; Doberski, J. (2005) The effect of fractionated Tagetes oil volatiles on aphid reproduction. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 115:153-159.
61. Turek C, Stintzing FC (2013) Stability of essential oils: a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 12(1):40–53.
62. Venzon M, Rosado MC, Fialho A, Pereira CJ (2007) Lethal and sublethal toxicity of neem on green peach aphid and on its predator *Eriopis connexa*. *Pesq Agropec Bras* 42:627–631.
63. Williams, I.S., Haylock, L.A., Dewar, A.M. & Dixon, A.F.G. (1998) Selection for a moderately insecticide resistant clone of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) on sugar beet in the absence of pesticides. *Bulletin of Entomological Research*, 88, 653-658.
64. Yankova, V, Markova, D, Todorova, V, Velichkov, G. (2009) Biological Activity of Certain Oils in Control of Green Peach Aphid (*Myzus persicae* Sulz.) on Pepper. *Acta Horticulturae* 830:619-625.
65. Yu M, Sun C, XueY, et al. (2019) Tannic acid-based nanopesticides coating with highly improved foliage adhesion to enhance foliar retention. *RSC Advances* 9:27096-27104
66. Zuo, Y.Y., Wang, K., Zhang, M., Peng, X., Piñero, J.C. and Chen, M.H. (2016) Regional susceptibilities of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) to ten insecticides. *Florida Entomologist*, 99, 269– 275.

- Fiche de lecture sur les microorganismes -

Référence :

REF	PICO 02
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte à l'aide de microorganismes pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> (ou les virus responsables de la jaunisse) sur betterave ?</p>	

Equation de Mots-clés :

Première approche : recherche combinée moyen de lutte ET ennemis de la culture ET culture hôte
TITLE-ABS-KEY ("entomopathogenic" AND ("Aphis fabae" OR "Myzus persicae") AND ("Beta vulgaris" OR "sugar beet")) :

Scopus : 0 document

Web of Science : 0 document

Deuxième approche : recherche combinée entre la plante hôte et des microorganismes entomopathogènes communs

TITLE-ABS-KEY (("sugar beet" OR "beta vulgaris") AND ("Lecanicillium lecanii" OR "Verticillium lecanii" OR "Paecilomyces fumosoroseus" OR "Bacillus thuringiensis" OR "Entomophthora" OR "Beauveria")) :

Scopus : 79 documents

Web of Science : 34 documents

Troisième approche : la précédente approche ayant donnée très peu de résultats pertinents, une nouvelle recherche sur les espèces d'insectes vecteurs cibles combiné avec le caractère entomopathogène des microorganismes

TITLE-ABS-KEY ("entomopathogenic") AND ("Aphis" OR "Myzus")) :

Scopus : 189 documents

Web of Science : 177 documents

36 documents retenus pour analyse

1. Ajuna, Henry B., Iksoo Kim, Yeon Soo Han, Chaw Ei Htwe Maung, and Kil Yong Kim. "Aphicidal Activity of *Bacillus thuringiensis* Strain AH-2 against Cotton Aphid (*Aphis gossypii*).
Entomological Research, November 3, 2020, 1748-5967.12481. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12481>.
2. Akello, J., & Sikora, R. (2012). Systemic acropetal influence of endophyte seed treatment on *Acyrtosiphon pisum* and *Aphis fabae* offspring development and reproductive fitness. *Biological Control*, 61(3), 215-221. doi:10.1016/j.biocontrol.2012.02.007.
3. Ali Bugti, Ghulam, Cao Na, Wang Bin, and Lin Hua Feng. "Pathogenicity of *Isaria Fumosorosea* Strain Ifu 13a Against Different Aphid Species." *Journal of the Kansas Entomological Society* 90, no. 4 (October 2017): 365–72. <https://doi.org/10.2317/JKESD1700034.1>.
4. Allegrucci, Natalia, María Silvana Velazquez, María Leticia Russo, María Florencia Vianna, Camila Abarca, and Ana Clara Scorsetti. "Establishment of the Entomopathogenic Fungus *Beauveria Bassiana* as an Endophyte in *Capsicum Annuum* and Its Effects on the Aphid Pest *Myzus Persicae* (Homoptera: Aphididae)."

- Revista de Biología Tropical* 68, no. 4 (August 20, 2020). <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i4.41218>.
5. Bayındır Erol, Alime, Ouidad Abdelaziz, Ali Kemal Birgücü, Mohamed Morad Senoussi, Ammar Oufroukh, and İsmail Karaca. "Effects of Some Entomopathogenic Fungi on the Aphid Species, *Aphis Gossypii* Glover (Hemiptera: Aphididae)." *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 30, no. 1 (December 2020): 108. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00311-3>.
 6. Boni, Simon Boniface, Robert Abraham Mwashimaha, Nickson Mlowe, Paola Sotelo-Cardona, and Thibault Nordey. "Efficacy of Indigenous Entomopathogenic Fungi against the Black Aphid, *Aphis Fabae* Scopoli under Controlled Conditions in Tanzania." *International Journal of Tropical Insect Science*, November 14, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42690-020-00365-8>.
 7. Diaz, Beatriz M., Monike Oggerin, Claudia C. López Lastra, Victor Rubio, and Alberto Fereres. "Characterization and Virulence of *Lecanicillium Lecanii* against Different Aphid Species." *BioControl* 54, no. 6 (December 2009): 825–35. <https://doi.org/10.1007/s10526-009-9218-9>.
 8. Fernández-Grandon, G. Mandela, Steven J. Harte, Jasper Ewany, Daniel Bray, and Philip C. Stevenson. "Additive Effect of Botanical Insecticide and Entomopathogenic Fungi on Pest Mortality and the Behavioral Response of Its Natural Enemy." *Plants* 9, no. 2 (February 1, 2020): 173. <https://doi.org/10.3390/plants9020173>.
 9. Fournier, V., and J. Brodeur. "Dose-Response Susceptibility of Pest Aphids (Homoptera: Aphididae) and Their Control on Hydroponically Grown Lettuce with the Entomopathogenic Fungus *Verticillium Lecanii*, Azadirachtin, and Insecticidal Soap." *Environmental Entomology* 29, no. 3 (June 1, 2000): 568–78. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-29.3.568>.
 10. Gindin, Galina, I. Barash, Nurit Harari, and B. Raccach. "Effect of Endotoxic Compounds Isolated From *Verticillium Lecanii* on the Sweetpotato Whitefly, *Bemisia Tabaci*." *Phytoparasitica* 22, no. 3 (September 1994): 189–96. <https://doi.org/10.1007/BF02980318>.
 11. Hassan, S. A., R. Albert, F. Bigler, P. Blaisinger, H. Bogenschütz, E. Boller, J. Brun, et al. "Results of the Third Joint Pesticide Testing Programme by the IOBC/WPRS-Working Group 'Pesticides and Beneficial Organisms.'" *Journal of Applied Entomology* 103, no. 1–5 (January 12, 1987): 92–107. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1987.tb00963.x>.
 12. Hesketh, Helen, Peter G. Alderson, Barry J. Pye, and Judith K. Pell. "The Development and Multiple Uses of a Standardised Bioassay Method to Select Hypocrealean Fungi for Biological Control of Aphids." *Biological Control* 46, no. 2 (August 2008): 242–55. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.03.006>.
 13. Iqbal, Erum Yawar, Ashfaque Ahmed Nahiyoon, Shahnaz Dawar, and Shahina Fayyaz. "Bioremediation of Cotton Aphid (*Aphis Gossypii* Glov.) (Hemiptera: Aphididae) by the Application of Different Fractions of Entomopathogenic Bacteria (*Xenorhabdus* Spp.)." *Pakistan Journal of Zoology* 52, no. 3 (2020). <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/20190828110853>.
 14. Jandricic, S.E., M. Filotas, J.P. Sanderson, and S.P. Wraight. "Pathogenicity of Conidia-Based Preparations of Entomopathogenic Fungi against the Greenhouse Pest Aphids *Myzus Persicae*, *Aphis Gossypii*, and *Aulacorthum Solani* (Hemiptera: Aphididae)." *Journal of Invertebrate Pathology* 118 (May 2014): 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2014.02.003>.
 15. Jensen, Rasmus Emil, Annie Enkegaard, and Tove Steenberg. "Increased Fecundity of *Aphis Fabae* on *Vicia Faba* Plants Following Seed or Leaf Inoculation with the Entomopathogenic Fungus *Beauveria Bassiana*." Edited by Peter Schausberger. *PLOS ONE* 14, no. 10 (October 7, 2019): e0223616. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223616>.
 16. Lee, Won Woo, Tae Young Shin, Sung Min Bae, and Soo Dong Woo. "Screening and Evaluation of Entomopathogenic Fungi against the Green Peach Aphid, *Myzus Persicae*, Using Multiple Tools." *Journal of Asia-Pacific Entomology* 18, no. 3 (September 2015): 607–15. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2015.07.012>.
 17. Michereff Filho, M., S. O. D. Oliveira, R. S. de Liz, and M. Faria. "Cage and Field Assessments of *Beauveria Bassiana*-Based Mycoinsecticides for *Myzus Persicae* Sulzer (Hemiptera: Aphididae) Control in Cabbage." *Neotropical Entomology* 40, no. 4 (2011): 470–76.
 18. Mohammed, Akram A. "Lecanicillium Muscarium and *Adalia Bipunctata* Combination for the Control of Black Bean Aphid, *Aphis Fabae*." *BioControl* 63, no. 2 (April 2018): 277–87. <https://doi.org/10.1007/s10526-018-9868-6>.
 19. Mohammed, A. A., & Hatcher, P. E. (2017). Combining entomopathogenic fungi and parasitoids to control the green peach aphid *Myzus persicae*. *Biological Control*, 110, 44-55. doi:10.1016/j.biocontrol.2017.03.012.
 20. Mohammed, Akram A., and Paul E. Hatcher. "Effect of Temperature, Relative Humidity and Aphid Developmental Stage on the Efficacy of the Mycoinsecticide Mycotal® against *Myzus Persicae*." *Biocontrol Science and Technology* 26, no. 10 (October 2, 2016): 1379–1400. <https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1207219>.
 21. Mohammed, Akram A., Jamal H. Kadhim, and Zahid N. A. Kamaluddin. "Selection of Highly Virulent Entomopathogenic Fungal Isolates to Control the Greenhouse Aphid Species in Iraq." *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 28, no. 1 (December 2018): 71. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0079-3>.
 22. Nazir, Talha, Abdul Basit, Abdul Hanan, Muhammad Majeed, and Dewen Qiu. "In Vitro Pathogenicity of Some Entomopathogenic Fungal Strains against Green Peach Aphid *Myzus Persicae* (Homoptera: Aphididae)." *Agronomy* 9, no. 1 (December 25, 2018): 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010007>.
 23. Prince, Gill, and Dave Chandler. "Susceptibility of *Myzus Persicae*, *Brevicoryne Brassicae* and *Nasonovia Ribisnigri* to Fungal Biopesticides in Laboratory and Field Experiments." *Insects* 11, no. 1 (January 17, 2020): 55. <https://doi.org/10.3390/insects11010055>.

24. Rashki, M., A. Kharazi-pakdel, H. Allahyari, and J.J.M. van Alphen. "Interactions among the Entomopathogenic Fungus, *Beauveria Bassiana* (Ascomycota: Hypocreales), the Parasitoid, *Aphidius Matricariae* (Hymenoptera: Braconidae), and Its Host, *Myzus Persicae* (Homoptera: Aphididae)." *Biological Control* 50, no. 3 (September 2009): 324–28. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.04.016>.
25. Reddy, S. G. Eswara, and Shalini Sahotra. "Multiplication of Entomopathogenic Fungus (*Lecanicillium Lecanii*) on Apple Pomace and Its Toxicity against Aphid (*Aphis Craccivora*)." *Toxin Reviews* 39, no. 3 (July 2, 2020): 252–57. <https://doi.org/10.1080/15569543.2018.1504222>.
26. Ruano-Rossil, J. M., E. B. Radcliffe, and D. W. Ragsdale. "Disruption of Entomopathogenic Fungi of Green Peach Aphid, *Myzus Persicae* (Sulzer), by Fungicides Used to Control Potato Late Blight." In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Aphids*. Rennes, France: Institut National de la Recherche Agronomique, 2021.
27. Sabry, K. H., M. A. Abdel-Raheem, and M. M. El-Fatih. "Efficacy of the Entomopathogenic Fungi; *Beauveria Bassiana* and *Metarhizium Anisopliae* on Some Insect Pests under Laboratory Conditions." *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 21, no. 1 (2011): 33.
28. Saruhan, I. "Efficacy of Some Entomopathogenic Fungi against *Aphis Fabae* Scopoli (Hemiptera: Aphididae)." *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 28, no. 1 (December 2018): 89. <https://doi.org/10.1186/s41938-018-0096-2>.
29. Saruhan, I., I. Erper, C. Tuncer, H. Uçak, C. Öksel, and I. Akça. "Evaluation of Some Commercial Products of Entomopathogenic Fungi as Biocontrol Agents for *Aphis Fabae* Scopoli (Hemiptera: Aphididae)." *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 24, no. 1 (2014): 225–28.
30. Scorsetti, Ana C., Richard A. Humber, Juan J. García, and Claudia C. López Lastra. "Natural Occurrence of Entomopathogenic Fungi (Zygomycetes: Entomophthorales) of Aphid (Hemiptera: Aphididae) Pests of Horticultural Crops in Argentina." *BioControl* 52, no. 5 (August 21, 2007): 641–55. <https://doi.org/10.1007/s10526-006-9045-1>.
31. Shah, P.A., S.J. Clark, and J.K. Pell. "Assessment of Aphid Host Range and Isolate Variability in *Pandora Neophidius* (Zygomycetes: Entomophthorales)." *Biological Control* 29, no. 1 (January 2004): 90–99. [https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(03\)00130-0](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(03)00130-0).
32. Shan, Le-Tian, and Ming-Guang Feng. "Evaluation of the Biocontrol Potential of Various *Metarhizium* Isolates against Green Peach Aphid *Myzus Persicae* (Homoptera: Aphididae): *Metarhizium* Potential in Aphid Control." *Pest Management Science* 66, no. 6 (June 2010): 669–75. <https://doi.org/10.1002/ps.1928>.
33. Uziel, A., and R. G. Kenneth. "Survival of Primary Conidia and Capilliconidia at Different Humidities in *Erynia* (Subgen. *Zoophthora*) Spp. and in *Neozygites Fresenii* (Zygomycotina: Entomophthorales), with Special Emphasis on *Erynia Radicans*." *Journal of Invertebrate Pathology* 58, no. 1 (1991): 118–26.
34. Vu, Van Hanh, Suk Il Hong, and Keun Kim. "Selection of Entomopathogenic Fungi for Aphid Control." *Journal of Bioscience and Bioengineering* 104, no. 6 (December 2007): 498–505. <https://doi.org/10.1263/jbb.104.498>.
35. Yeo, Helen, Judith K Pell, Peter G Alderson, Suzanne J Clark, and Barry J Pye. "Laboratory Evaluation of Temperature Effects on the Germination and Growth of Entomopathogenic Fungi and on Their Pathogenicity to Two Aphid Species." *Pest Management Science* 59, no. 2 (February 2003): 156–65. <https://doi.org/10.1002/ps.622>.
36. Zaki, F. N., and M. A. Abdel-Raheem. "Use of Entomopathogenic Fungi and Insecticide against Some Insect Pests Attacking Peanuts and Sugarbeet in Egypt." *Archives Of Phytopathology And Plant Protection* 43, no. 18 (December 2010): 1819–28. <https://doi.org/10.1080/03235400902830838>.

- Fiche de lecture sur les Macroorganismes -**Référence :**

REF	PICO 03
Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité des méthodes de lutte utilisant des « macroorganismes » pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> (ou les virus responsables de la jaunisse) sur betterave ?	

Equation de Mots-clés :

Sugar beet AND aphid AND (beneficial organism OR ladybug OR chrysopa OR coccinella OR predator OR mass rearing OR aphidius OR parasitoid)

956 références consultées

47 Documents récupérés de WoS

28 Documents récupérés de Scopus

15 Documents retenus pour analyse

1. Albittar L, Ismail M, Bragard C, Hance T (2016) Host plants and aphid hosts influence the selection behaviour of three aphid parasitoids (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae). *Eur J Entomol* 113:516–522.
2. Albittar, L., Ismail, M., Lohaus, G., Ameline, A., Visser, B., Bragard, C., Hance, T., 2019. Bottom-up regulation of a tritrophic system by Beet yellows virus infection: consequences for aphid-parasitoid foraging behaviour and development. *Oecologia* 191, 113–125
3. Dunning et al. (1975). Carabids in sugar beet crops and their possible role as aphid predators *Annals of Applied Biology*, 80,125-128.
4. Hassan S. A., Klingauf F., Shahin F., 1985. Role of *Chrysoperla carnea* as an aphid predator on sugar beet and the effect of pesticides. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie-Journal of Applied Entomology*, 100 (2), 163-174.
5. Kromp B., 1999. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 74 (1-3), 187-228.
6. Landis D. A., Van der Werf W., 1997. Early-season predation impacts the establishment of aphids and spread of beet yellows virus in sugar beet. *Entomophaga*, 42 (4), 499-516.
7. Meyhöfer R (2001) Intraguild predation by aphidophagous predators on parasitised aphids: the use of multiple video cameras. *Entomol Exp Appl* 100:77–87
8. Meyhofer R., Hindayana D., 2000. Effects of intraguild predation on aphid parasitoid survival. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 97 (1), 115-122.
9. Moiroux J, Chesnais Q, Spicher F et al (2018) Plant virus infection influences bottom-up regulation of a plant-aphid-parasitoid system. *J Pest Sci* 91:361–372.
10. Schröder et al. (1999) Population density of *Theridion impressum* L. Koch (Araneae, Theridiidae) in sugar beet fields in Germany, and its possible effects on numbers of *Myzus persicae* (Sulzer) (Hom., Aphididae). *Journal of Applied Entomology*, 123, 407-411.
11. Sengonca, C., Griesbach M., Lochte C., 1995. Suitable predator-prey ratios for the use of *Chrysoperla Carnea* (Stephens) eggs against aphids on sugar beet under laboratory and fields conditions. *Zeitschrift Für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Journal of Plant Diseases and Protection*, 102 (2), 113-120.
12. Vander Werf W., 1995. How do immigration rates affect predator/prey interactions in field crops?. Predictions from simple models and an example involving the spread of aphid-borne viruses in sugar beet. *Acta Jutlandica*, 9 (2), 295-312.
13. Wei J. N, Li T. F, Kuang R.P et al. (2003). Mass rearing of *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera : Aphidiidae) for biological control of *Myzus persicae* (Homoptera : Aphididae). *Biocontrol Science and Technology*, 13, 87-97.
14. Wenninger et al. (2020) Effects of Strip Tillage in Sugar Beet on Density and Richness of Predatory Arthropods. *Environmental Entomology*, 49, 33-48.
15. Yang S., Yang S. Y., Zhang C. P. (2009). Population dynamics of *Myzus persicae* on tobacco in Yunnan Province, China, before and after augmentative releases of *Aphidius gifuensis*. *Biocontrol Science and Technology* 19 :219-228.

- Fiche de lecture sur les médiateurs chimiques -**Référence :**

REF	PICO 04
Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte à l'aide de médiateurs chimiques (phéromone et autres composés organiques volatils) pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> ou les virus responsables de la jaunisse sur betterave ?	

Équation de Mots-clés :

La recherche a été étendue au-delà de la seule betterave, car d'une part très peu de travaux se sont intéressés à la lutte à l'aide de médiateurs chimiques contre les pucerons dans cette culture et d'autre part l'application d'une méthode de lutte à l'aide de médiateurs chimiques contre les mêmes pucerons mais sur une autre culture pourrait éventuellement être transposée à la betterave.

Aussi, compte tenu de la proximité de composition chimique entre les phéromones des différentes espèces de pucerons, la recherche ne s'est pas limitée aux deux espèces *Aphis fabae* et *Myzus persicae*. Les résultats obtenus sur les autres espèces de pucerons pourraient en effet être sources de nouvelles stratégies d'action.

Equation retenue :

((aphis OR myzus) AND (semiochemical* OR pheromone* OR volatil* OR allomone* OR kairomone*))

380 Documents récupérés de Scopus

27 Documents retenus pour analyse :

1. Alikhan, M.A. 1960 - The experimental study of the chemotactic basis of host-specificity in phytophagous insect, *Aphis fabae* Scop (Aphididae:Homoptera). Ann. Univ. Marie Curie-Sklodowska Sect.C 15:117-159.
2. Beale, M.H., M.A. Birkett, T.J.A. Bruce, K. Chamberlain, L.M. Field, A.K. Huttly, J.L. Martin, R. Parker, A.L. Phillips, J.A. Pickett, I.M. Prosser, P.R. Shewry, L.E. Smart, L.J. Wadhams, C.M. Woodcock and Y.H. Zhang. 2006. Aphid alarm pheromone produced by transgenic plants affects aphid and parasitoid behavior. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 103: 10509–10513.
3. Boullis and Verheggen (2016). The chemical ecology of Aphids. Elsevier.
4. Bruce et al. (2016) The first crop plant genetically engineered to release an insect pheromone for defence Scientific Reports 5:11183
5. Bruce, T.J.A., M.A. Birkett, J. Blande, A.M. Hooper, J.L. Martin, B. Khambay, I. Prosser, L.E. Smart and L.J. Wadhams. 2005. Response of economically important aphids to components of *Hemizygia petiolata* essential oil. Pest Manag. Sci. 61: 1115–1121
6. Calabrese, E.J. and A.J. Sorensen. 1978. Dispersal and recolonization by *Myzus persicae* following aphid alarm pheromone exposure. Ann. Entomol. Soc. Am. 71: 181–182
7. Campbell, C.A.M., F.J. Cook, J.A. Pickett, T.W. Popoe, L.J. Wadhams and C.M. Woodcock. 2003. Responses of the aphids *Phorodon humuli* and *Rhopalosiphum padi* to sex pheromone stereochemistry in the field. J. Chem. Ecol. 29: 2225–2234
8. Chucho, J., Thiéry, D. (2014) – Biology and ecology of the flavescence dorée vector *Scaphoideus titanus*, a review. Agronomy for sustainable development, 34: 381-403 DOI: 10.1007/s13593-014-0208-7.
9. Fahey, J.W., A.T. Zalcmann and P. Talalay. 2001. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. Phytochemistry 56: 5–51.
10. Gabrys, B.J., H.J. Gadomski, Z. Klukowski, J.A. Pickett, G.T. Sobota, L.J. Wadhams and C.M. Woodcock. 1997. Sex pheromone of cabbage aphid *Brevicoryne brassicae*: identification and field trapping of male aphids and parasitoids. J. Chem. Ecol. 23: 1881–1890.
11. Hardie, J., M. Holyoak, J. Nicholas, S.F. Nottingham, J.A. Pickett, L.J. Wadhams and C.M. Woodcock. 1990.

- Aphid sex pheromone components: Age dependent release by females and species-specific male response. *Chemoeology* 1: 63–68
12. Hardie, J., J.R. Storer, S.F. Nottingham, L. Peace, R. Harrington, L.A. Merritt, L.J. Wadhams and D.K. Wood. 1994. The interaction of sex pheromone and plant volatiles for field attraction of male bird-cherry aphid, *Rhopalosiphum padi*. *Brighton Crop Prot. Conf.—Pests and Diseases* 3: 1223–1230
 13. Hardie, J., L. Peace, J.A. Pickett, D.W.M. Smiley, J.R. Storer and L.J. Wadhams. 1997. Sex pheromone stereochemistry and purity affect field catches of male aphids. *J. Chem. Ecol.* 23: 2547–2554.
 14. Heuskin, S., B. Godin, P. Leroy, Q. Capella, J.P. Wathelet, F.J. Verheggen, E. Haubruge and G. Lognay. 2009. Fast gas chromatography characterisation of purified semiochemicals from essential oils of *Matricaria chamomilla* L. (Asteraceae) and *Nepeta Cataria* L. (Lamiaceae). *J. Chromatogr. A* 1216: 2768–2775.
 15. Heuskin, S., F.J. Verheggen, E. Haubruge, J.P. Wathelet and G. Lognay. 2011. The use of semiochemical slow-release devices in integrated pest management strategies. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 15: 459–470.
 16. Kunert, G., C. Reinhold and J. Gershenzon. 2010. Constitutive emission of the aphid alarm pheromone, (E)-beta-farnesene, from plants does not serve as a direct defense against aphids. *BMC Ecol.* 10: 23. doi: 10.1186/1472-6785-10-23
 17. Moran, N.A. 1992. The evolution of aphid life cycles. *Ann. Rev. Entomol.* 37: 321–348
 18. Nottingham, S.F., Hardie, J., Dawson, G.W.? Alastair, J.H., Pickett, J.H., Wadhams, L.J., Woodcock, C. 1991. Behavioral and electrophysiological responses of aphids to host and nonhost plant volatiles. *Journal chemical ecology*, 17 (6), 1231-1242
 19. Pettersson, J., A. Quiroz, D. Stephansson and H.M. Niemeyer. 1995. Odor communication of *Rhopalosiphum padi* on grasses. *Entomol. Exp. Appl.* 76: 325–328.
 20. Vandermoten, S., M.C. Mescher, F. Francis, E. Haubruge and F.J. Verheggen. 2012. Aphid alarm pheromone: an overview of current knowledge on biosynthesis and functions. *Insect Biochem. Mol.* 42: 155–163
 21. Verheggen, F.J., E. Haubruge, C.M. De Moraes and M.C. Mescher. 2013. Aphid responses to volatile cues from turnip plants (*Brassica rapa*) infested with phloem-feeding and chewing herbivores. *Arthropod-Plant Interactions.* 7: 567–577.
 22. Visser, J.H., Piron, P.G.M., 1995 - Olfactory antennal responses to plant volatiles in apterous virginoparae of the vetch aphid *Megoura viciae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 77, n° 1
 23. Visser, J.H., Piron, P.G.M. 1996 – Aphid olfaction : unpublished electroantennogram studies from 1993-1996
 24. Way, M. 1973. Population structure in aphid colonies. pp. 76–84. In: A.D. Lowe (ed.). *Perspectives in Aphid Biology*. Entomological Society of New Zealand, Auckland.
 25. Webster, B. 2012. The role of olfaction in aphid host location. *Physiol. Entomol.* 37: 10–18.
 26. Webster, B., T.J.A. Bruce, S. Dufour, C. Birkemeyer, M. Birkett, J. Hardie and J.A. Pickett. 2008. Identification of volatile compounds used in host location by the black bean aphid, *Aphis fabae*. *J. Chem. Ecol.* 34: 1153–1161.
 27. Xiangyu, J.G., F. Zhang, Y.L. Fang, W. Kan, G.X. Zhang and Z.N. Zhang. 2002. Behavioral response of aphids to the alarm pheromone component (E)-b-farnesene in the field. *Physiol. Entomol.* 27: 307–311.

- Fiche de lecture sur les méthodes physiques –

Référence :

REF	PICO 5
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité d'une méthode de lutte physique pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> ou les virus responsables de la jaunisse sur betterave ?</p>	

Équation de Mots-clés :

La première équation suivante a été appliquée afin de couvrir à la fois les pucerons ciblés, la culture de la betterave et les méthodes de lutte physique :

(Aphid* OR Aphis fabae OR Myzus persicae) AND (sugar beet OR Beta vulgaris) AND (uprooting OR pruning OR mineral oil* OR organic oil* OR thermal OR electrical trap* OR light trap* OR barrier* OR trench* OR Maltodextrin OR Kaolin OR clay)

Elle n'a donné aucun résultat

Pour élargir la recherche, la plante hôte (betterave) n'a plus été considérée. Les termes « Sugar beet » ont donc été retirés. La deuxième équation devenant :

(Aphid* OR Aphis fabae OR Myzus persicae) AND (uprooting OR pruning OR mineral oil* OR organic oil* OR thermal OR electrical trap* OR light trap* OR barrier* OR trench* OR Maltodextrin OR Kaolin OR clay)

Un seul document récupéré de Scopus :

Cambra, M., & Vidal, E. (2017). Sharka, a vector-borne disease caused by plum pox virus: Vector species, transmission mechanism, epidemiology and mitigation strategies to reduce its natural spreaddoi:10.17660/ActaHortic.2017.1163.10

Ce document n'a pas été repris pour analyse car il ne démontre pas l'efficacité de méthodes physiques contre les pucerons.

Pour élargir la recherche, la troisième équation suivante a été utilisée :

Aphi* AND (uprooting OR pruning OR mineral oil* OR organic oil* OR thermal OR trap* OR barrier* OR trench* OR Maltodextrin OR Kaolin OR clay)

96 documents ont été identifiés desquels 41 publications ont été retenues pour analyse :

1. Al-Daoud, F., Fageria, M. S., Zhang, J., Boquel, S., & Pelletier, Y. (2014). Mineral oil inhibits movement of potato virus Y in potato plants in an age-dependent manner. *American Journal of Potato Research*, 91(4), 337-345. doi:10.1007/s12230-013-9353-9
2. Alins, G., Alegre, S., & Avilla, J. (2017). Alternative to azadirachtin to control dysaphis plantaginea passerini

- (hemiptera: Aphidae) in organic apple production. *Biological Agriculture and Horticulture*, 33(4), 235-246
3. Ameline, A., Couty, A., Martoub, M., Source, S., & Giordanengo, P. (2010). Modification of macrosiphum euphorbiae colonisation behaviour and reproduction on potato plants treated by mineral oil. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, 135(1), 77-84. doi:10.1111/j.1570-7458.2010.00969.x
 4. Asjes, C. J. (1991). Control of air-borne field spread of tulip breaking virus, lily symptomless virus and lily virus X in lilies by mineral oils, synthetic pyrethroids, and a nematocidal in the netherlands. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 97(3), 129-138. doi:10.1007/BF01995961
 5. Asjes, C. J., & Blom-Barnhoorn, G. J. (2002). Control of aphid vector spread of lily symptomless virus and lily mottle virus by mineral oil/insecticide sprays in liliun doi:10.17660/ActaHortic.2002.570.35
 6. Asjes, C. J., & Blom-Barnhoorn, G. J. (2001). Control of aphid-vectored and thrips-borne virus spread in lily, tulip, iris and dahlia by sprays of mineral oil, polydimethylsiloxane and pyrethroid insecticide in the field. *Annals of Applied Biology*, 139(1), 11-19. doi:10.1111/j.1744-7348.2001.tb00125.x
 7. Barker, J. E., Holaschke, M., Fulton, A., Evans, K. A., & Powell, G. (2007). Effects of kaolin particle film on myzus persicae (Hemiptera: Aphididae) behaviour and performance. *Bulletin of Entomological Research*, 97(5), 455-460
 8. Boiteau, G., Singh, M., & Lavoie, J. (2009). Crop border and mineral oil sprays used in combination as physical control methods of the aphid-transmitted potato virus Y in potato. *Pest Management Science*, 65(3), 255-259. doi:10.1002/ps.1679
 9. Boquel, S., Giguère, M. -, Clark, C., Nanayakkara, U., Zhang, J., & Pelletier, Y. (2013). Effect of mineral oil on potato virus Y acquisition by rhopalosiphum padi. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, 148(1), 48-55. doi:10.1111/eea.12070
 10. Boquel, S., Giguère, M. -, & Pelletier, Y. (2016). Effect of mineral oils on host plant selection and probing behavior of rhopalosiphum padi. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, 160(3), 241-250. doi:10.1111/eea.12478
 11. Budnik, K., Laing, M. D., & Da Graça, J. V. (1996). Reduction of yield losses in pepper crops caused by potato virus Y in KwaZulu-natal, south africa, using plastic mulch and yellow sticky traps. *Phytoparasitica*, 24(2), 119-124. doi:10.1007/BF02981406
 12. Dupuis, B., Cadby, J., Goy, G., Tallant, M., Derron, J., Schwaerzel, R., & Steinger, T. (2017). Control of potato virus Y (PVY) in seed potatoes by oil spraying, straw mulching and intercropping. *Plant Pathology*, 66(6), 960-969. doi:10.1111/ppa.12698
 13. Fageria, M., Boquel, S., Leclair, G., & Pelletier, Y. (2014). Quantification of mineral oil accumulation and movement in potato plants and its significance in potato virus Y management. *Pest Management Science*, 70(8), 1243-1248. doi:10.1002/ps.3682
 14. Fageria, M. S., Boquel, S., Leclair, G., & Pelletier, Y. (2015). The use of mineral oil in potato protection: Dynamics in the plant and effect on potato virus Y spread. *American Journal of Potato Research*, 91(5), 476-484. doi:10.1007/s12230-014-9377-9
 15. Fernandez, D. E., Beers, E. H., Brunner, J. F., Doerr, M. D., & Dunley, J. E. (2005). Effects of seasonal mineral oil applications on the pest and natural enemy complexes of apple. *Journal of Economic Entomology*, 98(5), 1630-1640. doi:10.1093/jee/98.5.1630
 16. Galimberti, A., & Alyokhin, A. (2018). Lethal and sublethal effects of mineral oil on potato pests. *Journal of Economic Entomology*, 111(3), 1261-1267. doi:10.1093/jee/toy046
 17. Gupta, D., Singh, G., Thakur, N., & Bhatia, R. S. (2017). Evaluation of some novel insecticides, biopesticides and their combinations against peach leaf curl aphid, brachycaudus helichrysi infesting nectarine. *Journal of Environmental Biology*, 38(6), 1275-1280. doi:10.22438/jeb/38/6/MRN-469
 18. Hansen, L. M., & Nielsen, S. L. (2012). Efficacy of mineral oil combined with insecticides for the control of aphid virus vectors to reduce potato virus Y infections in seed potatoes (solanum tuberosum). *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 62(2), 132-137. doi:10.1080/09064710.2011.583936
 19. Karagounis, C., Kourdoumbalos, A. K., Margaritopoulos, J. T., Nanos, G. D., & Tsitsipis, J. A. (2006). Organic farming-compatible insecticides against the aphid myzus persicae (sulzer) in peach orchards. *Journal of Applied Entomology*, 130(3), 150-154. doi:10.1111/j.1439-0418.2006.01048.x
 20. Karczmarz, K., & Marcinek, B. (2018). Impact of mineral oils on dynamics in the aphids presence and virus infection of tulips 'Leen van der mark' cv. in the field cultivation. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 17(2), 11-25. doi:10.24326/asphc.2018.2.2
 21. Kirchner, S. M., Hiltunen, L. H., Santala, J., Döring, T. F., Ketola, J., Kankaala, A., . . . Valkonen, J. P. T. (2014). Comparison of straw mulch, insecticides, mineral oil, and birch extract for control of transmission of potato virus Y in seed potato crops. *Potato Research*, 57(1), 59-75. doi:10.1007/s11540-014-9254-4
 22. MacKenzie, T. D. B., Fageria, M. S., Nie, X., & Singh, M. (2013). Effects of crop management practices on current-season spread of potato virus Y. *Plant Disease*, 98(2), 213-222. doi:10.1094/PDIS-04-13-0403-RE
 23. MacKenzie, T. D. B., Lavoie, J., Nie, X., & Singh, M. (2017). Effectiveness of combined use of mineral oil and insecticide spray in reducing potato virus Y (PVY) spread under field conditions in new brunswick, canada. *American Journal of Potato Research*, 94(1), 70-80. doi:10.1007/s12230-016-9550-4
 24. MacKenzie, T. D. B., Nie, X., & Singh, M. (2016). Crop management practices and reduction of on-farm spread of potato virus Y: A 5-year study in commercial potato fields in new brunswick, canada. *American Journal of Potato Research*, 93(6), 552-563. doi:10.1007/s12230-016-9534-4
 25. Marčić, D., Perić, P., Prijović, M., & Ogurlić, I. (2009). Field and greenhouse evaluation of rapeseed spray oil

- against spider mites, green peach aphid and pear psylla in serbia. *Bulletin of Insectology*, 62(2), 159-167.
26. Martín, B., Varela, I., & Cabaleiro, C. (2004). Effects of various oils on survival of myzus persicae sulzer and its transmission of cucumber mosaic virus on pepper. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(6), 855-858. doi:10.1080/14620316.2004.11511856
27. Martín-López, B., Varela, I., Marnotes, S., & Cabaleiro, C. (2006). Use of oils combined with low doses of insecticide for the control of myzus persicae and PVY epidemics. *Pest Management Science*, 62(4), 372-378. doi:10.1002/ps.1168
28. Martoub, M., Couty, A., Giordanengo, P., & Ameline, A. (2011). Opposite effects of different mineral oil treatments on macrosiphum euphorbiae survival and fecundity. *Journal of Pest Science*, 84(2), 229-233. doi:10.1007/s10340-010-0344-z
29. Pinese, B., Lisle, A. T., Ramsey, M. D., Halfpapp, K. H., & Defaveri, S. (1994). Control of aphid-borne papaya ringspot potyvirus in zucchini marrow (cucurbita pepo) with reflective mulches and mineral oil-insecticide sprays. *International Journal of Pest Management*, 40(1), 81-87. doi:10.1080/09670879409371859
30. Pissinatti, A., & Ventura, M. U. (2015). Control of cabbage aphid, brevicoryne brassicae (L.) using kaolin and neem oil. *Journal of Entomology*, 12(1), 48-54
31. Powell, G. (1992). The effect of mineral oil on stylet activities and potato virus Y transmission by aphids. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, 63(3), 237-242. doi:10.1111/j.1570-7458.1992.tb01579.x
32. Powell, G., Hardie, J., & Pickett, J. A. (1998). The effects of antifeedant compounds and mineral oil on stylet penetration and transmission of potato virus Y by myzus persicae (sulz.) (hom., aphididae). *Journal of Applied Entomology*, 122(6), 331-333. doi:10.1111/j.1439-0418.1998.tb01507.x
33. Rolot, J. -, Seutin, H., & Deveux, L. (2021). Assessment of treatments to control the spread of PVY in seed potato crops: Results obtained in belgium through a multi-year trial. *Potato Research*, doi:10.1007/s11540-020-09485-7
34. Samara, R., Lowery, D. T., Stobbs, L. W., Vickers, P. M., & Bittner, L. A. (2016). Horticultural mineral oil influences plum pox virus transmission by myzus persicae. *Journal of Applied Entomology*, 140(9), 688-696. doi:10.1111/jen.12296
35. Vidal, E., Moreno, A., Bertolini, E., Pérez-Panadés, J., Carbonell, E. A., & Cambra, M. (2010). Susceptibility of prunus rootstocks to natural infection of plum pox virus and effect of mineral oil treatments. *Annals of Applied Biology*, 157(3), 447-457. doi:10.1111/j.1744-7348.2010.00436.x
36. Vidal, E., Zagrai, L., Milusheva, S., Bozhkova, V., Tasheva-Terzieva, E., Kamenova, I., . . . Cambra, M. (2013). Horticultural mineral oil treatments in nurseries during aphid flights reduce plum pox virus incidence under different ecological conditions. *Annals of Applied Biology*, 162(3), 299-308. doi:10.1111/aab.12022
37. Wang, R. Y., & Pirone, T. P. (1996). Mineral oil interferes with retention of tobacco etch potyvirus in the stylets of myzus persicae. *Phytopathology*, 86(8), 820-823. doi:10.1094/Phyto-86-820
38. Wilson, C. R. (1999). The potential of reflective mulching in combination with insecticide sprays for control of aphid-borne viruses of iris and tulip in tasmania. *Annals of Applied Biology*, 134(3), 293-297. doi:10.1111/j.1744-7348.1999.tb05267.x
39. Wróbel, S. (2012). Comparison of mineral oil and rapeseed oil used for the protection of seed potatoes against PVY and PVM infections. *Potato Research*, 55(1), 83-96. doi:10.1007/s11540-012-9210-0
40. Yang, Q., Arthurs, S., Lu, Z., Liang, Z., & Mao, R. (2019). Use of horticultural mineral oils to control potato virus Y (PVY) and other non-persistent aphid-vectored viruses. *Crop Protection*, 118, 97-103. doi:10.1016/j.cropro.2019.01.003
41. Yankova, V., Markova, D., Todorova, V., & Velichkov, G. (2009). Biological activity of certain oils in control of green peach aphid (myzus persicae sulz.) on pepper doi:10.17660/actahortic.2009.830.90

- Fiche de lecture sur les méthodes génétiques -

Référence :

REF	PICO 6
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte génétique (variétés résistantes) pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> ou les virus responsables de la jaunisse sur betterave?</p>	

Equation de Mots-clés :

((Beta vulgaris) or (sugar beet)) AND (Aphid or (myzus persicae) or (aphid fabae) or (virus*) or (BYV) or (BMV) or (BYNV) or (yellow disease)) AND (breeding or resistance) NOT (BYNVV or Beet necrotic yellow vein virus)

171 Documents récupérés de WoS (187 par le second expert)

163 Documents récupérés de Scopus

2 documents ajoutés sur lecture des références bibliographiques des articles retenus

1 article cité sur la base de son seul résumé (James et al. 2012)

40 Documents retenus pour analyse :

1. Andreello, M., Henry, K., Devaux, P. Desprez, B. & Manel, S. 2016. Taxonomic, spatial and adaptive genetic variation of *Beta* section *Beta*. *Theor Appl Genet* 129, 257–271. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2625-7>
2. Biancardi E, Panella LW, Lewellen RT (2012) *Beta* maritima. The Origin of Beets. Springer DOI 10.1007/978-1-4614-0842-0
3. Dunne, R. (1971). Overwintering of Myzus Persicae and Other Aphids Infesting Sugar Beet in Ireland. *Irish Journal of Agricultural Research*, 10(1), 59-69.
4. Francis, S. A., & Luterbacher, M. C. (2003). Identification and exploitation of novel disease resistance genes in sugar beet. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 59(2), 225-230.
5. Frese, L. 2010. Conservation and Access to Sugarbeet Germplasm. *Sugar Tech* 12, 207–219. <https://doi.org/10.1007/s12355-010-0054-0>
6. Friesen, T. L., Weiland, J. J., Aasheim, M. L., Hunger, S., Borchardt, D. C., & Lewellen, R. T. (2006). Identification of a SCAR marker associated with Bm, the beet mosaic virus resistance gene, on chromosome 1 of sugar beet. *Plant breeding*, 125(2), 167-172.
7. Golizadeh, A., Abedi, Z., Borzoui, E., Golikhajeh, N., & Jafary, M. (2016). Susceptibility of five sugar beet cultivars to the black bean aphid, *Aphis fabae* Scopoli (Hemiptera: Aphididae). *Neotropical entomology*, 45(4), 427-432.
8. Grimmer, M. K., Bean, K. M. R., Qi, A., Stevens, M., & Asher, M. J. C. (2008a). The action of three Beet yellows virus resistance QTLs depends on alleles at a novel genetic locus that controls symptom development. *Plant breeding*, 127(4), 391-397.
9. Grimmer, M. K., Bean, K. M. R., Luterbacher, M. C., Stevens, M., & Asher, M. J. C. (2008b). Beet mild yellowing virus resistance derived from wild and cultivated *Beta* germplasm. *Plant breeding*, 127(3), 315-318.
10. Gurel, E., S. Gurel and P. G. Lemaux (2008). "Biotechnology applications for sugar beet." *Critical Reviews in Plant Sciences* 27(2): 108-140.
11. Hall, A. E., Hunt, W. F., & Loomis, R. S. (1972). Variations in Leaf Resistances, Net Photosynthesis, and Tolerance to the Beet Yellows Virus Among Varieties of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) 1. *Crop Science*, 12(5), 558-561.
12. 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.
13. Hossain, R., W. Menzel and M. Varrelmann (2019). "Virus yellows in sugar beet - biology and infestation risk." *Sugar Industry-Zuckerindustrie* 144(11): 665-672.
14. Hull, R. (1965). Control of sugar beet yellows. *Annals of Applied Biology*, 56(2), 345-347.
15. James, L. C., Bean, K. M. R., Grimmer, M. K., Barnes, S., Kraft, T., & Stevens, M. (2012). Varieties of the future: identification of broad spectrum genetic resistance in sugar beet. *International sugar journal*,

- 114(1359), 164-168.
16. Koch, F. (1974). "Performances of sugar beet lines tolerant to virus yellows in a heavily infested area in northern Spain" *lirb-Institut International De Recherches Betteravieres* 6(4): 186-193.
 17. Kornienko, A. V., O. A. Podvigina, T. P. Zhuzhzhlova, T. P. Fedulova, M. A. Bogomolov, V. P. Oshevnev and A. K. Tutorina (2014). "High-priority research directions in genetics and the breeding of the sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the 21st century." *Russian Journal of Genetics* 50(11): 1137-1148.
 18. Kozłowska-Makulska, A., M. Beuve, J. Syller, M. S. Szyndel, O. Lemaire, S. Bouzoubaa and E. Herrbach (2009). "Aphid transmissibility of different European beet polerovirus isolates." *European Journal of Plant Pathology* 125(2): 337-341.
 19. Lasa Dolhagaray JM, I Romagosa. 1992. Mejora genética de la remolacha azucarera. Valladolid, AIMCRA. 130 pp. <http://hdl.handle.net/10261/126877>
 20. Lewellen, R. T. (1973). Inheritance of beet mosaic virus resistance in sugarbeet. *Phytopathology*, 63, 877-881.
 21. Lewellen RT, and Skoyen IO (1984) Beet western yellows can cause heavy losses in sugarbeet. *California Agriculture* 38:4-5
 22. Lewellen RT, Wisler GC, Liu H-Y, Kaffka SR, Sears JL, Duffus JE (1999) Reaction of sugarbeet breeding lines and hybrids to beet chlorosis luteovirus. *J Sugar Beet Res* 36:76
 23. Lowe, H. J. B. (1972). "ROLE OF VARIETIES IN CONTROLLING PESTS AND DISEASES." *lirb* 5(4): 224-&.
 24. Lowe, H. J. B. (1975). Infestation of aphid-resistant and susceptible sugar beet by *Myzus persicae* in the field. *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 79(1-4), 376-383.
 25. Lowe, H. J. B., & Russell, G. E. (1969). Inherited resistance of sugar beet to aphid colonization. *Annals of Applied Biology*, 63(2), 337-344.
 26. Lowe, H. J. B., & Singh, M. (1985). Glasshouse tests and field selection for heritable resistance to *Myzus persicae* in sugar beet. *Annals of applied biology*, 107(1), 109-116.
 27. Luterbacher, M. C., M. J. C. Asher, E. DeAmbrogio, E. Biancardi, P. Stevanato and L. Frese (2004). "Sources of resistance to diseases of sugar beet in related *Beta* germplasm: I. Foliar diseases." *Euphytica* 139(2): 105-121.
 28. McFarlane JS, and Bennett CW (1963) Occurrence of yellows resistance in the sugar beet with an appraisal of the opportunities for developing resistant varieties. *J ASSBT* 12:403-514
 29. Panella, L. and R. T. Lewellen (2007). "Broadening the genetic base of sugar beet: introgression from wild relatives." *Euphytica* 154(3): 383-400.
 30. Qi, A., Dewar, A.M. and Harrington, R. (2004), Decision making in controlling virus yellows of sugar beet in the UK. *Pest. Manag. Sci.*, 60: 727-732. <https://doi.org/10.1002/ps.871>
 31. Razmjou, J., & Fallahi, A. (2009). Effects of sugar beet cultivar on development and reproductive capacity of *Aphis fabae*. *Bull. Insectol*, 62, 197-201.
 32. Russell, G. E. (1964). Breeding for tolerance to Beet yellows virus and Beet mild yellowing virus in Sugar Beet. I Selection and breeding methods. *Annals of Applied Biology*, 53(3), 363-376.
 33. Russell, G. E. (1966a). Breeding for resistance to infection with yellowing viruses in sugar beet: I. Resistance in virus-tolerant breeding material. *Annals of Applied Biology*, 57(2), 311-320.
 34. Russell, G. E. (1966b). Recent developments in breeding for resistance to virus yellows of sugar beet. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles*, 13(1-4), 339-344.
 35. Savic, J. M. and A. C. Smigocki (2012). "*Beta vulgaris* L. serine proteinase inhibitor gene expression in insect resistant sugar beet." *Euphytica* 188(2): 187-198.
 36. Stevanato, P., C. Chiodi, C. Broccanello, G. Concheri, E. Biancardi, O. Pavli and G. Skaracis (2019). "Sustainability of the Sugar Beet Crop." *Sugar Tech* 21(5): 703-716.
 37. Stevens, M., B. Freeman, H. Y. Liu, E. Herrbach and O. Lemaire (2005). "Beet poleroviruses: close, friends or distant relatives?" *Molecular Plant Pathology* 6(1): 1-9.
 38. Uphoff, H. (2011). "Breeding sugarbeet varieties with reduced susceptibility to foliar diseases." *Zuckerindustrie* 136(1): 35-40.
 39. Van Geyt, J. P. C., Lange, W., Oleo, M., & De Bock, T. S. (1990). Natural variation within the genus *Beta* and its possible use for breeding sugar beet: a review. *Euphytica*, 49(1), 57-76.
 40. Zhang, C. L., D. C. Xu, X. C. Jiang, Y. Zhou, J. Cui, C. X. Zhang, D. F. Chen, M. R. Fowler, M. C. Elliott, N. W. Scott, A. M. Dewar and A. Slater (2008). "Genetic approaches to sustainable pest management in sugar beet (*Beta vulgaris*)." *Annals of Applied Biology* 152(2): 143-156.

- Fiche de lecture sur les méthodes culturales -

Référence :

REF	PICO 07
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte par stimulation ou élicitation des défenses des plantes pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> ou les virus responsables de la jaunisse sur betterave?</p>	

Equation de Mots-clés :

Equation de mots clés sur Web of Science

TOPIC: ((intercropping) OR (associational resistance) OR (beetles bank) OR (flower strip) OR (flower edge) OR (grassed strip*) OR (grassed edge) OR (hedgerow*) OR (windbreak*) OR (mulching) OR (soil cover) OR (crop rotation) OR (fertiliz*) OR (irrigation) OR (landscape management) OR (landscape heterogeneity) OR (landscape complexity) OR (landscape planning) OR (farming practice*) OR (conservation biological control) OR (tillage) OR (mowing) OR (cutting) OR (companion plant*) OR (service plant*) OR (banker plant*) OR (repellent plant*) OR (barrier plant*) OR (trap plant*) OR (insectary plant*) OR (push pull) OR (agroecology) OR (biocontrol service*) or (bottom up control) OR (interspecific diversity) OR (mix* variet*)) AND TOPIC: ((myzus persicae) or (aphis fabae))

= 500 références

Spécifiquement sur betterave :

TOPIC: (((intercropping) OR (associational resistance) OR (beetles bank) OR (flower strip) OR (flower edge) OR (grassed strip*) OR (grassed edge) OR (hedgerow*) OR (windbreak*) OR (mulching) OR (soil cover) OR (crop rotation) OR (fertiliz*) OR (irrigation) OR (landscape management) OR (landscape heterogeneity) OR (landscape complexity) OR (landscape planning) OR (farming practice*) OR (conservation biological control) OR (tillage) OR (mowing) OR (cutting) OR (companion plant*) OR (service plant*) OR (banker plant*) OR (repellent plant*) OR (barrier plant*) OR (trap plant*) OR (insectary plant*) OR (push pull) OR (agroecology) OR (biocontrol service*) or (bottom up control) OR (interspecific diversity) OR (mix* variet*))) AND TOPIC: (((myzus persicae) or (aphis fabae))) AND TOPIC: ((sugar beet) or (beta vulgaris))

77 articles retenus sur lecture des résumés

53 articles retenus in fine après lecture complète.

1. Andorno, A. V., & López, S. N. (2014). Biological control of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) through banker plant system in protected crops. *Biological Control*, 78, 9-14.
2. Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Yardim, E. N., Oliver, T. J., Byrne, R. J., & Keeney, G. (2006). Suppression of two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*), mealy bug (*Pseudococcus* sp) and aphid (*Myzus persicae*) populations and damage by vermicomposts. *Crop Protection*, 26(1), 29-39.
3. Balzan, M. V., & Moonen, A. C. (2014). Field margin vegetation enhances biological control and crop damage suppression from multiple pests in organic tomato fields. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 150(1), 45-65.
4. Banks, J. E., & Gagic, V. (2016). Aphid parasitoids respond to vegetation heterogeneity but not to fragmentation scale: an experimental field study. *Basic and Applied Ecology*, 17(5), 438-446.
5. Ben Issa, R., Gautier, H., & Gomez, L. (2017). Influence of neighbouring companion plants on the performance of aphid populations on sweet pepper plants under greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Entomology*, 19(2), 181-191.

6. Ben Issa, R., Gautier, H., Costagliola, G., & Gomez, L. (2016). Which companion plants affect the performance of green peach aphid on host plants? Testing of 12 candidate plants under laboratory conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 160(2), 164-178.
7. Ben-Issa, R., Gomez, L., & Gautier, H. (2017). Companion plants for aphid pest management. *Insects*, 8(4), 112.
8. Blumel, S., Hausdorf, H., (1996). Greenhouse trials for the control of aphids on cut-roses with the chalcid *Aphelinus abdominalis* Dalm. (Aphelinidae: Hymenoptera). *Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz* 69, 64–69.
9. Comadira, G., Rasool, B., Karpinska, B., Morris, J., Verrall, S. R., Hedley, P. E., ... & Hancock, R. D. (2015). Nitrogen deficiency in barley (*Hordeum vulgare*) seedlings induces molecular and metabolic adjustments that trigger aphid resistance. *Journal of experimental botany*, 66(12), 3639-3655.
10. Costello, M. J., & Altieri, M. A. (1995). Abundance, growth rate and parasitism of *Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) on broccoli grown in living mulches. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 52(2-3), 187-196.
11. Coutts, B. A., Kehoe, M. A., & Jones, R. A. C. (2011). Minimising losses caused by Zucchini yellow mosaic virus in vegetable cucurbit crops in tropical, sub-tropical and Mediterranean environments through cultural methods and host resistance. *Virus Research*, 159(2), 141-160.
12. Dardouri, T., Gautier, H., Ben Issa, R., Costagliola, G., & Gomez, L. (2019a). Repellence of *Myzus persicae* (Sulzer): Evidence of two modes of action of volatiles from selected living aromatic plants. *Pest management science*, 75(6), 1571-1584.
13. Dardouri, T., Gomez, L., Ameline, A., Costagliola, G., Schoeny, A., & Gautier, H. (2020). Non-host volatiles disturb the feeding behavior and reduce the fecundity of the green peach aphid, *Myzus persicae*. *Pest Management Science*.
14. Dardouri, T., Gomez, L., Schoeny, A., Costagliola, G., & Gautier, H. (2019). Behavioural response of green peach aphid *Myzus persicae* (Sulzer) to volatiles from different rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) clones. *Agricultural and Forest Entomology*, 21(3), 336-345.
15. Dupuis, B., Cadby, J., Goy, G., Tallant, M., Derron, J., Schwaerzel, R., & Steinger, T. (2017). Control of potato virus Y (PVY) in seed potatoes by oil spraying, straw mulching and intercropping. *Plant Pathology*, 66(6), 960-969.
16. El-Fakharany, S. K. M., Samy, M. A., Ahmed, S. A., & Khattab, M. A. (2012). Effect of intercropping of maize, bean, cabbage and toxicants on the population levels of some insect pests and associated predators in sugar beet plantations. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 65(1), 21-28.
17. Fereres, A. (2000). Barrier crops as a cultural control measure of non-persistently transmitted aphid-borne viruses. *Virus research*, 71(1-2), 221-231.
18. Frank, S. D. (2010). Biological control of arthropod pests using banker plant systems: past progress and future directions. *Biological control*, 52(1), 8-16.
19. Goh, H.G., Kim, J.H., Han, M.W. (2001). Application of *Aphidius colemani* Viereck for control of the aphid in greenhouse. *Journal of Asia-Pacific Entomology* 4, 171– 174.
20. Hansen, L. M., Lorentsen, L., & Boelt, B. (2008). How to reduce the incidence of black bean aphids (*Aphis fabae* Scop.) attacking organic growing field beans (*Vicia faba* L.) by growing partially resistant bean varieties and by intercropping field beans with cereals. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*, 58(4), 359-364.
21. Hansen, L.S., 1983. Introduction of *Aphidoletes aphidimyza* (Rond.) (Diptera: Cecidomyiidae) from an open rearing unit for the control of aphids in glasshouses. *Bulletin SROP* 6, 146–150
22. Hendges, A.R.A.A., Melo, J.W.S., Guimaraes, M.A., Rabelo, J.S., 2018. Intercropping kale with culinary herbs alters arthropod diversity and hinders population growth in aphids. *Hort. Sci.* 53 (1), 44–48.
23. Hooks, C. R., & Fereres, A. (2006). Protecting crops from non-persistently aphid-transmitted viruses: a review on the use of barrier plants as a management tool. *Virus research*, 120(1-2), 1-16.
24. Jado, R. H., Araj, S. E., Abu-Irmaileh, B., Shields, M. W., & Wratten, S. D. (2019). Floral resources to enhance the potential of the parasitoid *Aphidius colemani* for biological control of the aphid *Myzus persicae*. *Journal of Applied Entomology*, 143(1-2), 34-42.
25. Kirchner, S. M., Hiltunen, L. H., Santala, J., Döring, T. F., Ketola, J., Kankaala, A., ... & Valkonen, J. P. T. (2014). Comparison of straw mulch, insecticides, mineral oil, and birch extract for control of transmission of Potato virus Y in seed potato crops. *Potato research*, 57(1), 59-75.
26. Kuo-Sell, H.L., 1989. Cereal aphids as prey species for mass rearing of *Aphidoletes aphidimyza* (Rond) (Dipt., Cecidomyiidae) in the biological control of *Myzus persicae* (Sulz) in greenhouses. *Journal of Applied Entomology* 107, 58–64.
27. Lai, R., Hu, H., Wu, X., Bai, J., Gu, G., Bai, J., ... & Zhong, X. (2019). Intercropping oilseed rape as a potential relay crop for enhancing the biological control of green peach aphids and aphid-transmitted virus diseases. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(11), 969-976.
28. Lai, R., You, M., Lotz, L. A. P., & Vasseur, L. (2011). Response of green peach aphids and other arthropods to garlic intercropped with tobacco. *Agronomy journal*, 103(3), 856-863.
29. Landis, D. A., & Van der Werf, W. (1997). Early-season predation impacts the establishment of aphids and spread of beet yellows virus in sugar beet. *Entomophaga*, 42(4), 499-516.
30. Le Guigo, P., Rolier, A., & Le Corff, J. (2012). Plant neighborhood influences colonization of Brassicaceae by specialist and generalist aphids. *Oecologia*, 169(3), 753-761.

31. Leite, G. L. D., Picanço, M., Guedes, R. N. C., & Skowronski, L. (1999). Effect of fertilization levels, age and canopy height of *Lycopersicon hirsutum* on the resistance to *Myzus persicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 91(2), 267-273.
32. Li, X. W., Lu, X. X., Zhang, Z. J., Huang, J., Zhang, J. M., Wang, L. K., ... & Lu, Y. B. (2021). Intercropping rosemary (*rosmarinus officinalis*) with sweet pepper (*capsicum annuum*) reduces major pest population densities without impacting natural enemy populations. *Insects*, 12(1), 74.
33. Little, A. G., Arellano, C., Kennedy, G. G., & Cardoza, Y. J. (2011). Bottom-up effects mediated by an organic soil amendment on the cabbage aphid pests *Myzus persicae* and *Brevicoryne brassicae*. *Entomologia experimentalis et applicata*, 139(2), 111-119.
34. Manandhar, R., & Hooks, C. R. (2011). Using protector plants to reduce the incidence of Papaya ringspot virus-watermelon strain in zucchini. *Environmental Entomology*, 40(2), 391-398.
35. Mardani-Talaei, M., Nouri-Ganblani, G., Razmjou, J., Hassanpour, M., Naseri, B., & Asgharzadeh, A. (2016). Effects of chemical, organic and bio-fertilizers on some secondary metabolites in the leaves of bell pepper (*Capsicum annuum*) and their impact on life table parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of economic entomology*, 109(3), 1231-1240.
36. Moreno, C. R., & Racelis, A. E. (2015). Attraction, repellence, and predation: Role of companion plants in regulating *Myzus persicae* (Sulzer)(Hemiptera: Aphidae) in organic kale systems of south Texas. *Southwestern Entomologist*, 40(1), 1-14.
37. Ninkovic, V., Dahlin, I., Vucetic, A., Petrovic-Obradovic, O., Glinwood, R., & Webster, B. (2013). Volatile exchange between undamaged plants-a new mechanism affecting insect orientation in intercropping. *PLoS One*, 8(7), e69431.
38. Payton Miller, T. L., & Rebek, E. J. (2018). Banker plants for aphid biological control in greenhouses. *Journal of Integrated Pest Management*, 9(1), 9.
39. Potts, M.J.; Gunadi, N. The influence of intercropping with allium on some insect populations in potato (*Solanum tuberosum*). *Ann. Appl. Biol.* 1991, 119, 207–213.
40. Rolot, J. L., Seutin, H., & Deveux, L. (2021). Assessment of Treatments to Control the Spread of PVY in Seed Potato Crops: Results Obtained in Belgium Through a Multi-Year Trial. *Potato Research*, 1-24.
41. Rousselin, A., Sauge, M. H., Jordan, M. O., Vercambre, G., Lescourret, F., & Bevacqua, D. (2016). Nitrogen and water supplies affect peach tree-green peach aphid interactions: the key role played by vegetative growth. *Agricultural and Forest Entomology*, 18(4), 367-375.
42. Saucke, H., Juergens, M., Döring, T. F., Fittje, S., Lesemann, D. E., & Vetten, H. J. (2009). Effect of sowing date and straw mulch on virus incidence and aphid infestation in organically grown faba beans (*Vicia faba*). *Annals of applied biology*, 154(2), 239-250.
43. Sidauruk, L Sipayung P (2018) Population of *Myzus persicae* (Sulzer) and insect diversity on intercropping potatoes with other plants which planting at different time- IOP Conference Series: Earth and ...
44. Silva-Filho, R., Santos, R. H. S., de Souza Tavares, W., Leite, G. L. D., Wilcken, C. F., Serrão, J. E., & Zanuncio, J. C. (2014). Rice-straw mulch reduces the green peach aphid, *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) populations on kale, *Brassica oleracea* var. *acephala* (Brassicaceae) plants. *Plos one*, 9(4), e94174.
45. Stafford, D. B., Tariq, M., Wright, D. J., Rossiter, J. T., Kazana, E., Leather, S. R., ... & Staley, J. T. (2012). Opposing effects of organic and conventional fertilizers on the performance of a generalist and a specialist aphid species. *Agricultural and Forest Entomology*, 14(3), 270-275.
46. Staley, J. T., Stewart-Jones, A., Pope, T. W., Wright, D. J., Leather, S. R., Hadley, P., ... & Poppy, G. M. (2010). Varying responses of insect herbivores to altered plant chemistry under organic and conventional treatments. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1682), 779-786.
47. Tiwari, S., Sharma, S., & Wratten, S. D. (2020). Flowering alyssum (*Lobularia maritima*) promote arthropod diversity and biological control of *Myzus persicae*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(3), 634-640.
48. Toennisson, T. A., Klein, J. T., & Burrack, H. (2019). Measuring the effect of non-crop flowering plants on natural enemies in organic tobacco. *Biological Control*, 137, 104023.
49. Van Driesche, R. G., Lyon, S., Sanderson, J. P., Bennett, K. C., Stanek III, E. J., & Zhang, R. (2008). Greenhouse trials of *Aphidius colemani* (Hymenoptera: Braconidae) banker plants for control of aphids (Hemiptera: Aphididae) in greenhouse spring floral crops. *Florida Entomologist*, 91(4), 583-591.
50. Werling, B. P., & Gratton, C. (2010). Local and broadscale landscape structure differentially impact predation of two potato pests. *Ecological Applications*, 20(4), 1114-1125.
51. Wratten, S. D., Gurr, G. M., Tylianakis, J. M., & Robinson, K. A. (2007). Ch.16 Cultural Control. *in* Aphids as crop pests, Van Emden, H. F., & Harrington, R. (Eds.), Cabi. pp 423-439.
52. Zanic, K., Ban, D., Culjak, T. G., Ban, S. G., Dumicic, G., Haramija, J., & Znidarcic, D. (2013). Aphid populations (Hemiptera: Aphidoidea) depend of mulching in watermelon production in the Mediterranean region of Croatia. *Spanish journal of agricultural research*, (4), 1120-1128.
53. Zhao, J., Guo, X., Tan, X., Desneux, N., Zappala, L., Zhang, F., & Wang, S. (2017). Using *Calendula officinalis* as a floral resource to enhance aphid and thrips suppression by the flower bug *Orius sauteri* (Hemiptera: Anthocoridae). *Pest management science*, 73(3), 515-520.

- Fiche de lecture sur les stimulateurs de défenses des plantes -

Référence :

REF	PICO 08
<p>Question posée : quelles sont les études démontrant une efficacité de la méthode de lutte par stimulation ou élicitation des défenses des plantes pour lutter contre les pucerons <i>M. persicae</i> et <i>A. fabae</i> ou les virus responsables de la jaunisse sur betterave?</p>	

Equation de Mots-clés :

((elicit* and (defense* or defence*)) AND TOPIC: ((sugar beet) or (beta vulgaris))) = 58
 ((elicit* or stimul* or induce*) and (defense* or defence*)) AND TOPIC: ((myzus persicae) or (aphis fabae)) = 259
 Acibenzolar-S-methyl AND sugar beet = 4
 (Acibenzolar-S-methyl) AND TOPIC: ((myzus persicae) or (aphis fabae)) = 6
 (Acibenzolar-S-methyl) AND TOPIC: ((yellow) and (virus)) = 11
 (COS-OGA) AND (defense or defence) = 11
 (Laminarin) AND (sugar beet) OR ((myzus persicae) or (aphis fabae)) OR ((yellow) and (virus)) = 0
 (potassium and phosphonate) AND (sugar beet) OR ((myzus persicae) or (aphis fabae)) OR ((yellow) and (virus)) = 0

291 Documents récupérés de WoS

23 Documents retenus pour analyse :

1. Javed, K., Javed, H., & Qiu, D. (2020). Biocontrol Potential of Purified Elicitor Protein PeBL1 Extracted from *Brevibacillus laterosporus* Strain A60 and Its Capacity in the Induction of Defense Process against Cucumber Aphid (*Myzus persicae*) in Cucumber (*Cucumis sativus*). *Biology*, 9(7), 179.
2. Basit, A., Nazir, T., Hanan, A., Majeed, M. Z., Farhan, M., Dewen, Q. I. U., & Yong, W. A. N. G. (2020). MAMP-triggered resistance induced by elicitor protein PeBA1 derived from *Bacillus amyloliquefaciens* NC6 in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) against green peach aphid (*Myzus persicae* Sulzer). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(2), 705-715.
3. Hanan, A., Basit, A., Nazir, T., Majeed, M. Z., & Qiu, D. (2020). Anti-insect activity of a partially purified protein derived from the entomopathogenic fungus *Lecanicillium lecanii* (Zimmermann) and its putative role in a tomato defense mechanism against green peach aphid. *Journal of Invertebrate Pathology*, 170, 107282.
4. Nazir, T., Hanan, A., Basit, A., Majeed, M. Z., Anwar, T., Nawaz, I., & Qiu, D. (2020). Putative Role of a Yet Uncharacterized Protein Elicitor PeBb1 Derived from *Beauveria bassiana* ARSEF 2860 Strain against *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) in *Brassica rapa* ssp. *pekinensis*. *Pathogens*, 9(2), 111.
5. Javed, K., & Qiu, D. (2020). Protein Elicitor PeBL1 of *Brevibacillus laterosporus* Enhances Resistance Against *Myzus persicae* in Tomato. *Pathogens*, 9(1), 57.
6. Basit, A., Hanan, A., Nazir, T., Majeed, M. Z., & Qiu, D. (2019). Molecular and Functional Characterization of Elicitor PeBC1 Extracted from *Botrytis cinerea* Involved in the Induction of Resistance against Green Peach Aphid (*Myzus persicae*) in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Insects*, 10(2), 35.
7. Haas, J., Lozano, E. R., Haida, K. S., Mazarro, S. M., de Souza Vismara, E., & Poppy, G. M. (2018). Getting ready for battle: do cabbage seeds treated with jasmonic acid and chitosan affect chewing and sap-feeding insects? *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(5), 412-419.
8. Khelifa, M. (2017). Possible induction of potato plant defences against Potato virus Y by mineral oil application. *European Journal of Plant Pathology*, 147(2), 339-348.
9. Cooper, W. R., & Horton, D. R. (2015). Effects of elicitors of host plant defenses on pear psylla, *Cacopsylla pyricola*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 157(3), 300-306. [because addresses commercial elicitors; test vs *Myzus* or *Aphis*?]
10. Bingham, G., Alptekin, S., Delogu, G., Gurkan, O., & Moores, G. (2014). Synergistic manipulations of plant

- and insect defences. *Pest management science*, 70(4), 566-571.
11. Song, G. C., & Ryu, C. M. (2013). Two volatile organic compounds trigger plant self-defense against a bacterial pathogen and a sucking insect in cucumber under open field conditions. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 9803-9819.
 12. Dewhirst, S. Y., Birkett, M. A., Loza-Reyes, E., Martin, J. L., Pye, B. J., Smart, L. E., ... & Pickett, J. A. (2012). Activation of defence in sweet pepper, *Capsicum annum*, by cis-jasmone, and its impact on aphid and aphid parasitoid behaviour. *Pest management science*, 68(10), 1419-1429.
 13. Karatolos, N., & Hatcher, P. E. (2009). The effect of acetylsalicylic acid and oxalic acid on *Myzus persicae* and *Aphidius colemani*. *Entomologia experimentalis et applicata*, 130(1), 98-105.
 14. Boughton, A. J., Hoover, K., & Felton, G. W. (2006). Impact of chemical elicitor applications on greenhouse tomato plants and population growth of the green peach aphid, *Myzus persicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 120(3), 175-188.
 15. Kenney, J. R., Grandmont, M. E., & Mauck, K. E. (2020). Priming melon defenses with acibenzolar-S-methyl attenuates infections by phylogenetically distinct viruses and diminishes vector preferences for infected hosts. *Viruses*, 12(3), 257.
 16. Monci, F., García-Andrés, S., Sánchez-Campos, S., Fernández-Muñoz, R., Díaz-Pendón, J. A., & Moriones, E. (2019). Use of systemic acquired resistance and whitefly optical barriers to reduce tomato yellow leaf curl disease damage to tomato crops. *Plant disease*, 103(6), 1181-1188.
 17. Tripathi, D., & Pappu, H. R. (2015). Evaluation of acibenzolar-S-methyl-induced resistance against iris yellow spot tospovirus. *European journal of plant pathology*, 142(4), 855-864.
 18. Faoro, F., & Gozzo, F. (2015). Is modulating virus virulence by induced systemic resistance realistic? *Plant Science*, 234, 1-13.
 19. Takeshita, M., Okuda, M., Okuda, S., Hyodo, A., Hamano, K., Furuya, N., & Tsuchiya, K. (2013). Induction of antiviral responses by acibenzolar-s-methyl against cucurbit chlorotic yellows virus in Melon. *Phytopathology*, 103(9), 960-965.
 20. Guarnizo, N., Oliveros, D., Murillo-Arango, W., & Bermúdez-Cardona, M. B. (2020). Oligosaccharides: Defense Inducers, Their Recognition in Plants, Commercial Uses and Perspectives. *Molecules*, 25(24), 5972.
 21. Clinckemaiellie, A., Decroës, A., van Aubel, G., Carrola dos Santos, S., Renard, M. E., Van Cutsem, P., & Legrève, A. (2017). The novel elicitor COS-OGA enhances potato resistance to late blight. *Plant pathology*, 66(5), 818-825.
 22. van Aubel, G., Cambier, P., Dieu, M., & Van Cutsem, P. (2016). Plant immunity induced by COS-OGA elicitor is a cumulative process that involves salicylic acid. *Plant Science*, 247, 60-70.
 23. Zelena, E., Zeleny, F., Wonisch, A. & Tausz, M. (2011). Effect of sulfur nutrition on glutathione content in sugar beet plants in relation with aphids infestation. *Phyton*, 50(2), 319-327.

Annexe 3 : Matrice d'évaluation des méthodes de lutte

Organismes cibles	Famille de méthodes alternatives	Méthode ou produit générique	Méthode ou produit particulier	Magnitude de l'efficacité	Durabilité de l'efficacité	Opérationnalité	Praticité
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes + Carbamates	Lambda-cyhalothrine + pirimicarbe	3	1	3	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyridine-carboxamide	Flonicamide	3	2	3	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Keto-enoles	Spirotétramate	3	3	3	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Avermectine	Abamectine	2	3	2	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes + Carbamates	Tau-fluvalinate + pirimicarbe	3	1	3	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Deltamethrine	3	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Alpha-Cyperméthrine	3	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Cyperméthrine	3	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Lambda-cyhalothrine	3	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Tau-fluvalinate	2	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Pyréthriinoïdes	Esfenvalérate	3	1	2	2
Pucerons	PPP	Pyréthrines	Pyréthrine	2	1	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Carbamate	Pirimicarbe	3	1	2	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Oxadiazine	Indoxacarbe	3	2	2	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Spinosines	Spinosad	2	2	2	2
Pucerons	PPP	Conventionnel - Avermectine	Benzoate d'émamectine	2	2	2	3
Pucerons	PPP	Conventionnel - Diamide	Cyantranilprole	2	2	2	3
Pucerons	PPP	Citrus	d-limonène	2	3	2	3
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	huile de neem / azadirachtine	2	3	2	3
Pucerons	PPP	Détergent		2	3	1	2
Pucerons	PPP	Détergent		2	3	1	2
Pucerons	PPP	Squamocine, Annonacine	Acétogénine	2	2	1	2

Pucerons	PPP	Clonidine et analogues		3	3	1	3
Pucerons	PPP	Composés pyrazole-carboxamide		3	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Acide pyroligneux	1	3	1	2
Pucerons	PPP	Molécules extraites de micro-organismes	Rhamnolipides	3	3	1	3
Pucerons	PPP	Molécules extraites de micro-organismes	Xantholysines / Lipopeptides	2	3	1	3
Pucerons	PPP	Molécules extraites de micro-organismes	Acides gras de Trichoderma sp.	2	3	1	3
Pucerons	PPP	Molécules extraites de micro-organismes	Quinolactecide et Oxalicine B	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Extraits de trichomes de tabac	3	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Chenopodium ambrosioides	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Galangustine	1	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Huile d'une euphorbe du Brésil	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Extrait de Sophora alopecuroides	1	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Extrait de graines de Peganum harmala	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Nootkatone	1	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	Acides Dicaffeoyl	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Tagetes minuta	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Pinus sp. et Eucalyptus sp.	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Thymus vulgaris et Pimpinella anisum	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Lippia origanoides et Mentha spicata	1	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Mosla chinensis	2	3	1	2
Pucerons	PPP	Huiles essentielles et extraits de plantes	HE de Mentha pulegium et Melissa officinalis	2	3	1	2
Pucerons	Micro-organismes	Champignon	Beauveria bassiana	2	3	2	2
Pucerons	Micro-organismes	Champignon	Lecanicillium muscarium	2	3	2	2
Pucerons	Micro-organismes	Champignon	Verticillium lecanii	1	3	2	2

Pucerons	Micro-organismes	Champignon	Beauveria sp., Metarhizium anisopliae, Metarhizium flavoviride, Purpureocillium lilacinum, Aspergillus sp, Lecanicillium lecanii, Lecanicillium attenuatum	1	3	1	2
Pucerons	Macro-organismes	Parasitoïde	Lysiphlebus fabarum	2	3	1	1
Pucerons	Macro-organismes	Parasitoïde	Lysiphlebus testaceipes, Aphidius colemani	2	3	1	1
Pucerons	Macro-organismes	Parasitoïde	Aphidius gifuensis	3	3	2	2
Pucerons	Macro-organismes	Prédateur	Chrysoperla carnea	2	3	2	2
Pucerons	Macro-organismes	Prédateur	Chrysoperla lucasina	2	3	1	2
Pucerons	Macro-organismes	Prédateur	Adalia bipunctata	2	3	1	1
Pucerons	Macro-organismes	Prédateur	Cantharis lateralis, C. rufa (Coleoptera: Cantharidae), Coccinella septempunctat., C. undecimpunctata (Coleoptera: Coccinellidae), Pterostichus cupreus, Harpalus rufipes Patrobus atrorufus, Trechus quadristriatus, Bembidion lampros, (Coleoptera: Carabidae).	1	3	1	1
Pucerons	Macro-organismes	Prédateur	Theridion impressum	1	3	1	1
Pucerons	Médiateurs chimiques	Répulsif		1	3	1	1
Pucerons	Médiateurs chimiques	Attractant		1	3	1	1
Pucerons	Méthodes physiques	Huile minérale		2	3	2	3
Pucerons	Méthodes physiques	Huile organique		2	3	2	3
Pucerons	Méthodes physiques	Kaolinite		1	3	2	2
Pucerons	Méthodes physiques	Maltodextrine		1	3	2	3
Pucerons	Méthodes physiques	Paillage		1	3	3	1
Pucerons	Méthodes physiques	Bâches en plastique		1	3	3	1
Pucerons	Méthodes physiques	Pièges jaunes		1	3	3	1
Virus et pucerons	Stimulateurs de défenses des plantes	Benzothiadazole	ASM	2	3	2	3
Virus	Stimulateurs de défenses des plantes	Huile minérale	Huile de paraffine	2	3	2	3
Pucerons	Stimulateurs de défenses des plantes	Précurseurs d'acide jasmonique, d'acide salicylique et COS-OGA		1	3	2	3

Pucerons	Stimulateurs de défenses des plantes	Apport d'azote		1	3	3	3
Pucerons	Stimulateurs de défenses des plantes	Protéines extraites de microorganismes		1	3	1	3
Pucerons	Méthodes génétiques	Variétés résistantes aux pucerons		1	2	2	3
Virus	Méthodes génétiques	Variétés résistantes aux virus de la jaunisse		2	3	2	3
Pucerons	Méthodes culturales	Paillage et mulching		2	3	3	2
Pucerons	Méthodes culturales	Fertilisation organique		2	3	3	3
Pucerons	Méthodes culturales	Associations végétales	Associations végétales à effet "bottom-up" (diversion, répulsion)	2	3	2	1
Pucerons	Méthodes culturales	Associations végétales	Associations végétales à effet "top-down" (lutte biologique par conservation)	2	3	2	1

Annexe 4 : Suivi des actualisations du rapport

Date	Page	Description de la modification
26/05/2021	94	La phrase « Parmi celles-ci, seulement 8 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. » est remplacée par la phrase « Parmi celles-ci, seulement 7 %, était en lien direct avec la culture de la betterave. »
26/05/2021	100	Dans le tableau 3, la ligne 3 du tableau est déplacée en ligne 7 et dans la colonne « famille de méthode alternative », « PPP_synthèse » est remplacé par « PPP_naturels »
26/05/2021	104	La phrase « Des produits à base de <i>Lecanicillium lecanii</i> déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. » est remplacée par la phrase « Des produits à base de <i>Lecanicillium muscarium</i> déjà autorisés et commercialisés pour d'autres usages pourraient être rapidement mobilisables. »

Notes



anses

CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél : 01 42 76 40 40
www.anses.fr — @Anses_fr