

Intérêt des bandes fleuries pour le contrôle biologique des pucerons vecteurs des jaunisses de la betterave sucrière

Lagneau Ludovic¹, Le Lann Cécile¹, Tougeron Kévin^{3,4}, Canard Elsa², Marrec Ronan³, Plantegenest Manuel², Le Ralec Anne², Van Baaren Joan¹, Tricault Yann²

¹. Université de Rennes 1, UMR-CNRS 6553 ECOBIO, France

². Institut Agro Rennes Angers, UMR INRAE Université de Rennes 1 IGEPP 1349, France

³. Université de Picardie Jules Verne, UMR-CNRS 7058 EDYSAN, France

⁴. Université de Mons, Institut de Recherche en Biosciences, Belgique

Correspondance : joan.van-baaren@univ-rennes1.fr

Résumé

L'interdiction des néonicotinoïdes rend obligatoire la mise en œuvre de stratégies alternatives pour la gestion des pucerons vecteurs des jaunisses de la betterave à sucre. L'installation de bandes fleuries à proximité des cultures pourrait contribuer à une meilleure régulation biologique des pucerons en favorisant leurs ennemis naturels par l'apport de ressources alimentaires (nectar, pollen, proies alternatives, etc.) et d'habitat. L'analyse de 58 études consacrées aux bandes fleuries en grandes cultures confirme leur capacité à augmenter l'abondance des parasitoïdes ou des prédateurs et à réduire les infestations de ravageurs. Un second corpus de 32 articles permet de dresser une première liste, manifestement incomplète, des ennemis naturels des principaux pucerons vecteurs des jaunisses de la betterave. Parmi les facteurs influençant l'efficacité d'une bande fleurie sur le contrôle biologique, la composition spécifique du mélange et les traits floraux des espèces qui le constituent sont déterminants. L'influence des contextes paysager et climatique a été peu abordée jusqu'à présent. Les résultats collectés à partir de la bibliographie semblent indiquer que la composition des bandes fleuries à préconiser en culture de betterave à sucre pourrait différer entre les climats tempéré ou océanique et le climat continental. Des travaux de terrain restent indispensables pour évaluer la pertinence de l'approche bandes fleuries dans le cas de la gestion des jaunisses de la betterave.

Mots-clés : infrastructure agro-écologique, virus, parasitoïde, prédateur, paysage, climat

Abstract: Potential interest of flower strips for the biological control of aphid vectors of sugar beet yellows

The ban on neonicotinoids makes it compulsory to implement alternative strategies for the management of aphids that carry sugar beet yellows. The installation of flower strips near crops could contribute to a better biological regulation of aphids by favouring their natural enemies through the provision of food resources (nectar, pollen, alternative prey etc.) and habitat. The analysis of 58 studies devoted to flower strips in field crops confirms their capacity to increase the abundance of parasitoids or predators and to reduce pest infestations. A second corpus of 32 articles provides a first, obviously incomplete, list of natural enemies of the main aphid vectors of beet yellows. Among the factors influencing the effectiveness of a flower strip on biological control, the specific composition of the mixture and the floral traits of the species that make it up are decisive. The influence of the landscape and climatic contexts has been little discussed so far. The results collected from the literature seem to indicate that the composition of the flower strips to be recommended in sugar beet crops could differ between temperate or oceanic climates and continental climates. Fieldwork is still needed to assess the relevance of the flower strip approach to the management of yellows.

Keywords: agroecological infrastructure, virus, parasitoid, predator, landscape, climate

Introduction

Un quart du sucre produit à l'échelle mondiale est issu de la culture de la betterave sucrière, *Beta vulgaris* (Biancardi *et al.*, 2010 ; Heno *et al.*, 2018). La France en est le deuxième producteur et y consacre quelques 400 000 hectares. Les jaunisses d'origine virale constituent l'un des principaux problèmes phytosanitaires affectant la betterave sucrière. Quatre virus transmis à la plante par des pucerons (BYV, BYMV, BChV, BtMV) peuvent être responsables de cette maladie (Hossain *et al.*, 2021). Les principaux vecteurs de ces virus sont le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae*, et le puceron noir de la fève, *Aphis fabae* (Hossain *et al.*, 2021). D'autres espèces de pucerons plus sporadiques, comme *Aulacorthum solani*, *Macrosiphum euphorbiae*, *Myzus ascalonicus*, *Myzus ornatus* ou encore *Rhopalosiphoninus staphyleae* (le puceron de la betterave, peu abondant), peuvent également transmettre des virus de la jaunisse.

L'infection virale endommage le mécanisme photosynthétique, entraînant une diminution de la photosynthèse nette et le symptôme de jaunissement foliaire. Elle est aussi associée à une moindre croissance des racines latérales et à une forte perte de poids de la plante entière dont le pivot. L'ensemble de ces processus concourt à réduire la quantité de sucre extraite des plantes infectées (Clover *et al.*, 1999). Les pertes de rendement varient selon le virus impliqué (Hossain *et al.*, 2021). La sensibilité à la maladie diminue au cours de la croissance de la plante par un mécanisme de résistance à maturité contre les pucerons (Schop *et al.*, 2022). Cependant, l'épidémiologie de la maladie au champ reste mal connue. En France, il existe une forte disparité interdépartementale de la gravité des infestations et de la prévalence des différents virus (ITB, 2021). En l'absence de protection phytosanitaire efficace, jusqu'à 100% des betteraves peuvent être symptomatiques. Le rendement betteravier moyen des betteraves touchées par les jaunisses a diminué de 24% en 2020 et 20.5% en 2021, comparativement aux betteraves asymptomatiques cultivées dans les mêmes champs (essai ITB sur 26 parcelles - ARTB, 2022). En 2020, dans un contexte de gestion inopérante des jaunisses et de forte pression sanitaire (vols précoces et abondants des pucerons vecteurs) le rendement betteravier national a chuté de 29% (rapport de l'ANSES, 2021).

Depuis les années 1990, la gestion des jaunisses de la betterave en système conventionnel reposait entièrement sur la lutte anti-vectorielle par application d'insecticides néonicotinoïdes en traitement de semences (Hauer *et al.*, 2017 ; Hossain *et al.*, 2021). Cette stratégie permettait de contrôler efficacement les pucerons durant la période de sensibilité de la culture (de la levée à la fermeture du rang). A la fin des années 2000, de nombreuses voix se sont élevées pour dénoncer l'impact négatif de l'utilisation des néonicotinoïdes sur les organismes non ciblés tels que les pollinisateurs (Goulson, 2013 ; Hauer *et al.*, 2017). En France, la loi n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, a reconnu ce risque environnemental et a entraîné l'interdiction de l'utilisation des néonicotinoïdes à compter du 1er septembre 2018. Une dérogation pour la betterave à sucre a cependant rendu possible leur emploi en 2021 et 2022.

Pour pallier le retrait des néonicotinoïdes en culture betteravière, différentes méthodes alternatives peuvent être proposées et combinées (Jactel *et al.*, 2019 ; ANSES 2021 ; Francis *et al.*, 2022 ; Verheggen *et al.*, 2022). Elles se focalisent principalement sur le contrôle des pucerons vecteurs et comprennent notamment : (i) l'emploi d'aphicides, (ii) l'utilisation de Composés Organiques Volatils (COVs) agissant par attraction ou répulsion des pucerons, ou par attraction de leurs ennemis naturels, (iii) le recours à des méthodes physiques (confusion visuelle, pièges passifs, barrières physiques...), (iv) le déploiement de variétés de betteraves sucrières résistantes aux virus de la jaunisse et/ou aux pucerons vecteurs, et (v) la lutte biologique qui vise à réguler les populations de pucerons vecteurs par l'application de micro-organismes entomopathogènes (champignons, virus ou bactéries) ou de macroorganismes (parasitoïdes et/ou prédateurs) ou encore en favorisant leurs ennemis naturels par des approches agroécologiques (mise en place ou conservation d'habitats semi-naturels, associations culturales).

Le Plan National de Recherche et Innovation (PNRI) « Vers des solutions opérationnelles contre la jaunisse de la betterave sucrière », lancé en 2021 par l'Etat, se propose d'évaluer l'ensemble des options alternatives aux néonicotinoïdes dans une optique opérationnelle d'ici fin 2023. Le projet IAE-Betterave (IAE pour Infrastructure Agro-Ecologique), financé par le PNRI, cherche à évaluer l'intérêt des bandes fleuries pour la régulation biologique des pucerons. Dans cet article, nous présentons les mécanismes généraux entrant en jeu et analysons les facteurs de variation de leur efficacité, liés aux caractéristiques des bandes fleuries ainsi qu'aux contextes paysagers et climatiques au sein desquels elles sont implantées. Finalement, nous esquissons des pistes pour adapter cette approche agroécologique à la gestion des viroses en betterave à sucre. Très peu de références existant pour cette culture, nous nous sommes appuyés sur une analyse semi-quantitative de la littérature scientifique consacrée aux effets des bandes fleuries sur le contrôle biologique. Ce travail complète des synthèses récentes consacrées aux IAE et qui sont soit qualitatives et générales (voir par exemple Gurr *et al.*, 2017) soit quantitatives mais basées sur un nombre relativement faible de travaux (18 articles pour Albrecht *et al.*, 2020). Nous avons étudié comment les bandes fleuries ou leurs caractéristiques influençaient les variables mesurant la régulation des ravageurs en dénombrant les effets positifs, négatifs ou neutres, au sens agronomique. Par exemple, une augmentation du nombre d'ennemis naturels dans la culture face à la bande fleurie par rapport à une situation témoin a été considérée comme un effet positif. Un corpus de 45 articles parus entre 1993 et 2021 a été constitué à partir d'une recherche par mots clefs sur Google Scholar et Web of Science, complété par les ressources documentaires de différentes structures partenaires. La méthode est détaillée dans l'annexe 1, qui renvoie également vers la liste des articles obtenus. Les articles finalement retenus pour l'analyse sont ceux qui présentaient des données quantitatives exploitables (mesures liées au contrôle biologique), obtenues en grandes cultures, avec comparaison de bandes fleuries et de bandes témoins (en sol nu ou végétation spontanée ou végétation cultivée identique à la culture dans le champ) installées en bord de parcelle et principalement en Europe. Une majorité d'études (54%) portaient sur les cultures de céréales, 17% sur le colza et 9% sur la pomme de terre. Les cultures de betterave, soja, pois, chou et maïs étaient représentées par 2 à 4 études chacune. Parmi les ravageurs étudiés, les pucerons figuraient dans 17 études. Des ennemis naturels variés ont été étudiés mais les carabes ($n = 34$ études) les coccinelles (25), les araignées (23) et les parasitoïdes (18) l'ont été plus systématiquement.

Lutte biologique par conservation et ressources apportées aux ennemis naturels

Dans les agroécosystèmes, les populations d'insectes ravageurs sont régulées par un cortège d'ennemis naturels appartenant à deux groupes fonctionnels distincts, les prédateurs (notamment coccinelles, carabes, syrphes et araignées) et les insectes parasitoïdes (Le Ralec *et al.* 2019). Chez les parasitoïdes, les femelles recherchent activement leurs hôtes pour y pondre leurs œufs et la larve se développe en consommant son hôte (Figure 1). Les pucerons sont exploités par de nombreuses espèces d'Hyménoptères parasitoïdes solitaires (une seule larve par puceron) dont l'abondance et l'activité varient selon un ensemble de propriétés pilotables des agroécosystèmes comme les pratiques agronomiques appliquées, la diversité des cultures ou encore la structure du paysage et les caractéristiques des habitats semi-naturels. Dans un contexte d'utilisation généralisée des insecticides, l'impact potentiellement considérable des ennemis naturels sur les populations de ravageurs peut passer inaperçu. Landis *et al.* (2008) ont par exemple estimé que le service de régulation naturelle du puceron du soja, *Aphis glycines*, permettait d'économiser de l'ordre de 131 millions de dollars par an sur seulement 28 % de la surface cultivée en soja aux USA.

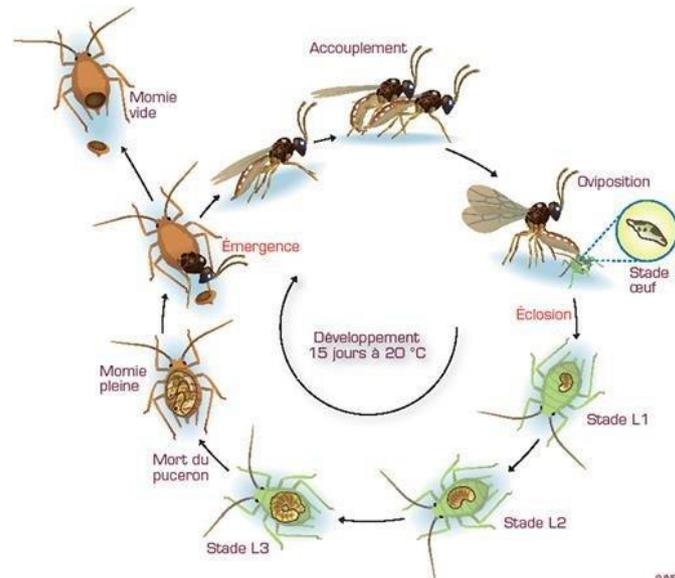


Figure 1 : Cycle de développement d'un hyménoptère parasitoïde de pucerons. Chez de nombreuses espèces, les adultes se nourrissent de nectar (floral ou extrafloral). Le miellat produit par les Hémiptères est une autre source de sucres potentiellement importante. Source : Encyclop'Aphid

La lutte biologique par conservation (Figure 2) consiste à favoriser le service de régulation des ravageurs assuré par leurs ennemis naturels présents naturellement (Holland *et al.*, 2016).

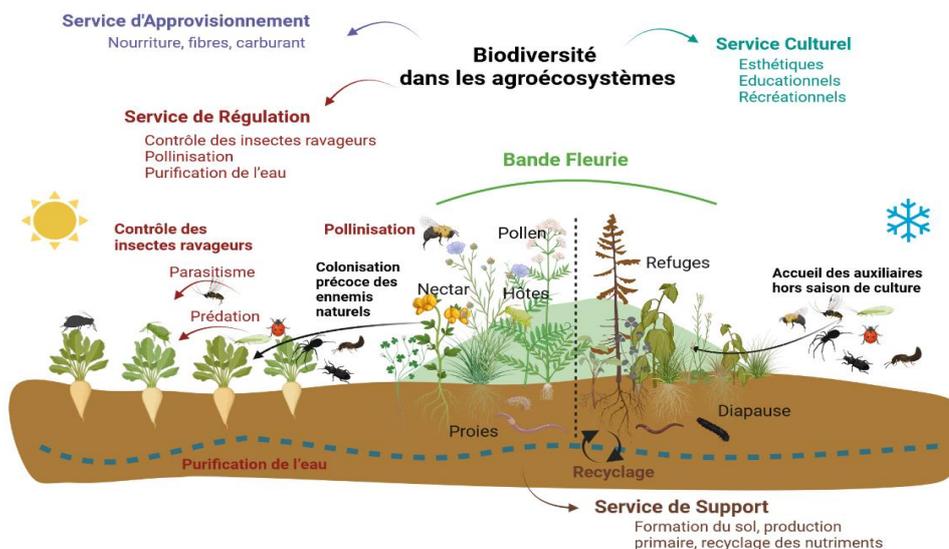


Figure 2 : Contributions d'une bande fleurie aux services écosystémiques. Focus sur le service de régulation des ravageurs de culture mobilisé en lutte biologique par conservation (création : BioRender.com)

Cette stratégie s'appuie d'une part sur la réduction des facteurs de mortalité (e.g. par traitement insecticide) et d'autre part sur l'amélioration des ressources offertes aux prédateurs et aux parasitoïdes dans et autour des cultures, jusqu'à l'échelle du paysage agricole (de quelques km² à quelques dizaines de km²) (Barbosa, 1998 ; Landis *et al.*, 2000 ; Holland *et al.*, 2016). Les différents types de ressources sont directement ou indirectement fournis par les plantes cultivées (par ex. culture pure, associations, agro-foresterie) ou non cultivées (par ex. adventices, haies) et comprennent :

- (i) des ressources alimentaires produites par des plantes fleuries et/ou nectarifères et consommées par les adultes. Il s'agit du nectar, source importante de sucres (sucrose, glucose

et fructose) et d'eau (Heil, 2011), et du pollen, source d'acides aminés et de protéines. Le miellat des pucerons, inféodés ou non à la culture, constitue une autre source de sucres souvent abondante et facilement accessible. Fréquemment exploitées par les parasitoïdes et les syrphes, ces ressources peuvent augmenter la longévité, la mobilité et la fécondité des femelles, engendrant une augmentation des taux de prédation ou de parasitisme subis par les populations de ravageurs (Gurr *et al.*, 2017 ; Damien *et al.*, 2020 ; Thomine, 2019). L'amélioration de la performance est par exemple documentée chez des parasitoïdes de pucerons des Brassicacées accédant à du nectar extra-floral en présence de leurs hôtes (Jamont *et al.*, 2013),

- (ii) des hôtes/proies alternatifs hébergés par des « plantes réservoirs » (ou plantes relais). Ces ressources facilitent l'installation précoce des ennemis naturels dans la culture ou son environnement immédiat, leur permettant de se maintenir voire de se multiplier alors que le ravageur ciblé est rare (Landis *et al.*, 2000 ; Gurr *et al.*, 2017). Chez certains parasitoïdes de pucerons cependant, un niveau de spécialisation marqué limite l'intérêt des hôtes alternatifs (Derocles *et al.*, 2014),
- (iii) des habitats peu perturbés et/ou aux conditions microclimatiques (température et humidité) favorables, offrant par exemple une protection contre les canicules, ou un abri face aux perturbations agricoles (traitements, travaux du sol etc.) (Landis *et al.*, 2000 ; Gurr *et al.*, 2017 ; Damien, 2018 ; Thomine, 2019). Cette fonction de refuge est importante dans les régions tempérées où de nombreux arthropodes participant au contrôle biologique hivernent à l'extérieur des cultures (Geiger *et al.*, 2009).

La lutte biologique par conservation peut être améliorée par la préservation et l'établissement d'IAE qui diversifient les communautés végétales et augmentent la qualité et la quantité des ressources disponibles au sein du paysage agricole (Landis *et al.*, 2000). Ces habitats semi-naturels comprennent des éléments ponctuels, comme les arbres isolés et les mares, des linéaires comme les bandes fleuries, les bandes herbeuses et enherbées ou encore les haies incluant les ripisylves, et des structures surfaciques, telles que les bois et bosquets, les zones humides, les prairies extensives, les jachères fleuries voire même les couverts d'inter-cultures (Damien *et al.*, 2017 ; Hatt *et al.*, 2018 ; Thomine, 2019). L'ensemble des IAE constitue un réseau d'habitats peu perturbés souvent gérés par les agriculteurs, dont le bon état fonctionnel est garant de la fourniture des services écosystémiques. Ainsi la lutte biologique par conservation, en s'appuyant sur l'amélioration des ressources offertes par les IAE, est susceptible de favoriser d'autres types de services comme la pollinisation mais aussi la préservation des sols et de l'eau (Figure 2).

Les bandes fleuries, des IAE au service de la régulation des ravageurs

Les bandes fleuries sont des IAE mises en place par les agriculteurs dans l'objectif principal d'améliorer le contrôle biologique des ravageurs et/ou la pollinisation des cultures. Dans une démarche agroécologique, elles devraient contribuer à limiter l'utilisation des insecticides. Les plantes de service qui les composent sont attractives pour les ennemis naturels en leur offrant des ressources nutritives abondantes (nectar, pollen, miellat des Hémiptères). Elles hébergent également des proies et des hôtes alternatifs et assurent une fonction de refuge (Twardowski *et al.*, 2005 ; Walton & Isaacs, 2011 ; Damien, 2018 ; Albrecht *et al.*, 2020 ; Hatt *et al.*, 2020).

Nous avons identifié 45 articles incluant un total de 58 études sur l'effet des bandes fleuries sur la régulation des ravageurs en grandes cultures, dont un tiers des études concernant des pucerons ravageurs de culture. Ces effets sont globalement positifs (amélioration de la gestion des ravageurs) ou neutres (Figure 3).

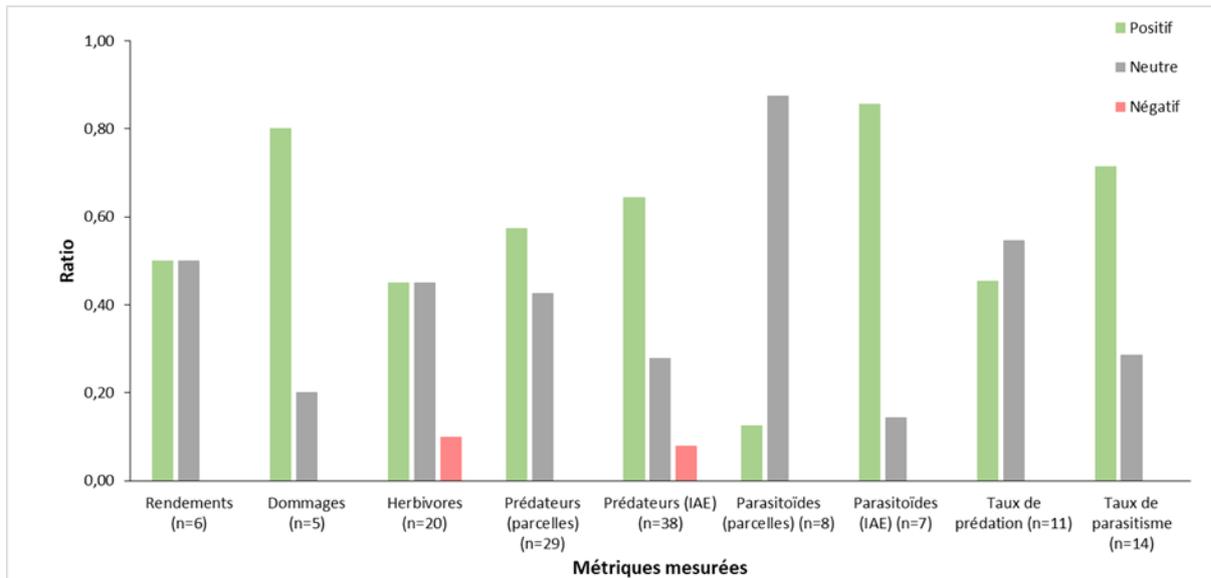


Figure 3 : Proportion d'études révélant des effets positifs (au sens agronomique, c'est-à-dire bénéfique à la culture, en vert), neutres (en gris) ou négatifs (en rouge) des bandes fleuries sur les variables mesurées : rendement de la culture, dégâts des ravageurs, abondances des herbivores, des prédateurs et des parasitoïdes au sein des parcelles ou des bandes fleuries, taux de prédation et taux de parasitisme. n indique le nombre d'études dans lesquelles la variable est présente, parmi les 58 études tirées des 45 articles analysés.

L'abondance des ennemis naturels dans les bandes fleuries, variable la plus fréquemment mesurée, est très souvent accrue par rapport aux aménagements témoins. Cet effet est rarement retrouvé pour l'abondance des parasitoïdes dans la culture mais, de façon intéressante, le taux de parasitisme des ravageurs de la culture y est généralement plus élevé. Ce constat suggère que les parasitoïdes adultes utilisent les bandes fleuries pour se nourrir (et/ou se multiplier sur des hôtes alternatifs). Ils y sont donc plus souvent capturés ou observés, mais prospectent le champ pour y exploiter leurs hôtes (pondre leurs œufs). Il y aurait donc complémentarité des deux types d'habitat et des ressources, permise par des mouvements d'allers-retours réguliers des femelles parasitoïdes. Les bandes fleuries tendent également à augmenter l'abondance des prédateurs, y compris dans la parcelle, sans qu'une amélioration du taux de prédation des ravageurs dans la parcelle ne soit systématiquement mesurée. Cependant, la prédation est plus difficile à quantifier que le parasitisme, qui dans le cas des pucerons, se manifeste sans ambiguïté par la transformation de l'hôte en momie à sa mort (Figure 1). L'augmentation des populations de prédateurs et de parasitoïdes est accompagnée d'une réduction de l'abondance des ravageurs dans environ la moitié des cas. Enfin, peu d'études se sont intéressées aux dégâts et aux rendements mais toutes constatent au mieux un bénéfice agronomique et au pire une absence d'effet des bandes fleuries. Si nous ne pouvons exclure un biais de publication au profit des études mettant en évidence un effet significatif des bandes fleuries, ces résultats corroborent ceux obtenus par Albrecht *et al.* (2020) à partir d'une synthèse quantitative portant sur 18 études menées dans des contextes agricoles variés en Europe, aux Etats-Unis et en Nouvelle-Zélande. Ces auteurs ont estimé que l'enrichissement de la communauté locale des ennemis naturels grâce aux bandes fleuries augmentait de 16 % en moyenne le contrôle biologique mesuré dans les cultures avoisinantes (sans modification du rendement, toutefois, que ce soit à la hausse ou à la baisse). De façon intéressante, l'effet des haies était comparable en tendance mais non significatif.

Bien que très minoritaires, deux articles rapportent des situations problématiques mais non élucidées, dans lesquelles la présence d'une bande fleurie est associée à une augmentation de l'abondance des ravageurs malgré une abondance ou une diversité plus forte en prédateurs et un taux de parasitisme plus important (Denys et Tschamtker, 2002 ; Török *et al.*, 2021). Dans 4 autres articles, il a aussi été montré une diminution de l'abondance/diversité des prédateurs dans l'IAE mais sans effet sur leurs abondances dans la parcelle et sans que les conséquences sur l'abondance des ravageurs soient quantifiées (Figure

3). Ces résultats pointent des limites attendues (Tschardt *et al.*, 2016 ; Damien, 2018) lorsque la conception de la bande fleurie (par ex. choix des espèces de fleurs) est mal adaptée à la situation phytosanitaire ou au contexte local (climat et paysage, voir plus loin). La prédation intragilde et les interactions trophiques de niveau supérieur pourraient aussi limiter le rôle positif des bandes fleuries. Ainsi les hyperparasitoïdes, qui exploitent les parasitoïdes primaires, peuvent eux aussi tirer profit d'une source de nectar à proximité des plantes cultivées (Jeavons *et al.*, 2021).

Un autre axe d'analyse concerne la portée spatiale des effets produits par la bande fleurie. La capacité de dispersion des parasitoïdes et de certains prédateurs n'excède souvent pas quelques dizaines de mètres. De plus, une forte attractivité du mélange fleuri peut limiter la propension des ennemis naturels à s'éloigner pour prospecter la culture adjacente, notamment dans le cas des femelles parasitoïdes qui doivent alterner entre recherche de nectar et recherche des hôtes. Ainsi, Albrecht *et al.* (2020) montrent que, même amélioré par la présence d'une bande fleurie, le niveau du contrôle biologique décroît exponentiellement avec la distance au bord de champ. Ce phénomène pourrait expliquer une partie des résultats neutres observés dans notre analyse (Figure 3). Cependant, les ravageurs colonisent fréquemment les bordures des parcelles avant de gagner le centre du champ (Tougeron *et al.*, 2022). Les bandes fleuries, malgré un rayon d'action limité, pourraient donc être efficaces pour limiter la diffusion des ravageurs dans la culture depuis son pourtour.

Facteurs de variation de l'effet des bandes fleuries sur la régulation des ravageurs

Plusieurs caractéristiques des bandes fleuries influencent leur efficacité et pourraient être raisonnées avant leur implantation (Albrecht *et al.*, 2020 ; Tschumi *et al.*, 2016a ; Tschumi *et al.*, 2015 ; Wäckers & Van Rijn, 2012). Il s'agit en particulier de traits floraux et de qualité du nectar, en lien notamment avec la composition spécifique du mélange, de la pérennité des plantes installées, des dimensions de la bande, de son âge ou encore de sa période d'implantation. Ces caractéristiques pourraient être adaptées en fonction du climat.

Les hyménoptères parasitoïdes et les syrphes sont dotés d'un appareil buccal court ne leur permettant d'exploiter que des fleurs à corolle courte, généralement de petite taille (par ex. les fleurs de sarrasin). Par conséquent, la morphologie florale est un critère à prendre en compte pour composer le mélange fleuri (Baker & Baker, 1983 ; Petanidou, 2005). Certaines espèces de plantes, comme le bleuet ou la vesce, sont également capables de produire du nectar extra-floral directement accessible (Damien, 2018). De plus, le volume de nectar produit par fleur et par plante ainsi que sa composition et sa concentration en sucres varient fortement entre espèces (Heil, 2011). Certains sucres agissent davantage sur la fécondité et d'autres sur la longévité des parasitoïdes (Tompkins *et al.*, 2010 ; Damien *et al.*, 2020). Ces effets différentiels sur les traits de vie (Wäckers, 2001) pourraient être pris en compte pour composer un mélange fleuri adapté aux ennemis naturels à favoriser. Cependant, bien que la qualité du nectar détermine pour partie la communauté d'insectes visitant une espèce de fleur (Baker & Baker 1983 ; Petanidou, 2005), d'autres caractéristiques peuvent expliquer son attractivité (Russel, 2015). Par exemple, la moutarde de couleur jaune est plus attractive pour les parasitoïdes que le sarrasin de couleur blanche dont la qualité du nectar est pourtant supérieure (Damien *et al.*, 2019). Le miellat produit par les Hémiptères hébergés dans la bande fleurie peut aussi compléter les ressources en nectar.

Les études analysées (voir aussi Wäckers & van Rijn, 2012) fournissent de nombreuses informations sur la composition spécifique des bandes fleuries. Elles permettent d'identifier quelques espèces fréquemment associées à un impact positif sur la régulation des ravageurs : *Daucus carota* (Apiaceae), *Achillea millefolium* (Asteraceae), *Centaurea cyanus* (Asteraceae), *Chrysanthemum leucanthemum* (Asteraceae), *Lotus corniculatus* (Fabaceae), *Trifolium pratense* (Fabaceae), *Papaver rhoeas* (Lamiaceae) et *Fagopyrum esculentum* (Polygonaceae) (Tableau 1). Cette liste indicative reste cependant à adapter au contexte local, aux ravageurs visés et à leurs ennemis naturels préférentiels.

Tableau 1 : Espèces de plantes les plus souvent associées (plus de 10 fois) à un effet positif des bandes fleuries sur les différentes variables liées au contrôle biologique des ravageurs. Calculs réalisés à partir d'une compilation des données fournies dans 58 études tirées de 45 articles.

Famille	Espèce	Rendements	Domages	Herbivores	Prédateurs	Parasitoïdes
Apiaceae	<i>Anethum graveolens</i>		2	3	6	
	<i>Coriandrum sativum</i>		2	4	5	
	<i>Daucus carota</i>				10	4
Asteraceae	<i>Achillea millefolium</i>	2		4	12	5
	<i>Anthemis arvensis</i>		2	3	5	
	<i>Centaurea cyanus</i>		3	5	14	4
	<i>Centaurea jacea</i>		2	3	6	2
	<i>Chrysanthemum leucanthemum</i>	2		4	10	4
Cichorioideae	<i>Cichorium intybus</i>	2		2	6	
Fabaceae	<i>Lotus corniculatus</i>	2		3	8	2
	<i>Trifolium pratense</i>			2	7	3
Papaveracea	<i>Papaver rhoeas</i>		3	5	10	2
Polygonaceae	<i>Fagopyrum esculentum</i>	2	3	5	13	3

Sur les 51 études (88%) qui mentionnaient la largeur de la bande fleurie, 33 portaient sur des bandes plutôt étroites, comprises entre 1,5 m et 5 m de large, et 18 sur des bandes plus importantes, allant jusqu'à 25 m de large dans quelques études. Quelle que soit la variable retenue (abondances des ravageurs, des ennemis naturels, taux de parasitisme ou de prédation), aucun effet de l'appartenance de la bande fleurie à l'une ou l'autre de ces deux classes n'a pu être mis en évidence.

L'effet de l'âge des bandes fleuries peut être abordé à partir des 47 études (81%) le précisant. Les bandes fleuries de plus d'un an ($n = 20$) sont plus souvent associées à une amélioration de la situation sanitaire dans la culture que celles de moins d'un an ($n = 27$). Ce résultat contredit l'absence d'effet de l'âge constaté par Albrecht *et al.* (2020) sur un corpus d'études plus restreint. Aucun effet particulier des types d'espèces composant la bande fleurie, espèces annuelles ($n = 20$), pérennes ($n = 8$) ou des deux types ($n = 22$), n'émerge de l'analyse des 50 études mentionnant ce facteur.

Dans la plupart des travaux analysés, les bandes fleuries ont été implantées pour fleurir au printemps. Les quelques expériences réalisées dans des régions à hivers doux montrent qu'il est possible d'implanter des bandes fleuries composées d'annuelles à l'automne, pour une floraison hivernale (Damien *et al.*, 2017). La présence de proies et d'hôtes alternatifs, mais aussi de nectar, dans ces bandes fleuries pourrait participer au développement précoce des populations d'ennemis naturels (Damien, 2018 ; Tougeron *et al.*, 2018).

Le faible nombre d'études disponibles n'a pas permis d'évaluer l'effet des modalités d'installation de la bande fleurie (date de semis, position en bord de champ ou dans le champ etc.). De manière générale, la faisabilité technique et l'acceptabilité par les agriculteurs doivent être prises en compte, invitant à un travail de co-conception. Les espèces végétales choisies doivent être peu onéreuses à l'achat des semences, peu exigeantes, de préférence non hôtes des ravageurs (ou jouant un rôle marginal dans l'infestation de la culture) et ne pas présenter de risque de salissement de la culture. Dans le cas de bandes pérennes, le mélange d'espèces doit être suffisamment générique pour couvrir les différents

complexes cultures-ravageurs se succédant au cours de la rotation, et ne pas constituer un réservoir de ravageurs.

Parce qu'il agit conjointement sur la phénologie des plantes (par ex. période de floraison) et des insectes (par ex. période de diapause), le climat apparaît également comme un facteur important à prendre en compte. Un déphasage temporel entre disponibilité des ressources offertes par les IAE et pullulation des ravageurs dans les champs pourrait limiter l'effet suppressif du service de régulation. Le contexte climatique est pourtant largement négligé dans les études portant sur les bandes fleuries et plus généralement sur les IAE. Les expérimentations sont en effet le plus souvent menées dans un contexte donné. Afin d'analyser l'effet du climat à partir d'un nombre satisfaisant de combinaisons entre variables mesurant la régulation des ravageurs et type de climat, nous avons élargi notre recherche bibliographique aux études s'intéressant à l'effet des bandes enherbées ou des haies. Parmi les 65 articles obtenus (lien vers la liste en annexe 1), nous en avons retenu 60 (dont 17 ne traitant pas des bandes fleuries) correspondant aux études menées dans des conditions propices à la culture de la betterave. Leur contexte climatique a été caractérisé en climat océanique ($n = 53$ études), continental (18) ou tempéré de transition (18). Un tiers des études compilées concernait des pucerons ravageurs de culture. Peu de variables ($n = 3$) ont été mesurées sous climats tempéré ou continental et aucune liée aux parasitoïdes. Davantage de variables sont disponibles pour le climat océanique (7). Quel que soit le contexte climatique, la fréquence des effets positifs des IAE l'emporte largement sur celle des effets négatifs (Figure 4). En contexte climatique océanique, les effets sur les parasitoïdes sont particulièrement favorables. Ce résultat pourrait être imputé à la perte de la diapause hivernale en conditions douces, qui permet la colonisation précoce des cultures (Tougeron *et al.*, 2018, 2022), et/ou à un meilleur développement des IAE.

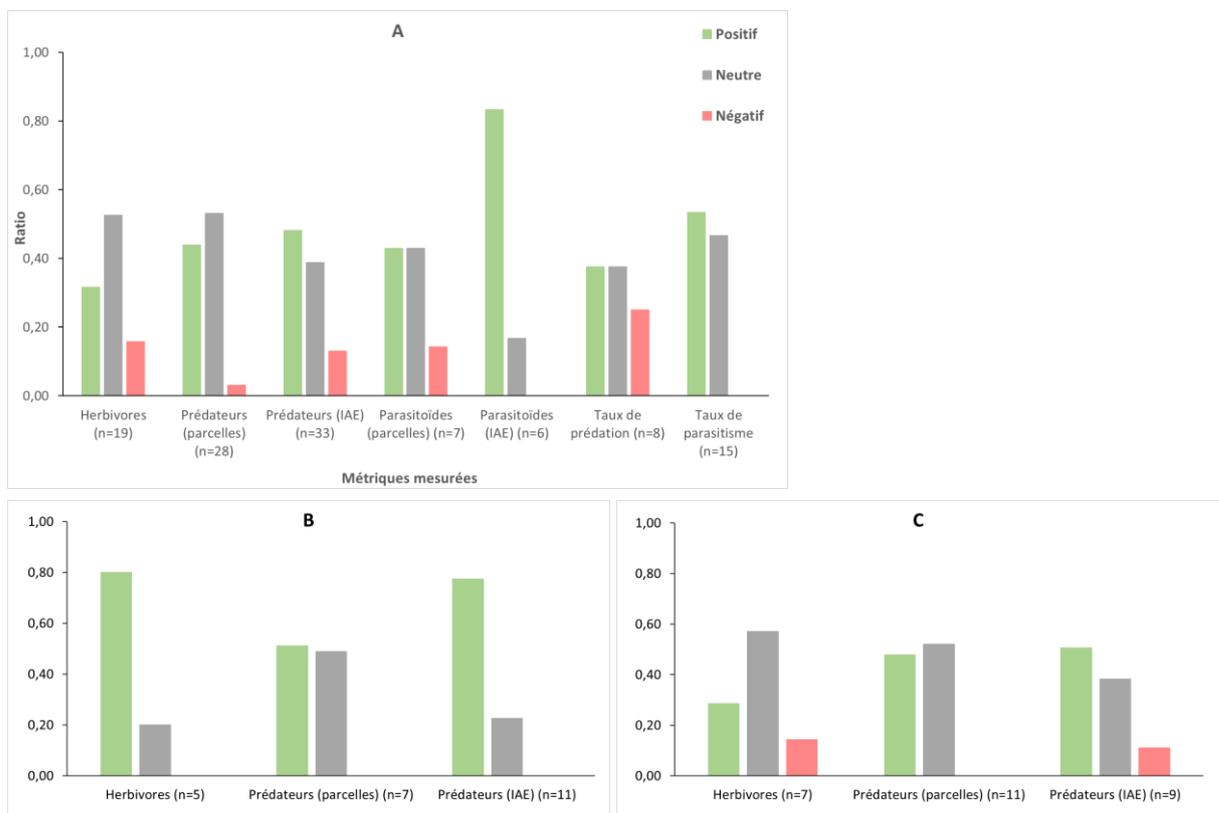


Figure 4 : Proportion d'études révélant des effets positifs (au sens agronomique, c'est-à-dire bénéfique à la culture, en vert), neutres (en gris) ou négatifs (en rouge) des IAE (bandes fleuries, bandes enherbées, haies) sur les différentes variables liées au contrôle biologique des ravageurs. (A) : études conduites sous climat océanique ($n = 53$) ; (B) climat tempéré ($n = 18$) ; (C) climat continental ($n = 18$).

Démarche pour développer l'approche bandes fleuries en contexte betteravier

Pour concevoir des mélanges fleuris favorisant la régulation de *Myzus persicae* (« puceron vert ») et *Aphis fabae* (« puceron noir »), principaux responsables des épidémies de jaunisses en culture de betterave sucrière, il est utile d'identifier leurs principaux ennemis naturels. En Europe et toutes cultures confondues, 31 espèces d'ennemis naturels sont mentionnées dans la littérature pour *M. persicae* et 21 espèces pour *A. fabae* (Tableau 2 ; voir annexe 1 pour la méthode de recherche bibliographique). Davantage d'espèces de parasitoïdes s'attaquent au puceron vert ($n = 20$) qu'au puceron noir ($n = 7$). Deux espèces fréquemment mentionnées, *Aphidius colemani* et *Lysiphlebus testaceipes*, sont communes aux deux pucerons hôtes. Les prédateurs du puceron noir comprennent de nombreuses espèces ou genres de coccinelles ($n = 9$; dont la plus fréquemment mentionnée est *Hippodamia variegata*), trois espèces de punaises prédatrices et une espèce de chrysope. Seules deux espèces de coccinelles sont notées prédatrices du puceron vert, en même temps que deux espèces de punaises et de cantharides ainsi que cinq espèces de carabes. Les cortèges de prédateurs sont donc relativement distincts, même si trois espèces généralistes sont communes aux deux pucerons (coccinelle à sept points et punaises du genre *Anthocoris*).

Tableau 2 : Recensement des ennemis naturels (EN) des 2 principaux pucerons vecteurs des virus de la jaunisse en betterave à sucre, sur toutes cultures. Les occurrences ont été dénombrées dans 12 articles pour *Myzus persicae* et 22 articles pour *Aphis fabae*. En gras, les EN partagés par les 2 pucerons.

Type d'EN	Espèce d'EN	Occurrences des EN	
		<i>Aphis fabae</i>	<i>Myzus persicae</i>
Parasitoïde	<i>Aphidius colemani</i>	3	6
	<i>Aphidius matricariae</i>	2	1
	<i>Aphidius avenae</i>		1
	<i>Aphidius ervi</i>		1
	<i>Aphidius nigripes</i>		1
	<i>Aphidius rhopalosiphi</i>		1
	<i>Aphidius transcaspicus</i>		1
	<i>Aphidius uzbekistanicus</i>		1
	<i>Aphelinus asychis</i>		1
	<i>Aphelinus semiflavus</i>		1
	<i>Binodoxys angelicae</i>	1	
	<i>Binodoxys similis</i>		1
	<i>Charipinae sp.</i>	1	
	<i>Dandrocerus sp.</i>	1	
	<i>Diaeretiella rapae</i>		3
	<i>Ephedrus persicae</i>		1
	<i>Ephedrus plagiator</i>		1
	<i>Lysiphlebus fabarum</i>	4	
	<i>Lysiphlebus testaceipes</i>	2	3
	<i>Praon abjectum</i>		1

	<i>Praon myzophagum</i>	1	
	<i>Praon occidentale</i>	1	
	<i>Toxares deltiger</i>	1	
	<i>Toxares shigai</i>	1	
Prédateur	<i>Anthocoris nemoralis</i>	1	1
	<i>Anthocoris nemorum</i>	1	1
	<i>Cantharis lateralis</i>		1
	<i>Cantharis rufa</i>		1
	<i>Cheilomenes propinqua</i>	2	
	<i>Chilocorus calvus</i>	1	
	<i>Chrysoperla carnea</i>	2	
	<i>Coccinella septempunctata</i>	2	1
	<i>Coccinella undecimpunctata</i>		1
	<i>Exochomus spp.</i>	1	
	<i>Harmonia axyridis</i>	1	
	<i>Henosepilachna spp.</i>	1	
	<i>Hippodamia convergens</i>	1	
	<i>Hippodamia variegata</i>	5	
	<i>Orius albidipennis</i>	2	
	<i>Propylaea quatuordecimpunctata</i>	1	
	<i>Bembidion lampros</i>		1
	<i>Harpalus rufipes</i>		1
	<i>Patrobus atrorufus</i>		1
	<i>Pterostichus cupreus</i>		1
	<i>Trechus quadristriatus</i>		1

Il est certain que ces listes d'espèces sont incomplètes. Aucune espèce de syrphé ou d'araignée n'est mentionnée par exemple. Pour identifier les ennemis naturels actifs en culture de betterave, des campagnes de piégeage sont menées sur différents sites dans le cadre du projet IAE-Betterave. Elles devraient apporter des informations nouvelles sur le niveau global de régulation exercé aux dépens des pucerons vecteurs ainsi que sur le taux de parasitisme associé à chacune des espèces de parasitoïdes rencontrées. Les observations faites en 2022 ont d'ores et déjà permis d'avérer le parasitisme des deux pucerons par les parasitoïdes *Aphidius matricariae* et *Diaeretiella rapae*, alors que cette seconde espèce n'était pas associée à *A. fabae* dans notre corpus bibliographique. L'ensemble de ces données permettra d'affiner le profil des plantes fleuries à mélanger en bandes selon les ressources à fournir. Le caractère généraliste des pucerons vecteurs des viroses constituera une contrainte forte pour le choix des espèces de fleurs à installer.

Le cas du parasitoïde *A. matricariae* illustre bien comment la connaissance des interactions biotiques pourrait servir l'approche bandes fleuries. Il s'agit d'un complexe de biotypes au statut incertain (Derocles *et al.* 2016) capable d'exploiter des hôtes alternatifs sur les Poacées en période hivernale et de parasiter

M. persicae sur le colza d'hiver et les Brassicacées d'inter-cultures. Des aménagements permettant l'installation de ce complexe avant la levée des betteraves pourraient contribuer à la gestion des pucerons vecteurs des jaunisses mais aussi d'autres pucerons dans les cultures avoisinantes. Il conviendrait cependant de s'assurer que la spécialisation d'hôte n'empêche pas l'exploitation croisée des pucerons hôtes alternatifs dans la bande et des pucerons cibles dans les cultures. Le sarrasin, la moutarde, le bleuet et la féverole sont des espèces florales qui peuvent favoriser ce parasitoïde (Damien, 2018). Cependant, la moutarde est une plante hôte des pucerons verts de la betterave sucrière.

Un aspect original du projet IAE-Betterave est d'évaluer l'influence du contexte paysager et climatique sur l'effet d'une bande fleurie sur la régulation des pucerons. En effet, la zone de production de betterave sucrière est vaste et couvre des territoires contrastés. Les paysages y sont parfois marqués par un syndrome d'intensification agricole (pauvreté en habitats semi-naturels, rotations courtes, usage prononcé des intrants) généralement associé à une perte de biodiversité végétale cultivée et spontanée (Jeavons, 2020) pouvant affecter les ennemis naturels des pucerons qui se déplacent dans la mosaïque paysagère agricole pour y rechercher leurs ressources. Cependant, l'impact du paysage varie en fonction de la distribution des ressources et de la capacité de dispersion de chaque organisme (Fahrig *et al.*, 2011). L'installation de bandes fleuries en zone betteravière permettra de tester l'hypothèse dite du « paysage de complexité intermédiaire » (Tscharrnke *et al.*, 2012 ; Martin *et al.*, 2019) qui conduit à postuler que la régulation des ravageurs sera faiblement améliorée par les bandes fleuries dans un paysage homogène de grandes cultures où les ennemis naturels sont trop peu abondants, tout comme dans un paysage très complexe où les ennemis naturels et leurs ressources vitales sont déjà très abondants, annihilant la plus-value d'une nouvelle IAE. Les résultats documentés par la littérature récente ne confirment cependant pas toujours cet attendu théorique (Albrecht *et al.*, 2020 ; Hoffmann *et al.*, 2021).

Les résultats de l'analyse de l'effet du climat sur l'efficacité des bandes fleuries (voir partie précédente), bien que très généraux, suggèrent que la composition de ces bandes pourrait être adaptée aux différentes régions betteravières métropolitaines. Sous climat océanique à tempéré, il s'agirait de privilégier des espèces non gélives à floraison en sortie d'hiver, afin de favoriser l'arrivée précoce et l'activité des parasitoïdes à proximité des cultures de betteraves. En climat continental, les espèces à floraison automnale formant un couvert hivernal persistant et offrant un site de diapause hivernale aux parasitoïdes seraient à recommander. Le mélange pourrait être complété par des espèces à floraison printanière fournissant des ressources (nectar et pollen) aux ennemis naturels en début de saison culturale.

Afin de documenter l'effet combiné des caractéristiques paysagères et du contexte climatique sur l'efficacité des bandes fleuries pour la régulation des ravageurs, nous suivons actuellement avec l'ITB (Institut Technique de la Betterave) un ensemble de parcelles avec bandes fleuries dans un réseau de fermes-pilotes disséminées sur la zone de production.

Conclusion générale

L'analyse semi-quantitative des 58 études consacrées à l'effet des bandes fleuries sur la régulation des populations de ravageurs par leurs ennemis naturels montre que ces IAE sont prometteuses pour améliorer le contrôle biologique des ravageurs en grandes cultures. Elle confirme les résultats d'une synthèse quantitative récente qui a permis d'estimer à 16% cette amélioration du service de régulation, toutes variables confondues ($n = 18$ études ; Albrecht *et al.*, 2020). Dans le cas des pucerons vecteurs des jaunisses de la betterave, ce constat reste à confirmer sur le terrain. Les bandes fleuries constituent un levier agroécologique à associer, dans des stratégies de protection de la culture, à d'autres méthodes fondées par exemple sur la manipulation du comportement des pucerons (odeurs répulsives et attractives ou confusion visuelle par paillage) ou le développement de variétés résistantes ou de solutions curatives (par ex. aphicides). Ces stratégies restent largement à élaborer à partir des travaux conduits dans les différents projets du PNRI, pour obtenir des alternatives crédibles aux néonicotinoïdes.

Les ressources apportées aux ennemis naturels peuvent être ajustées en adaptant la composition des mélanges fleuris aux espèces de parasitoïdes et de prédateurs recensées localement, en fonction du ravageur ciblé (ici les pucerons vecteurs des jaunisses) et des différents contextes paysager et climatique à couvrir. Par ailleurs, les mélanges proposés doivent disposer de solides références techniques d'évaluation et de mise en œuvre, et s'installer avec une bonne fiabilité dans des conditions climatiques et pédologiques variables à partir de semences disponibles et faciles d'emploi. Ces mélanges pourront aussi viser la régulation de plusieurs ravageurs, en particulier quand ils sont pérennes et bordent une parcelle dans laquelle une succession de cultures est pratiquée (par ex. betterave/céréale/oléoprotéagineux). Enfin, à l'échelle du territoire, un remaniement de l'espace agricole pour intégrer un réseau fonctionnel d'IAE (surface dédiée suffisante et connectivité satisfaisante), en tenant compte de la portée des effets attendus (par ex. distance d'effet d'une bande fleurie) devra être préconisé. Cette démarche implique un consensus entre acteurs et une volonté partagée pour une mise en œuvre collective. Elle pourra s'appuyer sur les outils issus du Pacte vert pour l'Europe (*European Green Deal*) qui vise une augmentation de 10 % des éléments à « haute diversité biologique » à l'horizon 2030.

Références

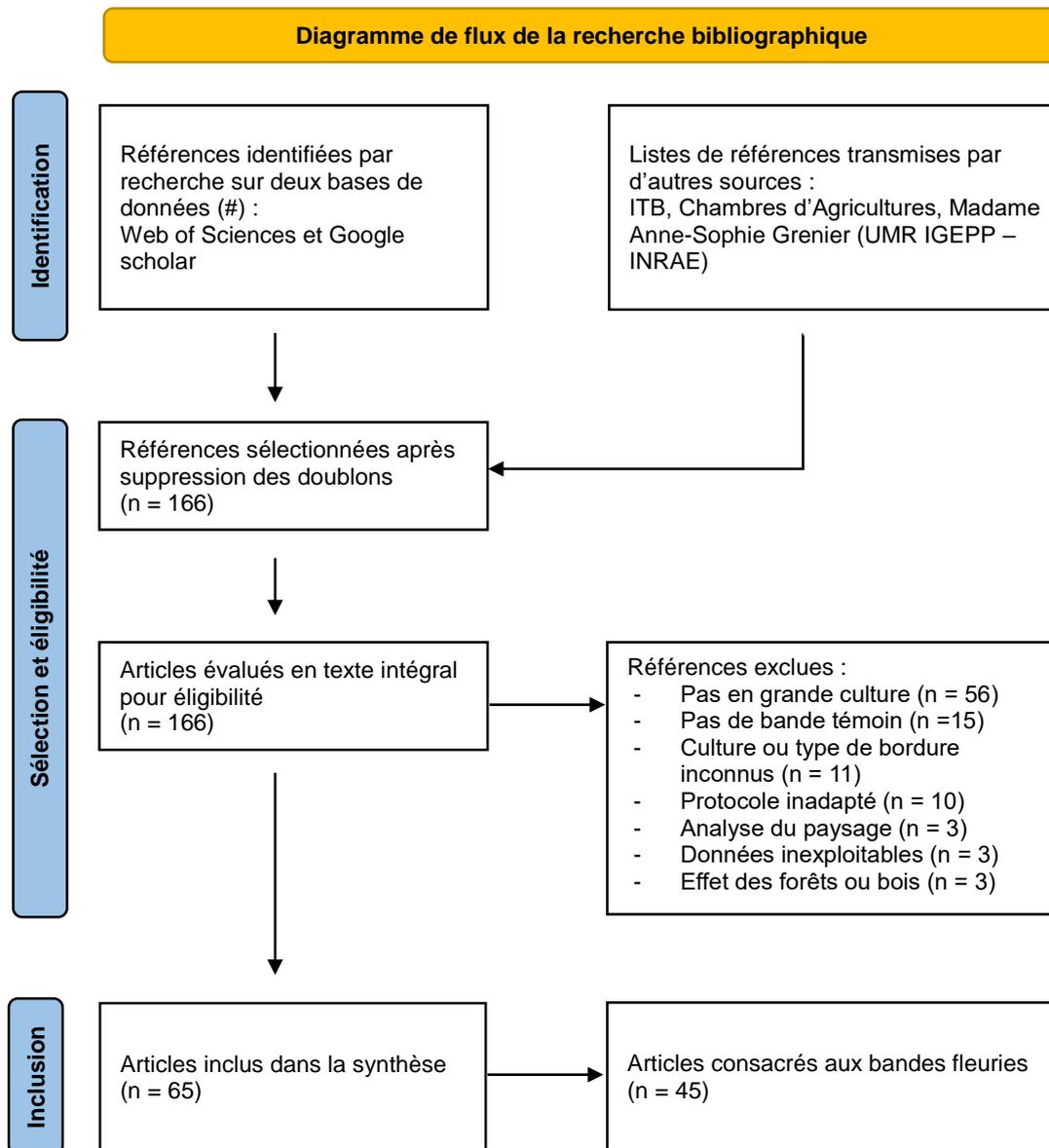
- Albrecht M., Kleijn D., Williams N.M., Tschumi M., Blaauw B.R., Bommarco R., Campbell A.J., Dainese M., Drummond F.A., Entling M.H., 2020. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis. *Ecology letters* 23, 1488-1498.
- Anses, 2021. Efficacité des traitements alternatifs aux néonicotinoïdes pour lutter contre les pucerons de la betterave (p. 132) [Saisine 2020-SA-0102].
- ARTB, 2022. Evaluer les pertes liées à la jaunisse - Retour d'expérience 2020 (19 p.) https://www.artb-france.com/images/syntheses/1-politiques-agricoles-gestion-des-risques/PNRI_projet_GRECOS_Retour_exprience_2020.pdf
- Baker H. G., Baker I., 1983. A brief historical review of the chemistry of floral nectar. In: *The Biology of nectaries*, 126–152. Columbia Univ. Press, New York.
- Barbosa P.A. (Ed.), 1998. *Conservation biological control*. Elsevier.
- Biancardi E., McGrath J.M., Panella L.W., Lewellen R.T., Stevanato P., 2010. Sugar Beet. In: J.E. Bradshaw (eds), *Root and Tuber Crops*, 173-219. Springer.
- Clover G.R.G., Azam-Ali S.N., Jaggard K.W., Smith H.G., 1999. The effects of beet yellows virus on the growth and physiology of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Plant pathology* 48, 129-138.
- Damien M., Le Lann C., Desneux N., Alford L., Al-Hassan D., Georges R., Van Baaren J., 2017. Change in plant phenology during winter increases pest control but not trophic link diversity. *Agriculture Ecosystems and Environment* 247, 418-425.
- Damien M., Barascou L., Ridet A., Van Baaren J., Le Lann C., 2019. Food or host: do physiological state and flower type affect foraging decisions of parasitoids? *Behavioral Ecology and Sociobiology* 73, 1-12.
- Damien M., Llopis S., Desneux N., van Baaren J., Le Lann C., 2020. How does floral nectar quality affect life history strategies in parasitic wasps? *Entomologia Generalis* 40, 147-156.
- Damien M., 2018. Favoriser les ennemis naturels de ravageurs par la diversité végétale dans un contexte hivernal. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France.
- Denys C., Tscharntke T., 2002. Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows. *Oecologia* 130, 315-324.
- Derocles S.A.P., Le Ralec A., Besson M.M., Maret M., Walton A., Evans D.M., Plantegenest M., 2014. Molecular analysis reveals high compartmentalization in aphid–primary parasitoid networks and low parasitoid sharing between crop and noncrop habitats. *Molecular Ecology* 23, 3900-3911.
- Derocles S.A.P., Plantegenest M., Rasplus J.-Y., Marie A., Evans D.M., Lunt D.H., Le Ralec A., 2016. Are generalist Aphidiinae (Hym. Braconidae) mostly cryptic species complexes? *Systematic Entomology* 41, 379-391.
- Fahrig L., Baudry J., Brotons L., Burel F.G., Crist T.O., Fuller R.J., Sirami C., Siriwardena G.M., Martin J.-L., 2011. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes: Heterogeneity and biodiversity. *Ecology Letters* 14, 101–112.
- Francis F., Then C., Francis A., Gbangbo Y.A.C., Iannello L. Ben Fekih I., 2022 Complementary Strategies for Biological Control of Aphids and Related Virus Transmission in Sugar Beet to Replace Neonicotinoids. *Agriculture* 12, 1663.
- Geiger F., Wäckers F.L. Bianchi F.J.J.A., 2009. Hibernation of predatory arthropods in semi-natural habitats. *BioControl* 54, 529–535.
- Goulson D., 2013. An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology* 50, 977-987.
- Gurr G.M., Wratten S.D., Landis D.A., You M., 2017. Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual review of entomology* 62, 91-109.
- Hatt S., Boeraeve F., Artru S., Dufrêne M., Francis F., 2018. Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: an agroecological perspective. *Science of the Total Environment* 621, 600-611.

- Hatt S., Francis F., Xu Q., Wang S., Osawa N., 2020. Perennial flowering strips for conservation biological control of insect pests: From picking and mixing flowers to tailored functional diversity. In: Y. Gao, H. Hokkanen, I. Menzler-Hokkanen (eds), Integrative biological control, Progress in Biological Control Series, 57-71. Springer.
- Hauer M., Hansen A.L., Manderyck B., Olsson Å., Raaijmakers E., Hanse B., Stockfisch N., Märlander B., 2017. Neonicotinoids in sugar beet cultivation in Central and Northern Europe: Efficacy and environmental impact of neonicotinoid seed treatments and alternative measures. *Crop Protection* 93, 132-142.
- Heil M., 2011. Nectar: generation, regulation and ecological functions. *Trends in Plant Science* 16, 191–200.
- Heno S., Viou L., Khan M.F., 2018. Sugar beet production in France. *Sugar tech* 20, 392-395.
- Hoffmann H., Peter F., Hermann J.D., Donath T.W., Diekötter T., 2021. Benefits of wildflower areas as overwintering habitats for ground-dwelling arthropods depend on landscape structural complexity. *Agriculture, Ecosystems Environment* 314, 107421.
- Holland J.M., Bianchi F.J., Entling M.H., Moonen A.-C., Smith B.M., Jeanneret P., 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest management science* 72, 1638-1651.
- Hossain R., Menzel W., Lachmann C., Varrelmann M., 2021. New insights into virus yellows distribution in Europe and effects of beet yellows virus, beet mild yellowing virus, and beet chlorosis virus on sugar beet yield following field inoculation. *Plant Pathology* 70, 584-593.
- Institut Technique de la Betterave, 2021. Situation jaunisse au 17 septembre 2021. Recherche et expertise au service de la filière betteravière. <https://www.itbfr.org/tous-les-articles/article/news/situation-jaunisse-au-17-septembre-2021/>. Consulté le 10/12/2022.
- Jactel H., Verheggen F., Thiéry D., Escobar-Gutiérrez A. J., Gachet E., Desneux N., Group N. W., 2019. Alternatives to neonicotinoids. *Environment international* 129, 423-429.
- Jamont M., Crépellière S., Jaloux B., 2013. Effect of extrafloral nectar provisioning on the performance of the adult parasitoid *Diaeretiella rapae*. *Biological Control* 65, 271-277.
- Jeavons E., 2020. Stratégies de diversification végétale et interactions entre insectes bénéfiques floricoles : quels impacts sur les communautés d'ennemis naturels et de pollinisateurs et sur le contrôle biologique des phytophages ? Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France.
- Jeavons E., van Baaren J., Le Ralec A., Buchard C., Duval F., Llopis S., Postic E., Le Lann C., 2021. Third and fourth trophic level composition shift in an aphid-parasitoid-hyperparasitoid food web limits aphid control in an intercropping system. *Journal of Applied Ecology* 59, 300-313.
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* 45, 175-201.
- Landis D.A., Gardiner M.M., van der Werf W., Swinton S.M., 2008. Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 20552–20557.
- Le Ralec A., Le Féon V., Le May C., Tricault Y., 2019. Caractéristiques écologiques des organismes impliqués dans les processus de régulation naturelle et de pollinisation. In : Paysage, biodiversité fonctionnelle et santé des plantes, 1ère éd., Editions Quae, 240 p. Sciences en Partage (Quae).
- Martin E.A., Dainese M., Clough Y., ..., Steffan-Dewenter I., 2019. The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology Letters* 22, 1083–1094.
- Petanidou T., 2005. Sugars in Mediterranean Floral Nectars: An Ecological and Evolutionary Approach. *Journal of Chemical Ecology* 31, 1065–1088.
- Russel M., 2015. A meta-analysis of physiological and behavioral responses of parasitoid wasps to flowers of individual plant species. *Biological Control* 82, 96-103.
- Schop S., Kloth K.J., Raaijmakers E., van der Vlucht R.A.A., 2022. The effect of mature plant resistance in sugar beet (*Beta vulgaris* spp. *Vulgaris*) on survival, fecundity and behaviour of green peach aphids (*Myzus persicae*). *Bulletin of Entomological Research* 112, 707-714.

- Tompkins J.-M.L., Wratten S.D., Wäckers F.L., 2010. Nectar to improve parasitoid fitness in biological control: Does the sucrose:hexose ratio matter? *Basic and Applied Ecology* 11, 264–271.
- Thomine E., 2019. Effet de la diversification spatiale et temporelle des cultures à l'échelle du paysage agricole sur le biocontrôle et les ravageurs de culture. Thèse de Doctorat, COMUE Université Côte d'Azur, France.
- Török E., Zieger S., Rosenthal J., Földesi R., Gallé R., Tscharncke T., Batáry P., 2021. Organic farming supports lower pest infestation, but less natural enemies than flower strips. *Journal of Applied Ecology* 58, 2277-2286.
- Tougeron K., Damien M., Le Lann C., Brodeur J., van Baaren J., 2018. Rapid responses of winter aphid-parasitoid communities to climate warming. *Frontiers in Ecology and Evolution* 6, 173.
- Tougeron K., Couthouis E., Hecq F., Barascou L., Baudry J., Boussard H., Burel F., Couty A., Doury G., Francis C., Le Roux V., Marrec R., Pétilion J., Spicher F., Hance T., van Baaren J., 2022. Where and when the biological control service can be maximized? *Science of the Total Environment* 822, 153569.
- Tscharncke T., Tylianakis J.M., Rand T.A., ..., Westphal C., 2012. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biological Reviews* 87, 661–685.
- Tscharncke T., Karp D.S., Chaplin-Kramer R., Batáry P., DeClerck F., Gratton C., ... Zhang W., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control—Five hypotheses. *Biological Conservation* 204, 449-458.
- Tschumi M., Albrecht M., Collatz J., Dubsy V., Entling M.H., Najar-Rodriguez A.J., Jacot K., 2016. Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops. *Journal of applied ecology* 53, 1169-1176.
- Tschumi M., Albrecht M., Entling M.H., Jacot K., 2015. High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282, 20151369.
- Twardowski J.P., Hurej M., Klukowski Z., 2005. The effect of the strip-management on reduction of *Aphis fabae* (Homoptera: Aphididae) populations by predators on sugar beet crop. *Journal of Plant Protection Research* 45, 213-219.
- Verheggen F., Barrès B., Bonafos R., ..., Jactel H., 2022. Producing sugar beets without neonicotinoids: An evaluation of alternatives for the management of viruses-transmitting aphids. *Entomologia Generalis* 42, 491-498.
- Wäckers F.L., 2001. A comparison of nectar- and honeydew sugars with respect to their utilization by the hymenopteran parasitoid *Cotesia glomerata*. *Journal of Insect Physiology* 47, 1077–1084.
- Wäckers F.L., Van Rijn P.C., 2012. Pick and mix: selecting flowering plants to meet the requirements of target biological control insects, in: Gurr, G.M., Wratten, S.D., Snyder, W.E., Read, D.M.Y. (eds), *Biodiversity and Insect Pests*, 139-165. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Walton N.J., Isaacs R., 2011. Influence of native flowering plant strips on natural enemies and herbivores in adjacent blueberry fields. *Environmental Entomology* 40, 697-705.

Annexe 1 : méthode de recherche bibliographique et liste des références

Une recherche bibliographique sur l'effet des IAE sur le contrôle biologique des ravageurs a été réalisée pour identifier tous les articles disponibles sur la période 1993 – 2021. La méthode pour en extraire tous les travaux exploitables consacrés aux bandes fleuries est résumée par la figure A.



#) Equation de recherche utilisée : (flower OR flowers OR "flower strip*" OR "wild flowers" OR wildflower* OR "agri-environment scheme*" OR grass OR "grass margin*" OR grassy OR "grassy margin*" OR edges OR hedgerow* OR "wood margin*" OR "woody margin*") AND (control OR biocontrol OR "pest control" OR pest OR virus) AND (predator OR predators OR parasitoid* OR "natural enem*" OR "beneficial insect*") AND (cereal OR potato OR "oilseed rape" OR "oil seed rape" OR "faba bean" OR fababean OR pea OR cabbage OR corn OR wheat OR soybean OR beet OR barley)

Figure A. Méthode de recherche bibliographique. Adapté de : Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021; 372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71.

Les informations relatives aux caractéristiques des IAEs (taille, âge et composition) et aux contextes paysager et climatique ont été extraites de chaque article retenu, de même que les effets des IAEs sur les différentes variables d'intérêt :

- Les rendements des cultures
- Les dommages directs et indirects causés par les ravageurs aux cultures (notamment l'expression symptomatique des maladies virales transmises par des insectes vecteurs)
- L'abondance des ravageurs (pucerons notamment) au sein des cultures
- L'abondance et la richesse spécifique des ennemis naturels (prédateurs et parasitoïdes) au sein des cultures et/ou des IAE
- Les taux de parasitisme et les taux de prédation aux dépens des ravageurs

L'analyse semi-quantitative de ce corpus a consisté à dénombrer les effets positifs, négatifs ou neutres (au sens agronomique, un effet positif étant favorable à la culture) parmi l'ensemble des études répertoriées et en distinguant les différentes variables d'intérêt.

Un second travail de recherche bibliographique a été conduit pour répertorier les ennemis naturels des pucerons vecteurs de jaunisse *Myzus persicae* et *Aphis fabae* mentionnés dans la littérature scientifique. Pour ce faire, la requête suivante a été soumise aux bases de données Google Scholar et Web of Science :

Myzus persicae OR *Aphis fabae* AND ("natural enem*" OR predator OR predators OR parasitoid OR parasitoids)

Seules les études européennes ont été analysées mais sans restriction sur la culture étudiée cette fois-ci.

La liste complète des références utilisées dans cet article, comprenant le corpus de 45 articles sur le rôle des bandes fleuries sur la régulation des pucerons, les 32 articles utilisés pour recenser leurs ennemis naturels et les 65 articles relatifs à l'effet du climat, est disponible à cette adresse : <https://doi.org/10.5281/zenodo.7782707>



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

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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