Caractérisation des communautés d'auxiliaires présentes sur les plantes de service et efficacité des techniques de transfert actif sur cultures maraichères

Lou Lecrocq

▶ **To cite this version:**

Lou Lecrocq. Caractérisation des communautés d'auxiliaires présentes sur les plantes de service et efficacité des techniques de transfert actif sur cultures maraichères. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04809400

HAL Id: dumas-04809400

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04809400v1

Submitted on 28 Nov 2024

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'Institut Agro Rennes-Angers
☐ **Site d'Angers** ☐**Site de Rennes**

Année universitaire : 2023-2024 Spécialité : Agronomie Spécialisation: Agroecology	**Mémoire de fin d'études** ☒ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2) ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Caractérisation des communautés d'auxiliaires présentes sur les plantes de service et efficacité des techniques de transfert actif sur cultures maraichères.

Par : Lou LECROCQ

Soutenu à Rennes, le 20/09/2024

Devant le jury composé de :

Président : Guénola PERES

Maître de stage : Marie VINCENT

(remplaçante de Jérémy BELLANGER)

Enseignant référent : Anne LE RALEC

Autres membres du jury:

Bruno JALOUX, examinateur

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

Remerciements

Ce mémoire marque pour moi la conclusion de six mois de stage très enrichissants, mais aussi de six années d'études passionnantes.

Je tiens tout d’abord à exprimer ma gratitude à Jérémy, mon maître de stage chez Agrobio35, pour son engagement tout au long de cette expérience, son aide précieuse, et ses nombreuses relectures.

Je remercie également chaleureusement toute l’équipe d'Agrobio35, salariés et stagiaires, pour leur accueil, leur bienveillance, et pour tout ce que chacun m'a apporté de différent. Merci pour votre implication dans le domaine de l'agriculture biologique et pour la bonne humeur que vous apportez au quotidien.

Un grand merci à Anne Le Ralec pour son aide précieuse, ses connaissances approfondies en entomologie, et sa rigueur scientifique, ainsi qu'à Christelle Buchard pour sa rapidité et son efficacité dans l'identification des pucerons et parasitoïdes.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance à nos collègues des Pays de la Loire, en particulier à Maxime Chabalier pour ses vastes connaissances sur les auxiliaires, ainsi qu'à Enora pour nos échanges constructifs et notre passion commune pour les petites bêtes.

Je remercie chaleureusement mes amies, qui ont rendu mes soirées de stage plus agréables par leur présence.

Merci du fond du cœur à ma famille pour le soutien indéfectible que vous m'avez apporté tout au long de ces années d'étude, et plus particulièrement pendant ce stage. Un merci tout spécial à ma mère et à mon père, qui m'ont toujours inspirée à travailler avec le vivant. Merci, maman, pour ta relecture attentive. Lulu, ma petite sœur, merci pour ta curiosité et pour m’avoir permis de te parler longuement des insectes. Enfin, Mickaël, merci pour ta patience infinie, pour m'avoir toujours soutenue, pour avoir regardé chaque soir mes photos d’insectes prises sur le terrain, et pour avoir supporté mes moments de stress avant les rendus.

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à ma réussite dans les études.

Table des matières

I. Introduction et contexte....1
II. Synthèse bibliographique....1
1. Les pucerons en maraîchage....1
1. 1. Le puceron, biologie et écologie....1
1.2. Problème des pucerons en maraîchage....2
2. Les luttes possibles contre les pucerons en maraîchage....3
2.1. La lutte contre les pucerons en agriculture biologique....3
2. 2. L'essor de nouvelles pratiques pour lutter contre les pucerons....3
3. Les plantes de services, un aménagement utilisé en lutte biologique afin d'attirer et de maintenir les populations d'auxiliaires....6
3.1. Définition....6
3.2. Conditions de succès des systèmes avec plantes relais....7
3. 3. Le transfert actif des ennemis naturels....8
III. Problématisation....8
IV. Matériel et méthode....9
1. Dispositif expérimental....9
1.1. Les plantes de services utilisées....9
1.2. Les sites d'étude....10
1.3. Agencement du dispositif expérimental....10
1.4. Le transfert actif....11
1.5. Gestion des paramètres environnementaux....11
2. Mesures et observations....12
2.1. Suivi des populations de pucerons et d'auxiliaires dans les serres....12
2.2. Identification des espèces majoritaires de ravageurs et parasitoïdes sur le dispositif....13
2.3. Caractérisation de l'environnement écologique et climatique sous abris....13
3. Evaluation économique du transfert actif par rapport à d'autres stratégies de lutte....14
4. Traitement des données....14
V. Résultats....15
1. Dynamiques de populations de pucerons et de leurs ennemis naturels dans les serres....15
1.1. Différence de temps d'arrivée des auxiliaires sur les cultures et sur les plante de service 15
1.2. Dynamiques des populations de pucerons et d'auxiliaires sur les plantes de service 15
1. 3. Dynamiques des populations de pucerons et d'auxiliaires sur les cultures....16

2. Répartition des pucerons et de leurs ennemis naturels sur les plantes de service 17
2. 1. Influence des plantes de service sur le nombre d'auxiliaires 17
2.2. Influence des plantes de service sur le taux de parasitisme 18
2.3. Influence des plantes de service sur le nombre de pucerons 18
2.4. Distribution des familles d'auxiliaires au cours du temps 18
2. 5. Importance de la floraison sur la répartition des auxiliaires.....18
3. Modèle de répartition des pucerons et de ses ennemis naturels au sein des cultures 19
3.1. Modélisation des auxiliaires au sein des cultures 19
3. 2. Modélisation du nombre de pucerons au sein des cultures.....19
4. Evaluation qualitative des communautés de pucerons et d'hyménoptères parasitoïdes dans le dispositif 20
4. 1. Les pucerons 20
4. 2. Les hyménoptères parasitoïdes 20
5. Analyse technico-économique du transfert actif au sein des fermes maraîchères.....20
VI. Discussion 21
1. Arrivée des auxiliaires dans les serres.....21
2. Répartition des auxiliaires au sein des plantes de services 21
3. Effet de la modalité de transfert sur les populations.....22
4. Action du parasitisme dans la lutte.....22
5. Limites de l'étude 23
5.1. Amélioration de l'homogénéité des sites d'études 23
5. 2. Amélioration du dispositif expérimental.....23
5. 3. Amélioration des mesures et observations.....23
VII. Conclusion.....24
VIII. Perspectives.....24

Glossaire

Auxiliaire (synonyme d'ennemi naturel) : organisme qui de par son mode de vie, développement et/ou alimentation, régule les populations de ravageurs de culture

Guilde : ensemble d'espèces appartenant à un même groupe taxonomique ou fonctionnel qui exploitent une ressource commune de la même manière en même temps

Holocycle : cycle complet de développement des pucerons qui comprend la génération sexuée et l'hivernation sous forme d'oeufs

Hétérométabole : se dit d'un insecte dont le cycle évolutif comporte une métamorphose progressive et incomplète sans stade nymphal entre la larve et l'adulte

Holométabole : se dit d'un insecte dont le cycle évolutif comporte une métamorphose complète

Indice de voracité : estimation du nombre de pucerons éliminé par jour par un auxiliaire

Momie : puceron parasité et tué par un hyménoptère parasitoïde. Il reste gonflé et durcit et de couleur souvent différente du puceron vivant.

Plante banque (synonyme de plante réservoir) : plante de service de biocontrôle à action indirecte apportant des ressources nutritives animales, autres que les proies habituelles comme des proie alternative pour les prédateurs ou hôtes alternatifs pour les parasitoïdes (Djian-Caporalino et al., 2020)

Plante de service : ensemble d'espèces végétales cultivées, ayant pour objectif d'améliorer des fonctions de l'agroécosystème, sans vocation à être récoltées ou pâturées (Jouhet et al., 2022). La définition inclut les plantes de biocontrôle qui sont des plantes qui apportent le service écosystémique de régulation des bioagresseurs dans l'agrosystème (Djian-Caporalino et al., 2020)

Plante ressource (synonyme de plante nourricière) : plante de service de biocontrôle à action indirecte apportant des ressources nutritives végétales aux auxiliaires

Prédateur furtif : prédateur qui vit dans une colonie sans y provoquer une réaction de défense (Voynaud, 2008)

Ravageur : organisme animal qui attaque les plantes cultivées, ou les récoltes stockées, en causant un préjudice économique au détriment des agriculteurs

Ressources complémentaires : ressource nécessaire en plus des hôtes ou des proies à l'accomplissement du cycle des ennemis naturels, comme de la nourriture pour les adultes, des refuges ou des sites d'hivernage (Jaloux, 2011)

Ressource supplémentaire : hôte ou proie alternative, qui ne présentent pas de danger pour la culture principale, et qui peuvent attirer et maintenir les populations d'ennemis naturels sur la parcelle (Jaloux, 2011)

Liste des abréviations

AB : Agriculture biologique

GAM : Generalized additive model

GLM : Generalized linear model

GLMM : Generalized linear mixed model

PBI : Protection biologique intégrée

TCD : Tableau croisé dynamique

UMR IGEPP : Unité mixte de recherche de l'institut de génétique, environnement et protection des Plantes

ZINB : Zero-inflated negative binomial

Liste des figures

Figure 1 : Photographie d'un puceron aptère de l'espèce Aulacorthum solani.
Figure 2 : Tâches et déformations d'une feuille de concombre dues au virus de la mosaïque des concombres (CMV).
Figure 3 : Répartition de l'activité des différents auxiliaires dans le temps.
Figure 4 : Caractérisation des auxiliaires selon leur spécialité.
Figure 5 : Schéma explicatif des différents types de plantes de service.
Figure 6 : Plan de la serre n°2 suivie à la ferme Le pays fait son jardin et disposition des plants et des blocs de plantes de service suivis.
Figure 7 : Plan de la serre n° 4 suivie à la ferme Le pays fait son jardin et disposition des plants de courgettes et des blocs de plantes de service suivis.
Figure 8 : Plan de la serre suivie à la ferme Biotaupe et disposition des plants et des blocs de plantes de service suivis
Figure 9 : Calendrier des actions effectuées dans chaque ferme.
Figure 10: Méthode de battage des soucis.
Figure 11 : Nombre total d'auxiliaires et de pucerons par mètre carré sur les cultures et les plantes de service sur les deux sites.
Figure 12 : Nombre de pucerons, répartition des auxiliaires et voracité des auxiliaires sur les blocs de plante de service à la ferme Biotaupe.
Figure 13 : Nombre de pucerons, répartition des auxiliaires et voracité des auxiliaires sur les blocs de plante de service à la ferme Le pays fait son jardin.
Figure 14 : Plans spatialisés de l'infestation de pucerons sur la ferme Biotaupe.
Figure 15 : Plans spatialisés de l'infestation de pucerons sur la ferme Le pays fait son jardin.
Figure 16 : Nombre de pucerons et voracité par plant de tomate au cours du temps à la ferme Biotaupe.
Figure 17 : Nombre de pucerons et voracité par plant de courgettes au cours du temps à la ferme Biotaupe.
Figure 18 : Nombre de pucerons et voracité par plant de tomates au cours du temps à la ferme Le pays fait son jardin.
Figure 19 : Nombre de pucerons et voracité par plant de courgettes au cours du temps à la ferme Le pays fait son jardin.
Figure 20 : Répartition du nombre d'auxiliaire total par plante de service.
Figure 21 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de syrphes en fonction de l'espèce de plante de service.
Figure 22 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de mirides en fonction de l'espèce de plante de service.
Figure 23 : Moyenne du taux de parasitisme par plante en fonction de l'espèce de plante de service.
Figure 24 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de pucerons en fonction de l'espèce de plante de service.
Figure 25 : Répartition du nombre d'auxiliaire total en fonction du temps.
Figure 26 : Différence de prédiction moyenne du nombre d'auxiliaires dans les cultures en fonction de la modalité de transfert.
Figure 27 : Comparaison des moyennes ajustées de pucerons selon la modalité de transfert.
Figure 28 : Espèces de pucerons identifiés sur les cultures et sur les plantes de service.
Figure 29 : Espèces de parasitoïdes identifiés sur les cultures et sur les plantes de service.

Figure 1: Photograph of a wingless aphid of the species Aulacorthum solani.
Figure 2: Spots and deformations of a cucumber leaf due to cucumber mosaic virus (CMV).
Figure 3: Distribution of the activity of different beneficial insects over time.
Figure 4: Characterization of beneficial insects according to their specialty.
Figure 5: Explanatory diagram of the different types of service plants.
Figure 6: Plan of greenhouse number 2 followed at the farm "Le pays fait son jardin" and arrangement of plants and blocks of service plants followed.
Figure 7: Plan of greenhouse number 4 followed at the farm "Le pays fait son jardin" and arrangement of zucchini plants and blocks of service plants followed.
Figure 8: Plan of the greenhouse followed at the Biotaupe farm and arrangement of plants and blocks of service plants followed.
Figure 9: Calendar of actions carried out on each farm.
Figure 10: Marigold beating method.
Figure 11: Total number of beneficial insects and aphids per square meter on crops and service plants at both sites.
Figure 12: Number of aphids, distribution of beneficial insects and voracity of beneficial insects on service plant blocks at the Biotaupe farm.
Figure 13: Number of aphids, distribution of beneficial insects and voracity of beneficial insects on service plant blocks at the farm "Le pays fait son jardin".
Figure 14: Spatially mapped plans of aphid infestation at the Biotaupe farm.
Figure 15: Spatially mapped plans of aphid infestation at the farm "Le pays fait son jardin".
Figure 16: Number of aphids and voracity per tomato plant over time at the Biotaupe farm.
Figure 17: Number of aphids and voracity per zucchini plant over time at the Biotaupe farm.
Figure 18: Number of aphids and voracity per tomato plant over time at the farm "Le pays fait son jardin".
Figure 19: Number of aphids and voracity per zucchini plant over time at the farm "Le pays fait son jardin".
Figure 20: Distribution of the total number of beneficial insects per service plant.
Figure 21: Comparison of adjusted means of the number of hoverflies according to the species of service plant.
Figure 22: Comparison of adjusted means of the number of mirids according to the species of service plant.
Figure 23: Average parasitism rate per plant according to the species of service plant.
Figure 24: Comparison of adjusted means of the number of aphids according to the species of service plant.
Figure 25: Distribution of the total number of beneficial insects over time.
Figure 26: Difference in average predicted number of beneficial insects in crops according to the transfer method.
Figure 27: Comparison of adjusted means of aphids according to the transfer method.
Figure 28: Species of aphids identified on crops and service plants.
Figure 29: Species of parasitoids identified on crops and service plants.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des différents ennemis naturels du puceron.
Tableau 2 : Plantes de service utilisées dans le dispositif et effet attendu sur les auxiliaires.
Tableau 3 : Liste des familles et genres d'auxiliaires suivis dans le dispositif.
Tableau 4 : Comparatif des coûts des différentes techniques de luttes contre les pucerons en maraîchage.

Table 1 : Presentation of the different natural enemies of the aphid.
Table 2 : Service plants used in the system and expected effect on beneficial insects.
Table 3 : List of families and genera of beneficial insects monitored in the system.
Table 4 : Comparison of the costs of different aphid control techniques in market gardening.

Liste des annexes

Annexe I : Itinéraires culturaux des cultures de tomates et de courgettes dans les fermes étudiées.
Annexe II : Liste des plantes spontanée présentes dans les blocs de plantes de service au Pays fait son jardin.
Annexe III : Eléments permettant la validation du modèle GLM negatif binomial gonflé à zéro utilisé pour modéliser le nombre de syrphes sur les plantes de services.
Annexe IV : Script Rstudio utilisé pour l'analyse statistique des résultats pour les plantes de service.
Annexes V : Résultats des différents modèles créés.
Annexe VI : Calendrier de floraison des différentes plantes de service.
Annexe VII : Script Rstudio utilisé pour l'analyse statistique des résultats pour les cultures.
Annexe VIII : Eléments permettant la validation du modèle GAM utilisé pour modéliser le nombre d'auxiliaires dans les cultures.
Annexe IX : Eléments permettant la validation du modèle GAM utilisé pour modéliser le nombre de pucerons dans les cultures.

Figure 1 : Photographie d'un puceron aptère de l'espèce Aulacorthum solani (Chaubet, 2010)**.**
Figure 1: Photograph of a wingless aphid of the species Aulacorthum solani.

I. Introduction et contexte

Les pucerons représentent une menace importante pour les cultures des exploitations maraîchères, ce qui pousse les agriculteurs à rechercher des solutions durables. Cependant, face au coût élevé des techniques de protection biologique intégrée, de nombreux producteurs et productrices biologiques se sont orientés vers des approches permettant de pérenniser les populations d'auxiliaires dans les serres, en cherchant à maintenir un équilibre écologique favorable.

Dans cette optique, le dispositif DEPHY, financé par le plan Ecophyto et mis en place par le ministère de l'Agriculture, joue un rôle clé. Il a été conçu pour aider les agriculteurs à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires dans les exploitations partenaires, tout en intégrant une logique de développement durable. En s'inscrivant dans cette démarche, le réseau ferme DEPHY regroupe aujourd'hui trois mille exploitations agricoles en France, toutes engagées dans la réduction des produits phytosanitaires et la promotion de pratiques alternatives.

Un exemple concret de cette initiative est le groupe DEPHY Maraîchage en Ille-et-Vilaine, constitué de douze maraîchers et maraîchères. Depuis deux ans, ce groupe travaille sur la mise en place des plantes de service, une méthode visant à renforcer la biodiversité au sein des exploitations, contribuant ainsi à la réduction des intrants chimiques tout en favorisant le contrôle naturel des ravageurs comme les pucerons.

II. Synthèse bibliographique

1. Les pucerons en maraîchage

1. 1. Le puceron, biologie et écologie

Les pucerons sont des insectes suceurs de l'ordre des Hémiptères constituant la super-famille des Aphidoidea. La famille la plus représentée est la famille des Aphididae (Turpeau et al., 2010). On compte 4000 espèces de pucerons dans le monde. Présentes principalement dans les régions tempérées, elles peuvent se retrouver sur un quart des espèces végétales (Dixon, 1997).

1. 1. 1. Multiplication

Les pucerons ont un développement hétérométabole, ce qui signifie qu'ils subissent une métamorphose continue sans stade nymphal. Ils peuvent se reproduire de façon sexuée ou asexuée. La reproduction asexuée se fait par parthénogenèse par des femelles vivipares. Certaines espèces se reproduisent uniquement de cette façon. D'autres espèces alternent avec une phase de reproduction sexuée: c'est l'holocycle. Les femelles fécondables ovipares et les mâles sont créés à l'automne et vont pouvoir se reproduire. La femelle va pondre des œufs qui resteront en diapause tout l'hiver. Les femelles fondatrices issues de ces œufs produiront une ou plusieurs générations de femelles par parthénogenèse durant le reste de l'holocycle (Hullé, 1999; Turpeau et al., 2010).

Figure 2 : Tâches et déformations d'une feuille de concombre dues au virus de la mosaïque des concombres (CMV) (Lecoq, 2013)**.**

Figure 2: Spots and deformations of a cucumber leaf due to cucumber mosaic virus (CMV).

1.1. 2. Dispersion

On distingue les espèces monœciques et les espèces diœciques selon le nombre d'hôtes qu'ils ont dans la saison. Les espèces monœciques effectuent leur cycle de développement sur une même espèce d'hôte alors que les espèces diœciques se déplacent d'un hôte primaire à un hôte secondaire, d'espèces très différentes (Hullé, 1999; Turpeau et al., 2010). La dispersion des population se fait grâce à la caractéristique du polyphénisme chez les pucerons. En effet, ils ont la capacité de créer des individus ailés au cours de la saison (Dixon, 1997). Chez les holocycliques diœciques, on observe trois phases de création d'ailés dans les populations. Au printemps, ils émigrent de l'hôte primaire à l'hôte secondaire. En été, ils changent d'hôtes secondaires pour avoir suffisamment de ressources : c'est la dissémination. En automne ils émigrent de nouveau sur l'hôte primaire pour pondre. Pour les autres pucerons, ils font uniquement des vols de dissémination (Turpeau et al., 2010).

1.1.3. Alimentation

Les pucerons sont polyphages de type piqueur-suceur. Ils utilisent leur stylet qu'ils peuvent enfoncer jusqu'au phloème des tissus végétaux afin d'en extraire la sève élaborée (Hullé, 1999). Chaque espèce de puceron est spécialiste d'une à plusieurs familles de plantes (Turpeau et al., 2010).

1.2. Problème des pucerons en maraîchage

Les principaux pucerons que l'on retrouve sur les plants de tomates et de courgettes ont été répertoriés au fil des décennies. On retrouve les mêmes espèces principales de pucerons sur tomates et courgettes : *Macrosiphum euphorbiae, Myzus persicae, Aphis gossypii* et *Aulacorthum solani* (Figure 1) (Blancard, 2023).

Le régime alimentaire des pucerons cause des dommages directs et indirects aux plantes cultivées (Hullé, 1999). D'une part, leur alimentation affaiblit directement les plantes. D'autre part, les effets indirects de leur alimentation peuvent gravement affecter les rendements. Le miellat déposé sur les plantes favorise le développement de champignons saprophytes, entraînant des fumagines qui entravent la respiration de la plante. En outre, les pucerons sont des vecteurs de virus, causant d'importants dégâts. On estime que la transmission de virus par les pucerons est la principale cause des pertes économiques dans les cultures (Turpeau et al., 2010).

1.2.1. Un vecteur de virus

La diversité des plantes infectées par les pucerons et la diversité des virus transmissibles par les pucerons en fait un des vecteurs principaux des maladies virales chez les espèces végétales (Turpeau et al., 2010). Les virus transmis aux tomates et courgettes sont transmis selon le mode non persistant (Lecoq et al., 1998; Hullé, 1999; Turpeau et al., 2010; Perrot et al., 2021). Ce type de transmission s'effectue par la simple adhérence au stylet du puceron lors d'une piqûre courte (Peters, 1971; Turpeau et al., 2010).

1. 2. 2. Les symptômes des plantes attaquées par les pucerons

Les symptômes provoqués par les virus sont très variables selon le stade de développement du végétal lors de l'infection, mais aussi selon la souche du virus et peuvent être modifiés lors de la synergie entre plusieurs virus. Les symptômes des virus sur les tomates et les courgettes se manifestent principalement par des marbrures, nécroses, déformations des feuilles, ainsi que des réductions de taille et des anomalies sur les fruits (Figure 2) (Lecoq et al., 1998; Blancard and Marchoux, 2013). Ces symptômes peuvent impacter le rendement de la culture ou le caractère commerciale des fruits.

Tableau 1 : Présentation des différents ennemis naturels du puceron (tiré de (Boyer et al., 2017; Villenave-Chasset, 2020).
Table 1 : Presentation of the different natural enemies of aphids.

Ordre	Famille	Genre	Type de pièces buccales	Cycle de développement	Régime alimentaire	Voracité
Coleoptera	Coccinellidae	*Coccinella* *Harmonia* *Adalia* *Scymnus* *Propylea* *Hippodamia* *Rhyzobius*	Broyeur	Holométabole	Prédateurs spécialistes	10 à 50
					Polyphages généralistes	70 à 100
	Carabidae	*Amara* *Anchomenus* *Brachinus* *Dyschirius* *Harpalus* *Pterostichus*	Broyeur	Holométabole	Prédateurs généralistes	
	Staphylilinae	*Tachyporus* *Ocypus*	Broyeur	Holométabole	Prédateurs généralistes	
	Cantharidae	*Rhagonycha*	Broyeur	Holométabole	Polyphage généraliste (pollen, nectar, pucerons)	
Hemiptera	Anthocoridae	*Anthocoris* *Orius*	Piqueur-suceur	Hétérométabole	Prédateurs généralistes	10
	Miridae	*Macrolophus* *Heterotoma* *Deraecoris*	Piqueur-suceur	Hétérométabole	Prédateurs généralistes	10
	Nabidae		Piqueur-suceur	Hétérométabole	Prédateurs généralistes	
Neuroptera	Chrysopidae	*Chrysoperla* *Dichochrysa* *Chrysopa*	Broyeur	Holométabole	Prédateurs généralistes	15 à 30
					Floricole	0
	Hemerobiidae	*Micromus*	Broyeur	Holométabole	Prédateur généraliste	15 à 30
					Polyphage généraliste	
Diptera	Syrphidae	*Episyrphum* *Syrphus* *Sphaerophoria* *Eupeodes*	Piqueur-suceur	Holométabole	Prédateur spécialiste	30 à 70
					Floricole	0
	Cecidomyiidae	*Aphidoletes*	Piqueur-suceur	Holométabole	Prédateur spécialiste	20
					Floricole	0
Hymenoptera	Aphelinidae/ Braconidae	*Aphelinus* *Aphidiinae*	Broyeur-lecheur	Holométabole	Parasitoïdes spécialistes et floricole	15 à 50
Araneae	Lycosidae/ Linyphiidae				Prédateurs généralistes	
Dermaptera	Forficula		Broyeur	Hétérométaboles	Polyphage généraliste	

2. Les luttes possibles contre les pucerons en maraîchage

Utilisés massivement pendant plusieurs décennies pour protéger les cultures, les produits phytosanitaires ont permis d'accroître la production agricole et de lutter contre les ravageurs des cultures. Cependant, leurs effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine sont aujourd'hui largement documentés. De plus, l'utilisation excessive de pesticides peut favoriser l'apparition de résistances chez les ravageurs, réduisant l'efficacité des traitements sur le long terme (Kouassi, 2001)**.** Face à l'augmentation des connaissances sur les effets néfastes des produits phytosanitaires, les scientifiques et les consommateurs ont cherché à diminuer leur utilisation. C'est ainsi que les prémices de l'agriculture biologique ont émergé en France après la Seconde Guerre mondiale (Silguy, 1997).

2.1. La lutte contre les pucerons en agriculture biologique

2.1.1. Les traitements utilisés en agriculture biologique

L'agriculture biologique exclut l'emploi des substances de synthèse. Cependant, certaines substances d'origine naturelle sont autorisées pour lutter contre les ravageurs. Pendant de nombreuses années, la roténone a été un insecticide naturel largement utilisé en maraîchage biologique pour lutter contre les pucerons (Legrand, 2010). Aujourd'hui les substances actives autorisées pour la lutte contre les pucerons sont l'azadirachtine, les sels potassiques d'acides gras et la maltodextrine pour les cultures de tomates et de courgettes (Anses, 2024).

2.1.2. Limites des produits phytosanitaires utilisés

Les biopesticides, bien que d'origine naturelle, peuvent perturber les équilibres écologiques et ne sont pas sans impact environnemental (Ashishie and Ashishie, 2018). Ils présentent souvent une efficacité inférieure à celle des pesticides conventionnels, nécessitant leur utilisation préventive plutôt que curative (Rochefort et al., 2006). En raison de ces limites, les agriculteurs biologiques doivent recourir à des méthodes complémentaires pour gérer les ravageurs.

2. 2. L'essor de nouvelles pratiques pour lutter contre les pucerons

2.2.1. Possibilité d'action sur les pratiques culturales

L'effet de la fertilisation du sol semble jouer un rôle sur les pressions de pucerons. En effet, une fertilisation trop importante semble attirer davantage les pucerons sur les cultures (Delpech, 2018). L'appétence des pucerons augmenterait pour des végétaux trop fertilisés (Ferreira, 2021).

Par ailleurs, les exploitations durables et biologiques semblent présenter en général moins de pucerons que les exploitations conventionnelles. Cela serait principalement dû à l'utilisation d'herbicides et d'insecticides qui diminuerait le nombre de prédateurs de ces pucerons dans les exploitations conventionnelles (Lamy et al., 2011). Une étude de 2015 ajoute que l'apport d'engrais azotés et l'expansion des terres profitent davantage aux pucerons qu'aux parasitoïdes et prédateurs ce qui déstabilise les relations interspécifiques en diminuant le rapport prédateurs sur ravageurs (Zhao et al., 2015).

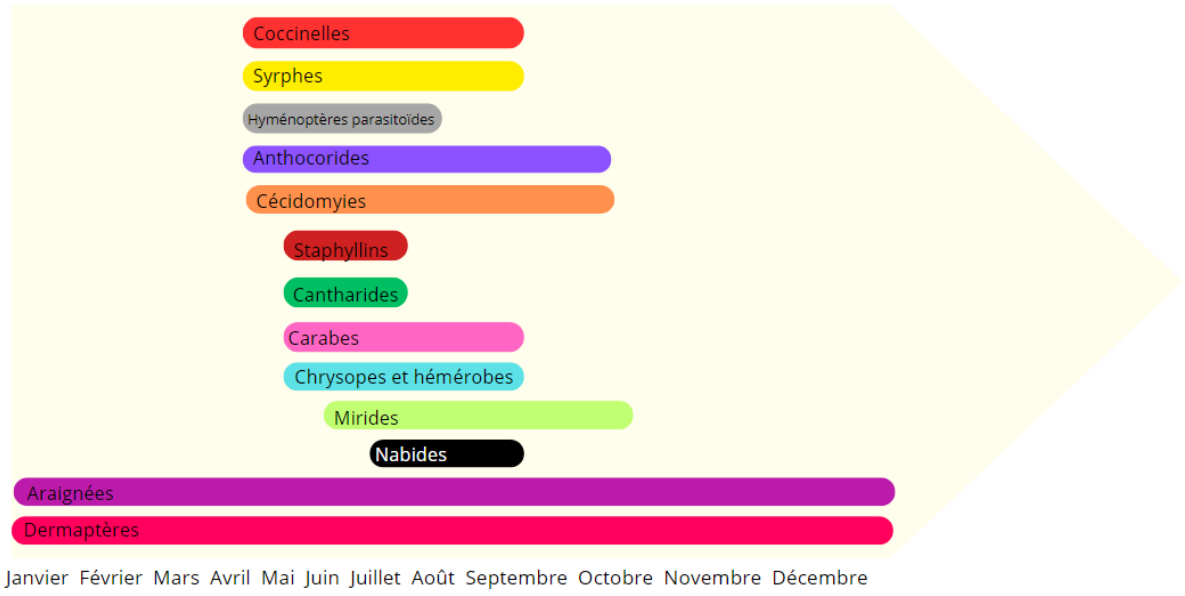


Figure 3 : Répartition de l'activité des différents ennemis naturels des pucerons dans le temps (tiré de (Boyer et al., 2017; Villenave-Chasset, 2020)**.**
Figure 3: Distribution of the activity of different aphids natural enemies over time.

2.2.2. L'essor de la lutte biologique

La lutte biologique correspond à l'utilisation d'organismes vivants visant à limiter le développement d'une population de ravageurs (DeBach and Rosen, 1991; Jourdheuil et al., 1991). Elle ne repose pas sur l'élimination complète de la population de ravageurs mais sur son maintien en dessous du seuil de nuisibilité ou seuil économiquement acceptable pour le producteur.

Il existe trois principales approches de lutte biologique (DeBach and Rosen, 1991). La première, la lutte biologique par acclimatation, consiste à introduire de manière durable un ennemi naturel pour contrer un ravageur exotique accidentellement introduit. La deuxième approche, appelée lutte biologique inondative ou augmentative, implique l'introduction en grand nombre d'ennemis naturels pour contrôler les populations de ravageurs (Jourdheuil et al., 1991). Enfin, la lutte biologique conservative cherche à préserver les ennemis naturels en optimisant leur environnement pour favoriser leur présence et leur efficacité.

2.2.2.1 Les ennemis naturels des pucerons

Les ennemis naturels des pucerons peuvent être classés en plusieurs groupes, chacun ayant un rôle spécifique dans la régulation de ces ravageurs (Tableau 1). Leur action s'étale au cours de l'année avec des périodes d'actions qui se recoupent (Figure 3).

Les prédateurs généralistes tels que les punaises prédatrices (Wagner and Weber, 1964; Messelink et al., 2011), les araignées (Boreau de Roincé et al., 2012; Villenave-Chasset, 2020), les forficules (Dib, 2011) et quelques espèces de carabes (Villenave-Chasset, 2020), staphylins (Boyer et al., 2017) et cantharides (Turpeau et al., 2010) exercent une action de protection contre les pucerons. Leur efficacité est particulièrement marquée avant que les populations de pucerons n'atteignent des niveaux nuisibles (Villenave-Chasset, 2020).

Les prédateurs spécialistes incluent les coccinelles, les chrysopes et hémérobes, les syrphes (Schmid and Henggeler, 1998; Villenave-Chasset, 2020) ainsi que les cécidomyies prédatrices (Boyer et al., 2017). Ils jouent un rôle essentiel dans la régulation des populations de pucerons, même lorsque celles-ci ont dépassé le seuil de nuisibilité (Villenave-Chasset, 2020). En effet, ceux-ci ont une voracité importante envers les pucerons, la voracité étant définie comme le nombre de pucerons qu'un auxiliaire peut éliminer en une journée.

Les champignons entomopathogènes peuvent avoir une action importante et efficace, mais celle-ci dépend fortement des conditions climatiques (Rabindra and Ramanujam, 2007).

Enfin, les hyménoptères parasitoïdes se distinguent des prédateurs par leur mode d'interaction avec les pucerons : alors que les prédateurs les consomment directement, les femelles parasitoïdes pondent leurs œufs dans ou sur le corps de leur hôte, où les larves se développeront. Les femelles parasitoïdes des pucerons pondent préférentiellement dans les larves de pucerons qui, au cours du développement du parasitoïde, se transforment en momie (Trottin-Caudal et al., 2006; Boyer et al., 2017; Vorburger, 2018).

2.2.2.2. Interactions possibles entre ces auxiliaires

Les différents auxiliaires ne jouent pas uniquement le rôle de prédateurs des pucerons et peuvent interagir horizontalement au sein d'une même guilde. Ainsi, les effets des différents prédateurs sur les pucerons peuvent être nuls ou additifs, mais aussi antagonistes.

a. La prédation intraguilde peut avoir de lourdes conséquences sur la lutte biologique

La prédation intraguilde désigne une situation où un membre d'une même guilde tue et consomme un autre membre de cette guilde. Ce type de prédation constitue ainsi une interaction mixte combinant des éléments de la prédation traditionnelle (entre membres de différentes guildes) et de la compétition intraspécifique (Lucas, 2001). On peut donner l'exemple de la coccinelle asiatique (*Harmonia axyridis*) qui agit au détriment de la cécidomyie prédatrice *Aphidoletes aphidimyza* (Voynaud, 2008). Dans le cas de la lutte biologique, les effets de la prédation intraguilde dépendent de nombreux paramètres et peuvent donc être positifs ou négatifs (Lucas, 2001).

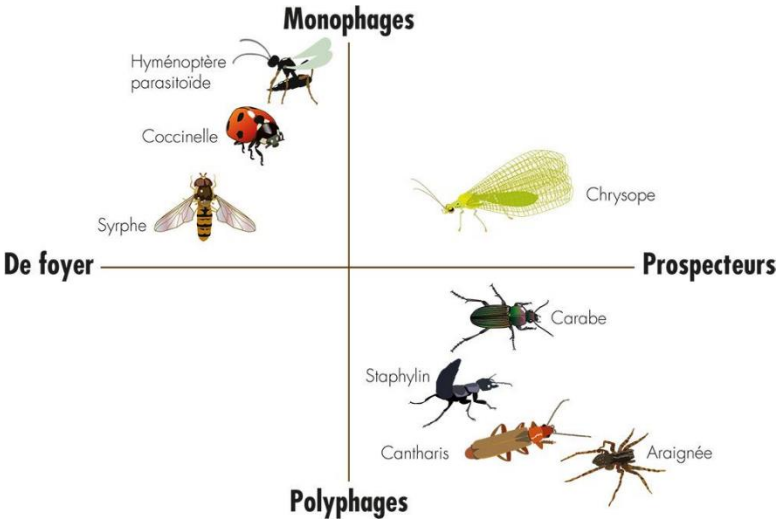


Figure 4 : Caractérisation des ennemis naturels des pucerons selon leur spécialité.
(Cerrutti et al., 2023)
Figure 4: Characterization of aphids natural enemies according to their specialty.

Le cannibalisme est un cas particulier de la prédation intraguilde dans lequel un individu prédate un autre individu de la même espèce. Les coccinelles asiatiques, connues pour leur voracité, peuvent avoir recours au cannibalisme lors de la diminution de leurs proies habituelles (Boyer et al., 2017).

b. La compétition chez les hyménoptères parasitoïdes

Les parasitoïdes adultes rivalisent pour les ressources de pucerons hôtes. On observe une compétition par interférence lorsque plusieurs femelles exploitent simultanément une même colonie, ainsi qu'une compétition par exploitation lorsqu'elles le font successivement. Les larves quant à elles s'affrontent au sein de l'hôte par exploitation ou interférence (Doigni, 2023). Ces phénomènes sont observés lorsqu'il y a une forte compétition ou une faible disponibilité des hôtes non parasités (Alphen and Visser, 1990). Parfois, les femelles pratiquent l'ovicide, tuant l'œuf précédemment pondu pour éviter la compétition larvaire (Godfray, 1994).

Plusieurs cas de compétition sont observés chez les hyménoptères parasitoïdes : le superparasitisme pour lequel plusieurs femelles de la même espèce pondent dans le même hôte, le multiparasitisme pour lequel plusieurs femelles d'espèces différentes pondent dans le même hôte et l'hyperparasitisme pour lequel un parasite secondaire pond dans l'œuf du parasite primaire (Leblanc, 2017). En ce qui concerne la lutte biologique, l'hyperparasitisme est considéré comme altérant l'efficacité des parasitoïdes primaires. D'une part, ils diminuent le taux d'émergence des parasitoïdes primaires et, d'autre part, ils incitent les adultes à quitter les colonies de pucerons (Brodeur and Rosenheim, 2000).

c. La gestion des fourmis

Les fourmis entretiennent une relation mutualiste avec les pucerons, en échangeant protection contre miellat. Elles défendent activement les pucerons contre leurs ennemis naturels. Les prédateurs actifs subissent davantage les effets de ce mutualisme que les prédateurs furtifs et les parasitoïdes (Guénard, 2007). Certains ennemis naturels développent des stratégies pour se faire accepter des fourmis, comme du camouflage ou un décalage du moment de la prédation (Turpeau et al., 2010).

2.2.2.3. Des caractéristiques écologiques des ravageurs à la réussite de la lutte biologique

a. Les prédateurs de foyers ou les prédateurs opportunistes, des stratégies différentes agissant différemment sur les foyers de pucerons

Contrairement aux prédateurs opportunistes qui ont l'habitude de prospecter pour trouver leurs proies, les prédateurs de foyers pondent leur œufs au sein des colonies de pucerons afin de favoriser leur développement (Cerrutti et al., 2023). Les prédateurs prospecteurs auraient donc plutôt une influence sur la fréquence des foyers alors que les prédateurs de foyer sur leur intensité (Ferré, 2023).

On remarque par ailleurs que les prédateurs spécialistes sont plutôt de foyer alors que les généralistes plutôt opportunistes (Figure 4).

b. La spécialisation des prédateurs naturels: un élément clé de la lutte biologique.

L'efficacité de la lutte biologique est très fortement corrélée à la spécialisation des ennemis naturels présents. En effet, plus l'ennemi naturel est spécialiste, plus il devra être efficace dans sa prédation (Navasse, 2016).

Parmi les prédateurs des pucerons, il est possible de distinguer les espèces aphidiphages spécialisées dans la prédation des pucerons des espèces zoophages plus généralistes, qui se nourrissent également d'autres types de proies. Les prédateurs aphidiphages présentent différents niveaux de spécificité : certaines espèces attaquent exclusivement une seule espèce de pucerons, tandis que d'autres montrent une préférence pour plusieurs espèces de pucerons (Turpeau et al., 2010). Par exemple, les hyménoptères parasitoïdes s'attaquent à des espèces déterminées de pucerons. Les espèces spécialistes, qui consomment une ou deux espèces

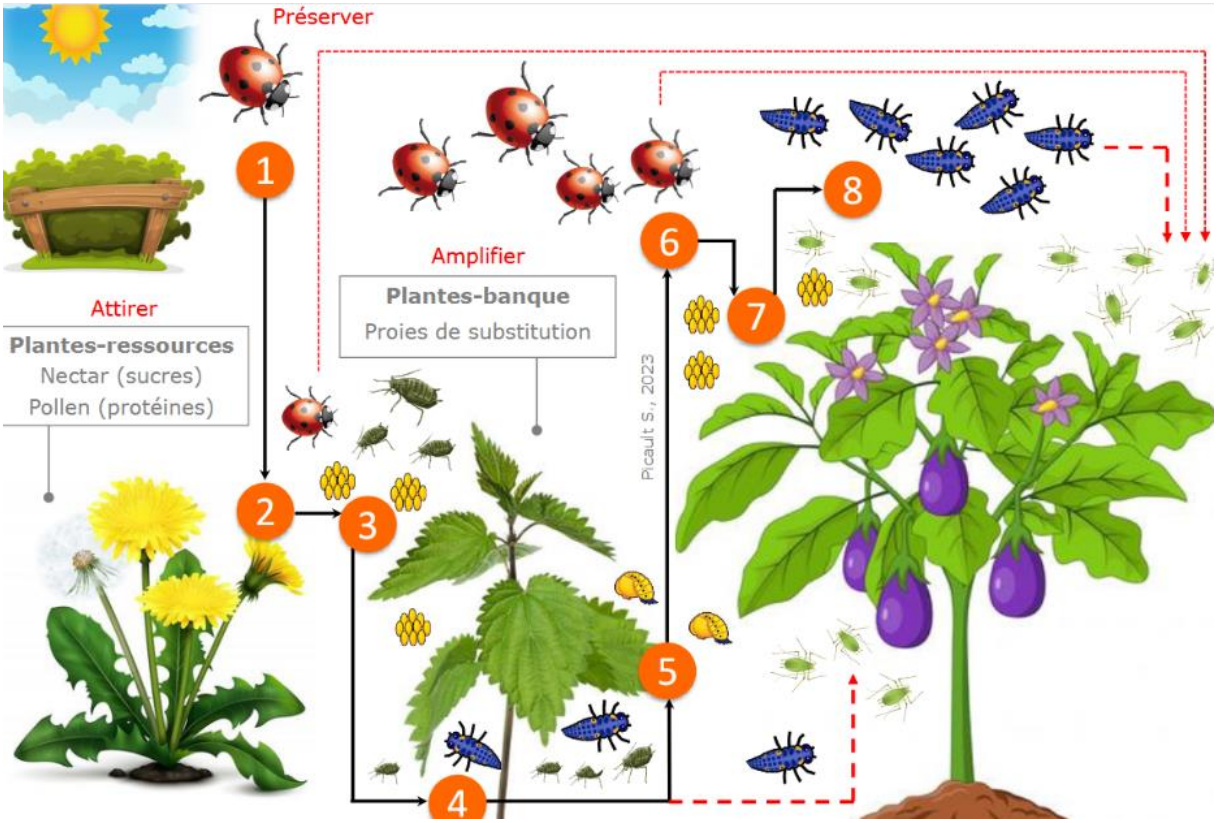


Figure 5 : Schéma explicatif des différents types de plantes de service selon leur action sur les ennemies naturels des pucerons (Picault, 2023).

Figure 5: Explanatory diagram of the different types of service plants according to their action on the natural enemies of aphids.

de pucerons, représentent plus de 50% des 170 espèces étudiées (Navasse, 2016). Cette spécialisation des parasitoïdes viendrait de « l'effet cascade » dû à la spécialisation alimentaire des pucerons (Stireman et al., 2006).

3. Les plantes de services, un aménagement utilisé en lutte biologique afin d'attirer et de maintenir les populations d'auxiliaires

3.1. Définition

Les plantes de service sont un « ensemble d'espèces végétales cultivées, ayant pour objectif d'améliorer des fonctions de l'agroécosystème, sans vocation à être récoltées ou pâturées. » (Jouhet et al., 2022). Pour notre étude, seules les plantes de service ayant un objectif de régulation des bioagresseurs sont étudiées.

On distingue plusieurs méthodes d'action chez les plantes de service de biocontrôle (Djian-Caporalino et al., 2020). En effet, leur action peut être directe en repoussant les bioagresseurs de la parcelle, en les empêchant de rentrer sur la culture, en diminuant le potentiel infectieux ou en permettant de les détecter précocement. Leur action peut, à l'inverse, être indirecte, en favorisant le contrôle effectué par les auxiliaires.

Au sein de cette deuxième catégorie, l'installation de plantes de service peut s'inscrire dans les luttes biologiques inondatives ou conservatives. Dans la stratégie inondative, les plantes de service permettent l'optimisation de la technique en maintenant les ennemis naturels sous les abris. En effet, des lâchers trop tardifs ou la migration des auxiliaires due aux trop faibles ressources nutritives sont des paramètres qui augmentent l'échec de la lutte sans plantes de service. Dans la stratégie conservative, les plantes de service permettent d'attirer et de maintenir les ennemis naturels (Figure 5) (Djian-Caporalino et al., 2020).

3.1.1. Les plantes banques: un réservoir de proies

Les plantes banques servent de réservoirs de proies de substitution comme ressources supplémentaires pour les larves d'auxiliaires (Frank, 2010; Picault et al., 2018). Les premiers essais de système de plantes banques ont été effectués à la fin des années 1970. Ils ont mis en évidence les avantages de cette méthode par rapport à des lâchers inondatifs répétés d'auxiliaires : un unique lâcher d'auxiliaires est nécessaire grâce à la facilité d'élevage de ceux-ci sur les plantes banques (Collier and Van Steenwyk, 2004).

L'un des systèmes les plus célèbres utilisant des plantes-banques vise à lutter contre *Aphis gossypii*. Il repose sur l'utilisation de céréales comme plantes réservoir de *Rhopalosiphum padi* afin d'attirer le parasitoïde *Aphidius colemani* (Djian-Caporalino et al., 2020). Les études montrent que ce système réduit significativement le nombre de pucerons dans les serres (Goh et al., 2001).

3.1.2. Les plantes nourricières : un réservoir de ressources végétales complémentaires

Les plantes ressources nourrissent les auxiliaires adultes en leur fournissant des ressources nutritives végétales nécessaires à la poursuite de leur cycle de développement (Picault et al., 2018). Leurs actions sont nombreuses et difficiles à distinguer. Les ressources complémentaires peuvent servir à attirer les auxiliaires, à les maintenir sur place tout en augmentant leur longévité, leur fécondité et leur activité de ponte (Tylianakis et al., 2004; Portillo et al., 2012).

Le souci (*Calendula officinalis*) est une plante ressource intéressante qui attire principalement les individus de l'espèce *Macrolophus pygmaeus*. Cette plante joue à la fois le rôle de plante nourricière en fournissant de la sève et du pollen, mais elle fournit aussi des

proies (Bout et al., 2019). Des études ont démontré que les bandes fleuries sont bénéfiques pour le maintien des populations de parasitoïdes, car le nectar et le pollen qu'elles fournissent sont essentiels pour les adultes afin de continuer leur cycle de développement. (Boyer et al., 2017). L'hypothèse de Heimpel et Jervis suggère que le nectar joue probablement un rôle important dans l'efficacité des parasitoïdes pour la lutte biologique. En effet, une augmentation des taux de parasitisme et de l'efficacité de la lutte biologique a été observée à proximité des plantes à fleurs (Heimpel and Jervis, 2005).

3.1.3. Les plantes de service: un habitat pour l'hiver

En plus de fournir des ressources aux auxiliaires, les plantes de services peuvent fournir un habitat pour les formes dormantes des auxiliaires durant l'hiver. Elles peuvent aussi fournir des sites de pontes. C'est le cas de l'herbe ou du trèfle ensemencé qui peuvent abriter des momies de *S.avenae* pendant son hivernage (Boyer et al., 2017). Ces plantes peuvent avoir une structure particulière, ce qui favorise le maintien dans le temps des auxiliaires en leur donnant une protection physique et un microclimat favorable à leur développement (Djian-Caporalino et al., 2020).

3.2. Conditions de succès des systèmes avec plantes relais

3.2.1. Période d'implantation des plantes relais

Pour bénéficier du biocontrôle impliqué par les plantes de services, celles-ci doivent être plantées un mois avant la fin de la culture d'été précédente. Ceci permet aux plantes d'héberger les auxiliaires de l'année précédente et de leur servir d'abris et de garde-manger pour l'hiver. Pour garantir leur efficacité lors de la saison suivante, il est donc recommandé de planter les bandes fleuries avant le 15 octobre (Lambion, 2018).

3.2.2. La gestion de l'enherbement

Pour maintenir l'efficacité des plantes relais, il est essentiel de s'assurer qu'elles ne soient pas concurrencées par d'autres plantes. Le choix de plantes couvrantes peut constituer une solution efficace pour étouffer les adventices et réduire ainsi les besoins en désherbage (Lambion et al., 2020).

3.2.3. Diversité des arrangements spatiaux

La distance des plantes de rente aux plantes de service affecte significativement le taux de parasitisme des pucerons par les hyménoptères parasitoïdes dans la culture. En effet, pour que les auxiliaires bénéficient au maximum des ressources fournies par les plantes de service, il est essentiel que ces dernières soient situées à une distance optimale des cultures. Cette distance optimale peut varier en fonction de l'espèce de plante implantée, de l'espèce d'auxiliaire étudiée, du type de cultures et des conditions environnementales comme le climat ou le type de sol (Tylianakis et al., 2004).

Les arrangements de plantes de service au sein des cultures doivent se faire selon un compromis entre services et disservices de celles-ci (Djian-Caporalino et al., 2020). En effet, l'insertion en bordure facilite la gestion des plantes et limite la compétition qu'elles peuvent avoir avec la culture.

3. 3. Le transfert actif des ennemis naturels

Si les plantes de service constituent un outil précieux pour la protection des cultures, en attirant les auxiliaires naturels des ravageurs, il arrive que leur attractivité devienne excessive. Cette situation peut, en effet, détourner les auxiliaires des plantes cultivées, réduisant leur efficacité contre les ravageurs (Parker and Popenoe, 2008). La difficulté de dispersion dépend beaucoup de l'auxiliaire considéré et de la plante banque choisie (Frank, 2010).

Certaines techniques se développent face à la possible difficulté de transferts des auxiliaires sur la culture. Par exemple, la plantation des plantes de service en pots peut permettre de les surelever ou de les déplacer, ce qui peut être intéressant pour favoriser le transfert des ennemis naturels sur les cultures (Pratt and Croft, 2000; Bout et al., 2019). La coupe d'organes riches en ennemis naturels sur les plantes de service peut aussi être envisagée comme transfert actif. Les organes doivent être mis dans des boîtes fermées pour être déplacées afin de ne pas perdre d'auxiliaires, puis déposés au plus près des cultures (Sutter et al., 2022). De la même manière, des fauches de plantes relais peuvent être réalisées afin de favoriser le départ des auxiliaires vers les cultures (Sallets, 2015). Pour certaines espèces, l'arrachage des pieds peut même être envisagé (Bout et al., 2019).

III. Problématisation

Les maraîchers et les maraîchères du groupe souhaitent **caractériser les communautés d'auxiliaires présentes sur les différentes plantes de service** et **évaluer l'efficacité des techniques de transfert actif des auxiliaires sur les cultures.** Les expérimentations seront menées sur cultures de courgettes et tomates dans le cadre d'une lutte biologique contre les pucerons au sein d'exploitations en agriculture biologique appartenant au groupe DEPHY Ferme. Cette étude est une étude préliminaire qui permettra de formuler des directives décisionnelles à l'intention des agriculteurs, leur permettant de déterminer le moment opportun et les actions à entreprendre en cas d'infestation de pucerons en présence de plantes de service.

Pour répondre à ces problématiques, un suivi de population de pucerons et de leurs ennemis naturels est fait au sein des cultures et des plantes de service afin de voir les paramètres influençant ces populations.

Les hypothèses testées sont les suivantes :

1. Les plantes de service permettent une installation précoce des auxiliaires dans les serres (Hofsvang and Hågvar, 1979).
2. L'espèce de plante de service influence les communautés d'auxiliaires la colonisant
3. Les cultures qui ont profité d'un transfert actif d'auxiliaires présentent des populations d'auxiliaires plus importantes (Lambion, 2017)**.**
4. Les cultures qui ont profité d'un transfert actif d'auxiliaires ont bénéficié d'un contrôle des populations de pucerons plus efficaces.

Tableau 2 : Plantes de service utilisées dans le dispositif et effets attendus sur les auxiliaires.

Table 2 : Service plants used in the system and expected effect on beneficial insects.

Plante de service	Pucerons attirés	Auxiliaires attirés	Sources
Urtica dioica	Oui	Punaises prédatrice (genre *Heterotoma*) Parasitoïdes spécifiques du puceron de l'ortie Chrysopes	(Villenave-Chasset, 2020)
Calendula officinalis	Oui	Mirides (genre Macrolophus et Dicyphus) Syrphes Anthocorides (Orius sauteri)	(Zhao et al., 2017; Villenave-Chasset, 2020)
Poacées	Oui, *Rhopalosiphum padi*	Aphidius colemani	(Frank, 2010; Djian-Caporalino et al., 2020)
Rumex obtusifolius		Chrysopes Syrphes	(Villenave-Chasset, 2020)
Renonculacées		Parasitoïdes adulte	(Villenave-Chasset, 2020)
Géraniacées		Syrphes Mirides (genre Dicyphus)	(Villenave-Chasset, 2020)
Pastinaca sativa		Hyménoptère parasitoïdes adulte Coccinelles Syrphes Chrysopes	(Wäckers and van Rijn, 2012; Villenave-Chasset, 2020)
Trifolium		Parasitoïdes adulte	(Villenave-Chasset, 2020)

IV. Matériel et méthode

1. Dispositif expérimental

1.1. Les plantes de services utilisées

Les plantes de services utilisées ont été choisies par les maraîchers·ères eux-même pour attirer une ou plusieurs familles d'auxiliaires.

Un tableau récapitulatif indiquant les plantes choisies et leurs intérêts attendus est présenté (Tableau 2).

1.1.1. L'ortie

Urtica dioica est une plante banque utile pour attirer précocement plusieurs espèces de pucerons. Elle a été identifiée comme étant favorable à la présence de coccinelles, punaises prédatrices du genre *Heterotoma*, de chrysopes et de parasitoïdes spécifiques aux pucerons des orties (Villenave-Chasset, 2020). Elle s'implante naturellement sous les serres maraîchères et est entretenue pour être maintenue sur les zones souhaitées.

1.1.2. Le souci

Calendula officinalis a été identifié pour attirer les mirides du genre *Macrolophus* et *Dicyphus*, les syrphes (Villenave-Chasset, 2020), ainsi que les anthocorides de l'espèce *Orius sauteri* particulièrement (Zhao et al., 2015). Il est semé ou planté par les maraîchers·ères sur les zones souhaitées, et peut se maintenir dans le temps en raison de sa nature vivace.

1.1.3. Les Poacées

Les espèces de la famille des Poacées constituent des plantes banques pour des pucerons spécifiques qui ne s'attaquent pas aux cultures légumières. Ils abritent généralement des individus de l'espèce *Rhopalosiphum padi* (Frank, 2010). Ils sont semés sur les zones souhaitées par les maraîchers·ères, et se ressèment parfois d'eux même.

1.1.4. Les plantes spontanées

Au sein des plantes spontanées, on s'intéresse à celles dont les propriétés ont été prouvées.

Les plantes du genre Rumex tels que *Rumex obtusifolius* ont été identifiées comme intéressantes pour les chrysopes adultes et les syrphes adultes, surtout au stade fleur grâce à leur pollen.

Les Renonculacées sont intéressantes pour les parasitoïdes et les syrphes dont le nectar leur permet de nourrir leur forme adulte grâce à leur nectar

Les fleurs de Géraniacées attirent les syrphes et les mirides du genre *Dicyphus* (Villenave-Chasset, 2020).

Le panais sauvage *Pastinaca sativa* est surtout utile lors de sa floraison pour attirer les hyménoptères parasitoïdes, les coccinelles (Villenave-Chasset, 2020), les syrphes et les chrysopes (Wäckers and van Rijn, 2012).

Enfin, le nectar des Fabacées du genre *Trifolium* est particulièrement attirant pour les parasitoïdes (Villenave-Chasset, 2020).

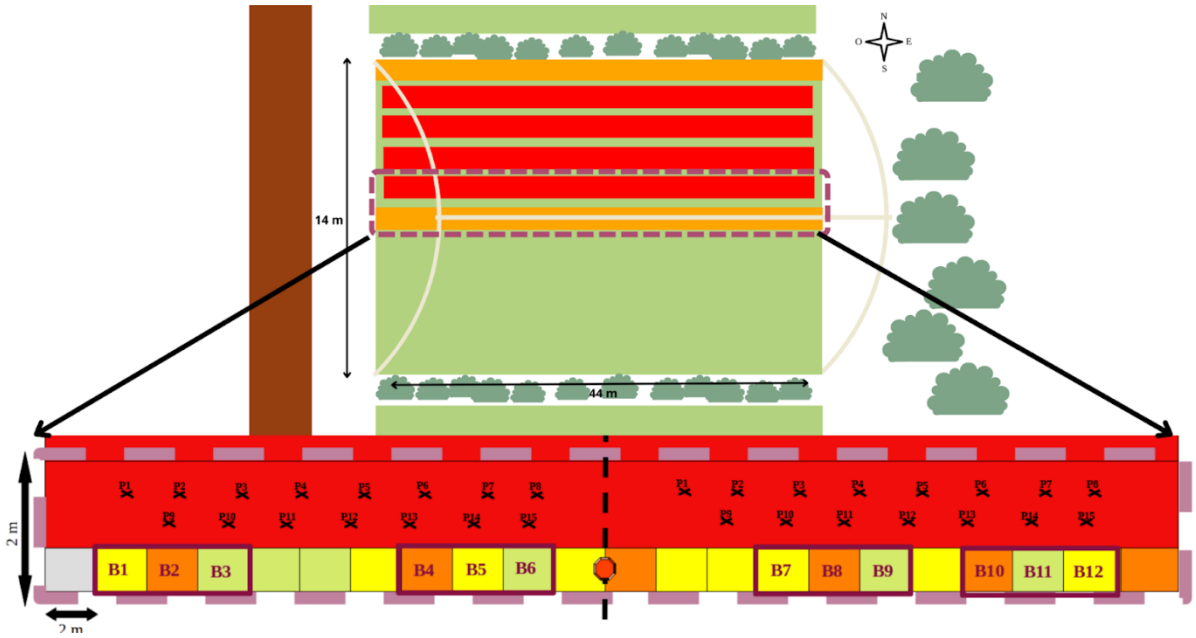


Figure 6 : Plan de la serre n°2 suivie à la ferme Le pays fait son jardin et disposition des plants et des blocs de plantes de service suivis.

Figure 6: Plan of greenhouse number 2 followed at the farm "Le pays fait son jardin" and arrangement of plants and blocks of service plants followed.

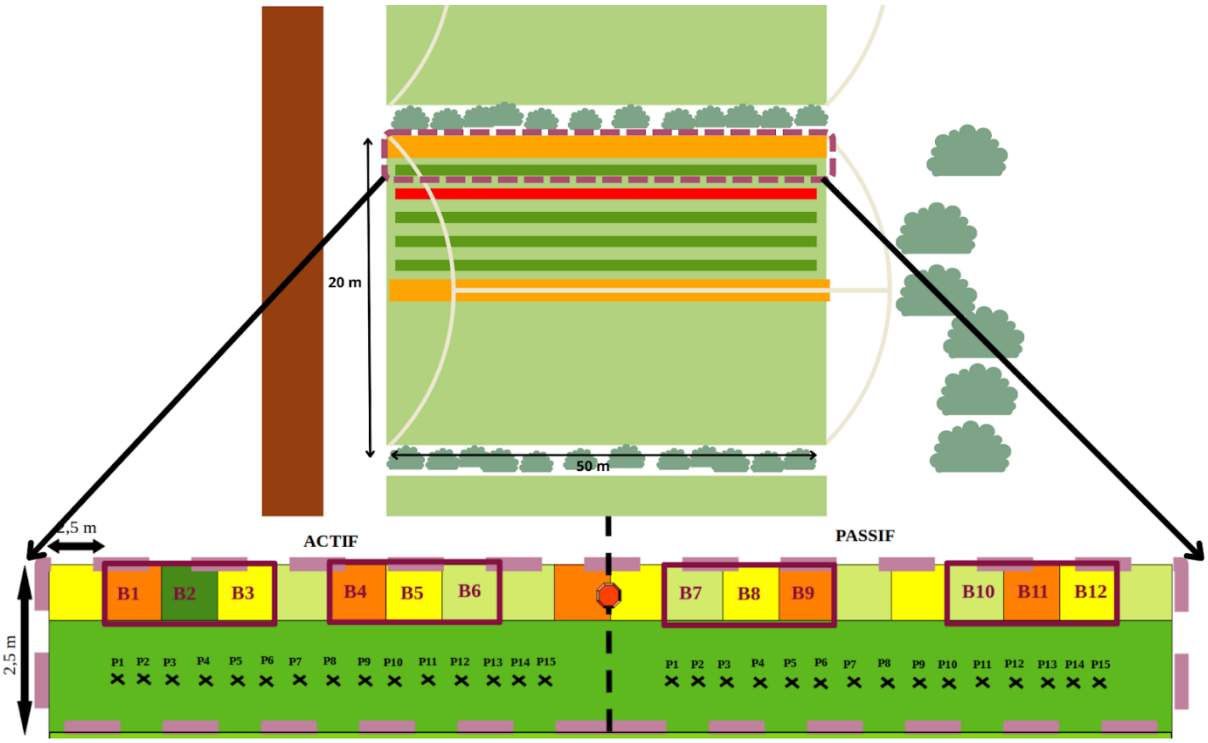


Figure 7 : Plan de la serre n° 4 suivie à la ferme Le pays fait son jardin et disposition des plants de courgettes et des blocs de plantes de service suivis.

Figure 7: Plan of greenhouse number 4 followed at the farm "Le pays fait son jardin" and arrangement of zucchini plants and blocks of service plants followed.

1.2. Les sites d'étude

L'étude a été menée en Ile-et-Vilaine (Bretagne) dans deux exploitations ayant des cultures maraîchères sous abris froids. Les deux exploitations appartiennent au groupe DEPHY Fermes et sont certifiées Agriculture Biologique : Le GAEC Biotaupe basé à Vignoc (35630) et le jardin de cocagne Le Pays fait son jardin au Theil-de-Bretagne (35333). Les fermes sont déjà très impliquées dans des programmes favorisant la biodiversité à l'échelle de la ferme. Les dispositifs impliquant de la biodiversité dans les serres sont aussi mis en place déjà depuis quelques années.

1.3. Agencement du dispositif expérimental

Dans chaque serre étudiée, des plantes de service ont été plantées entre les poteaux maintenant la serre : en bordure et au centre de la serre. Dans chaque ferme, on suit une planche de culture de tomates et une planche de culture de courgettes, toutes deux à proximité directe d'une bande de plantes de service. Les itinéraires culturaux sont présentés en annexe (Annexe 1). Les bandes de plantes de service sont subdivisées en plusieurs blocs correspondant à l'écartement entre 2 poteaux. Chaque bloc contient une ou plusieurs espèces de plantes.

1.3. 1. Le pays fait son jardin

Les deux planches étudiées se trouvent dans deux serres bi-tunelles différentes. La première serre (n°2) fait 600 mètres carrés (44 mètres sur 14 mètres) et la deuxième serre (n°4) fait 1000 mètres carrés (55 sur 20 mètres) (Figure 6, 7 et 8).

1.3.1.1. Les plantes cultivées

Les plants de tomates de variété Cindel ont été plantés semaine 16 à raison de 2 pieds par mètre carré sur la planche 4 de la serre numéro 2 (Figures 6 et 8). Un traitement d'insecticide à base de savon noir (Eradicoat®) a été effectué sur les plants juste avant la plantation puisqu'ils étaient déjà colonisés par les pucerons dans la pépinière.

Les plants de courgette de variété Zephir ont été plantés semaine 16 à raison de 1,2 pieds par mètre carré sur la planche numéro 1 dans la serre numéro 4 (Figures 7 et 8).

1.3.1.2. Les plantes de service

Chaque bloc de plantes de service mesure 2,5 mètres sur 1 mètre dans la serre numéro 2 et 2 mètres sur 1 mètre dans la serre numéro 4. Les blocs sont constitués respectivement de soucis, de graminées (blé et avoine) et de végétation spontanée.

Dans le bloc constitué de graminées, du blé a été planté en novembre 2023 et de l'avoine a été sursemé en janvier 2024. Une partie des soucis a été plantée en novembre 2022 et une autre partie a été plantée en novembre 2023. Dans la végétation spontanée, on retrouve plusieurs espèces de plantes de familles différentes (Annexe 2).

L'enchaînement des espèces de plantes relais est présenté sur les figures 6 et 7.

1.3. 2. Biotaupe

Les deux planches étudiées se trouvent dans le même tunnel d'une serre multichapelle. Le tunnel fait 1000 mètres carrés (13 mètres sur 80 mètres) (Figures 8 et 9).

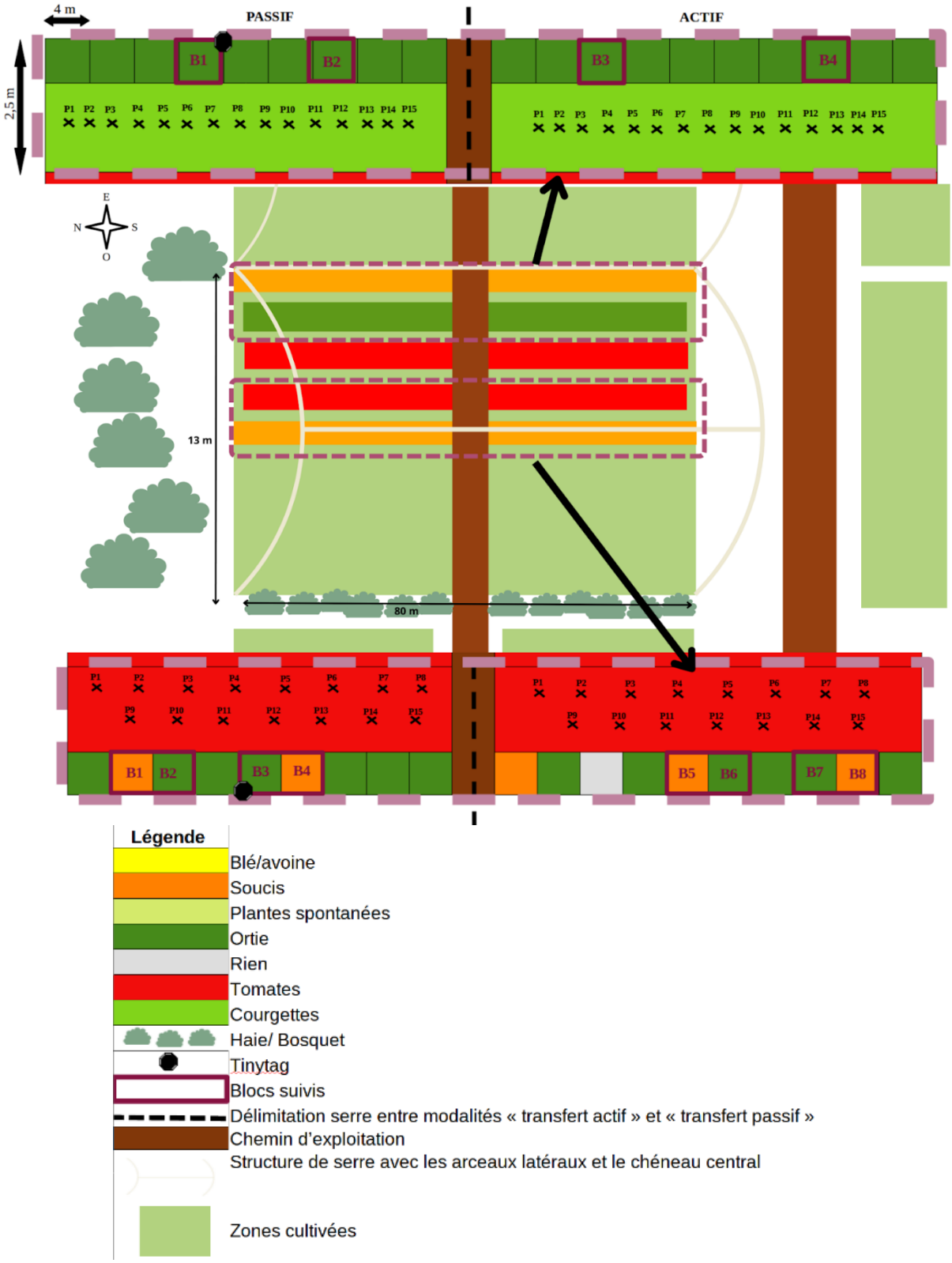


Figure 8 : Plan de la serre suivie à la ferme Biotaupe et disposition des plants et des blocs de plantes de service suivis.

Figure 8: Plan of the greenhouse followed at the Biotaupe farm and arrangement of plants and blocks of service plants followed.

1.3.2.1. Les plantes cultivées

Les plants de tomates ont été plantés semaine 12 à raison de 2 pieds par mètre carré en quinconce sur deux lignes. Une ligne est constituée de plants greffés et l'autre de plants non greffés. Les plants sont de différentes variétés dont la Cindel, rose de Berne et cornue des andes. .

Les plants de courgette ont été plantés semaine dix à raison de 1,2 pieds par mètre carré sur une seule ligne. Les plants sont de la variété Canella.

1.3.2.2. Les plantes de service

Chaque bloc mesure 4 mètres sur 0,5 mètre. Les blocs sont constitués respectivement de soucis et d'orties. Les pieds de soucis ont été plantés en novembre 2023.

L'enchaînement des espèces de plantes relais est présenté sur la figure 9.

1.4. Le transfert actif

1.4.1. Zone concernée par le transfert actif

Pour l'expérimentation, chaque tunnel est divisé en deux parties de surface équivalente. Les transferts sont faits uniquement sur la moitié de la serre dédiée (Figures 6 à 9). L'autre partie qui ne subit pas de transfert constitue notre témoin.

1.4 2. Moments choisis pour effectuer le transfert actif

Le transfert actif est effectué lorsque les premiers pucerons sont visibles sur les cultures. Si l'invasion de pucerons continue, des transferts sont effectués régulièrement afin de maintenir la population d'auxiliaires sur les cultures (Figure 10).

1.4.3. Méthodes et techniques de mise en œuvre du transfert actif

Le transfert actif a été effectué de deux manières différentes.

Pour les soucis, un battage a été effectué au-dessus d'un seau, puis les auxiliaires ont été relâchés sur les cultures (Figure 11). Pour récupérer les larves et les momies, les organes les accueillant sont prélevés puis déposés sur les cultures.

Pour les plantes spontanées, les graminées et les orties, une partie des plantes du bloc sont fauchées. Les plantes fauchées sont directement déposées dans un bac hermétique puis déposées au milieu de la planche de culture. A chaque fois, le nombre d'auxiliaires transféré a été dénombré.

1.5. Gestion des paramètres environnementaux

1.4.1. Le pays fait son jardin

L'arrosage des abris froids se fait par aspersion et goutte à goutte. Les serres sont exposées est-ouest. Elles se trouvent aux abords d'un petit bosquet à l'est et du chemin d'exploitation à l'ouest. L'ouverture des serres se fait manuellement par une porte relevable et des aérations latérales. Elles sont ouvertes l'après-midi lors de températures élevées en basse saison et toute la journée dès le mois de mai.

1.4.2. Biotaupe

L'arrosage des abris froids se fait par goutte à goutte. Les serres sont exposées au nord-sud. Au Nord se trouve une ligne d'arbres et au sud un chemin d'exploitation.

L'aération des serres se fait automatiquement au niveau du toit grâce à un programme qui ouvre le système lorsqu'il fait plus de 18 degrés Celsius.

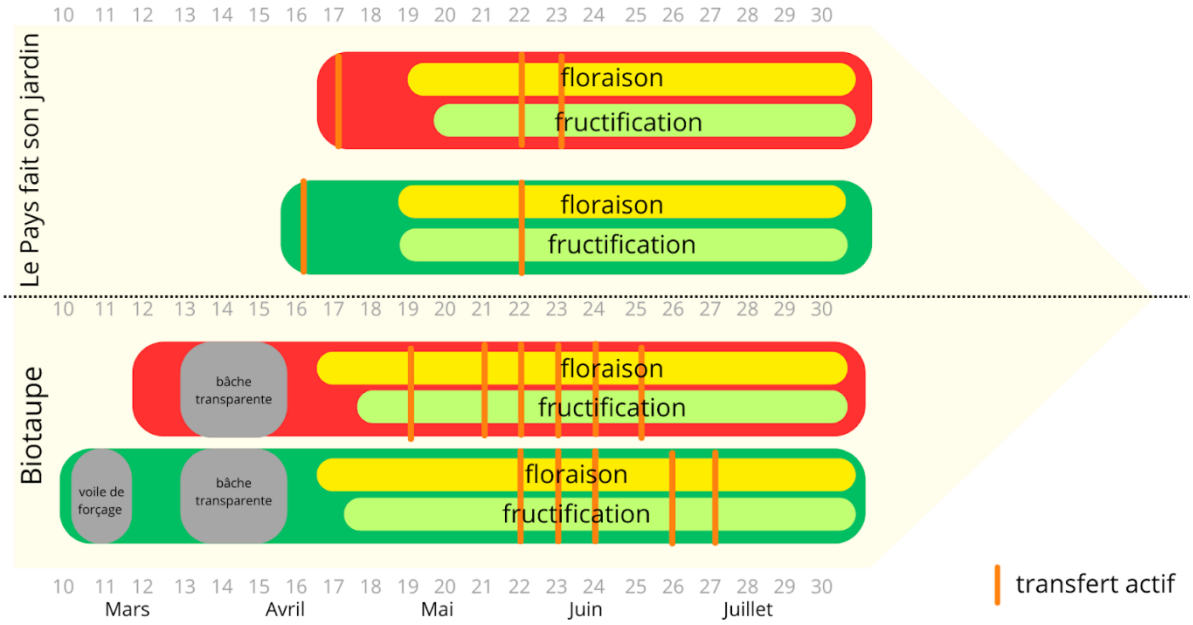


Figure 9 : Calendrier des périodes de floraison et fructification, des dates de transferts actifs et itinéraire techniques pour les fermes suivies.
Figure 9: Calendar of flowering and fruiting periods, active transfer dates, and technical itineraries for the monitored farms.

Figure 10: Méthode de battage des soucis pour le transfert actif des auxiliaires.
Figure 10 : Marigold beating method for the auxiliaries active transfer.

2. Mesures et observations

2.1. Suivi des populations de pucerons et d'auxiliaires dans les serres

Le suivi de populations de pucerons et de leurs ennemis naturels associés se fait toutes les semaines par un suivi visuel. Étant dans des serres maraîchères en fonctionnement, aucun relevé destructif (comme l'installation de pots Barber) n'a été effectué. Ceci a pour but de perturber le moins possible la faune auxiliaire présente.

1.1.1. Liste des auxiliaires suivis

Le choix a été fait de suivre uniquement certains taxons de la faune auxiliaire (Tableau 3). Le choix des espèces suivies s'est effectué grâce à la bibliographie en conservant les prédateurs et les parasitoïdes les plus répandus et voraces des pucerons. Les auxiliaires observés sont identifiés jusqu'au genre, car les espèces au sein du même genre ont généralement des régimes alimentaires similaires.

1.1.1.1. Prédateurs généralistes

Les staphylins et les carabes étant, pratiquement sans exception, des prédateurs non spécifiques, on dénombre tous les individus de ces familles (Boyer et al., 2017).

Au sein des hétéroptères, les punaises du genre *Orius* et *Anthocoris* chez les anthocorides sont dénombrés puisqu'ils sont les deux genre les plus importants prédateurs des pucerons. Les mirides sont aussi comptabilisées. Étant phytophage ou zoophage (Wagner and Weber, 1964), on dénombre uniquement les zoophages.

1.1.1.2. Prédateurs spécialistes

Pour les familles de prédateurs spécialistes, seuls les genre aphidiphages sont dénombrés (Tableau). Pour les genre difficilement discernables au stade larvaires, on dénombre les larves uniquement si elles sont présentes au sein d'une colonie de pucerons.

1.1.1.3. Parasitoïdes

Pour les parasitoïdes, on s'intéresse uniquement aux hyménoptères parasitoïdes. On évalue leur activité grâce à la présence de momies au sein des colonies de pucerons. Le genre des hyménoptères parasitoïdes peut être identifié grâce à la forme et la couleur des momies (Trottin-Caudal et al., 2006; Boyer et al., 2017). A l'état d'adultes volants, tous les micro-hyménoptères parasitoïdes sont dénombrés.

1.1.2. Suivi sur les plantes de services

Pour chaque planche de culture, on observe deux blocs de chaque type de plantes de service dans la bande de plantes de service accolée.

Sur chaque bloc différent, un transect d'un demi mètre linéaire est déterminé aléatoirement et inchangé sur toute la période du suivi grâce à deux piquets en plastique coloré. Sur chacun des transects, on effectue le suivis sur dix plants de ce transect. Sur chacun des dix plants, on dénombre le nombre de pucerons et d'auxiliaires.

Une première recherche visuelle est faite à environ un mètre de distance pour voir les plus gros auxiliaires avant de les effrayer. Une deuxième recherche est faite en regardant le transect dans sa globalité de plus près. Une troisième recherche est effectuée en manipulant les plantes du transect, en inspectant sous les feuilles et au niveau des nœuds des tiges. Cette étape permet également de distinguer les auxiliaires présents dans le sol en écartant les plantes. L'aspiration des insectes peut faciliter leur identification visuelle ultérieure sous loupe binoculaire.

Tableau 3 : Liste des familles et genres d'auxiliaires suivis dans le dispositif.
Table 3 : List of families and genera of beneficial insects monitored in the system.

Famille d'auxiliaires suivis	**Genre suivis**	**Suivi effectué**
Coccinellidae	*Coccinella* *Harmonia* *Adalia* *Scymnus* *Propylea* *Hippodamia* *Rhyzobius*	Suivi visuel
Carabidae	tout	Suivi visuel
Staphylilinae	tout	Suivi visuel
Anthocoridae	*Anthocoris* *Orius*	Suivi visuel
Miridae	*Macrolophus* *Heterotoma* *Deraecoris.*	Suivi visuel
Chrysopidae	*Chrysoperla* *Dichochrysa* *Chrysopa*	Suivi visuel
Hemerobiidae	*Micromus*	Suivi visuel
Syrphidae	*Episyrphum* *Syrphus* *Sphaerophoria* *Eupeodes*	Suivi visuel: -adultes sans distinction -larves au sein d'une colonie de pucerons
Cecidomyiidae	*Aphidoletes*	Suivi visuel: -adultes sans distinction -larves au sein d'une colonie de pucerons
Aphelinidae/ Braconidae	*Aphelinus* *Aphidius* *Praon*	Suivi visuel : -adultes sans distinction -momies
Lycosidae/ Linyphiidae	tout	Suivi visuel
Forficula	tout	Suivi visuel

1.1.3.Suivi sur les plantes de rente

Pour chaque culture, on choisit aléatoirement quinze plants qu'on identifie sur lesquels les suivis seront fait sur toute la période de suivi (Figures 6 à 9).

Sur chaque plant, on effectue le suivi sur cinq feuilles (une feuille haute, deux feuilles intermédiaires et deux feuilles basses). Le suivi est effectué en trois temps comme pour les plantes de service (un mètre, dix centimètres, deux centimètres). On dénombre les pucerons et leurs ennemis naturels de la même manière.

2.2. Identification des espèces majoritaires de ravageurs et parasitoïdes sur le dispositif

Les espèces de pucerons présents sur les plantes de services et sur les cultures ont été identifiées de manière ponctuelle afin de connaître les différentes communautés présentes au fil des mois. La plupart des auxiliaires parasitoïdes étant des spécialistes, l'identification des pucerons permet de mettre en place une stratégie de biocontrôle efficace à l'échelle de la ferme. Cela aide également à déterminer s'il peut y avoir une migration non souhaitée des pucerons des plantes de service vers les cultures, surtout si les pucerons des plantes de service et des cultures sont de la même espèce.

De plus, les momies présentes sur les différentes plantes de service et de rente sont prélevées et les parasitoïdes qui en émergent sont identifiés. Cette démarche permet de vérifier si les hyménoptères attirés par les plantes de service sont également capables de parasiter les pucerons des cultures.

Les échantillons sont envoyés pour identification à l'institut de génétique, de l'environnement et de la protection des plantes de l'institut national de la recherche agronomique, alimentaire et environnementale (UMR IGEPP INRAE).

2.3. Caractérisation de l'environnement écologique et climatique sous abris

2.3.1. Mesures climatiques sous les abris

Des dispositifs de suivi de température et d'hygrométrie Tinytag ont été installés sur chaque culture suivie. En tout, quatre boîtiers (correspondant aux planches de cultures suivies) ont donc été disposés. La localisation des boitiers au niveau de chaque culture est présentée sur la figure. Ces dispositifs, une fois branchés sur un ordinateur, permettent de voir l'évolution de la température et de l'hygrométrie relevées toutes les quinze minutes. Chaque semaine, lors des inventaires de population, les données de l'appareil sont collectées.

2.3.2. Suivi des stades de développement des espèces cultivées et des espèces relais

Lors des inventaires de population réalisés sous les serres, on détermine en parallèle les stades de développement des espèces végétales étudiées. On note pour chaque espèce la période de floraison, épiaison et fructification au cours de la saison.

2.3.3. Caractérisation des blocs de plantes relais

Chaque semaine, les blocs de plantes relais sont caractérisés. Les espèces présentes, leur pourcentage au sein du bloc ainsi que leur stade de maturité sont indiqués.

2.3.4. Suivi sanitaire des cultures

Les planches des cultures suivies sont examinées toutes les semaines afin de déceler des potentielles maladies et symptômes d'attaques d'autres ravageurs sur les cultures.

3. Evaluation économique du transfert actif par rapport à d'autres stratégies de lutte

Une comparaison économique des différentes luttes utilisées contre les pucerons a été effectuée. Ces coûts sont à comparer à une perte potentielle globale si aucune de ces lutte n'est mise en place, en considérant une perte de rendement de 50%.

Pour la stratégie impliquant l'utilisation de plantes de service (3), le coût de mise en place a été estimé en additionnant les coûts des semences et ceux de la main-d'œuvre nécessaire pour la plantation et les désherbages. Pour la stratégie intégrant également les transferts (4), les coûts de main-d'œuvre associés aux transferts ont été ajoutés. Ces coûts ont été calculé pour une ligne de plantes de service attenante à une planche de culture. Il ont donc été converti pour obtenir un coût par mètre carré de culture attenante.

Pour comparaison, le coût de deux stratégies de lutte phytosanitaire ont été calculés. Le coût d'une stratégie englobe le coût total des insecticides utilisés pour la stratégie, qui peut comprendre plusieurs passages, ainsi que la main d'œuvre nécessaire pour les effectuer. Les coûts des traitements phytosanitaires ont été obtenus par la coopérative d'approvisionnement en matériel partenaire de la Chambre d'Agriculture (CAMN). Une comparaison a aussi été faite avec une stratégie de lâchers d'auxiliaires du commerce en se basant sur le prix des auxiliaires du commerce multiplié par le nombre d'itération du lâcher.

4. Traitement des données

Deux tableurs distincts sont construits à l'aide des données : un comprenant les données de comptage sur plantes de service et un comprenant les données de comptage sur les cultures. Les deux tableurs contiennent également des informations spatio-temporelles (semaine et localisation), des paramètres abiotiques recueillis lors des mesures (température et humidité), ainsi que des variables explicatives supplémentaires calculées.

Les logiciels Excel et Rstudio sont utilisés afin d'analyser graphiquement et statistiquement les données.

Graphiquement, on peut observer les tendances des dynamiques de pucerons et de leurs ennemis naturels. La création de tableaux croisés dynamiques (TCD) sur Excel permet de faire l'analyse multidimensionnelle des données du tableau. La voracité et le nombre de pucerons peuvent, par exemple, être analysés pour comprendre les dynamiques de prédation et identifier les tendances émergentes par ferme et par culture. Les TCD nous permettent aussi de créer des plans spatialisés permettant de visualiser les dynamiques spatiales des pucerons au cours du temps.

Sur Rstudio, des analyses statistiques distinctes sont faites sur les cultures et les plantes de service. On cherche à évaluer tout d'abord l'influence de la modalité de transfert sur les populations d'auxiliaires et de pucerons sur les cultures. Ensuite, on étudie l'influence de l'espèce de plante sur les populations d'auxiliaires et de pucerons sur les plantes de service. Pour analyser ces effets de manière pertinente, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres susceptibles d'affecter ces populations. Pour cela, des modèles ajustés aux données permettront de comprendre les relations entre variables. Plusieurs modèles sont construits selon la variable réponse.

Pour les comptages sur les cultures, deux modèles sont créés pour analyser les paramètres influençant respectivement les populations de pucerons et d'auxiliaires. On compare les groupes ayant bénéficié d'un transfert actif d'auxiliaires à ceux ne l'ayant pas reçu.

Concernant l'analyse des comptages dans les plantes de service, plusieurs modèles sont créés. Les variables de réponse de ces modèles correspondent respectivement à chaque

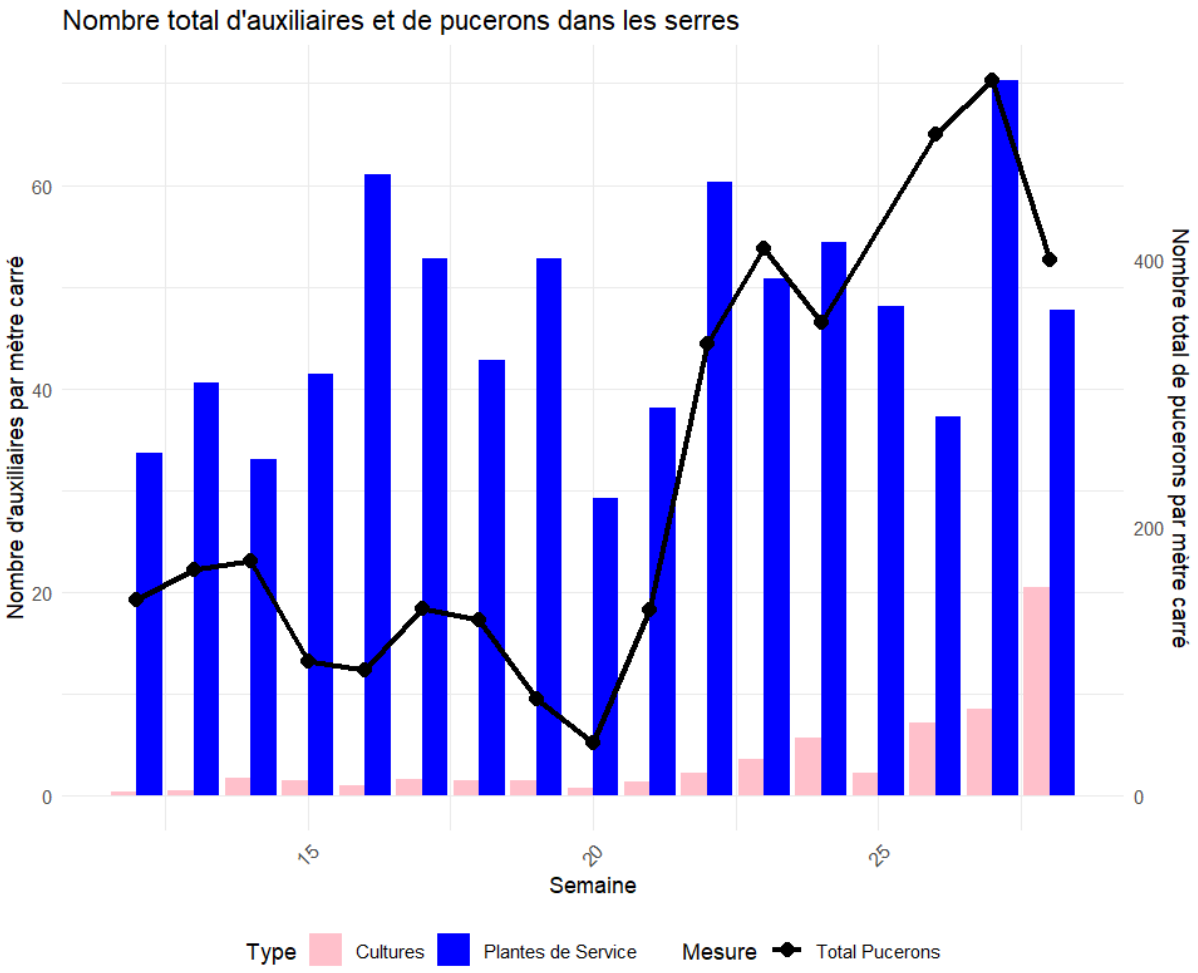


Figure 11 : Nombre total d'auxiliaires et de pucerons par mètre carré sur les cultures et les plantes de service sur les deux fermes suivies.

Figure 11: Total number of beneficial insects and aphids per square meter on crops and service plants at both sites.

espèce d'auxiliaires et aux pucerons, dans le but d'expliquer leur répartition au sein des blocs de plantes de service. On compare ensuite les groupes en fonction de l'espèce de plante de service.

Les modèles s'ajustant le mieux aux données sont sélectionnés en se basant sur le critère d'information d'Akaike (AIC). Les critères de normalité et d'homoscédasticité des résidus sont ensuite vérifiés. Des comparaisons de moyennes ajustées des différents groupes peuvent être effectuées à l'aide du modèle ajusté. La différence de moyenne entre les groupes est considérée comme significative si la comparaison de ces groupes indique une p-value inférieure à 0,05. Lorsque les différences entre les groupes sont significatives, les moyennes ajustées de la variable réponse sont extraites pour visualiser ces écarts.

V. Résultats

1. Dynamiques de populations de pucerons et de leurs ennemis naturels dans les serres

1.1. Différence de temps d'arrivée des auxiliaires sur les cultures et sur les plante de service

La situation globale des pressions de pucerons et d'auxiliaires au sein des deux sites au cours de la saison est présentée (Figure 12). Toutes les cultures ont fini d'être plantées à la semaine 17. À cette semaine, le nombre d'auxiliaires sur les plantes de service est plus de vingt fois supérieur au nombre d'auxiliaires sur les cultures. La population d'auxiliaires sur les cultures commence à augmenter la même semaine que la population de pucerons (semaine 20). Cependant, son augmentation s'effectue globalement moins rapidement.

1.2. Dynamiques des populations de pucerons et d'auxiliaires sur les plantes de service

1.2.1. Biotaupe

Le nombre de pucerons augmente globalement jusqu'à la semaine 18 puis diminue globalement à partir de la semaine 22 atteignant des valeurs inférieure à cent pucerons par mètre carré à partir de la semaine 26. La voracité, calculée en multipliant le nombre d'auxiliaires de chaque genre par leur voracité respective, augmente de manière continue tout au long de la saison. Jusqu'à la semaine 20, elle suit une évolution similaire à celle de la population de pucerons, avec un décalage d'une semaine et des valeurs plus faibles. À partir de la semaine 23, la voracité des auxiliaires dépasse celle des pucerons, entraînant une diminution drastique du nombre de pucerons (Figure 13).

1.2.2. Le pays fait son jardin

La voracité semble globalement en légère augmentation malgré une forte hétérogénéité selon les semaines. On observe par ailleurs la diversification des espèces d'auxiliaires avec l'apparition de syrphes en semaine 23 par exemple. La population de

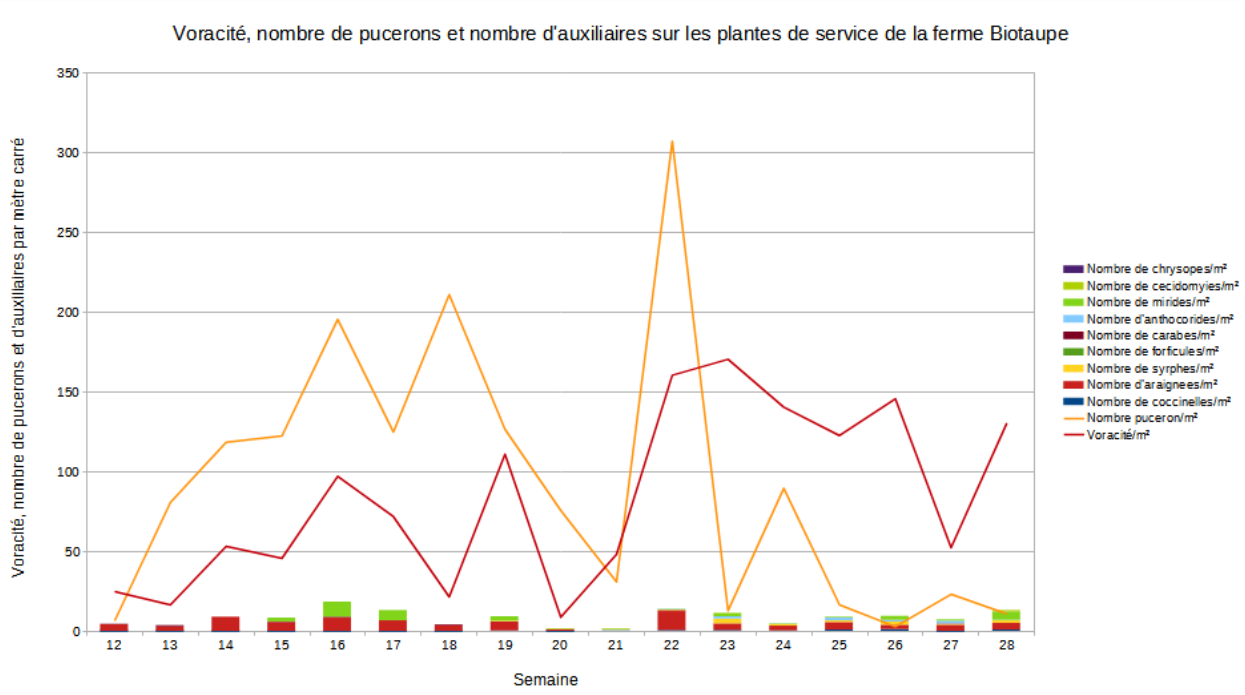


Figure 12 : Nombre de pucerons, répartition des auxiliaires et voracité des auxiliaires sur les blocs de plante de service à la ferme Biotaupe.

Figure 12 : Number of aphids, distribution of beneficial insects and voracity of beneficial insects on service plant blocks at the Biotaupe farm.

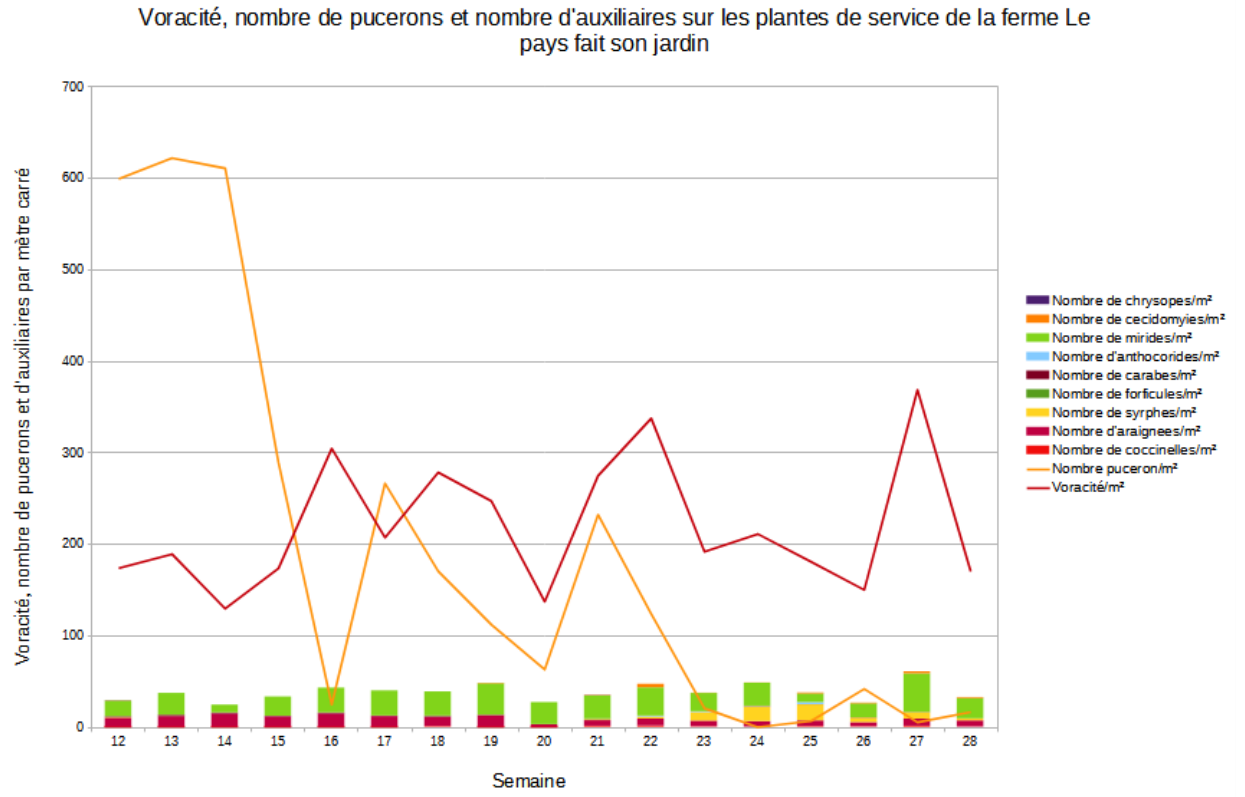


Figure 13 : Nombre de pucerons, répartition des auxiliaires et voracité des auxiliaires sur les blocs de plante de service à la ferme Le pays fait son jardin.

Figure 13 : Number of aphids, distribution of beneficial insects and voracity of beneficial insects on service plant blocks at the farm "Le pays fait son jardin".

pucerons est maximale en début de saison. Des grandes colonies de pucerons ont été observées sur *Taraxacum officinale* à cette même période. Les populations de pucerons diminuent globalement dans les blocs de plantes de service au cours du temps jusqu'à atteindre moins de cinquante pucerons par mètre carré de plantes de service (Figure 14).

1. 3. Dynamiques des populations de pucerons et d'auxiliaires sur les cultures

1. 3. 1. Visualisation des dynamiques spatiales des pucerons grâce à un plan spatialisé

Les figures représentent les dynamiques spatiales des pucerons au sein des cultures pour plusieurs semaines de suivi. Les seuils de mise en forme conditionnelle ont été calculés en fonction de l'amplitude du nombre de pucerons sur les tomates et sur les courgettes au cours de la saison.

Sur la ferme Biotaupe, la colonisation a commencé dès la semaine 19, du côté du transfert actif pour les tomates et du côté du transfert passif pour les courgettes. La colonisation s'est effectuée autour des points d'arrivée de manière assez symétrique. Pour les courgettes, les foyers ne se sont pas propagés davantage à partir de la semaine 23 mais l'intensité des foyers a globalement augmenté (Figure 15).

Sur la ferme Le pays fait son jardin, la colonisation dès la première semaine est due à une colonisation des plants avant la plantation. Par conséquent, les dynamiques spatiales des pucerons sont impactés par la disposition des plants colonisés dans la serre par les maraîchers·ères. L'application d'un insecticide sur les plants juste avant la plantation a permis une diminution forte du nombre de pucerons dès les semaines suivantes (Figure 16).

1.3. 2. Visualisation des dynamiques temporelles des pucerons sur les cultures

1.3.2.1 Biotaupe

Sur la culture de tomate, la voracité est supérieure au nombre de pucerons dans les deux modalités jusqu'à la semaine 17. La population de pucerons reste sous le seuil de cinq pucerons jusqu'à la semaine 22 pour la modalité passive et 20 pour la modalité active. L'infestation de pucerons s'est effectuée d'abord par la partie de la serre qui bénéficie du transfert actif. L'augmentation des pucerons est suivie d'une hausse du nombre d'auxiliaires, entraînant une voracité globale des ennemis naturels plus élevée dans le cas du transfert actif. Cette tendance n'est pas observée dans la modalité témoin. À partir de la semaine 24, une augmentation de la voracité est observée, accompagnée d'une globale stabilisation du nombre de pucerons (Figure 18).

Sur la culture de courgette, la voracité et le nombre de pucerons sont très bas dans la culture (moins de dix individus) jusqu'à la semaine 20. La colonisation de pucerons commence à la semaine 22 et de manière plus forte du côté du transfert passif. Par ailleurs, même si l'augmentation des pucerons est plus faible du côté du transfert actif, la voracité augmente plus rapidement. En effet, à la semaine 26 par exemple, la voracité est une fois et demi plus élevée du côté actif alors que le nombre de pucerons est presque deux fois supérieur sur le côté avec le transfert passif (Figure 19).

1.3.2.2. Le pays fait son jardin

Sur la culture de tomates, le nombre de pucerons est élevé des deux côtés dès la plantation avec une pression trois fois supérieure du côté du transfert actif. Cette pression diminue sur les deux modalités pour atteindre le seuil de moins de 1 pucerons par plant à partir de la semaine 25. La voracité augmente dans les deux modalités de transfert, mais les plantes

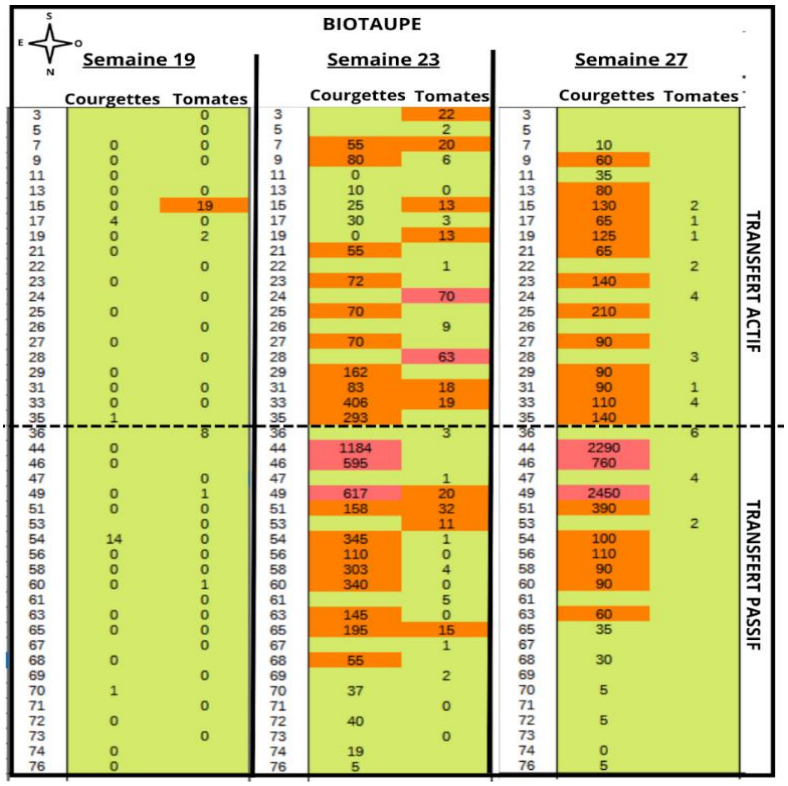
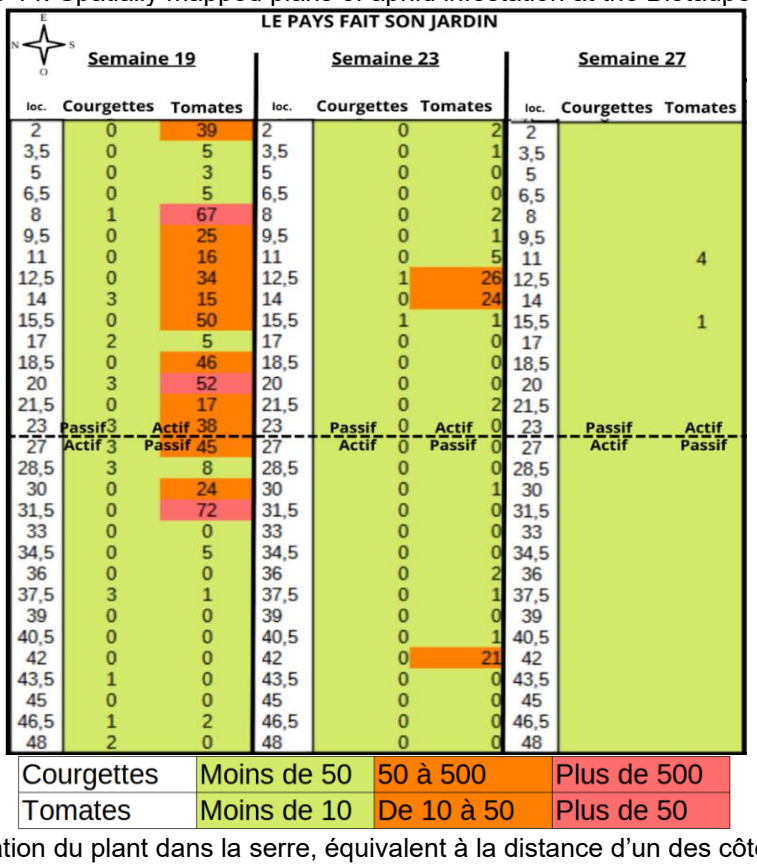


Figure 14 : Plans spatialisés de l'infestation de pucerons sur la ferme Biotaupe.
Figure 14: Spatially mapped plans of aphid infestation at the Biotaupe farm.



Courgettes	Moins de 50	50 à 500	Plus de 500
Tomates	Moins de 10	De 10 à 50	Plus de 50

loc. : localisation du plant dans la serre, équivalent à la distance d'un des côté (en mètre)

Figure 15 : Plans spatialisés de l'infestation de pucerons sur la ferme Le pays fait son jardin
Figure 15: Spatially mapped plans of aphid infestation at the farm "Le pays fait son jardin".

bénéficiant du transfert actif atteignent une voracité quatre fois supérieure à la semaine 28, malgré l'arrêt des transferts dès la semaine 23 (Figure 20).

Sur la culture de courgettes, les populations sont restées très faibles tout au long de la saison. Les populations de pucerons ont globalement diminué dans les deux modalités de transfert jusqu'à atteindre des taux inférieurs à 0,1 pucerons par plant à partir de la semaine 23. Les populations d'auxiliaires ont été très variables selon les semaines et aucune différence claire n'est observée entre les modalités (Figure 21).

2. Répartition des pucerons et de leurs ennemis naturels sur les plantes de service

2. 1. Influence des plantes de service sur le nombre d'auxiliaires

Sur les modèles choisi pour chacune des dix familles d'auxiliaires, seuls les modèles pour les syrphes et les mirides indiquent une différence significative de nombre entre les espèces de plantes de service. Seuls ces modèles seront présentés dans cette partie. Pour les autres ennemis naturels, les modèles les mieux ajustés aux données ne montrent pas de différences significatives entre les différentes espèces de plantes de service. Tous les modèles ont vérifiées les conditions de normalité et d'homoscédasticité des données (Annexe 3).

2. 1. 1. Influence sur la distribution de tous les auxiliaires

La distribution de tous les auxiliaires en fonction de l'espèce de plante de service montre une différence de communautés d'auxiliaires, en nombre et en genre selon l'espèce de plante. Le nombre d'auxiliaire sur les soucis est environ cinq fois supérieur au nombre d'auxiliaires sur les autres espèces de plantes de service. Cette différence est principalement due à la présence de nombreuses mirides du genre *Macrolophus*. Même si les différences sont significatives uniquement pour les syrphes et les mirides, on observe des tendances pour les autres auxiliaires. Par exemple, les hyménoptères parasitoïdes et les araignées ont tendance à être plus présent sur les orties (Figure 22).

2. 1. 2. Influence sur les syrphes

Pour modéliser le nombre de syrphes au sein des cultures, un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM) de type binomial négatif gonflé à zéro (ZINB) a été choisi. Ce modèle permet de gérer la surdispersion et l'excès de zéros de données complexes. L'espèce de plante et la semaine de comptage ont été incluses comme des variables fixes. La ferme a été incluse comme une variable explicative à effet aléatoire. Pour modéliser l'excès de zéro dans le modèle, on utilise les variables de l'espèce de plante et de la semaine (Annexe 4).

Grâce à ce modèle, nous pouvons observer que les syrphes sont significativement plus présentes sur les plantes spontanées que sur les soucis, le blé et l' ortie. Elles sont significativement plus présentes sur les soucis et le blé que sur l'ortie. Par ailleurs, il n'y a pas de différences significatives entre le blé et le souci (Figure 23). Par exemple, l'estimation de différence entre la moyenne ajustée du nombre de syrphes entre les plantes spontanées et les orties est d'environ 0.08 syrphes par plante (en mettant à l'exponentielle les résultats logarithmiques) (Annexe 5).

2. 1. 3. Influence sur les mirides

Pour les mirides, un modèle GLMM ZINB a aussi été choisi. Il prend en compte les variables explicatives de l'espèce de plante, de la semaine, de la ferme et de la température (Annexe 4). Grâce à ce modèle, nous pouvons observer que la présence des mirides est

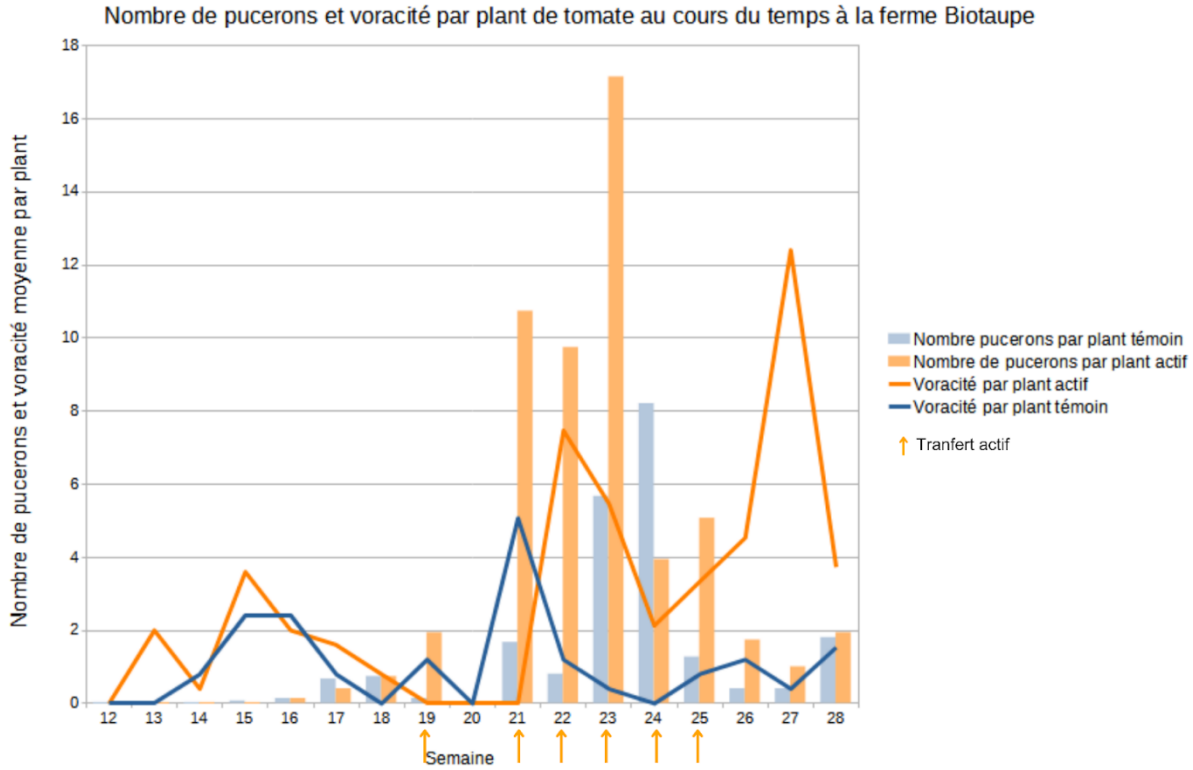


Figure 16 : Nombre de pucerons et voracité par plant de tomate au cours du temps à la ferme Biotaupe.

Figure 16: Number of aphids and voracity per tomato plant over time at the Biotaupe farm.

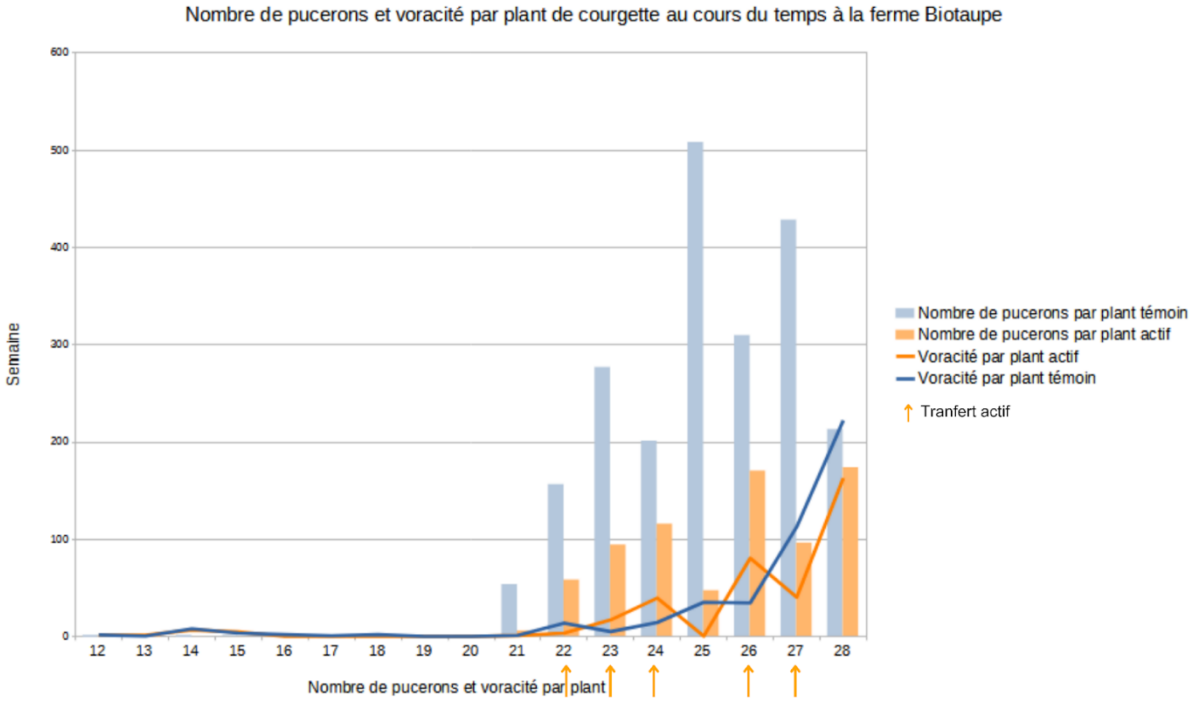


Figure 17 : Nombre de pucerons et voracité par plant de courgettes au cours du temps à la ferme Biotaupe.

Figure 17: Number of aphids and voracity per zucchini plant over time at the Biotaupe farm.

significativement plus importante sur les soucis par rapport aux autres espèces de plantes de service (Figure 24). L'estimation de différence entre la moyenne ajustée de nombre de mirides entre le soucis et les autres plantes de service est d'environ 0.7 mirides par plante (en mettant à l'exponentielle les résultats logarithmiques).

2.2. Influence des plantes de service sur le taux de parasitisme

Le taux de parasitisme est calculé en divisant le nombre de momies observées par plante par le nombre total de pucerons observés sur cette même plante (pucerons vivants et momies). Les taux de parasitisme sont calculés uniquement sur les plantes présentant des pucerons. Nous considérons ici que le pourcentage de parasitisme est uniquement dû à l'espèce de plante sur laquelle la momie a été trouvée. Le pourcentage de parasitisme observé sur les orties est environ deux fois supérieur à celui observé sur les soucis. Le blé a un taux de parasitisme significativement inférieur à celui observé sur ortie et soucis avec un taux de parasitisme moyen inférieur à 0,1%. Aucun phénomène de parasitisme de pucerons par des hyménoptères parasitoïdes n'a été observé sur les plantes spontanées pendant la saison (Figure 25).

2.3. Influence des plantes de service sur le nombre de pucerons

Selon le modèle GLM ZINB utilisé pour modéliser les populations de pucerons (Annexe 4), l'espèce de plante de service n'influe pas significativement sur leur nombre. Cependant, les soucis et les orties semblent avoir une tendance à attirer préférentiellement les pucerons (Figure 26).

2.4. Distribution des familles d'auxiliaires au cours du temps

Pour toutes les espèces d'auxiliaires testées, la semaine du comptage a un impact significatif et positif sur chacune d'elles. On peut donc visualiser la tendance de distribution des auxiliaires au cours du temps (Figure 27).

Les auxiliaires généralistes sont présents sur les plantes de service dès la semaine 12. Les auxiliaires spécialistes apparaissent dès la semaine 18 avec les coccinelles et les cécidomyies puis avec les parasitoïdes et les syrphes dès la semaine 19.

2. 5. Importance de la floraison sur la répartition des auxiliaires

Le calendrier de floraison des différentes espèces de plantes de service montre une certaine hétérogénéité des floraisons des blocs de plantes spontanée au cours du temps . En effet, la majorité des blocs ne sont pas fleuris des semaines 17 à 20 (Annexe 6). Les modèles choisis pour les différents auxiliaires ne montrent pas de relations significatives entre le nombre d'individus de l'espèce étudiée et la période de floraison des blocs de plantes de service.

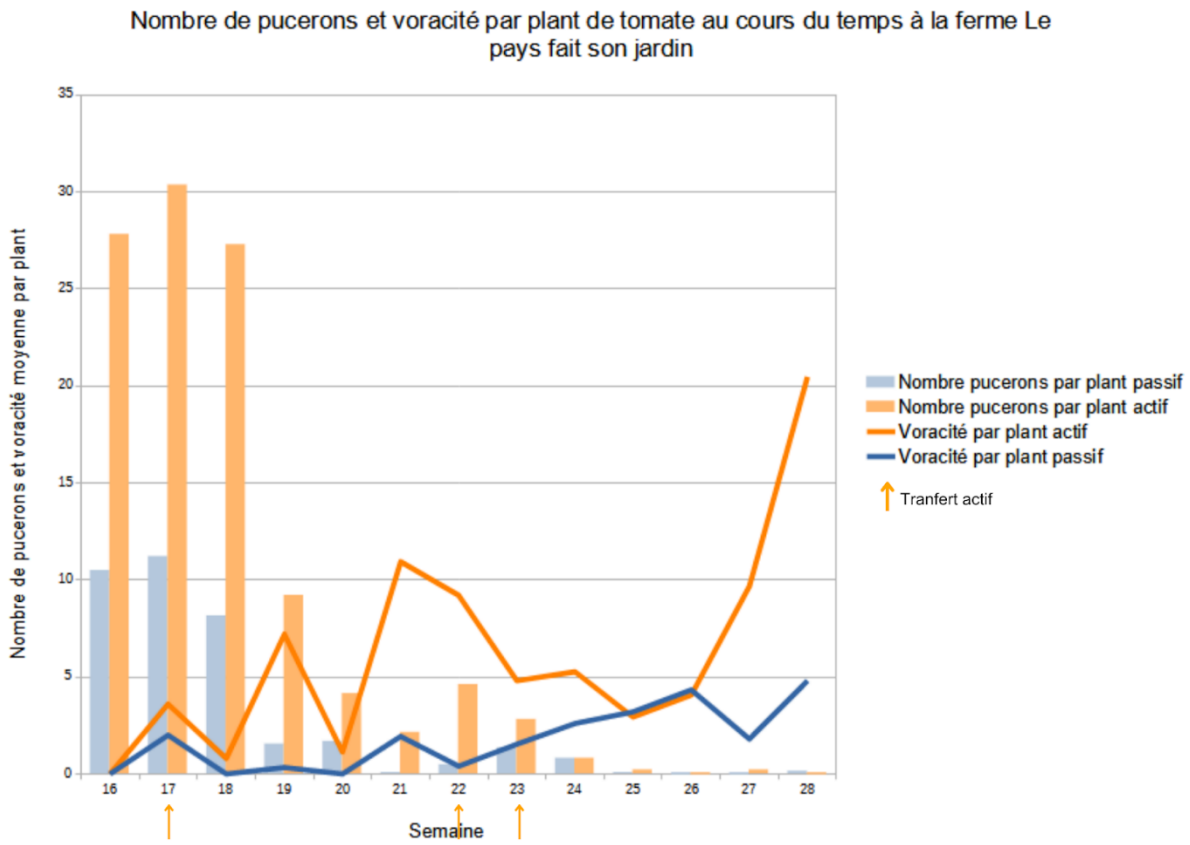


Figure 18 : Nombre de pucerons et voracité par plant de tomates au cours du temps à la ferme Le pays fait son jardin.

Figure 18: Number of aphids and voracity per tomato plant over time at the farm "Le pays fait son jardin".

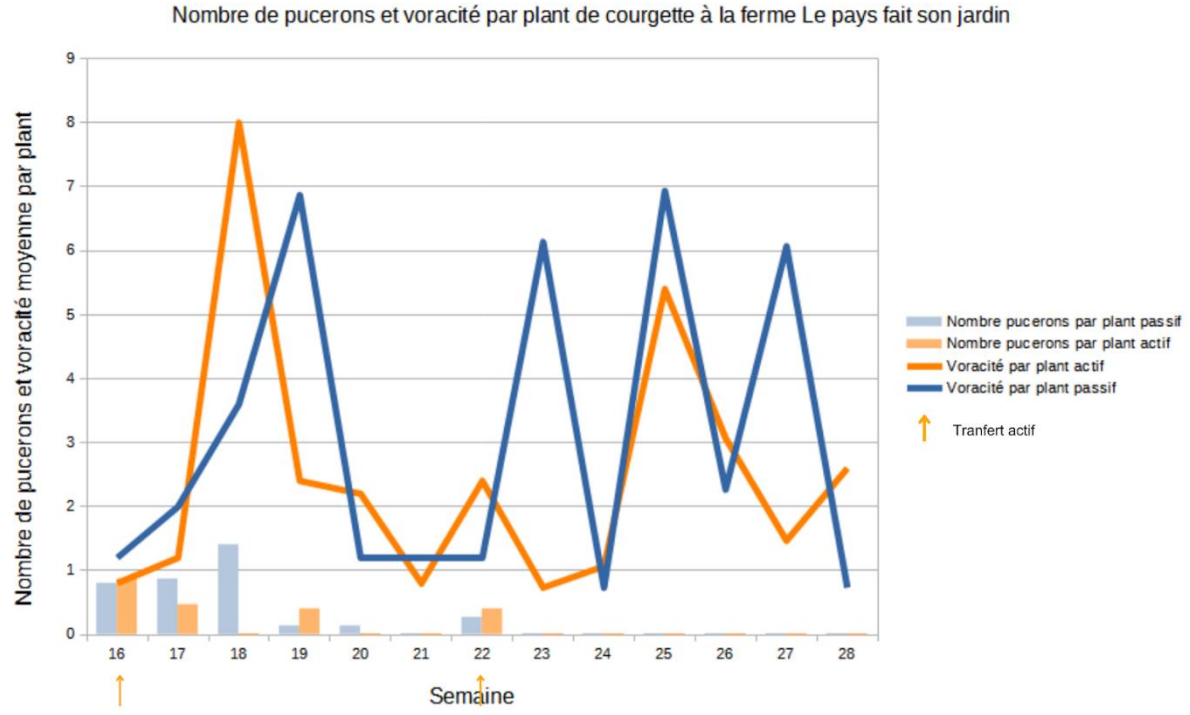


Figure 19 : Nombre de pucerons et voracité par plant de courgettes au cours du temps à la ferme Le pays fait son jardin.

Figure 19 : Number of aphids and voracity per zucchini plant over time at the farm "Le pays fait son jardin".

3. Modèle de répartition des pucerons et de ses ennemis naturels au sein des cultures

3.1. Modélisation des auxiliaires au sein des cultures

Un modèle de régression additive généralisée (GAM) a été choisi afin d'analyser l'influence de différentes variables environnementales et biologiques sur le nombre total d'auxiliaires dans les cultures. Le modèle utilise une distribution binomiale négative pour gérer la surdispersion des données et est ajusté par la méthode REML (Restricted Maximum Likelihood). La variable réponse est le nombre d'auxiliaires total. Plusieurs variables explicatives ont été retenues. La température et l'humidité ont été intégrées en tant qu'effet lisse. Une interaction tensorielle entre ces deux variables a aussi été intégrée. Le nombre de pucerons a été aussi pris en compte en tant qu'effet lisse. Le nombre de nœuds a été augmenté pour les variables du nombre de pucerons et de l'humidité afin de capturer plus précisément les variations locales des données. Une interaction tensorielle a été rajoutée entre la position des plants et le nombre de pucerons. Enfin, la modalité de transfert a été ajoutée en tant que variable catégorielle. Une base spline cubique a été utilisée afin de modéliser des relations non linéaires (Annexe 7).

L'hypothèse de normalité des résidus n'a pas été vérifiée graphiquement pour ce modèle. Cependant, le test de Breusch-Pagan montre que l'homoscédasticité des résidus est vérifiée et l'AIC du modèle est le plus faible de tous les autres modèles essayés (Annexe 8).

La fonction *"emmeans"* n'étant pas compatible avec les modèles GAM, l'utilisation du rapport de vraisemblance permet d'obtenir la significativité de la différence entre les deux modalités. Avec ce modèle, l'analyse du rapport de vraisemblance montre que l'inclusion de la variable de la modalité de transfert dans le modèle améliore significativement l'ajustement du modèle aux données (Annexe 5). La différence de déviance est significative avec une valeur p de 1,9e-10, ce qui suggère que la modalité de transfert a un effet significatif sur la variable réponse du nombre total d'auxiliaires (Figure 28).

3. 2. Modélisation du nombre de pucerons au sein des cultures

Un modèle additif généralisé (GAM) a été choisi pour modéliser le nombre de pucerons au sein des cultures. Une distribution binomiale négative est utilisée pour modéliser les données de comptage au vu de la nature surdispersée des données. La variable réponse est le nombre de pucerons vivants. Plusieurs variables explicatives ont été retenues. La modalité de transfert est incluse comme un terme paramétrique. Les variables de l'humidité, de la température, de la voracité des auxiliaires et de la semaine sont incluses en tant que termes lisses pour capturer les effets non linéaires potentiels de ces variables. Un terme d'interaction entre l'humidité et la température a été ajouté pour modéliser leur effet combiné. Enfin, la localisation des plants a été intégrée comme un effet aléatoire (Annexe 7).

La normalité et l'homoscédasticité des résidus sont vérifiées et les indicateurs de qualité du modèle montrent que ce modèle explique une bonne proportion de la variabilité dans les données, bien qu'il reste une part de variabilité non expliquée (Annexe 9).

En passant les résultat logarithmiques à l'exponentielle, la comparaison entre les modalités de transfert "actif" et "passif" montre que le nombre de pucerons vivants est en moyenne environ 62.3% fois celui observé dans la modalité de transfert actif, avec une p-value de 0.0004, indiquant une différence statistiquement significative. Par ailleurs, le recoupement des barres représentant l'erreur standard entre les deux groupes indique que les moyennes des groupes sont proches l'une de l'autre par rapport à la variabilité des données (Figure 29). La p-value prenant en compte la variabilité des données et la taille de l'échantillon,

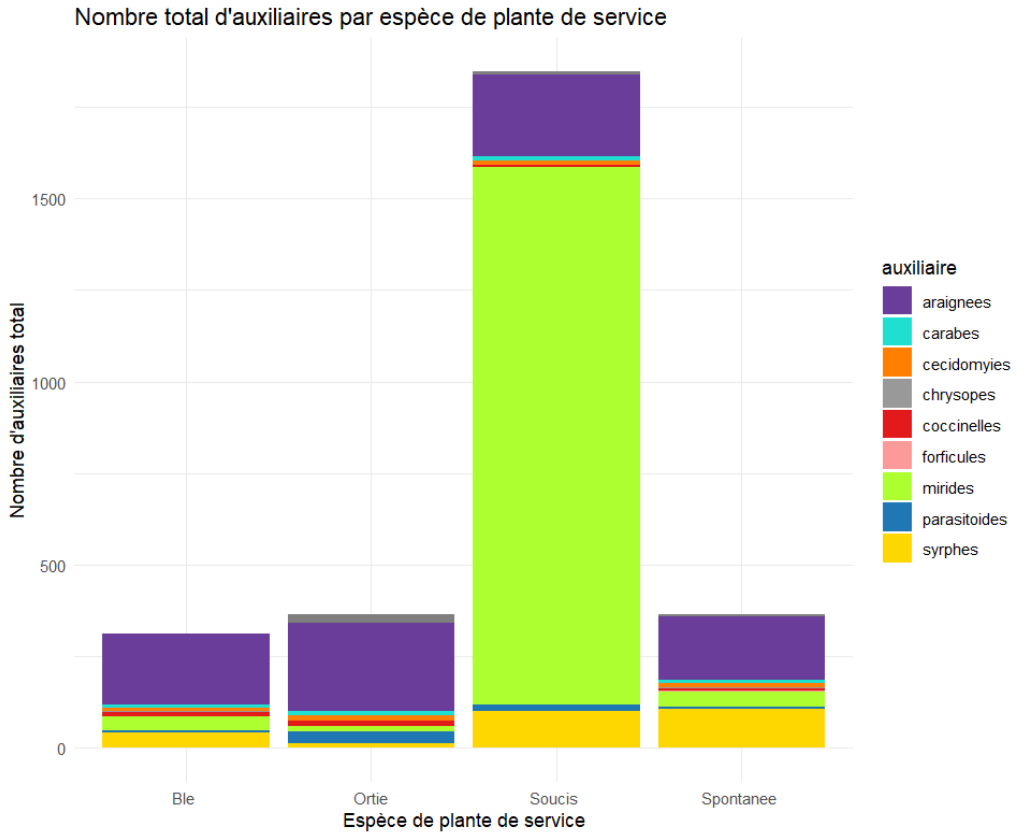


Figure 20 : Répartition du nombre d'auxiliaire total par plante de service sur les deux fermes suivies.

Figure 20 : Distribution of the total number of beneficial insects per service plant on .

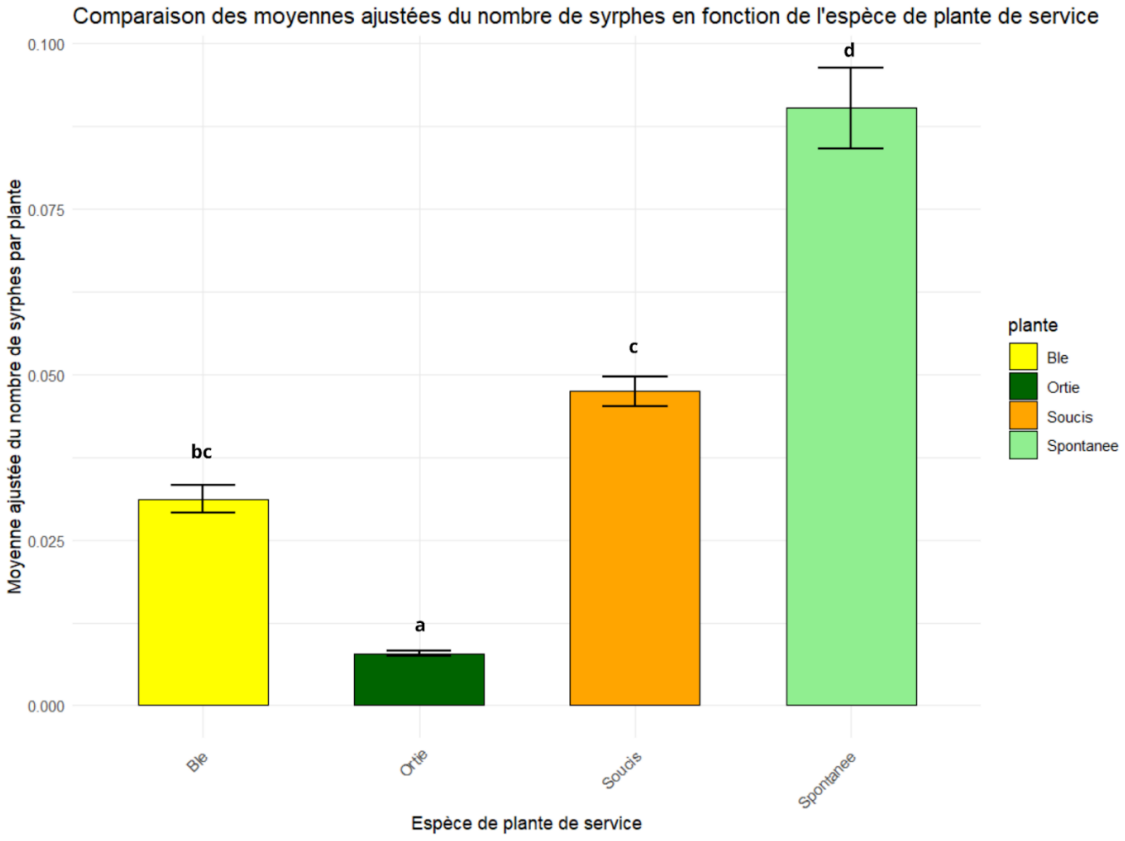


Figure 21 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de syrphes en fonction de l'espèce de plante de service.

Figure 21 : Comparison of adjusted means of the number of hoverflies according to the species of service plant.

est donc l'information retenue pour prouver qu'il existe une différence significative entre les deux groupes.

Les résultats du modèle montrent aussi que la localisation des plants a un effet aléatoire significatif sur le nombre de pucerons vivants. De plus, la température, l'humidité, la voracité et la semaine ont des effets significatifs mais non linéaires sur le nombre de pucerons sur les cultures.

4. Evaluation qualitative des communautés de pucerons et d'hyménoptères parasitoïdes dans le dispositif

4. 1. Les pucerons

Sur les soucis, les pucerons identifiés sont tous de l'espèce *Aulacorthum solani*. Sur les *Urtica dioica*, deux populations se distinguent : les *Microlophium carnosum* et les *Aphis urticae*. Quelques colonies d'Aulacorthum solani ont aussi été trouvées ponctuellement. Sur les *Taraxacum officinale* (au sein des plantes spontanées), les colonies exclusivement présentes sont du genre *Uroleucon*. Sur les Poacées, c'est les individus de l'espèce *Sitobion avenae* qui sont le plus présents, mais des colonies de *Rhopalosiphum padi* sont aussi présentes.

Au sein des cultures, c'est l'espèce *Aulacorthum solani* qui se démarque, aussi bien sur les courgettes que sur les tomates. Dans un deuxième temps, l'installation des *Aphis gossypii* s'est faite sur les courgettes, en prenant la place des individus *Aulacorthum solani* (Figure 30).

4. 2. Les hyménoptères parasitoïdes

Sur les graminées, c'est l'espèce de parasitoïdes *Aphidius rhopalosiphi* qui se distinguent ainsi que des hyperparasitoïdes du genre *Alloxysta*. Sur les orties, les momies prélevées ont fait émerger exclusivement des individus *Aphidius microlophii*. Sur les soucis, les parasitoïdes émergeant sont de l'espèce *Aphidius urticae*. Cependant, des hyperparasitoïdes du genre *Alloxysta* ont aussi émergé de certaines momies. C'est le cas de nombreuses momies prélevées sur tomates dont le parasitoïde initial a été parasité par des hyperparasitoïdes du genre *Alloxysta*, ce qui empêche de connaître les parasitoïdes primaires des pucerons. Sur douze momies identifiées, un tiers ont fait émerger un hyperparasitoïde. *Praon volucre* est le seul parasitoïde à avoir émergé de momies avec socle sur tomates. Aucune momie n'a été retrouvée sur courgettes au moment des prélèvements (Figure 31).

5. Analyse technico-économique du transfert actif au sein des fermes maraîchères

En se focalisant sur les stratégies de lutte biologique, nous constatons tout d'abord que le transfert d'auxiliaires triple le prix d'utilisation des plantes de service à cause du temps pris pour le transfert. La stratégie de protection biologique intégrée (PBI) utilisant des lâchers de *Macrolophus* (7) est à comparer avec la stratégie d'utilisation de plantes de service et de transfert actif (4). En effet, les lâchers de *Macrolophus* du commerce induisent une population de 3 individus par mètre carré sur la saison alors que la planche de plante de service

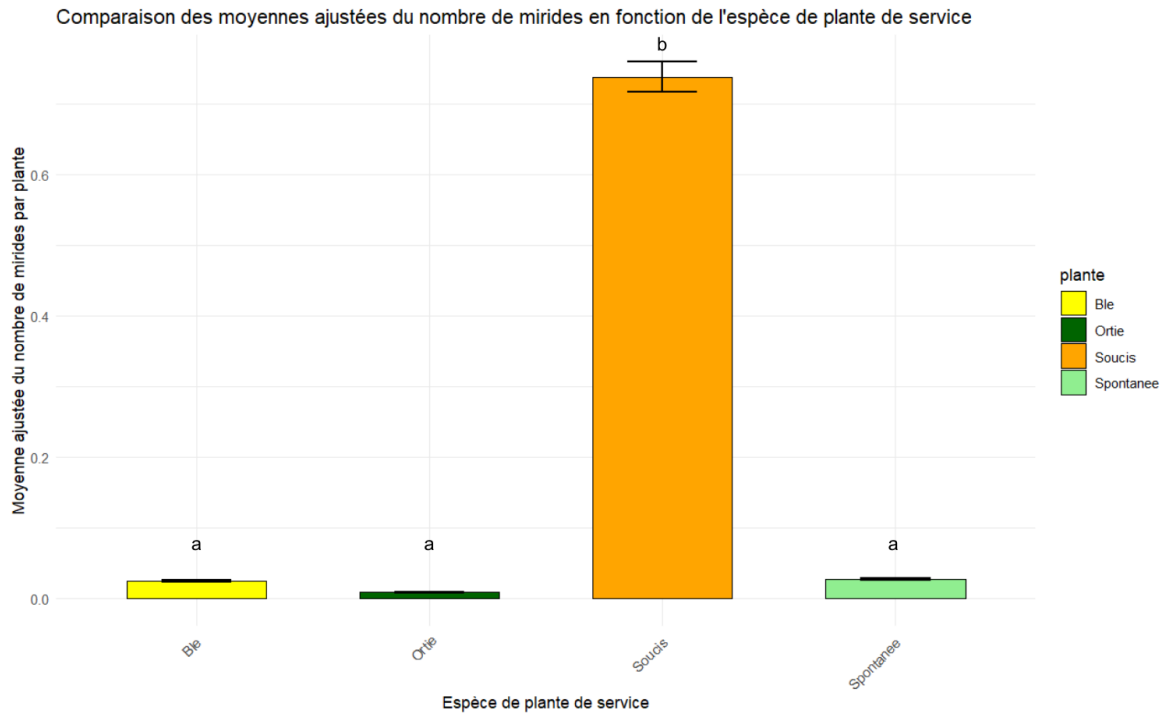


Figure 22 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de mirides en fonction de l'espèce de plante de service.

Figure 22 : Comparison of adjusted means of the number of mirids according to the species of service plant.

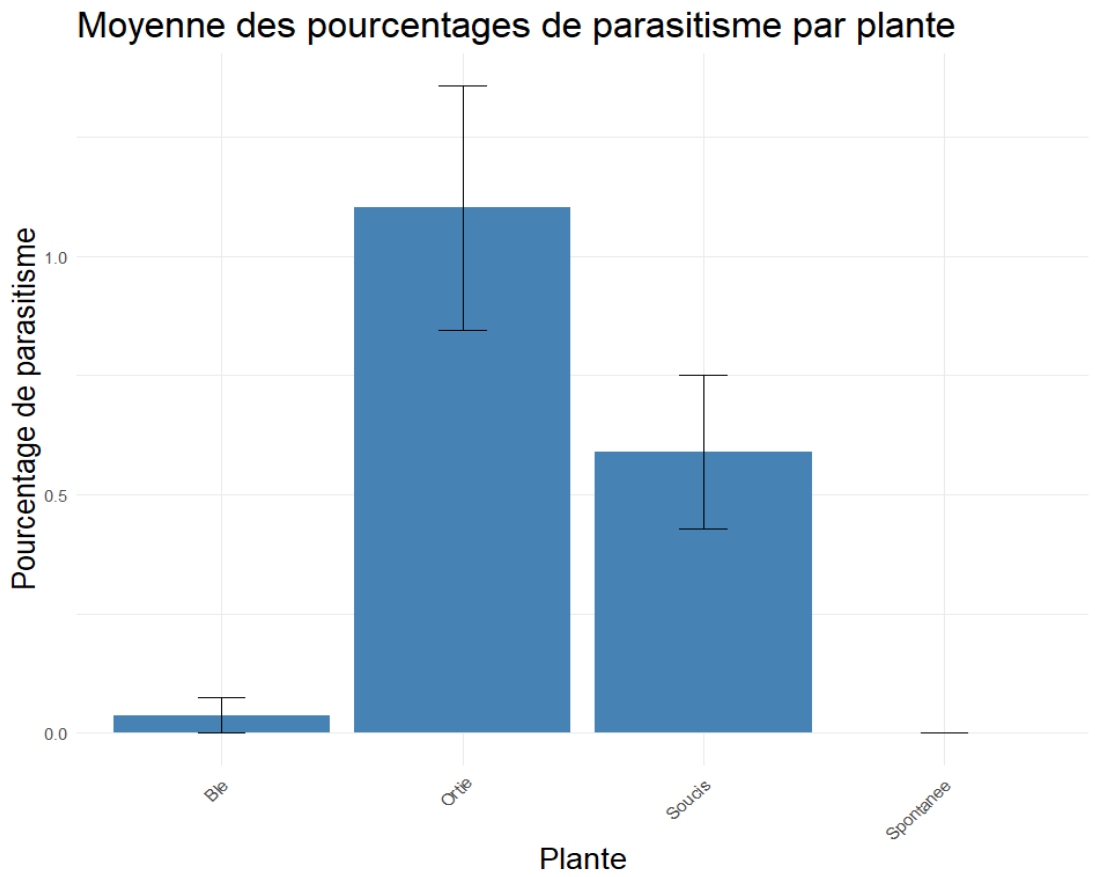


Figure 23 : Moyenne du taux de parasitisme par plante en fonction de l'espèce de plante de service.

Figure 23 : Average parasitism rate per plant according to the species of service plants.

comptabilise une population de 2,3 *Macrolophus* par mètre carré. On considère donc une efficacité similaire pour un prix deux fois inférieur (Tableau 4).

Ces coûts sont à comparer avec une perte de rendement potentielle si aucune stratégie n'est mise en place. En effet, selon les techniciens et les techniciennes, une attaque de pucerons non contrôlée peut entrainer une perte d'environ 50% de rendement. En se basant sur les mercuriales de prix de vente des courgettes bretonnes cultivées en agriculture biologique en 2024, on obtient donc une perte potentielle de 5,4 euros par mètre carré en considérant un rendement moyen de 30 000 kg/ha.

VI. Discussion

1. Arrivée des auxiliaires dans les serres

La dynamique des populations d'auxiliaires nous montre bien que les plantes de service ont un rôle pour l'installation précoce des auxiliaires comme leur population est beaucoup plus élevée que sur les cultures au début de la saison (Picault et al., 2018). Les graphiques montrent une corrélation entre l'augmentation du nombre de pucerons et celle des auxiliaires, suggérant que les pucerons provoquent l'arrivée des auxiliaires dans les plantes de service (Figure). Cependant, malgré la diminution des pucerons au cours du temps, les auxiliaires se maintiennent, indiquant que les plantes de service fournissent également des ressources nutritives ou des abris, comme l'expliquent plusieurs auteurs (Djian-Caporalino et al., 2020).

La dynamique entre les populations de pucerons et d'auxiliaires au sein des plantes de service semble suivre la logique des dynamiques proies prédateurs du modèle Lotka-Voltera. En effet, l'augmentation du nombre de pucerons semble stimuler l'augmentation du nombre d'auxiliaires. Inversement, la diminution du nombre d'auxiliaires stimule l'augmentation du nombre de pucerons.

2. Répartition des auxiliaires au sein des plantes de services

La présence de punaises du genre *Macrolophus* est significativement plus élevée au sein des soucis, ce qui est cohérent avec les autres études menées à ce sujet (Bout et al., 2019). Néanmoins, l'effet attendu des graminées (Djian-Caporalino et al., 2020) sur l'attraction des pucerons n'est pas observé cette année puisque le nombre de pucerons n'est pas significativement plus élevé sur le blé et le pourcentage de parasitisme est très bas par rapport aux autres espèces de plantes. Au vu de la répartition des auxiliaires entre les plantes de service, l'association de plantes de service paraît être une bonne solution pour diversifier les communautés d'auxiliaires présentes (Niyibizi Gakuru and Tech, 2020).

Par ailleurs, l'action significative de la température sur les différentes espèces d'auxiliaires montrent l'importance de pouvoir contrôler finement les conditions de température et d'humidité sous la serre.

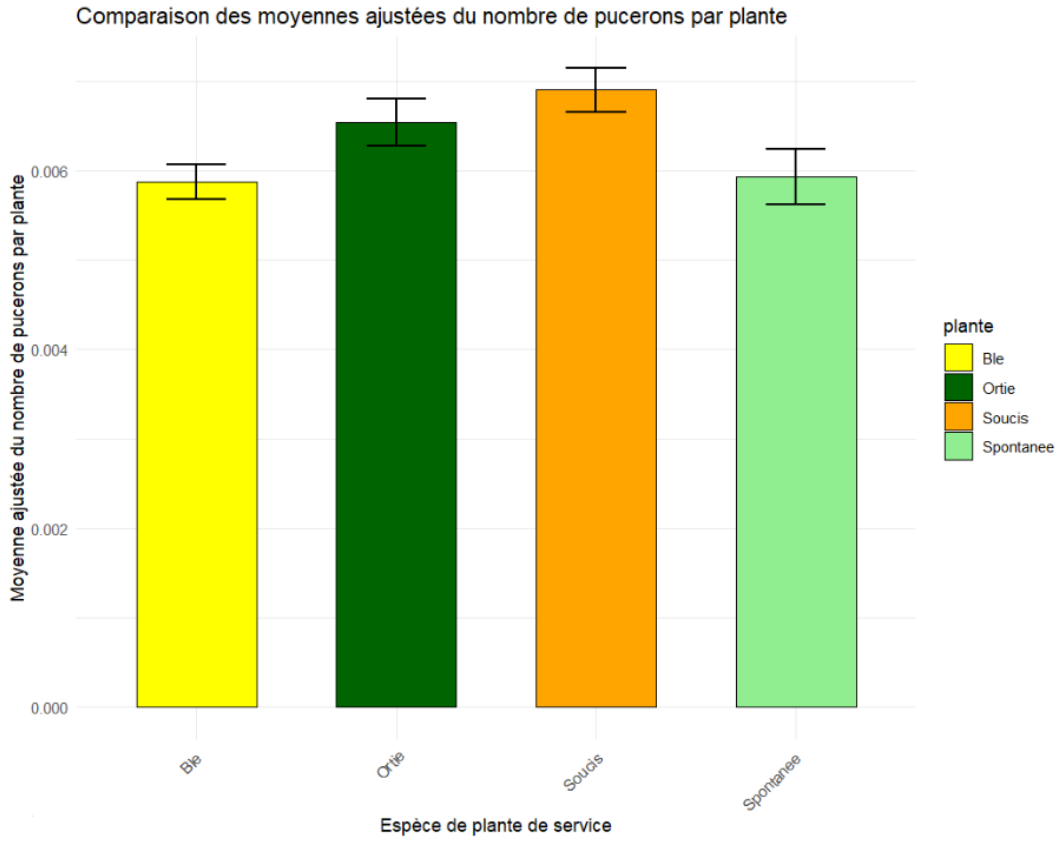


Figure 24 : Comparaison des moyennes ajustées du nombre de pucerons en fonction de l'espèce de plante de service.

Figure 24 : Comparison of adjusted means of the number of aphids according to the species of service plant.

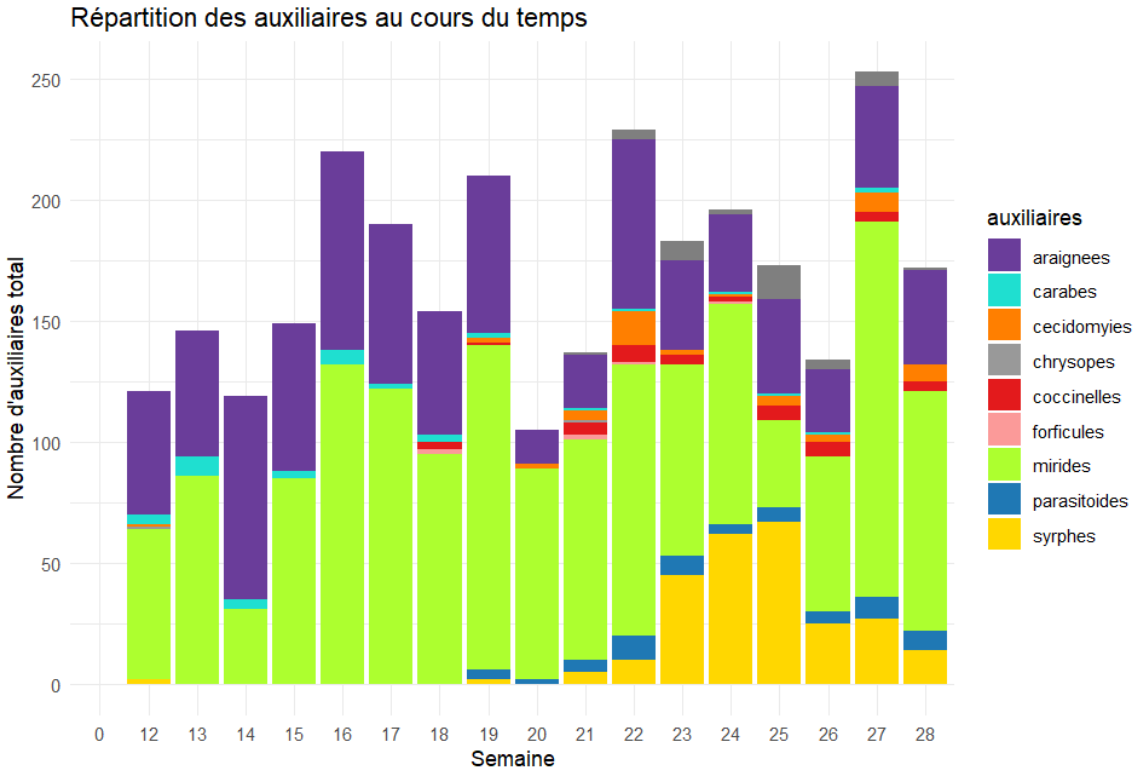


Figure 25 : Répartition du nombre d'auxiliaire total en fonction du temps.

Figure 25: Distribution of the total number of beneficial insects over time.

3. Effet de la modalité de transfert sur les populations

La colonisation des pucerons se fait par foyers autour de l'arrivée d'une mère fondatrice lors de son vol d'émigration. Le point d'arrivée des premiers pucerons ne semble pas être lié à la modalité de transfert de la planche de culture, d'où l'intégration d'un facteur aléatoire dû à la localisation des plants dans notre modèle comparant les modalités de transfert. Graphiquement, on observe que l'augmentation des populations de pucerons semble avoir été plus facilement contrôlée par les auxiliaires dans le cas du transfert actif, la courbe de voracité suivant mieux le nombre de pucerons (Figure 18).

Comme le montre une étude menée sur des soucis, le transfert actif semble avoir tendance à augmenter le nombre d'auxiliaires dans les cultures (Lambion, 2018). Notre étude révèle également que le transfert actif entraîne une diminution significative du nombre de pucerons (Figure 29). Cependant, les résultats sont à nuancer au vu de la faible différence de moyenne ajustée entre les deux modalités. De plus, le transfert actif ne permet pas d'augmenter le nombre d'auxiliaires sur les cultures lorsque les plantes de service n'en contiennent pas suffisamment. Ainsi, il apparaît primordial de s'assurer une bonne colonisation des plantes de service par les auxiliaires en début de saison afin de lutter efficacement contre les auxiliaires par la suite. Ceci peut se faire grâce à un lâcher préventif d'auxiliaires en début de saison qui viendront se reproduire sur les plantes de service.

Par ailleurs, l'augmentation plus forte du nombre d'auxiliaires sur les cultures du côté du transfert actif malgré la diminution du nombre de pucerons montre que les auxiliaires se maintiennent sur la culture de tomates malgré l'arrêt des transferts (Figures 18 et 20). Ceci signifie que les transferts actifs pourraient pouvoir se faire avant l'arrivée des pucerons sur culture de tomate.

Concernant le budget de la stratégie, les coûts de transfert calculés sont à peu près équivalents à ceux trouvés dans un rapport de la chambre d'agriculture de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. En effet, ils les estiment à 11 centimes par mètre carré contre les 14 centimes par mètre carré calculés pour notre dispositif. Par ailleurs, cette étude montre que l'implantation de soucis permettrait d'économiser plus de 30 centimes par mètre carré par rapport à des lâchers inondatifs (Lambion, 2018). C'est la différence que l'on retrouve entre les stratégies (4) et (8) (Tableau 4). D'après l'analyse du coût de transfert, il semble donc pertinent d'effectuer des transferts actifs. Même si le prix de la stratégie avec transfert est le triple du prix de la stratégie sans transfert, elle pourrait permettre de diminuer de 60% le nombre de pucerons, ce qui est non négligeable en comparaison avec la perte potentielle due aux pucerons.

4. Action du parasitisme dans la lutte

Bien que les orties et les soucis présentent un taux de parasitisme plus élevé que ceux du blé et des plantes spontanées, ce pourcentage proche de 1% reste très faible par rapport au taux attendu. En effet, ces taux sont très variables et dépendent beaucoup de la pression de proies dans la serre et de l'espèce de parasitoïde, mais ceux observés normalement sont plutôt compris entre 10% et 50% (Postic, 2016).

Par ailleurs, les hyménoptères parasitoïdes observées sur les plantes de service ne sont pas intéressants pour la lutte biologique puisqu'ils sont spécifiques uniquement aux pucerons de ces plantes de service. Il n'y a que le souci qui abritent un parasitoïde intéressant (*Aphidius urticae*) puisqu'il est hôte d'*Aulacorthum solani* (Figure 31). Par ailleurs, beaucoup de momies observées ont fait émergé des espèces d'hyperparasitoïdes du genre Alloxysta. Ces individus sont généralistes et peuvent donc être un frein à la lutte biologique se reposant sur les parasitoïdes (Turpeau et al., 2010). Ceci pourrait donc être un facteur d'explication du très faible taux de parasitisme sur les sites.

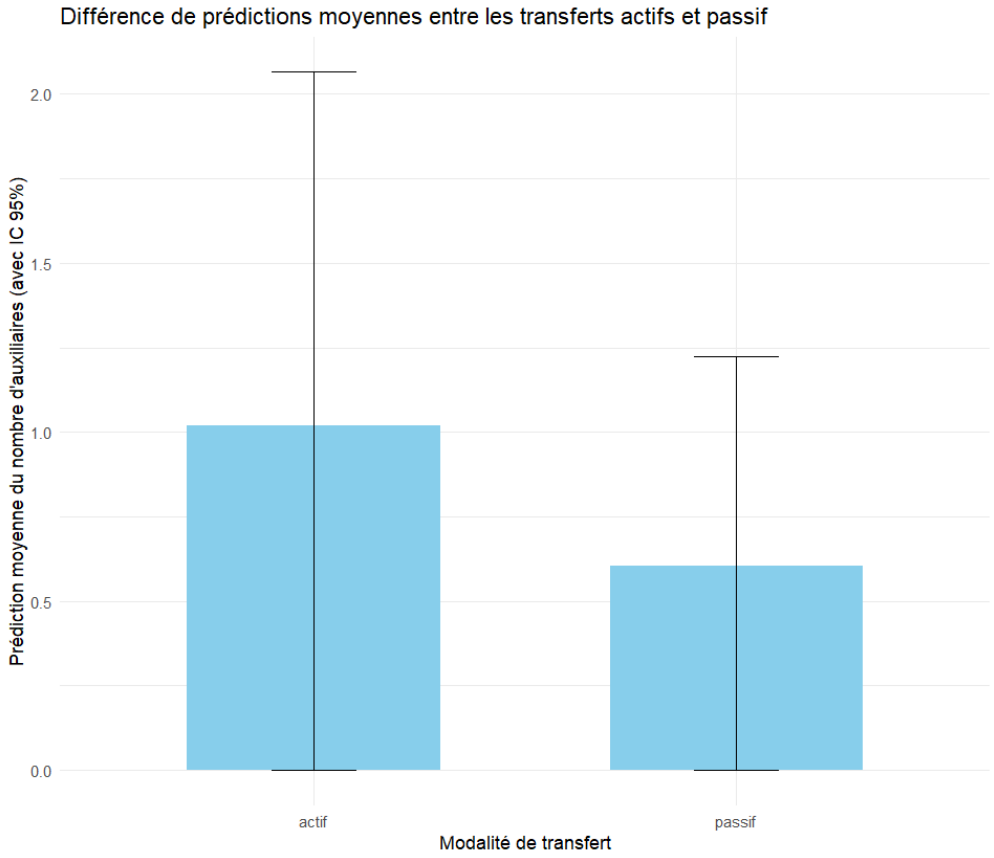


Figure 26 : Différence de prédiction moyenne du nombre d'auxiliaires dans les cultures en fonction de la modalité de transfert.

Figure 26: Difference in average predicted number of beneficial insects in crops according to the transfer method.

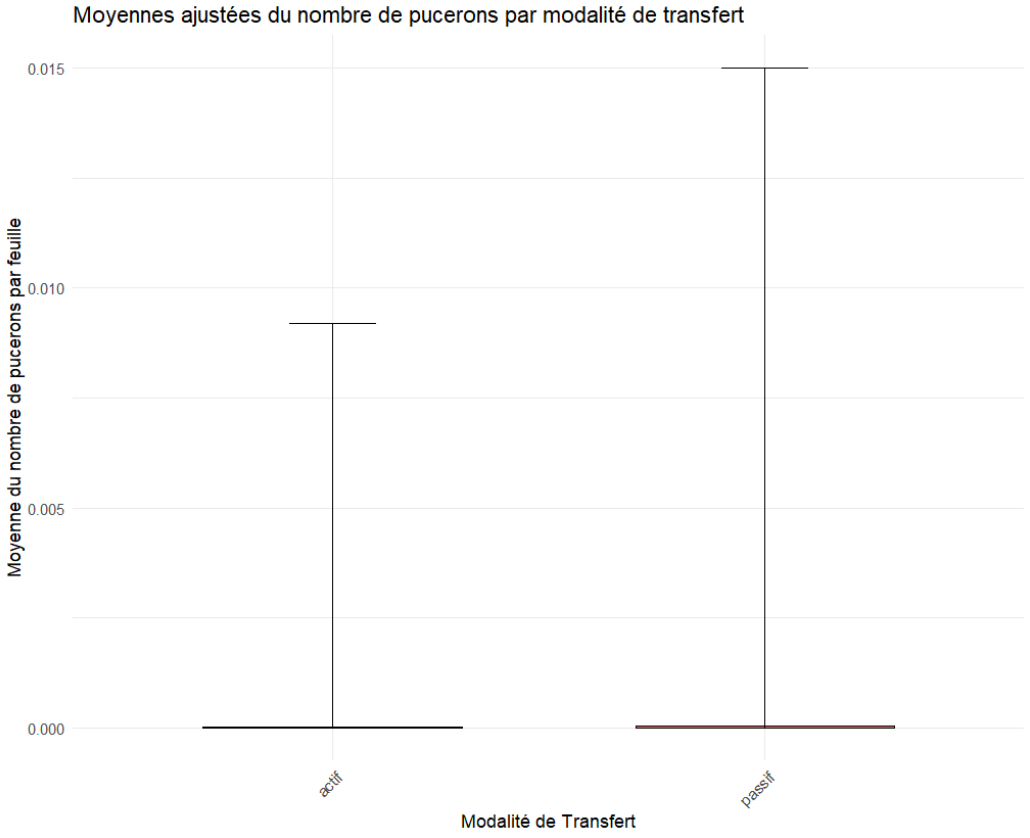


Figure 27 : Comparaison des moyennes ajustées de pucerons selon la modalité de transfert.

Figure 27: Comparison of adjusted means of aphids according to the transfer method.

5. Limites de l'étude

5.1. Amélioration de l'homogénéité des sites d'études

Les itinéraires culturaux effectués sur les différents sites n'étaient pas les mêmes. En effet, les périodes de plantation et les variétés plantées ne sont pas similaires entre les deux sites. De plus, les paramètres environnementaux des serres n'ont pas pu être bien contrôlés pendant l'étude. En effet, la bâche d'une des serres s'étant envolée pendant 2 semaines, les dynamiques ont sans doute été impactées. De plus, la colonisation de planches par le mildiou a obligé les producteurs à ouvrir prématurément les ouvertures des serres afin d'aérer, ce qui a impacté les conditions climatiques sous le tunnel et a pu avoir des conséquences sur les populations de certains auxiliaires.

5. 2. Amélioration du dispositif expérimental

Le nombre de planches étudiées au sein des différents tunnels aurait dû être augmenté. En effet, l'hétérogénéité des gradients d'infestation auraient pu être lissé en ayant différentes planches avec des foyers d'infestation différents. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de sites d'étude différents aurait permis de prendre en compte plus pertinemment l'effet de la température et de l'humidité sur les populations.

Le nombre d'itération de blocs de la même espèce de plante de service aurait dû être augmenté au sein des mêmes tunnels et les mêmes espèces auraient dû être présentes entre les différents sites. De plus, la disposition et la sélection des plantes de service au sein du dispositif auraient dû être davantage réfléchies pour permettre une lutte plus ciblée contre les pucerons, en favorisant des auxiliaires plus spécialisés. En effet, les comptages ont révélé que les *Macrolophus*, majoritaires parmi les auxiliaires dénombrés, présentent une voracité faible pour les pucerons. Cela remet en question le choix du souci comme plante de service pour une lutte ciblée contre ces ravageurs. Des plantes comme celles du genre *Asclepia*, la tanaisie commune ou l'achillée millefeuille pourraient être envisagées pour accueillir des prédateurs plus spécifiques même si celles-ci ont d'autres inconvénients comme le coût ou la difficulté de mise en place (Duquesnoy, 2020).

Un des sites n'a presque pas présenté de pucerons cette année, ce qui n'a pas permis d'observer correctement les dynamiques. De plus, les dynamiques des pucerons et des ennemis naturels étant très tardives cette année, toutes les dynamiques n'ont pas pu être observées. Pour contrer ces deux dernières limites, il faudrait expérimentalement pouvoir coloniser de manière homogène des planches de culture. Ceci permettrait d'observer la lutte exercée par les auxiliaires sur une colonisation homogène, afin de constituer le témoin positif de l'étude.

Toutes ces propositions d'améliorations du dispositif n'ont pas pu être réalisées dans les conditions de recherche appliquée au sein des serres des membres du groupes. En effet, la typologie de petites fermes maraichères diversifiées du groupe ne permet pas d'avoir d'assez grandes surfaces de serres et un assez grand nombre de répétition des mêmes cultures pour pouvoir faire suffisamment de répétitions. De plus, l'objectif principal des maraîchers et maraichères est de pouvoir produire suffisamment donc il est difficile d'empêcher totalement l'action de ceux-ci pour l'expérimentation.

5. 3. Amélioration des mesures et observations

L'observation visuelle des auxiliaires n'est parfois pas suffisante. En effet, certains auxiliaires s'observent majoritairement la nuit comme les chrysopes, ou au sol comme les carabes. Des dispositifs comme les pièges Barber ou des caméras à insecte auraient pu améliorer ces observations. Cependant, les caméras sont très coûteuses et la volonté des membres du groupe est de ne pas faire de suivis destructifs.

Espèce végétale	Espèce de pucerons majoritaire 1	Espèce de pucerons majoritaire 2	Espèce de pucerons minoritaire
Soucis	Aulacorthum solani		
Ortie	Microlophium carnosum	Aphis urticae	Aulacorthum solani
Pissenlit	Uroleucon		
Graminées	Sitobion avenae	Rhopalosiphum padi	
Tomates	Aulacorthum solani		
Courgettes	Aphis gossypii		Aulacorthum solani

L'espèce de pucerons est considérée comme majoritaire quand elle représente plus de 50% des pucerons présents lorsque deux espèces sont présentes ou qu'elle représente plus de 30% des pucerons présents lorsque trois espèces sont présentes

Figure 28 : Espèces de pucerons identifiés sur les cultures et sur les plantes de service.

Figure 28: Species of aphids identified on crops and service plants.

Espèce végétale	Espèce de parasitoïdes observés	Spécificité du parasitoïde	Espèces d' hyperparasitoïdes observés
Soucis	Aphidius urticae	Aulacorthum solani, Acyrthosiphon sp., Macrosiphum sp.	Alloxysta
Ortie	Aphidius microlophii	Microlophium carnosum	
Pissenlit	Aucun		
Graminées	Aphidius rhopalosiphi	Sitobion avenae, Rhopalosiphum padi	Alloxysta
Tomates	Praon volucre	Macrosiphum euphorbiae, Aphis fabae, Aphis gossypii, Myzus persicae, Aulacorthum solani	Alloxysta
Courgettes	Aucun		

Figure 29: Espèces de parasitoïdes identifiés sur les cultures et sur les plantes de service.

Figure 29: Species of parasitoids identified on crops and service plants.

Tableau 4 : Comparatif des coûts des différentes techniques de luttes contre les pucerons en maraîchage (en euros par mètre carré).

Table 4 : Comparison of the costs of different aphid control techniques in market gardening.

Numéro de la stratégie	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Stratégie utilisée	**100% phyto**	**100% phyto AB**	**PS**	**PS+transfert**	**PBIaa**	**PBIaa + PS + transfert**	**PBIm**	**PBI + PS + transfert**
Prix de la stratégie (en €/m²)	0.09	0.21	0.05	0.14	0.59	0.73	0.32	0.45
Details de la stratégie	1 passage de Tekkepi aux dosages recommandés	2 passages de Flipper aux dosages recommandés	Coût des graines + plantation + désherbage pour une bande avec des blocs de soucis, d'ortie et de blé	Coût des PS + main d'œuvre pour 5 transferts de 15 minutes	4 lâchers d'Aphidius (1 individu/ m2) + 1 lâcher d'Aphidoletes (5 individus/m2)	(4) + (5)	2 lâchers de Macrolophus pygmaeus (1,5 individus/ m2)	(4) + (7)

De plus, les populations de pucerons et de parasitoïdes ont été prélevées seulement pendant un mois et les individus n'ont été prélevés que ponctuellement. Un suivi plus long et plus régulier aurait permis de voir l'évolution de la répartition des espèces au cours des semaines. Cependant, on peut noter que le prélèvement de trop d'individus aurait pu influer sur les dynamiques de populations dans les serres.

Enfin, la répétition de l'expérience sur plusieurs années serait intéressante pour lisser les hétérogénéités dues au hasard. En effet, les maraîchers et les maraîchères insistent sur la variabilité des dynamiques de populations selon les années.

VII. Conclusion

Les résultats ont montré que les plantes de service facilitent l'installation des auxiliaires, d'abord sur elles-mêmes, puis sur les cultures principales. La distribution des ennemis naturels des pucerons au sein des plantes de service confirme les résultats de la bibliographie. En effet, les Miridae sont significativement plus observées sur les soucis et les Syrphidae sont significativement plus observées sur les plantes spontanées puis dans les soucis. Néanmoins, l'effet attendu des graminées sur l'attraction des pucerons n'est pas observé.

D'après le modèle utilisé, le transfert des auxiliaires sur les cultures diminue le nombre de pucerons et semble augmenter le nombre d'auxiliaires par plant par rapport au passage passif des auxiliaires. Toutefois, ce transfert actif n'est pertinent que si un nombre suffisant d'auxiliaires est présent sur les plantes de service. C'est pourquoi il est primordial d'accompagner les techniciens·nes et les maraîchers·ères en définissant des seuils d'action. Ces seuils concernent aussi bien les populations d'auxiliaires que celles de pucerons et permettent de les aider à choisir la meilleure méthode et le moment opportun pour effectuer les transferts.

Enfin, il est important de noter que l'efficacité de la lutte biologique est fortement influencée par les conditions météorologiques, et qu'elle peut être moins efficace lors des années où les températures sont plus basses.

VIII. Perspectives

L'installation de plantes de service est une méthode intéressante dans une démarche d'augmentation de la biodiversité dans les fermes pour lutter contre les ravageurs. Le fait de favoriser les auxiliaires permet de lutter contre plusieurs ravageurs importants des serres comme les pucerons mais aussi les aleurodes, thrips ou *Tuta absoluta,* à condition d'utiliser une bonne association de plantes de services selon le risque sur la culture envisagée.

Par ailleurs, la démarche d'augmentation de la biodiversité dans sa ferme va obligatoirement de pair avec une démarche de diminution des insecticides, afin de pouvoir profiter des services écosystémiques rendus par les auxiliaires. Pour rendre cela possible, la création d'un protocole simplifié à destination des maraîchers et maraîchères pourrait être envisagée. Ce protocole leur permettrait de déterminer eux-mêmes quand réaliser les transferts et quand il est nécessaire d'adopter une alternative, grâce à l'observation des populations. En effet, la lutte biologique prenant plus de temps à agir qu'une lutte chimique, le délais d'intervention est très important à prendre en compte. Ainsi, la formation et la création d'outils simplifiés et fonctionnels pour les techniciens·nes et les maraîchers·ères semble primordiales pour une bonne efficacité des techniques de transferts.

Toutefois, il est important de maîtriser la biodiversité issue des plantes de services mises en place. En effet, les plantes de service peuvent aussi favoriser une biodiversité nuisible qui aurait un effet non intentionnel et donc une limite à cette utilisation (Ris et al., 2014).

Enfin, il est essentiel de concevoir le système de plantes de service de manière globale. La biodiversité extérieure aux serres joue également un rôle crucial, en créant des couloirs écologiques qui facilitent la migration des auxiliaires vers les serres.

Bibliographie

Alphen JJMV, Visser ME (1990) Superparasitism as an Adaptive Strategy for Insect Parasitoids. *Annual Review of Entomology* Vol.35: 59–79. DOI 10.1146/annurev.en.35.010190.000423

Ashishie P, Ashishie C (2018) Biopesticide, their Ecological and Toxicological Effects (Review). *International Journal of Sciences* Vol.7, n° 8 : 21–25. DOI 10.18483/ijSci.1736

Boreau de Roincé C, Lavigne C, Mandrin J-F, Rollard C, Symondson WOC (2012) Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bulletin of entomological research* Vol. 103 : 148–154. DOI 10.1017/S0007485312000636

Bout A, Lambion J, Quaglietti B, Scotta M, Ruiz I, Goff I, Ris N, Streito J-C (2019) M. pygmaeus, une punaise auxiliaire pleine de ressources. *Phytoma* n° 724 : 41–44. https://www.researchgate.net/publication/341662000_M_pygmaeus_une_punaise_auxiliaire_pleine_de_ressources

Boyer F, Ulrych R, Sellam M, Lejeune V, Chabert A, Gross H (2017) Les auxiliaires de cultures: biologie, écologie, méthodes d'observation et interet agronomique, Acta éditions. 263p.

Brodeur J, Rosenheim JA (2000) Intraguild interactions in aphid parasitoids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* Vol. 97, n°1: 93–108. DOI 10.1046/j.1570-7458.2000.00720.x

Chaubet B, Hullé M, Turpeau E (2010) A. solani. Encyclopaphid, https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/fiche-especes/pucerons/aulacorthum/a.-solani

Collier T, Van Steenwyk R (2004) A critical evaluation of augmentative biological control. *Biological Control* Vol 31, n°2 : 245–256. DOI 10.1016/j.biocontrol.2004.05.001

DeBach P, Rosen D (1991) Biological Control by Natural Enemies. CUP Archive. 466p.

Delpech L (2018) Etude des pratiques de fertilisation azotée en maraîchage biologique diversifié. Mémoire de fin d'étude : ISARA Lyon. 66p.

Dib H (2011) Predation potency and intraguild interactions between generalist (Forficula auricularia) and specialist (Episyrphus balteatus) predators of the rosy apple aphid (Dysaphis plantaginea). *Biological Control* n° 59. 90–97. https://www.academia.edu/29753150/Predation_potency_and_intraguild_interactions_between_generalist_Forficula_auricularia_and_specialist_Episyrphus_balteatus_predators_of_the_rosy_apple_aphid_Dysaphis_plantaginea_

Dixon AFG (1997) Aphid ecology an optimization approach Vol. 2, Chapman&Hall. *Springer Science & Business Media*, Great Britain. 314p. ISBN 978-0-412-74180-7.

Djian-Caporalino C, Caravel C, Rhino B, Lavoir A-V, Villeneuve F, Fournet S, Gautier H, Chave M, Cortesero A-M, Nicot PC, et al (2020) Agrosystèmes légumiers: les plantes de service contre les bioagresseurs, Info CTIFL hors-série. 23p.

Doigni M (2023) Étude de l'impact de la température sur la compétition interspécifique entre les parasitoïdes de pucerons Aphidius matricariae Haliday et Ephedrus persicae Froggatt. Mémoire de fin d'étude : Université catholique de Louvain. 80 p.

Duquesnoy M (2020) Des plantes de services pour optimiser la régulation des pucerons en cultures d'aubergines et de poivrons sous abris froids. Mémoire de fin d'étude : Unilasalle, Beauvais. 70p.

Ferré A (2023) Astredhor. Les prédateurs généralistes et les spécialisés dans la gestion des pucerons : une complémentarité indispensable. 2p. https://rmtbioreg.fr/ressources/68/les-predateurs-generalistes-et-les-specialises-dans-la-gestion-des-pucerons-une-complementarite-indispensable

Ferreira B (2021) Anses. Rapport d'expertise collective. Efficacité des traitements disponibles pour lutter contre les pucerons de la betterave. Maison-Alfort. 137p. https://www.anses.fr/fr/system/files/SANTVEG2020SA0102Ra.pdf

Frank SD (2010) Biological control of arthropod pests using banker plant systems: Past progress and future directions. *Biological Control* Vol. 52 n°1 : 8–16. DOI 10.1016/j.biocontrol.2009.09.011

Godfray HCJ (1994) Parasitoids : behavioral and evolutionary ecology. Princeton University Press

Goh HG, Kim JH, Han MW (2001) Application of *Aphidius colemani* Viereck for Control of the Aphid in Greenhouse. *Journal of Asia-Pacific Entomology* Vol. 4, n°2: 171–174. DOI 10.1016/S1226-8615(08)60119-3

Guénard B (2007) Mutualisme fourmis pucerons et guilde aphidiphage associée : le cas de la prédation furtive. Mémoire de fin d'étude : Université du Québec, Montréal. 122p. https://archipel.uqam.ca/3103/

Heimpel GE, Jervis MA (2005) Does floral nectar improve biological control by parasitoids? *In* FL Wäckers, J Bruin, PCJ van Rijn, eds, Plant-Provided Food for Carnivorous Insects: A Protective Mutualism and its Applications. Cambridge University Press, Cambridge, pp 267–304. ISBN 978-0-521-81941-1

Hofsvang T, Hågvar EB (1979) Different introduction methods of Ephedrus cerasicola Starý to control Myzus persicae (Sulzer) in small paprika glasshouses. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* Vol. 88, n°1-5: 16–23. DOI 10.1111/j.1439-0418.1979.tb02472.x

Hullé M (1999) Les pucerons des plantes maraîchères: cycles biologiques et activités de vol. Editions Quae. 140p. ISBN 978-2-85794-179-8

Jaloux B (2011) Cultures associées et contrôle des populations de pucerons, mécanismes et perspectives. *Journées Techniques Fruits et Légumes Biologiques GRAB/ITAB*, Rennes, France. pp. 76–80

Jouhet E, Vincent F, Lahens M, Blomme L, Giuliano S (2022) Plantes de service : Définition. Dictionnaire d'agroécologie. DOI 10.17180/XXV9-MX71

Jourdheuil P, Grison P, Fraval A (1991) La lutte biologique : un aperçu historique. Courrier de la cellule environnement INRA n° 15 : 37–60. https://hal.science/hal-01207929

Kouassi M de (2001) La lutte biologique : une alternative viable à l'utilisation des pesticides? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* Vol.2, n°2. DOI 10.4000/vertigo.4101

Lambion J (2018) CRA PACA. Le souci : plante-hôte de Macrolophus. Ressources coll.2, doc. 2F. 4p. https://orgprints.org/id/eprint/38249/

Lambion J (2017) Biodiversité fonctionnelle en maraîchage biologique: renforcer l'effet des bandes florales grâce à un transfert actif. *Maraîchage bio infos* n° 93. 8p. https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=3442

Lambion J, Koch L, Lahu A (2020) Gestion de l'enherbement et biodiversité fonctionnelle contre pucerons en maraîchage biologique sous abris (Projet Ecophyto Placohb). Maraîchage bio infos : 2–5. https://orgprints.org/id/eprint/38248/

Lamy F, Bolland P, Viannay D, Pintureau B (2011) Influence des pratiques culturales sur les populations d'arthropodes dans un contexte de maraîchage rhônalpin. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon* Vol. 80, n°9: 211–217. DOI 10.3406/linly.2011.13810

Leblanc A (2017) Estimation de l'impact des parasitoïdes sur les populations de pucerons en champ. Institut de recherche en biologie végétale. Mémoire de fin d'étude : Université de Montréal. 58p.

Lecoq H, Wisler GC, Pitrat M (1998) Cucurbit viruses : the classics and the emerging. Cucurbitaceae'98, Pacific Grove, United States. ASHS. https://hal.inrae.fr/hal-02768090

Legrand M (2010) Produits de traitement utilisables contre les pucerons en maraîchage biologique: synthèse des essais et pistes envisagées. Journées Techniques Fruits et Légumes Biologiques. https://www.itab.asso.fr/downloads/actes/actesfl2010web.pdf

Lucas É (2001) Prédation intraguilde et lutte biologique. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* Vol. 2, n° 2. DOI 10.4000/vertigo.4102

Messelink G, Bloemhard C, Kok L, Janssen A (2011) Generalist predatory bugs control aphids in sweet pepper. *IOBC/WPRS Bull.* Vol. 68: 115-118. https://www.researchgate.net/publication/254841423_Generalist_predatory_bugs_control_aphids_in_sweet_pepper

Navasse Y (2016) Spécialisation parasitaire chez les Aphidiinae : existe-t-il des parasitoïdes de pucerons généralistes ? These de doctorat : Rennes 1. 188p. https://www.theses.fr/2016REN1B039

Niyibizi Gakuru P, Tech U de L> GA-B (2020) Associations végétales pour le contrôle des ravageurs : D'une synthèse des approches théoriques à l'application pratique. Mémoire de fin d'étude : Université de Liège. 56p. https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10897

Parker L, Popenoe J (2008) Using Banker Plants as a Biocontrol System for Spidermites. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* n° 121 : 385–386.

Perrot S, Houdault S, Grimault V, Lecoq H, Justafré I, Buisson M, Bertrand F, LOSDAT D, Constant C, Menet G (2021) Virus courgette -Amélioration de l'évaluation de la résistance de la courgette aux Cucumber mosaic virus (CMV), Zucchini yellow mosaic virus (ZYMV) et Watermelon mosaic virus (WMV). *Innovations Agronomiques, INRAE* n° 84 : 33-43. hal-03263602

Peters D (1971) Relationships between plant Viruses and their Aphid and Leafhopper vectors. Ann Parasitol Hum Comp Vol.46, ,n°3bis: 233–242. DOI 10.1051/parasite/1971463s233

Picault S, Quennesson S, Roy G, Davy M, Torres M, Ginez A, Schoeny A, Lambion J, Lavigne D, Bouvard D (2018) AGATH : Utilisation de plantes de service et de kaolin pour gérer les populations de pucerons et de thrips en cultures légumières. *Innovations Agronomiques* n°63 : 385–397. DOI 10.15454/1.5191193584430571E12

Portillo N, Alomar O, Wäckers F (2012) Nectarivory by the plant-tissue feeding predator *Macrolophus pygmaeus* Rambur (Heteroptera: Miridae): Nutritional redundancy or nutritional benefit? *Journal of Insect Physiology* Vol. 58, n°3: 397–401. DOI 10.1016/j.jinsphys.2011.12.013

Postic E (2016) Caractérisation de pucerons et efficacité des parasitoïdes dans le cadre d'un programme de lutte biologique en culture de fraisier sous abri. Mémoire de fin d'étude : Montpellier SupAgro. 25p.

Pratt PD, Croft BA (2000) Banker Plants: Evaluation of Release Strategies for Predatory Mites. *Journal of Environmental Horticulture* Vol. 18, n°4 : 211–217. DOI 10.24266/0738-2898-18.4.211

Rabindra RJ, Ramanujam B (2007) Microbial control of sucking pests using entomopathogenic fungi. *Journal of biological control* n°21 : 21–28

Ris N, Ion-Scotta M, Al Khatib F, Lambion J, Warlop F, Bout A (2014) Biodiversités « utile » et « nuisible » dans les agrosystèmes : importance pour la lutte biologique par conservation. *Mémoires de la Société Entomologique de France* n°9 : 35–43. https://orgprints.org/id/eprint/26837/

Rochefort S, Lalancette R, Labbé R, Brodeur J, Caron J (2006) Recherche et développement de biopesticides et pesticides naturels à faible toxicité pour les organismes non ciblés et respectueux de l'environnement – Projet PARDE. Université Laval. 80p.

Sallets P (2015) Légumes bio : quelles stratégies pour protéger vos cultures ? *Itinéraires bio* Vol. 21: 27–29. https://orgprints.org/id/eprint/45181/1/BIOW-4786-ITBIO-21_1.3.pdf

Schmid O, Henggeler S (1998) Ravageurs et maladies au jardin : les solutions biologiques, Terre vivante. 256p. ISBN 2-904082-00-X

Silguy C de (1997) L'agriculture biologique. FeniXX. 147p. ISBN 978-2-7059-0825-6

Stireman JO, Nason JD, Heard SB, Seehawer JM (2006) Cascading host-associated genetic differentiation in parasitoids of phytophagous insects. *Proc Biol Sci* Vol. 273 : 523–530. DOI 10.1098/rspb.2005.3363

Sutter L, Camps C, Lambion J, Van Rijn P, Studer J (2022) Des bandes fleuries pour auxiliaires sous abri - Un outil de lutte contre les ravageurs. Agroscope n° 155. 4p.

Trottin-Caudal Y, Arvanitakis L, Bordat D, Caldumbide C, Canard M, Chabrière C, Chaubet B, Cheval B, Delvare G, Fournier C, et al (2006) Reconnaître les auxiliaires. Légumes et fraise sous serres, abris et en plein champ, Lavoisier Editions. CTIFL. 125p. ISBN 2-87911-193-5

Tylianakis JM, Didham RK, Wratten SD (2004) Improved Fitness of Aphid Parasitoids Receiving Resource Subsidies. *Ecology* Vol. 85, n°3 : 658–666. DOI 10.1890/03-0222

Villenave-Chasset J (2020) Biodiversité fonctionnelle: protection des cultures et auxiliaires sauvages Vol. 2. Collection Agriproduction. Edition France Agricole. Collection 150p. ISBN 978-2-85557-648-0

Vorburger C (2018) Symbiont-conferred resistance to parasitoids in aphids – Challenges for biological control. *Biological Control* Vol. 116 : 17–26. DOI 10.1016/j.biocontrol.2017.02.004

Voynaud L (2008) Prédation intraguilde entre prédateurs actif et furtif au sein d'une guilde aphidiphage. Mémoire de fin d'étude : Université du Québec, Montréal. 66p.

Wäckers FL, van Rijn PCJ (2012) Pick and Mix: Selecting Flowering Plants to Meet the Requirements of Target Biological Control Insects. Biodiversity and Insect Pests. John Wiley & Sons, Ltd, pp 139–165. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118231838.ch9. ISBN 978-1-118-23183-8

Wagner E, Weber HH (1964) Hétéroptères Miridae. Faune de France Vol. 67. Fédération française des sociétés de sciences naturelles. Office central de faunistique, Paris. 589p.

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 Manag Sci* Vol. 73, n°3 : 515–520. DOI 10.1002/ps.4474

Zhao Z, Hui C, He D-H, Li B-L (2015) Effects of agricultural intensification on ability of natural enemies to control aphids. *Scientific Reports* Vol. 5, n°8024. DOI 10.1038/srep08024

Sitographie

Anses (2024) Ephy. Usages des produits phytopharmaceutiques. [En ligne]. Disponible sur : https://ephy.anses.fr/ (Consulté le 7 mars 2024).

Blancard D (2023) Ephytia. Tomate - Pucerons. [En ligne]. Disponible sur : https://ephytia.inra.fr/fr/C/5140/Tomate-Pucerons (Consulté le 21 mars 2024).

Blancard D, Marchoux G (2013) Ephytia. Tomate - Principaux symptômes. [En ligne]. Disponible sur : http://ephytia.inra.fr/fr/C/5251/Tomate-Principaux-symptomes (Consulté le 18 mars 2024).

Cerrutti N, Geloen M, Cadoux S (2023) Terres Inovia. Biodiversité fonctionnelle : Un atout pour les producteurs de grandes cultures. [En ligne]. Disponible sur : https://www.terresinovia.fr/-/biodiversite-fonctionnelle-un-atout-pour-les-producteurs-de-grandes-cultures (consulté le 22 mai 2024).

Turpeau E, Hullé M, Chaubet B (2010) Encyclop'aphid. Taxonomie des pucerons. [En ligne]. Disponible sur : https://encyclopedie-pucerons.hub.inrae.fr/qu-est-ce-qu-un-puceron/taxonomie (Consulté le 2 août 2024)

Annexe I : Itinéraires culturaux des cultures de tomates et de courgettes dans les fermes étudiées

Semaine	Biotaupe	Le pays fait son jardin
culture précédente	Epinards	Epinards
4-6	Travail du sol (sous-solage, vibroculteur, rouleau, compost)	Travail du sol (vibroculteur, rouleau, compost)
9	Solarisation	
10	Plantation courgette et installation voile de forçage	
12	Plantation tomates	
15		Solarisation
16		Plantation courgettes traitées avec Eradicoat et apport de fumier
17		Plantation tomates

Annexe II : Liste des plantes spontanée présentes dans les blocs de plantes de service au Pays fait son jardin

Famille	*Espèce*
Apiacées	*Pastinaca sativa*
Astéracées	*Taraxacum officinale*
Astéracées	*Lapsana communis*
Astéracées	*Sonchus oleraceus*
Caryophyllacées	*Stellaria media*
Convolvulacées	*Convolvulus arvensis*
Géraniacées	*Geranium robertianum*
Lamiacées	*Lamium purpureum*
Oxalidacées	*Oxalis acetosella*
Polygonacées	*Rumex obtusifolius*
Primulacées	Lysimachia arvensis
Rosacées	Potentilla reptans
Rubiacées	*Galium aparine*

Annexe III : Eléments permettant la validation du modèle GLM negatif binomial gonflé à zéro utilisé pour modéliser le nombre de syrphes sur les plantes de services

```
        studentized Breusch-Pagan test

data:  test_lm
BP = 0.7651, df = 1, p-value = 0.3817
```

Figure: Résultat du test d'homoscédasticité de Breusch-Pagan

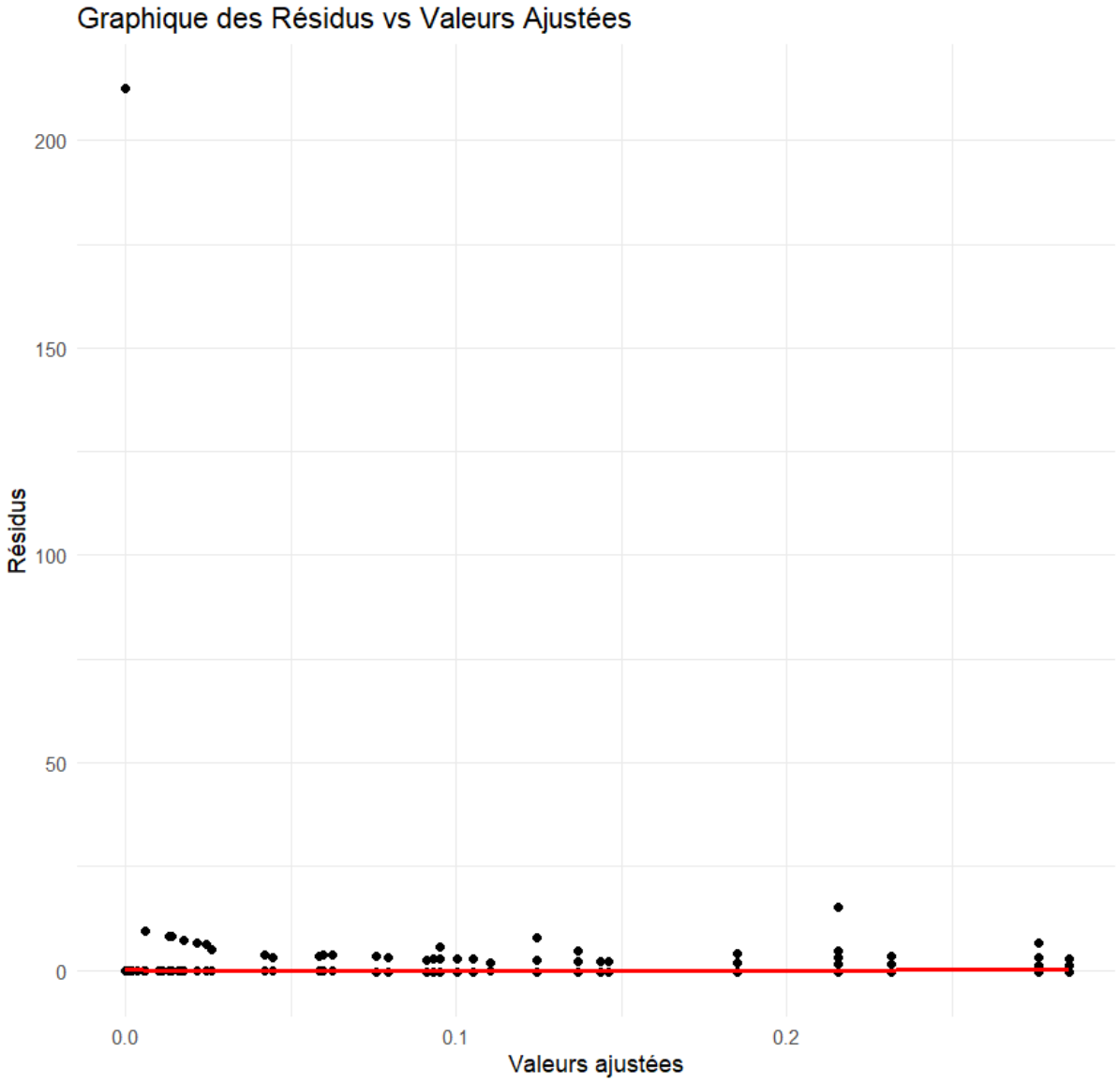


Figure: Graphique des résidus en fonction des valeurs ajustées du modèle

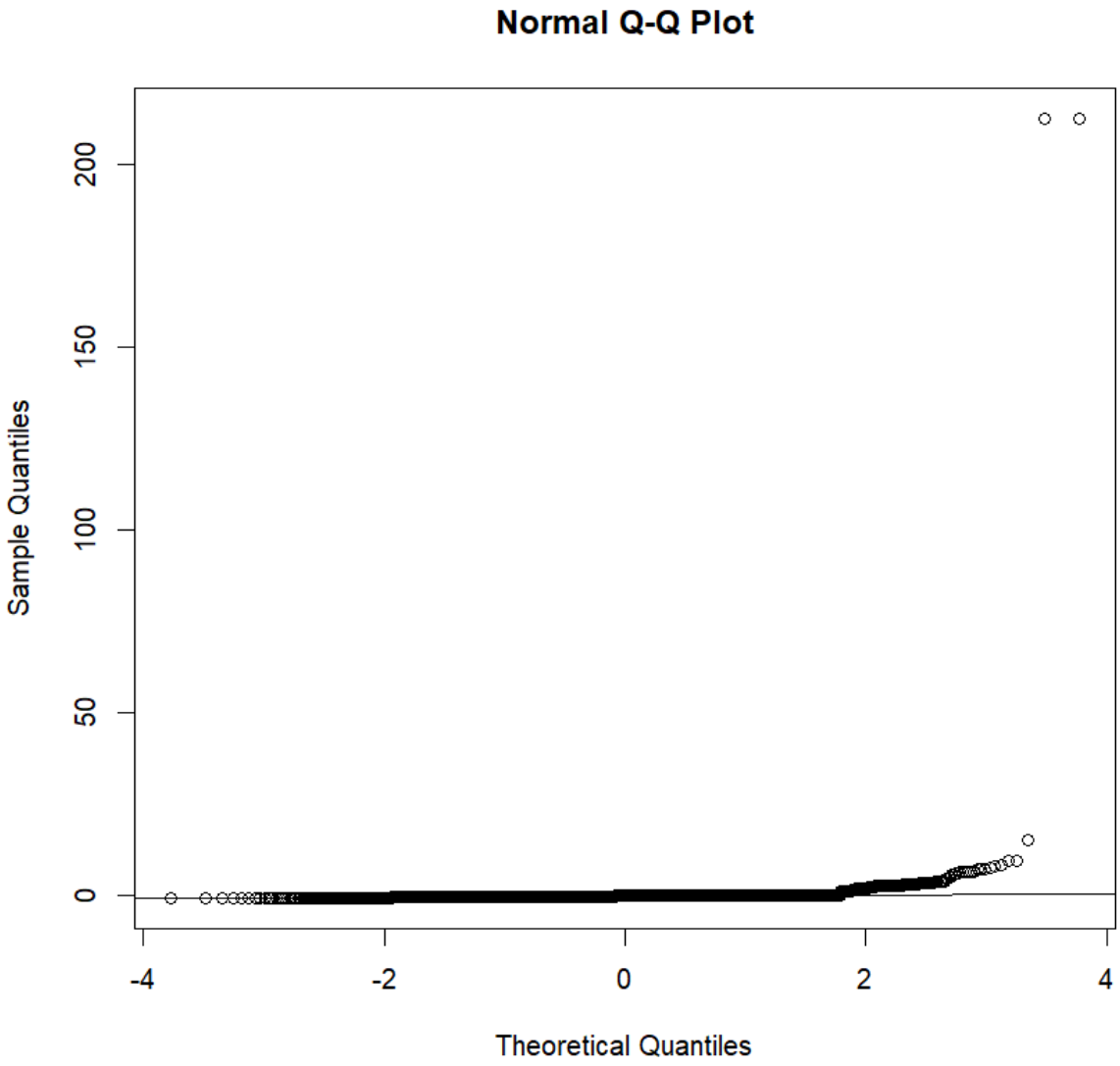


Figure: Graphique Q-Q plot vérifiant la normalité des résidus du modèle

Annexe IV : Script Rstudio utilisé pour l'analyse statistique des résultats pour les plantes de service

```
#Importation des données
planteservice <- read.csv("C:/Users/lou/Desktop/planteservice.csv", sep=";")

#Importation des packages necessaires
library(ggplot2)
library(tidyr)
library(AER)
library (vegan)
library (RVAideMemoire)
library(dplyr)
library(glmmTMB)
library(pdp)
library(pscl)
library(emmeans)
library(lmtest)
library(ggpubr)

#Modification des variables
planteservice$semaine <- as.numeric(planteservice$semaine)
planteservice$temperature <- gsub(",", ".", planteservice$temperature)
planteservice$temperature <- gsub(" ", "", planteservice$temperature)
planteservice$temperature <- as.numeric(planteservice$temperature)
planteservice$humidite <- gsub(",", ".", planteservice$humidite)
planteservice$humidite <- gsub(" ", "", planteservice$humidite)
planteservice$humidite <- as.numeric(planteservice$humidite)
planteservice$pucerons_vivants <- as.numeric(planteservice$pucerons_vivants)
planteservice$ligne <- gsub(",", ".", planteservice$ligne)
planteservice$ligne  <- as.numeric(planteservice$ligne)
planteservice$plante<- as.factor(planteservice$plante)
planteservice$ferme <- as.factor(planteservice$ferme)
planteservice$floraison <- as.factor(planteservice$floraison)
planteservice$culture <- as.factor(planteservice$culture)
planteservice$pourcentage_parasitisme <-
as.numeric(planteservice$pourcentage_parasitisme)
summary(planteservice)
str(planteservice)


##Création d'un modèle pour expliquer la répartition des auxiliaires dans les espèces de plante de service
##Analyse exploratoire pour savoir la distribution des données
ggplot(planteservice, aes(x = nombre_aux_tot)) +
  geom_histogram(binwidth = 5) +
  labs(title = "Distribution du nombre de pucerons", x = "Nombre de pucerons", y = "Fréquence")
#Données surdispersées avec excès de zéros
# Test de surdispersion
dispersiontest(poisson_model)
#dispersion significativement trop elevée
#Verification de l'excès de zéros
table(planteservice$nombre_aux_tot)
#excès de zéros
```

##Syrphes

```
#Création du modèle négatif binomial pour les syrphes
neg_binom_model_syrphes3 <- glm.nb(syrphes ~ plante + semaine + humidite*temperature ,
data =planteservice)
summary(neg_binom_model_syrphes3)

#essai du modèle avec surrepresentation de zéros
modele_ZINB_syprhes4 <- zeroinfl(
  formula = syrphes ~ plante + semaine | semaine + humidite ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
summary(modele_ZINB_syprhes4)
AIC(modele_ZINB_syprhes4)

#Mise au logarithme de certaines variables pour améliorer le modèle
planteservice$log_temperature <- log(planteservice$temperature + 1)
planteservice$log_humidite <- log(planteservice$humidite + 1)

modele_ZINB_syprhes5 <- zeroinfl(
  formula = syrphes ~ plante + semaine + ferme + log_temperature + log_humidite | plante +
semaine + ferme + log_temperature + log_humidite,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
summary(modele_ZINB_syprhes5)
AIC(modele_ZINB_syprhes5)

#Essai modèle mixte
modele_mixed <- glmer.nb(syrphes ~  plante * semaine +  (1 | ferme)  +  (1 | OLRE), data =
planteservice, family=poisson)
summary(modele_mixed)
AIC(modele_mixed)
#pas assez performant pour mes données complexes

modele_GLMM <- glmmTMB(syrphes ~ plante + semaine +
                         (1 | ferme) ,
                       zi = ~ plante + semaine  ,
                       family = nbinom2,
                       data = planteservice)
summary(modele_GLMM)
AIC(modele_GLMM )

# Vérification de la fiabilité du modèle
#Test normalité
plot(residuals(modele_GLMM, type = "pearson"))
qqnorm(residuals(modele_GLMM , type = "pearson"))
qqline(residuals(modele_GLMM, type = "pearson"))

# Graphique des résidus vs valeurs ajustées
residus <- residuals(modele_GLMM, type = "pearson")
valeurs_adj <- fitted(modele_GLMM)
residus_df <- data.frame(
  valeurs_adj = valeurs_adj,
  residus = résidus)
```

```
ggplot(residus_df, aes(x = valeurs_adj, y = residus)) +
  geom_point() +
  labs(x = "Valeurs ajustées", y = "Résidus", title = "Graphique des Résidus vs Valeurs Ajustées") +
  theme_minimal() +
  geom_smooth(method = "loess", se = FALSE, color = "red")  # courbe de tendance
#Points répartis aléatoirement autour de la ligne horizontale

# Test homoscédasticité
test_lm <- lm(residus ~ valeurs_adj)
bptest(test_lm)  # Test de Breusch-Pagan
#p-value>0.05: homoscédasticité vérifiée

##Representation graphique
# Moyennes ajustées par plante
#Alignement des données
common_indices <- intersect(seq_along(modele_GLMM$fitted.values), seq_along(planteservice$plante))
modele_GLMM_fitted_values_aligned <- modele_GLMM$fitted.values[common_indices]
planteservice_plante_aligned <- planteservice$plante[common_indices]
mean_syrphes <- tapply(modele_GLMM_fitted_values_aligned , planteservice_plante_aligned, mean)
std_error <- tapply(modele_GLMM_fitted_values_aligned,planteservice_plante_aligned, sd) / sqrt(table(planteservice_plante_aligned))

#valeurs ajustées du modèle
modele_GLMM_fitted_values <- fitted(modele_GLMM)
common_indices <- intersect(seq_along(modele_GLMM_fitted_values), seq_along(planteservice_plante))
modele_GLMM_fitted_values_aligned <- modele_GLMM_fitted_values[common_indices]
planteservice_plante_aligned <- planteservice_plante[common_indices]

# Moyennes des valeurs ajustées par type de plante
mean_syrphes <- tapply(modele_GLMM_fitted_values_aligned, planteservice_plante_aligned, mean, na.rm = TRUE)

# Erreurs standards
std_error <- tapply(modele_GLMM_fitted_values_aligned, planteservice_plante_aligned, sd, na.rm = TRUE) / sqrt(table(planteservice_plante_aligned))

# Résultats
print(mean_syrphes)
print(std_error)

mean_df <- data.frame(plante = names(mean_syrphes), mean_syrphes = mean_syrphes, std_error = std_error)

# Graphique des moyennes ajustées avec intervalles de confiance
colors <- c("Ble " = "yellow", "Ortie" = "darkgreen", "Soucis " = "orange", "Spontanee " = "lightgreen")

ggplot(mean_df, aes(x = plante, y = mean_syrphes, fill = plante)) +
  geom_bar(stat = "identity", color = "black", width = 0.6) +
  geom_errorbar(aes(ymin = mean_syrphes - 1.96 * std_error, ymax = mean_syrphes + 1.96 * std_error),
```

```
            width = 0.3, linewidth = 0.7, color = "black") +
  scale_fill_manual(values = colors) +
  labs(x = "Espèce de plante de service", y = "Moyenne ajustée du nombre de syrphes par plante") +
  ggtitle("Comparaison des moyennes ajustées du nombre de syrphes en fonction de l'espèce de plante de service") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
```

Les mêmes étapes ayant été faites pour tous les auxiliaires, seuls les modèles sont présentés:

##Modèle mirides

```
modele_GLMM_mirides <- glmmTMB(mirides ~ plante + semaine + ferme +
                     (1 | temperature) +  (1 | semaine),
                   zi = ~ semaine + plante + ferme + humidite*temperature + nombre_puceron,
                   family = nbinom2,
                   data = planteservice)
```

##Modèle anthocorides

```
modele_ZINB_antho <- zeroinfl(
  formula = anthocorides ~ plante + semaine  |semaine  ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

##Modèle parasitoïdes

```
modele_ZINB_para2 <- zeroinfl(
  formula = parasitoides ~ ferme + semaine + nombre_puceron | semaine +humidite,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

##Modèle cécidomyies

```
modele_ZINB_ceci <- zeroinfl(
  formula = cecidomyies~ semaine + nombre_puceron + ferme | semaine+ humidite,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

##Modèle araignées

```
modele_ZINB_araignees <- zeroinfl(
  formula = araignees ~  semaine + ferme + temperature + humidite  | plante + semaine  + ferme ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

##Modèle coccinelles

```
modele_ZINB_cocci <- zeroinfl(
  formula = coccinelles ~ plante + semaine + floraison   | plante + semaine  + floraison  ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

#Modèle staphylins

```
modele_ZINB_staph <- zeroinfl(
  formula = carabes ~ plante + semaine + floraison  | plante + semaine + floraison  ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

#Modèle pucerons

```
modele_ZINB_pucerons <- zeroinfl(
  formula = carabes ~ plante + semaine + floraison | plante + semaine + floraison  ,
  data = planteservice,
  dist = "negbin"
)
```

Annexes V : Résultats des différents modèles crées

```
 contrast             estimate    SE  df z.ratio p.value
 Ble  - Ortie           1.6876 0.402 Inf   4.198  0.0002
 Ble  - Soucis         -0.0378 0.232 Inf  -0.163  0.9985
 Ble  - Spontanee      -0.8877 0.227 Inf  -3.906  0.0005
 Ortie - Soucis        -1.7255 0.376 Inf  -4.588  <.0001
 Ortie - Spontanee     -2.5754 0.374 Inf  -6.877  <.0001
 Soucis  - Spontanee   -0.8499 0.179 Inf  -4.754  <.0001

Results are given on the log (not the response) scale.
P value adjustment: tukey method for comparing a family of 4 estimates
```

Résultat du summary de la comparaisons du nombre de syrphes entre les plantes de service

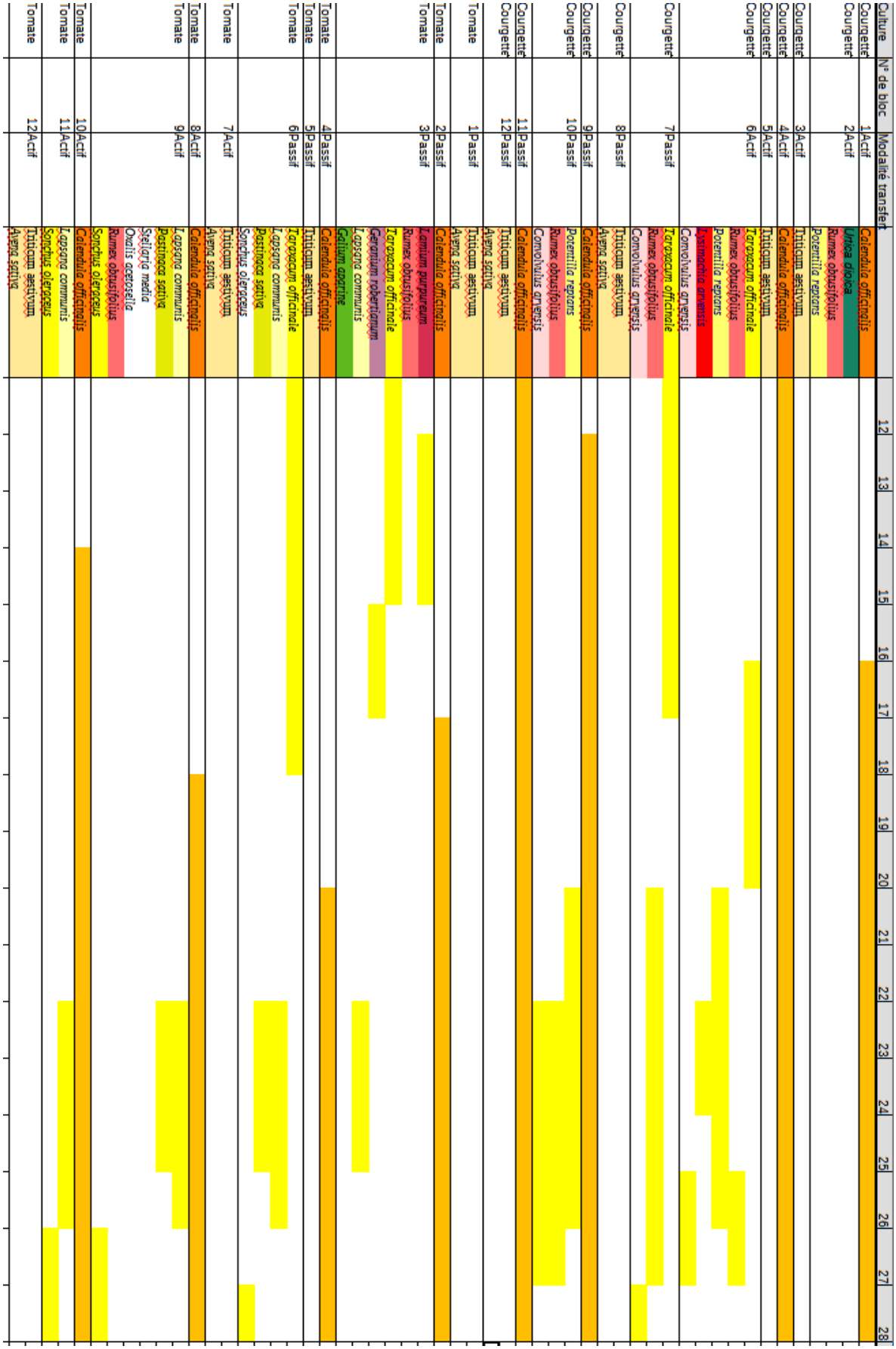
```
> anova(modele_gam_quadratique, modele_sans_modalite, test="Chisq")
Analysis of Deviance Table

Model 1: nombre_aux_tot ~ s(temperature, bs = "cr") + ti(humidite, temperature) +
    s(nombre_pucerons, bs = "cr", k = 20) + ti(nombre_pucerons,
    ligne) + s(humidite, bs = "cr", k = 20) + modalite_transfert
Model 2: nombre_aux_tot ~ s(temperature, bs = "cr") + ti(humidite, temperature) +
    s(nombre_pucerons, bs = "cr", k = 20) + ti(nombre_pucerons,
    ligne) + s(humidite, bs = "cr", k = 20)
  Resid. Df Resid. Dev     Df Deviance Pr(>Chi)
1    8649.2     6156.6
2    8650.8     6199.9 -1.621  -43.313 1.89e-10 ***
```

Résultat de l'anova du test de rapport de vraisemblance du nombre d'auxiliaires dans les cultures en fonction de la modalité de transfert

```
 contrast        estimate    SE   df t.ratio p.value
 actif  - passif   -0.473 0.133 8657  -3.568  0.0004

Results are given on the log (not the response) scale.
```

Résultats de la comparaison des moyennes ajustées entre les modalités de transfert.

Annexe VI : Calendrier de floraison



Annexe VII : Script Rstudio utilisé pour l'analyse statistique des résultats pour les cultures

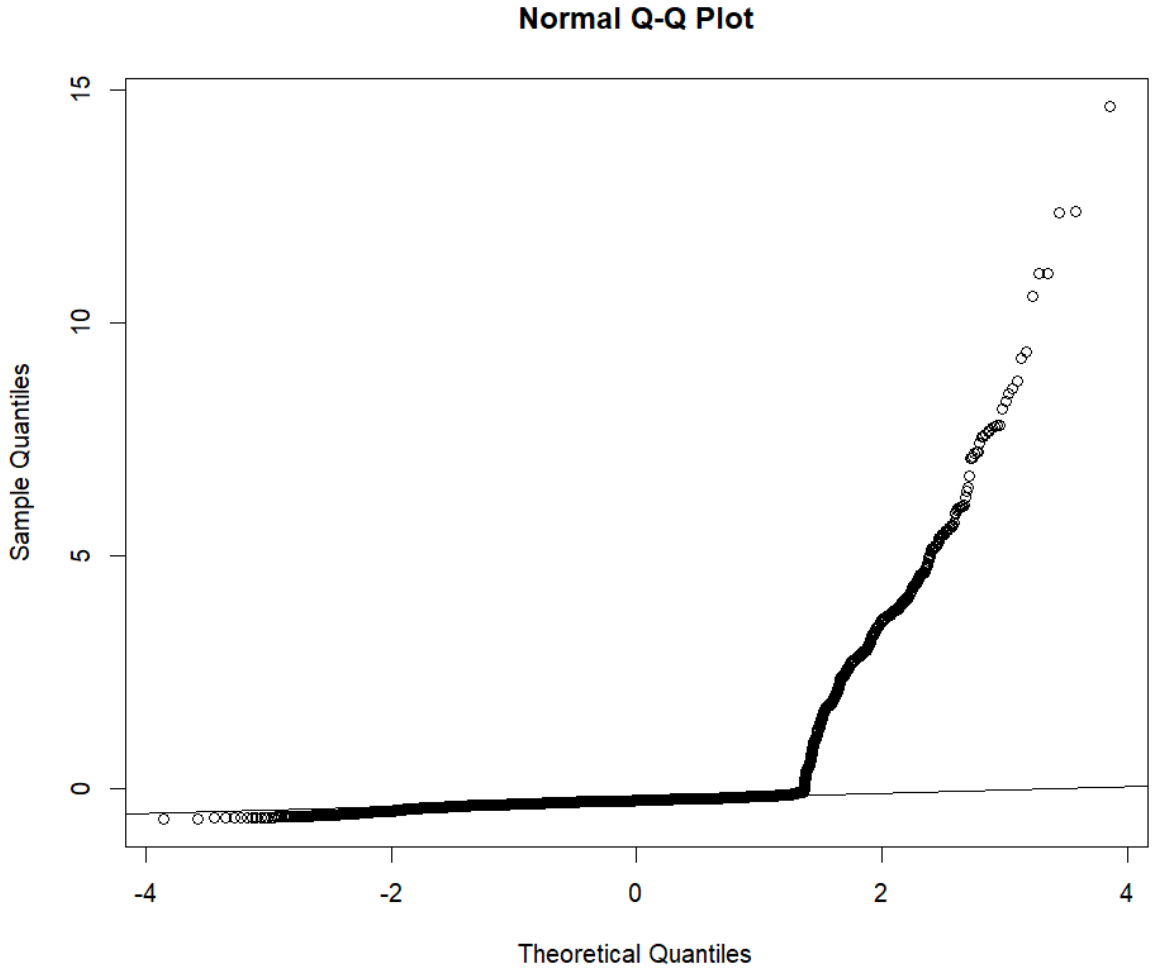
La même méthode a été utilisée pour faire les modèles ajustés aux données des pucerons et auxiliaires sur la culture que sur les plantes de service. Seuls les modèles finaux sont présentés.

```
#Modèle pucerons : modèle gam avec intégrations d' interactions et d'effets aléatoires
modele_gam_pucerons<- gam(pucerons_vivants ~ s(humidite) + s(temperature) +
                          ti(humidite, temperature) + modalite_transfert +
                          s(voracite) + s(semaine) + s(ligne, bs = "re"),
                        family = nb(), data = culture)

#Modèle auxiliaires
modele_gam_aux <- gam(nombre_aux_tot ~ s(temperature, bs="cr") + ti(humidite,
temperature) +
                        s(nombre_pucerons, bs="cr", k=20) +
                        ti(nombre_pucerons, ligne) +
                        s(humidite, bs="cr", k=20) +
                        modalite_transfert,
                      family = nb(), data = culture, method="REML")
```

Annexe VIII : Eléments permettant la validation du modèle GAM utilisé pour modéliser le nombre d'auxiliaires dans les cultures

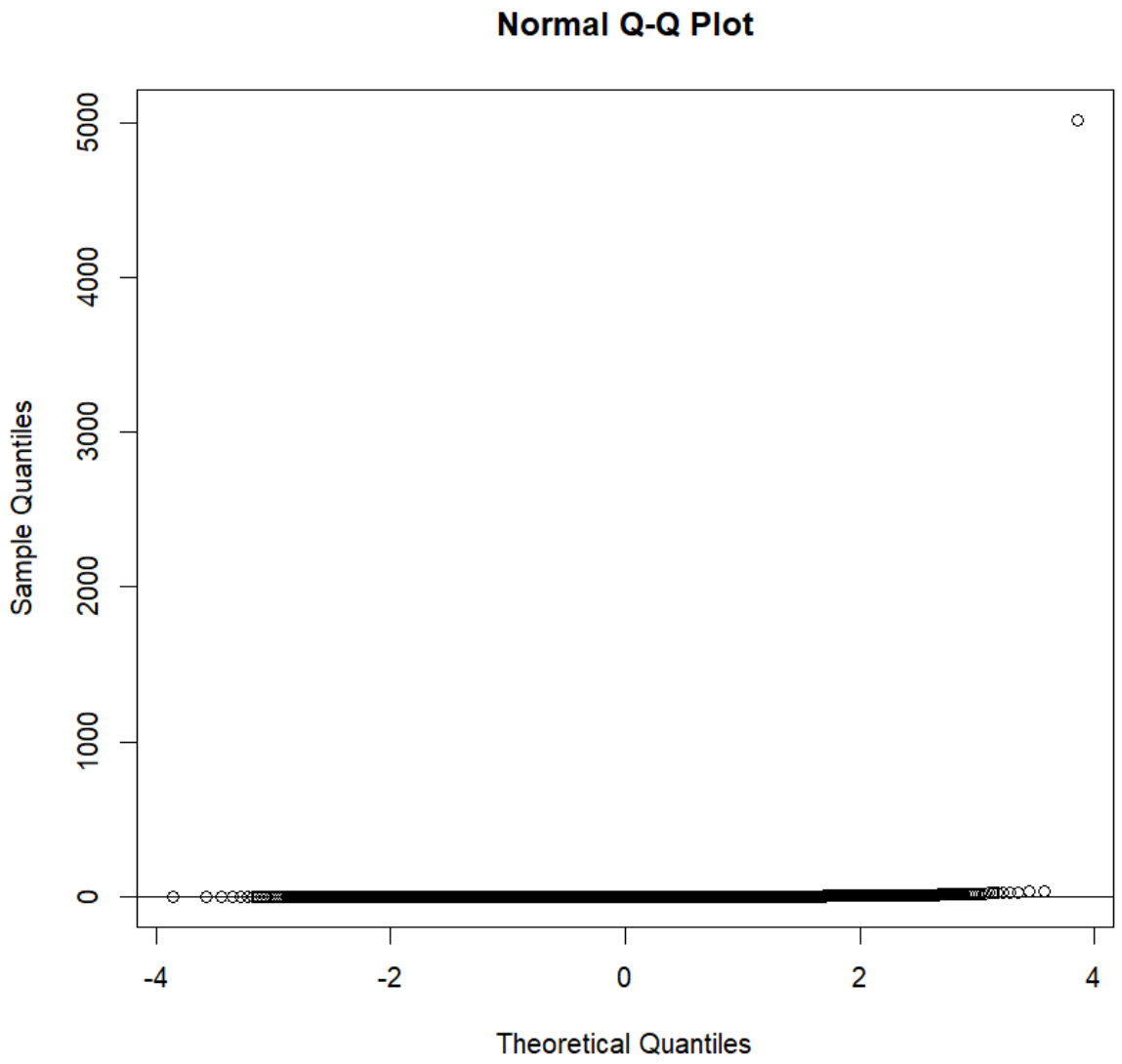
```
        studentized Breusch-Pagan test

data:  test_lm
BP = 1.1592, df = 1, p-value = 0.2816
```

Résultat du test de Breusch-Pagan

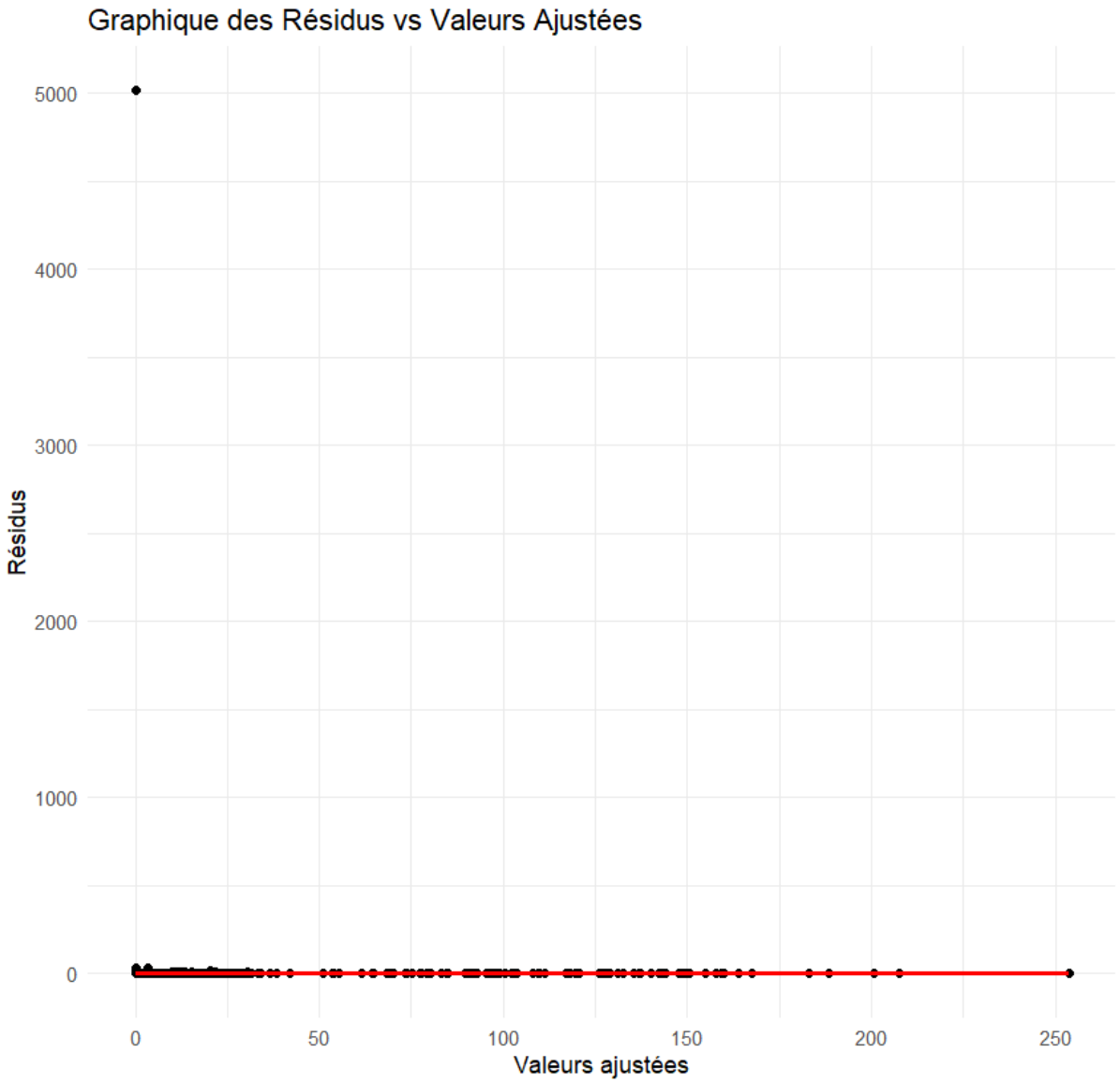


Graphique Q-Q plot pour vérifier la normalité des résidus

Annexe IX : Eléments permettant la validation du modèle GAM utilisé pour modéliser le nombre de pucerons dans les cultures



Graphique Q-Q plot pour vérifier la normalité des résidus



Graphique des résidus en fonction des valeurs ajustées du modèle

```
        studentized Breusch-Pagan test

data:  test_lm
BP = 0.11031, df = 1, p-value = 0.7398
```

Résultat du test de Breusch-Pagan

L'INSTITUT agro Rennes Angers	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronomie Spécialisation / option : Agroecology Enseignant référent : Anne LE RALEC

Auteur(s) : Lou Lecrocq Date de naissance : 24/03/2001	Organisme d'accueil : Agrobio35 Adresse : 29 Av. des Peupliers, 35510 Cesson-Sévigné
Nb pages : 25 Annexes : 9	
Année de soutenance : 2024	Maître de stage : Jérémy BELLANGER

Titre français : Caractérisation des communautés d'auxiliaires présentes sur les plantes de service et efficacité des techniques de transfert actif sur cultures maraichères.

Titre anglais : Characterization of beneficial insect communities on companion plants and effectiveness of active transfer techniques in vegetable crops.

Résumé :
Les pucerons constituent une menace majeure pour les cultures dans les fermes maraîchères. Le coût élevé des techniques de protection biologique intégrée a incité les maraîchers et maraîchères biologiques à chercher des moyens de pérenniser les populations d'auxiliaires dans les serres. Dans ce contexte, le groupe DEPHY maraîchage (35) souhaite identifier les plantes de service les plus efficaces contre les pucerons et évaluer l'intérêt du transfert actif des auxiliaires vers les cultures. L'expérimentation s'est déroulée sur deux fermes, ciblant les cultures de tomates et de courgettes. La démarche expérimentale a consisté à suivre les populations d'auxiliaires et de pucerons sur les différentes espèces de plantes de service ainsi que sur les cultures. Les parcelles ont été divisées en deux zones : l'une bénéficiant d'un transfert actif d'auxiliaires, l'autre servant de témoin. La création de modèles ajustés aux données a permis de pouvoir comparer les populations selon les espèces de plantes de service et selon le transfert ou non d'auxiliaires. La comparaison des moyennes ajustées entre les groupes a montré une préférence significative des mirides pour les soucis et des syrphes pour les plantes spontanées et les soucis. Par ailleurs, les populations de pucerons sont significativement réduites lorsqu'il y a eu un transfert d'auxiliaires sur la culture. Finalement le projet a soulevé différentes pistes d'amélioration des systèmes de plantes de service: bien choisir et diversifier les espèces en fonction du besoin et transférer les auxiliaires quand ils sont présents.

Abstract :
Aphids pose a significant threat to crops in vegetable farms. The high cost of integrated biological protection techniques has prompted organic farmers to seek ways to sustain beneficial insect populations in greenhouses. In this context, the DEPHY Vegetable Group (35) aims to identify the most effective companion plants against aphids and assess the value of actively transferring beneficial insects to crops. The experiment was conducted on two farms, focusing on tomato and zucchini crops. The experimental approach involved monitoring the populations of beneficial insects and aphids on various companion plant species as well as on the crops. The plots were divided into two zones: one benefiting from an active transfer of beneficial insects, and the other serving as a control. The creation of models adjusted to the data allowed for the comparison of populations based on the species of companion plants and the presence or absence of insect transfer. The comparison of adjusted means between groups showed a significant preference of mirid bugs for marigolds and hoverflies for spontaneous plants and marigolds. Furthermore, aphid populations were significantly reduced when beneficial insects were transferred to the crops. Finally, the project highlighted several avenues for improving companion plant systems: carefully selecting and diversifying species based on needs, and transferring beneficial insects when they are present.

Mots-clés : pucerons, maraîchage, plante de service, auxiliaires, DEPHY, lutte biologique, transfert actif
Key Words: aphids, market gardening, service plant, natural enemies, DEPHY, biological control, active transfer