

2023-2024

Effet des pratiques de fertilisation et de la pérennité des plantes de service sur l'efficacité des stratégies de lutte biologique par conservation mise en œuvre en culture de courgette



Jean-Charles Midon

Maître d'apprentissage : Sébastien Picault

Responsables pédagogiques : François Texier et
Andreas Thomas Knigge

Remerciements :

Je tiens à remercier toute l'équipe DSPL du centre opérationnel de Carquefou : Sébastien Picault, Charlotte Le Pennec, Loïc Fouyer, Charlotte Berthelot, Vanessa Demoisson ; ainsi que les stagiaires Abderrahim Ouazzani, Sarah Chabrol et Martin Garnier.

Un remerciement tout particulier à Sébastien Picault pour les précieuses petites minutes qu'il m'a régulièrement accordées, au cours desquelles il a partagé ses connaissances avec générosité et m'a apporté rigueur et précision.

Un grand merci à toutes les personnes du CTIFL qui m'ont apporté joie et bonne humeur au quotidien.

Table des figures

Figure 1 Stades de croissance de la courgette (Dreamtime)

Figure 2 Calendrier de production de la courgette (GAB and FRAB, 2009)

Figure 3 Cycle de vie des pucerons (Benoît Gilles, Passion entomologie)

Figure 4 Chronologie du développement de la résistance chez *Myzus persicae* (Bass et al., 2014)

Figure 5 Principe d'une stratégie de lutte biologique par conservation (Picault S. 2023)

Figure 6 Rendement moyen en fruits (\pm SE) des plants de concombre fertilisés avec 90, 110, 150 et 190 ppm d'azote (N) en présence ou en absence de pucerons (Hosseini et al., 2010)

Figure 7 Corrélation entre la concentration en acides aminés de la sève du phloème et la fertilisation des plantes avec NH_4NO_3 (Nowak et Komor, 2010)

Figure 8 Préférences alimentaires des pucerons sur différentes plantes fertilisées avec NH_4NO_3 (Nowak et Komor, 2010)

Figure 9 Taux de reproduction des pucerons par jour (moyenne \pm SE) sur différentes plantes fertilisées avec NH_4NO_3 . (Nowak et Komor, 2010)

Figure 10 Représentation schématique des effets tritrophiques de l'azote. Les lignes pleines représentent des effets positifs et les lignes pointillées indiquent des effets négatifs (Chen, Olson et Ruberson, 2010)

Figure 11 Plan du dispositif, T2 parcelle aménagée avec des plantes de services de 48 mois, T3 parcelle aménagée avec des plantes de services de 12 mois et T4 témoin non traité (extrait du protocole CTIFL)

Figure 12 Cumul des précipitations mensuelles pour l'année 2024 et la période 2002-2023

Figure 13 Températures moyennes journalières pour l'année 2024 et la période 2002-2023

Figure 14 Températures moyennes journalières à l'intérieur des tunnels T2, T3 et T4

Figure 15 Températures maximales journalières à l'intérieur des tunnels T2, T3 et T4

Figure 16 Teneur en nitrates du sol mesuré dans chaque parcelle élémentaire des tunnels T2, T3 et T4 pour les niveaux de fertilisation azotée 150N et 450N

Figure 17 Teneur en nitrate moyenne du feuillage des plants de courgette des tunnels T2, T3 et T4 pour les niveaux de fertilisation azotée 150N et 450N

Figure 18 Poids moyen \pm SE d'un fruit pour les tunnels T2, T3 et T4

Figure 19 Nombre moyen de fruits par plants et par date pour les tunnels T2, T3 et T4

Figure 20 Poids de fruits normalisé cumulé de la semaine 21 à la semaine 28

Figure 21 Diagramme de floraison des plantes nectarifères et/ou pollinifères pour les tunnels T2 et T3

Figure 22 Pourcentage de feuilles / collecteur par classe d'infestation ou de parasitisme et niveau d'activité moyen des prédateurs de pucerons sur les plantes banques dans les tunnels T2 et T3 de la semaine 4 à la semaine 28

Figure 23 Pourcentage de feuilles par classe d'infestation ou de parasitisme et niveau d'activité moyen des prédateurs de pucerons sur les courgettes dans les tunnels T2, T3 et T4 de la semaine 17 à la semaine 29

Figure 24 Pourcentage moyen \pm SE de plantes sans pucerons (plantes classées A) dans les parcelles élémentaires fertilisée avec 150 et 450 kg/Ha d'azote dans les tunnels T2, T3 et T4.

Table des tableaux

Tableau 1 Système de classe pour caractériser la floraison des plantes-ressources

Tableau 2 Échelle de classes pour estimer le niveau d'infestation des populations de pucerons sur les tiges d'ortie et de tanaisie

Tableau 3 Échelle de classes pour estimer le niveau d'infestation des populations de pucerons dans les patchs d'achillée millefeuille

Tableau 4 Échelle de classes pour estimer le taux de parasitisme des populations de pucerons

Tableau 5 Échelle de classes pour estimer la taille des populations de pucerons sur les feuilles de courgettes

Tableau 6 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par plante déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T2

Tableau 7 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques et par plante déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T3

Tableau 8 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par famille de prédateurs déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T2

Tableau 9 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par famille de prédateurs déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T3

Tableau 10 Fréquence moyenne par date \pm SE pour chaque classe d'infestation mesurée dans les tunnels T2, T3 et T4 pendant le pic d'infestation (semaine 17 à 21)

Tableau 11 Pourcentage moyen \pm SE de plantes sans pucerons (plantes classées A) dans les parcelles élémentaires fertilisée avec 150 et 450 kg/Ha d'azote dans les tunnels T2, T3 et T4

Table des matières

1.	Contexte	1
2.	Introduction.....	2
2.1.	Culture de la courgette	2
2.1.1.	Stades de Croissance	2
2.1.2.	Exigences Climatiques	2
2.1.3.	Calendrier de Production et Besoins en Eau	2
2.1.4.	Fertilisation	2
2.1.5.	Maladies et Ravageurs.....	2
2.1.6.	Rotation des Cultures	2
2.2.	Les pucerons.....	3
2.2.1.	Cycle biologique.....	3
2.2.2.	La problématique pucerons.....	3
2.3.	Lutte biologique par conservation.....	4
2.3.1.	Les plantes banques	4
2.3.2.	Les plantes nectarifères et/ou pollinifères	5
2.4.	Gestion de la fertilisation azotée.....	5
3.	Matériels et méthodes	8
3.1.	Objectifs de l'étude.....	8
3.2.	Facteurs étudiés.....	8
3.3.	Site de l'étude et conditions expérimentales	8
3.3.1.	Localisation et description du site	8
3.3.2.	Conditions climatiques et de sol.....	8
3.4.	Dispositif expérimental (protocole CTIFL)	9
3.4.1.	Fertilisation azotée des cultures.....	9
3.4.2.	Plantation et entretien des cultures.....	9
3.4.3.	Protection des cultures contre les maladies.....	10
3.4.4.	Protection des cultures contre les ravageurs	10
3.4.5.	Pollinisation	10
3.4.6.	Aération des tunnels.....	10
3.4.7.	Gestion des plantes-banques et des plantes nectarifères et/ou pollinifères	10
3.5.	Mesures et observations (protocole CTIFL).....	10
3.5.1.	Suivi phénologique des plantes nectarifères et/ou pollinifères	10

3.5.2.	Suivi des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons ainsi que du taux de parasitisme sur les plantes-banques	11
3.5.3.	Suivi des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons ainsi que du taux de parasitisme sur les plants de courgette.....	11
3.5.4.	Structure spécifique des populations de pucerons	12
3.5.5.	Suivi de la teneur en azote nitrique du sol	12
3.5.6.	Suivi de la teneur en azote nitrique dans le feuillage des plantes	12
3.5.7.	Suivi de la température	12
3.5.8.	Production des tunnels.....	13
3.5.9.	Traitements statistiques	13
4.	Résultats	15
4.1.	Conditions expérimentales.....	15
4.1.1.	Conditions météorologiques	15
4.1.2.	Teneur en nitrates du sol	16
4.1.3.	Teneur en nitrates dans le feuillage des courgettes	16
4.2.	Production	16
4.2.1.	Poids moyen des courgettes.....	16
4.2.2.	Nombre moyen de fruits par plante.....	16
4.2.3.	Production totale des tunnels	17
4.3.	Floraison des plantes nectarifères et/ou pollinifères	17
4.4.	Niveau d'infestation des plantes banques par les pucerons	17
4.4.1.	Infestation des patches d'achillée millefeuille par les pucerons	17
4.4.2.	Infestation des patches d'ortie par les pucerons.....	18
4.4.3.	Infestation des patches de tanaïs par les pucerons.....	18
4.5.	Activité et structures des communautés de prédateurs et parasitoïdes sur les plantes banques	19
4.5.1.	Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur l'achillée	19
4.5.2.	Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur l'ortie	19
4.5.3.	Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur la tanaïs	19
4.5.4.	Structure des communautés de prédateurs sur les plantes-banque	20
4.6.	Effet du type d'aménagement sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons.	20
4.7.	Effet du niveau de fertilisation azotée sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons	21
5.	Discussion	22
5.1.	Efficacité de la stratégie de lutte biologique par conservation	22
5.2.	Impact de la fertilisation azotée sur la stratégie de lutte biologique par conservation	23
5.3.	Des plantes de services aux performances contrastées.....	23

5.3.1.	Plantes nectarifères et/ou pollinifères	23
5.3.2.	Plantes banques	24
5.3.3.	Des structures de communautés de pucerons sans danger pour les cultures.....	25
5.4.	Effet des tunnels sur la production.....	25
6.	Conclusion et perspectives.....	26

1. Contexte

La courgette (*Cucurbita pepo* L.) est un produit phare dans la gamme de production légumière pour l'ensemble des producteurs du territoire français. La France est le troisième producteur européen de courgettes, derrière l'Espagne et l'Italie (Argeste, 2022). Cependant, le taux d'auto-approvisionnement pour la courgette en France n'est que de 45 % (FranceAgriMer and Interfel, 2023). Pour augmenter ce taux et atteindre les objectifs fixés par le plan de souveraineté alimentaire, l'un des leviers identifiés est le développement de la production sous abri froid. Ce mode de culture permet d'allonger la saison de production, de gagner en précocité et de continuer à produire plus tardivement, et donc de mieux faire face à la concurrence des pays du sud. Cependant, la culture sous abri crée un environnement favorable au développement des ravageurs (Rathee, Dalal and Mehra, 2018). Dans un contexte où la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse en agriculture pour lutter contre les ravageurs est devenue une priorité, il est crucial de rechercher des solutions alternatives à ces produits. En outre, l'utilisation de produits non spécifiques, qui ne ciblent pas uniquement les ravageurs, peut entraîner une augmentation de la pression des ravageurs en éliminant les auxiliaires des cultures. Cela favorise non seulement le développement des ravageurs ciblés lors d'une attaque ultérieure, mais risque également de provoquer un phénomène de résurgence et la prolifération des ravageurs secondaires qui ne sont plus naturellement régulés. Afin de gérer les populations de pucerons dans les cultures de légumes sous abri froid, une stratégie de lutte biologique par conservation a été mise au point dans le cadre du projet REGULEG (2018-2020) porté par le CTIFL et réalisé avec la contribution financière du compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural (CASDAR). Cette stratégie consiste à utiliser des plantes ayant deux fonctions différentes : d'un côté, des plantes banques ayant pour objectif de constituer une réserve précoce de pucerons servant de proies aux larves de prédateurs de pucerons (coccinelles, syrphes, cécidomyies...) et/ou de micro-hyménoptères parasitoïdes (*Aphidius* sp.), et de l'autre des plantes nectarifères et/ou pollinifères ayant pour objectif de fournir une ressource énergétique aux adultes afin qu'ils complètent leur cycle de reproduction. Dans le projet REGULEG, la stratégie a été appliquée aux cultures d'aubergine. Les résultats obtenus ont montré que celle-ci permet de réguler efficacement les populations de pucerons, mais que le niveau d'efficacité peut varier fortement d'une situation à l'autre. Afin d'étudier les facteurs pouvant expliquer cette variabilité, des travaux sont actuellement menés dans le projet EFFICACE, lui aussi porté par le CTIFL et réalisé avec la contribution financière du CASDAR. Dans ce projet, deux facteurs sont étudiés : le type d'aménagement (aménagements pérenne vs annuel) et les pratiques de fertilisation azotée (apport de 150 kg/ha vs apport de 450 kg/ha). En 2023, les travaux ont été menés en culture d'aubergine. En 2024, ils ont été menés en culture de courgette.



Figure 1 Stades de croissance de la courgette (Dreamtime)

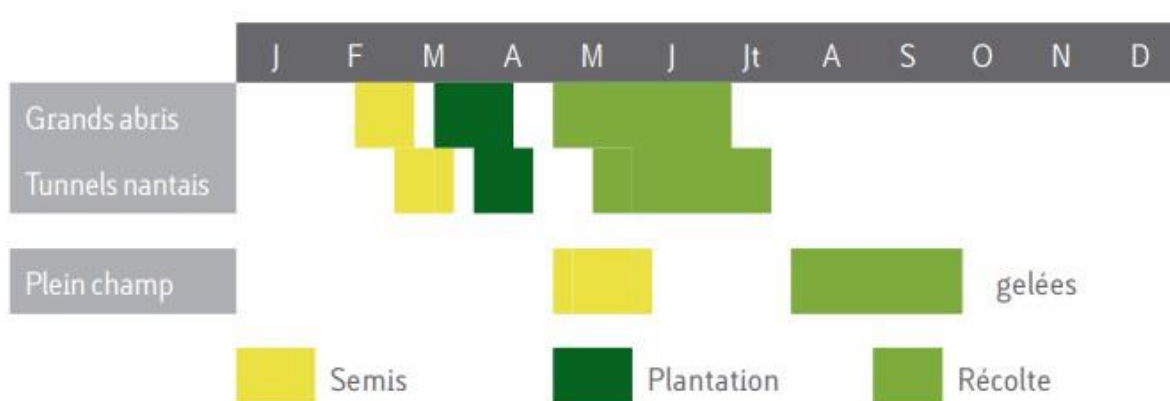


Figure 2 Calendrier de production de la courgette (GAB and FRAB, 2009)

2. Introduction

2.1. Culture de la courgette

La courgette (*Cucurbita pepo* L.) est une plante annuelle originaire d'Amérique du Sud, caractérisée par une croissance indéterminée. Monoïque, elle produit à la fois des fleurs mâles et femelles sur la même plante, mais distinctement (Figure 1).

2.1.1. Stades de Croissance

La courgette se développe avec un système racinaire qui explore 25 à 30 cm en sol sableux. Les fleurs femelles apparaissent environ 40 jours après le semis, suivies des fleurs mâles environ 10 jours plus tard. La pollinisation est strictement entomophile.

2.1.2. Exigences Climatiques

La température optimale pour la croissance végétative de la courgette est de 25 à 30°C. Les températures ne doivent pas dépasser 35°C pendant toute la période de croissance. La plante peut supporter des températures minimales entre 7°C et 10°C, à condition que la température moyenne soit d'environ 15°C ou plus (Erard, 2001).

2.1.3. Calendrier de Production et Besoins en Eau

Le calendrier de production varie selon le mode de culture (Figure 2). Pour une culture de printemps sous abris durant 4 mois, les besoins en eau sont évalués entre 200 et 300 mm, à administrer en petites doses régulières. Les courgettes sont généralement récoltées lorsqu'elles atteignent une taille de 15 à 20 cm de longueur. Récolter régulièrement permet d'encourager une production continue et d'assurer une qualité optimale des fruits.

2.1.4. Fertilisation

Avant la plantation, il est recommandé d'appliquer une fertilisation avec un engrais NPK (50-100-150) et de la magnésie (50 kg/ha). Pendant la période de récolte, il faudra apporter 10 unités d'azote par hectare et par semaine, avec un engrais NPK (1-0,6-1,5) et de la magnésie (0,3 kg/ha). Les apports doivent être ajustés en fonction des de la teneur en nitrates dans le sol régulièrement mesurée à l'aide d'un outil d'analyse rapide.

2.1.5. Maladies et Ravageurs

Les principales maladies affectant les courgettes sont le mildiou, l'oïdium et le botrytis. Les principaux ravageurs de la courgette sont les pucerons, les aleurodes et les acariens.

2.1.6. Rotation des Cultures

Pour optimiser la santé des cultures et prévenir les maladies du sol, les courgettes doivent être placées en tête dans la succession culturale et la rotation doit être de deux ans

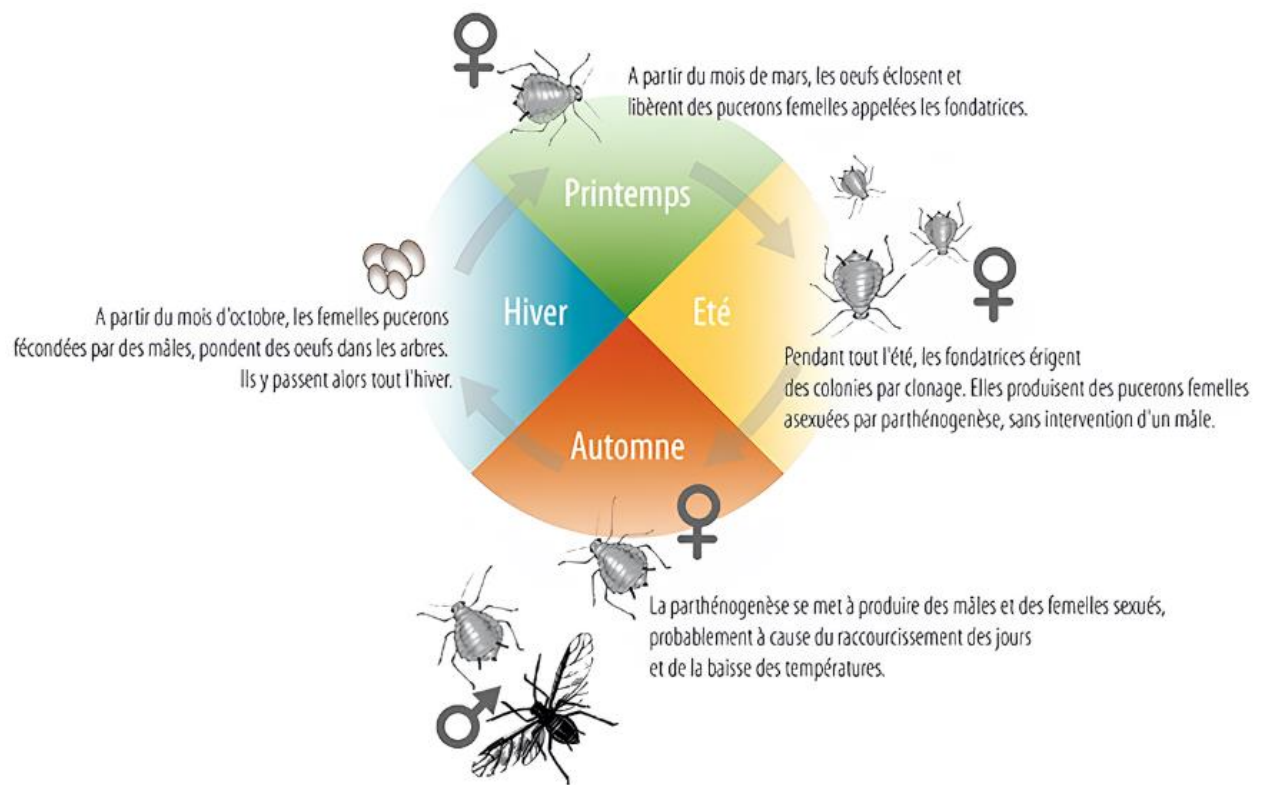


Figure 3 Cycle de vie des pucerons (Benoît Gilles, *Passion entomologie*)

au minimum. Les précédents favorables à la culture de courgette sont les liliacées, la chicorée, les choux, la laitue et les céréales. Il est conseillé d'éviter les précédents cucurbitacées et tomate.

2.2. Les pucerons

2.2.1. Cycle biologique

Les pucerons sont des insectes piqueurs suceurs de sève de la famille des Aphididae et de l'ordre des Hemiptera. Ils sont petits, mesurant de 1 à 4 millimètres de long. Leur corps est souvent ovale ou en poire, et peut varier en couleur selon les espèces et les stades de développement. Ils passent par plusieurs stades de développement : œuf, cinq stades nymphaux, et adulte. La reproduction se fait principalement par parthénogenèse au cours de la saison, permettant une multiplication rapide, tandis que la reproduction sexuée intervient en fin de cycle pour produire des œufs résistants qui survivront à l'hiver (Figure 3)

2.2.2. La problématique pucerons

L'agriculture fait face à de nombreux défis, notamment les infestations de ravageurs qui peuvent causer des dommages considérables aux cultures et entraîner des pertes de rendement importantes. Parmi ces ravageurs, les pucerons, tels que *Aphis gossypii*, *Myzus persicae* ou *Macrosiphum euphorbiae*, représentent l'un des principaux ravageurs des cultures de courgettes. Étant une plante exigeant beaucoup de chaleur, la courgette est souvent cultivée sous abri afin d'obtenir des récoltes précoces et faire face à la concurrence, ce qui favorise un développement rapide des pucerons. En culture de concombre, le puceron *A. gossypii* accomplit ainsi son cycle en 20,7 jours à une température de 10 °C, et seulement en 3,8 jours à une température de 30 °C (Zamani *et al.*, 2006). Ces conditions environnementales plus stables augmentent aussi la longévité des pucerons est également plus élevée (Gash, 2012). Les pucerons sont des insectes piqueurs-suceurs qui se nourrissent de la sève circulant dans les vaisseaux du phloème des plantes. Ils causent des dommages directs en prélevant cette sève, ce qui réduit les nutriments disponibles pour la plante et affaiblit ainsi sa vigueur et sa croissance. En se nourrissant, les pucerons injectent également de la salive phytotoxique, provoquant une déformation du feuillage des plantes. Parmi les dégâts indirects, ils excrètent du miellat, une substance sucrée qui favorise le développement de fumagine, entravant l'activité photosynthétique. Cependant, les dégâts indirects les plus importants sur le plan économique proviennent du fait que les pucerons sont responsables de la transmission de phytovirus, notamment le virus de la mosaïque jaune de la courgette. Les méthodes de lutte chimique contre les pucerons présentent plusieurs inconvénients significatifs, parmi lesquels le développement de résistances au sein des populations de pucerons est particulièrement préoccupant. Cette résistance accrue réduit progressivement l'efficacité des insecticides au fil

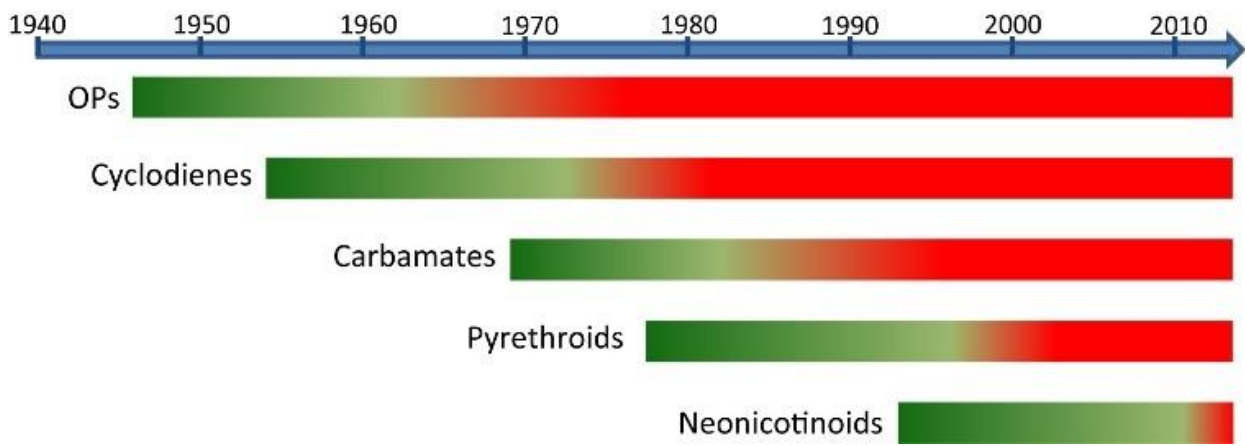


Figure 4 Chronologie du développement de la résistance chez *Myzus persicae*. Les barres vertes indiquent les années où les insecticides fournissent un bon contrôle. Les barres rouges indiquent le développement d'une résistance compromettant le contrôle. OPs : organophosphates (Bass et al., 2014).

du temps. Depuis les années cinquante, la gestion du puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*), l'un des principaux ravageurs des cultures de courgette, repose essentiellement sur l'utilisation intensive d'insecticides chimiques dans de nombreuses cultures. Cette pratique a conduit à l'émergence de multiples formes de résistance chez *M. persicae*, touchant pratiquement toutes les classes d'insecticides disponibles, y compris les pyréthrinoides et les néonicotinoïdes (Figure 4). En conséquence, *M. persicae* est désormais classé parmi les pucerons les plus résistants au monde (Bass et al., 2014). De plus, l'utilisation intensive de produits chimiques pose des risques significatifs pour la santé humaine, l'environnement en contaminant les sols et les cours d'eau, et affecte négativement la biodiversité, y compris les organismes non ciblés tels que les pollinisateurs et les prédateurs naturels des ravageurs s'ils sont présents lors du traitement ou lorsqu'ils se nourrissent. Face à ces constats, il est crucial de développer des approches alternatives plus durables. Dans la lutte biologique, le lâcher inondatif d'auxiliaires, souvent employé contre les ravageurs, remplace un traitement chimique par un traitement naturel sans repenser fondamentalement le système agricole. Cette méthode vise principalement un effet à court terme et ne cherche pas nécessairement à implanter durablement les auxiliaires. De plus, elle reste coûteuse en raison de la répétition des lâchers et peut s'avérer compliquée lorsque les températures sont trop basses pour acclimater les auxiliaires issus des élevages. Dans ce contexte, la lutte biologique par conservation représente une alternative prometteuse. Elle marque un changement de perspective, où l'agriculteur adopte une approche écosystémique, favorisant les prédateurs naturels et les parasitoïdes pour maintenir un équilibre écologique durable.

2.3. Lutte biologique par conservation

La lutte biologique par conservation est une stratégie de gestion des ravageurs qui vise à maintenir et à favoriser les populations d'insectes ennemis naturels des ravageurs en préservant et en améliorant leurs habitats. Cette approche encourage la présence continue de ces prédateurs et parasitoïdes en leur fournissant les conditions nécessaires à leur survie et leur reproduction. En favorisant ces alliés naturels, la lutte biologique par conservation permet de réguler de manière durable les populations de ravageurs, tout en minimisant les besoins en interventions chimiques. Le principe fondamental de la lutte biologique par conservation repose sur deux axes principaux : la création de refuges et la fourniture de ressources. Ces refuges sont constitués de deux types de plantes, les plantes banques et les plantes nectarifères et/ou pollinifères.

2.3.1. Les plantes banques

Elles hébergent des populations précoces de ravageurs qui servent de proies aux ennemis naturels. Pour qu'une plante-banque soit fonctionnelle, il faut que les pucerons

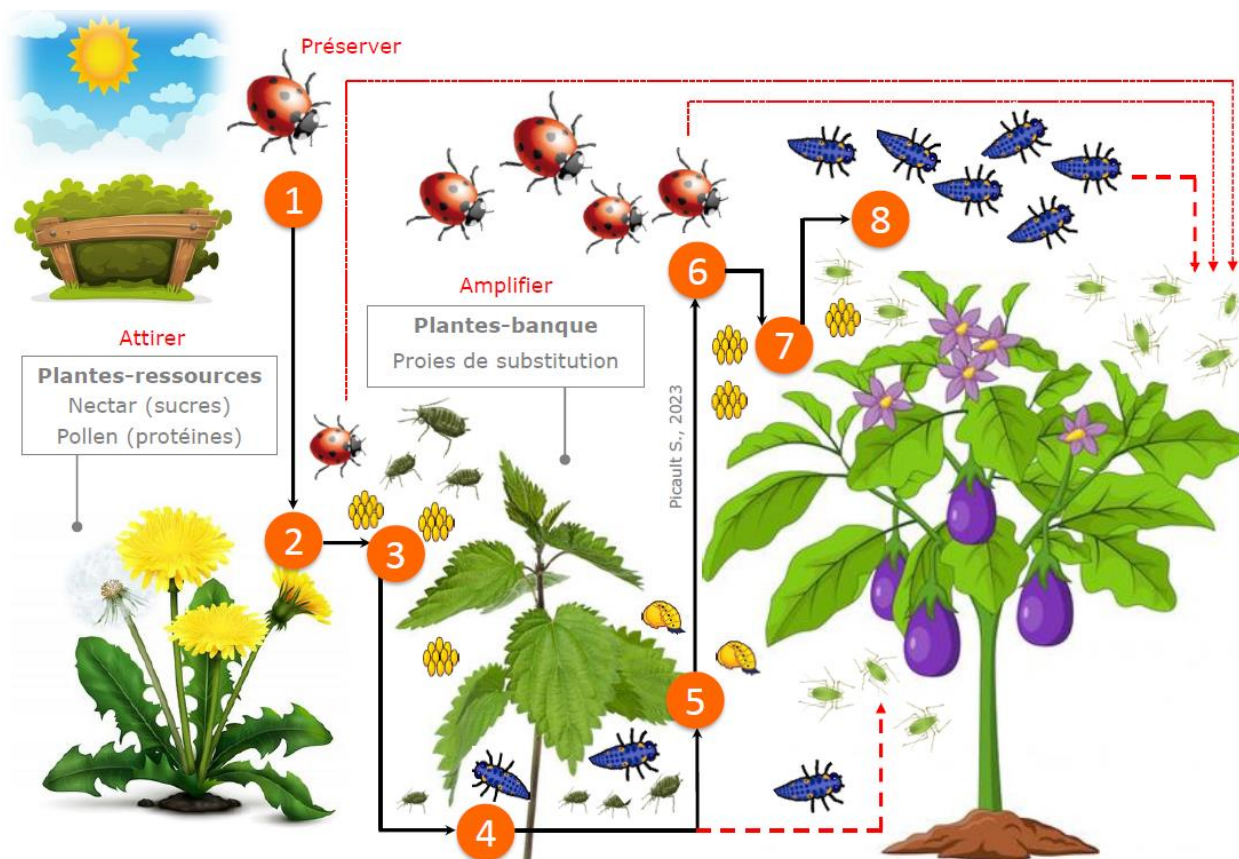


Figure 5 Principe d'une stratégie de lutte biologique par conservation. Plantes-ressources = plantes pollinifères et/ou nectarifères (Picault S. 2023)

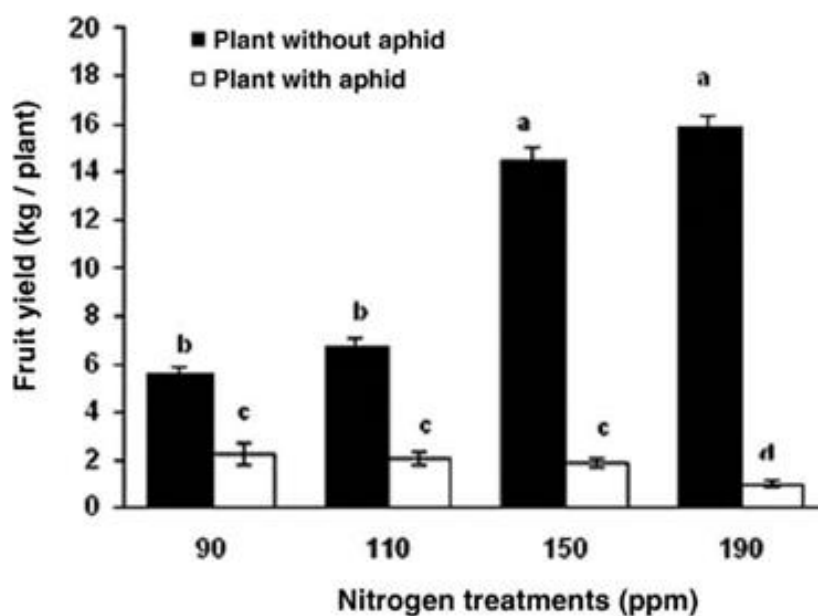


Figure 6 Rendement moyen en fruits (\pm SE) des plants de concombre fertilisés avec 90, 110, 150 et 190 ppm d'azote (N) en présence ou en absence de pucerons. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les niveaux de fertilisation en azote en fonction de la présence ou de l'absence de pucerons ($P = 0,05$, LSD après une ANOVA à un facteur) (Hosseini et al., 2010).

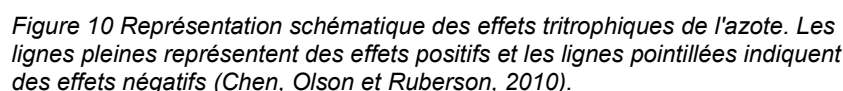
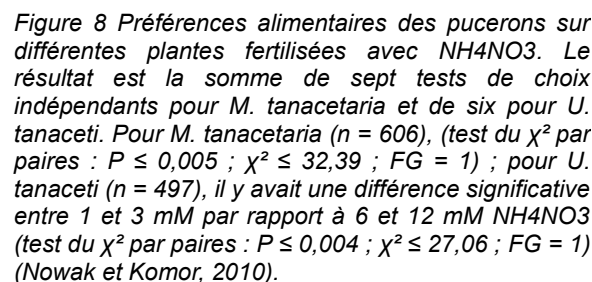
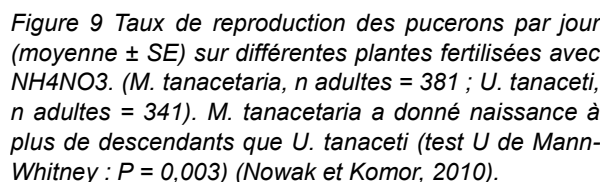
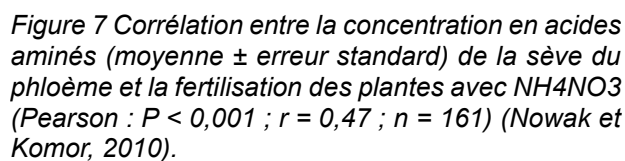
servant de proie de substitution s'installent au moins un à deux mois avant que les pucerons s'attaquant aux cultures légumières n'arrivent sur les cultures et que 50% des plantes-banques soient fortement infestés par les pucerons servant de proie de substitution (Picault, 2021b). La pérennité des bandes fleuries pourrait être également un facteur d'efficacité important, mais cela reste à vérifier. Les pucerons passant par un stade hivernal sous forme d'œuf (Figure 3) la persistance des bandes fleuries favorise donc le développement précoce des proies de substitution dès le début de la saison et renforce l'efficacité globale de la stratégie.

2.3.2. Les plantes nectarifères et/ou pollinifères

Elles fournissent les nutriments essentiels tels que nectar et pollen aux prédateurs et parasitoïdes, permettant leur survie et reproduction. Pour une efficacité optimale, il est important que ces plantes commencent à fleurir avant l'implantation des cultures et qu'elles continuent à fleurir pendant toute la période de culture. Elles assurent une source continue d'énergie pour les prédateurs adultes, facilitant leur maintien en nombre et leur efficacité dans la régulation des populations de ravageurs. Ces plantes permettent ainsi aux prédateurs et parasitoïdes indigènes de se développer à proximité des cultures cibles avant leur implantation (Figure 5). Ainsi pour être efficace, la lutte biologique par conservation doit considérer l'intégralité du système agricole, incluant tous les aspects du développement des ravageurs et de leurs prédateurs. Un autre élément clé à prendre en compte est la fertilisation azotée, qui influence la dynamique des populations de pucerons (Gash, 2012) et de leurs ennemis naturels (Garratt, Wright and Leather, 2010).

2.4. Gestion de la fertilisation azotée

L'azote est un élément crucial pour le développement des plantes et a des impacts significatifs sur les interactions entre les plantes et les ravageurs tels que les pucerons et de manière indirecte sur leurs prédateurs et parasitoïdes. Une fertilisation azotée adéquate de la courgette améliore sa biomasse et sa photosynthèse, augmentant ainsi la productivité des cultures. En revanche, en cours de culture l'excès ou le manque d'azote se traduit par une coulure des fleurs ou des déformations du fruit. La courgette se caractérise par un développement foliaire important et une croissance très rapide, ce qui entraîne des besoins en eau et en éléments minéraux élevés, en particulier l'azote qui revêt une grande importance dans l'élaboration de la biomasse (Erard, 2001). Dans une étude portant sur l'impact de différents niveaux de fertilisation azotée sur les cultures de concombres, il a été observé qu'en l'absence de pucerons, le rendement des plantes augmentait de manière linéaire avec une fertilisation azotée plus élevée (Hosseini *et al.*, 2010). Cependant, en présence de pucerons, le rendement diminuait de manière linéaire avec la fertilisation azotée, les plantes fertilisées avec le niveau le plus élevé d'azote (190 ppm) produisant le rendement le plus bas (Figure 6).



L'azote est aussi un facteur clé dans la colonisation des plantes par les pucerons. En augmentant la disponibilité d'azote, essentiel à la synthèse de la chlorophylle, la fertilisation azotée influence le choix des plantes par les pucerons en modifiant la réflectance des végétaux (Garratt, Wright and Leather, 2010). Un autre facteur déterminant dans la sélection des plantes hôtes par les insectes piqueurs-suceurs comme les pucerons, repose essentiellement sur la qualité nutritionnelle des tissus végétaux, en particulier la sève du phloème. Le ratio protéine/glucide et donc la concentration en acides aminés dans la sève du phloème, étroitement liés à la fertilisation des plantes (Figure 7), jouent un rôle crucial dans la sélection des plantes par les pucerons. Dans le cadre d'une étude de (Nowak and Komor, 2010) portant sur *M. tanacetaria* et *U. tanacetii*, pucerons spécifiques de *Tanacetum vulgare* (tanaïsie), l'impact de la fertilisation azotée sur le choix des plantes par les pucerons a été examiné. Les résultats ont démontré que les pucerons avaient une préférence marquée pour les plantes ayant reçu des doses plus élevées d'azote (Figure 8). Cette étude montre également que les femelles ont produit un plus grand nombre de descendants lorsqu'elles ont été nourries avec des plantes fertilisées avec 6 mM de NH_4NO_3 , comparativement aux plantes fertilisées avec 1 mM ou 3 mM de NH_4NO_3 (voir Figure 9). D'autres études ont établi un lien entre la fertilisation azotée des plantes et les paramètres biodémographiques des pucerons. Par exemple, une étude menée sur *Aphis gossypii* se développant sur des concombres sous serre a démontré que l'augmentation de la fertilisation azotée entraîne une hausse significative de la fécondité et de la longévité des pucerons adultes. La longévité à l'âge adulte est passée de 12,3 à 15 jours, tandis que la fécondité a augmenté de 58,7 à 93,1 nymphes produites par adulte, avec des doses de fertilisation passant de 90 à 190 unités d'azote (N) (Hosseini *et al.*, 2010). Une autre étude portant sur *Metopolophium dirhodum*, le puceron des céréales, a observé des résultats similaires bien que plus nuancés. Bien qu'il n'y ait pas eu de différence significative en ce qui concerne la longévité, la fécondité des pucerons a varié de 56,7 nymphes par adulte à 50 unités d'azote (N), jusqu'à 82,5 nymphes par adulte à 200 unités d'azote (N). Cependant, un seuil critique a été atteint avec une sur-fertilisation des plants de blé à 250 unités d'azote (N), où la fécondité est redescendue à 57,2 nymphes par adulte (Gash, 2012). En outre, les niveaux de fertilisation azotée ne se limitent pas à influencer uniquement les pucerons, mais affectent également leurs prédateurs et parasitoïdes à travers une cascade d'effets sur la qualité des ressources végétales et les interactions tritrophiques associées. Ces effets incluent la qualité des ressources alimentaires telles que le pollen et le nectar, les réponses chimiques émises par les phytophages, et les modifications du comportement de défense face aux prédateurs, ainsi que l'altération de leur qualité nutritionnelle (Chen, Olson and Ruberson, 2010) (Figure 10). L'étude menée par (Aqueel *et al.*, 2014) explore l'effet de la fertilisation azotée sur les interactions entre les pucerons (*Rhopalosiphum padi* et *Sitobion avenae*) et les chrysopes (*Chrysoperla carnea*). Leurs résultats révèlent que les larves de C.

carnea consomment davantage de pucerons lorsque les plantes sont fertilisées au niveau le plus bas d'azote (0 g N/plant), avec une diminution de la consommation à mesure que la fertilisation augmente (0.1, 0.2 et 0.4 g N/plant). De manière similaire, les recherches de (Couture, Servi and Lindroth, 2010) sur *Asclepias curassavica* montrent que les coccinelles *Harmonia axyridis* ont consommé 30% moins de pucerons sur les plants à forte teneur en azote (0.058 g par semaine de NH_4NO_3). Les études citées précédemment mettent en évidence que l'augmentation de la fertilisation azotée favorise la fécondité des pucerons. Ces résultats, associés à la diminution de la consommation des pucerons par les prédateurs sur les plantes à forte fertilisation, soulignent l'importance cruciale des interactions complexes entre les plantes, les ravageurs et leurs prédateurs dans les stratégies de lutte biologique et de conservation.

3. Matériels et méthodes

3.1. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer comment la stratégie de lutte biologique par conservation, développée dans le cadre des projets REGULEG et EFFICACE pour protéger les cultures d'aubergine sous abri froid contre les pucerons, affecte le niveau d'infestation des cultures de courgette sous abri froid par les pucerons.

Le deuxième objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du contexte de nutrition azotée (déficit azoté ou excès d'azote, sachant que le besoin en azote de la courgette est de 170 unités à l'échelle du cycle de culture qui est d'environ 3 mois et par voie de conséquence de la teneur en nitrates dans le feuillage des plantes, sur l'efficacité de cette stratégie. Dans cette étude, les plantes-banques utilisées sont l'ortie (*Urtica dioica*), la tanaïs (*Tanacetum vulgare*) et l'achillée millefeuille (*Achillea millefolium*) tandis que les plantes nectarifères et/ou pollinifères utilisées sont la corbeille d'or (*Alyssum saxatile*), la sauge officinale (*Salvia officinalis*) et le pissenlit (*Taraxacum officinale*).

3.2. Facteurs étudiés

Deux facteurs seront étudiés : le facteur « stratégie de protection contre les pucerons » qui comprend trois niveaux « stratégie LBC avec plantes de service de 4 ans », « stratégie LBC avec plantes de service de 1 an » et « aucune protection », et le facteur « nutrition azotée » qui comprend deux niveaux, dose « 150N » et dose « 450N ».

3.3. Site de l'étude et conditions expérimentales

3.3.1. Localisation et description du site

L'étude est menée au Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), sur son centre opérationnel de Carquefou situé dans la région des Pays de la Loire. Le centre opérationnel CTIFL de Carquefou est spécialisée dans la recherche sur les productions légumières, sous abri et en plein champ.

3.3.2. Conditions climatiques et de sol

Les conditions climatiques de Carquefou sont caractérisées par un climat océanique tempéré, avec des hivers doux et des étés modérés. Les précipitations sont réparties de manière relativement uniforme tout au long de l'année, mais les périodes d'ensoleillement et

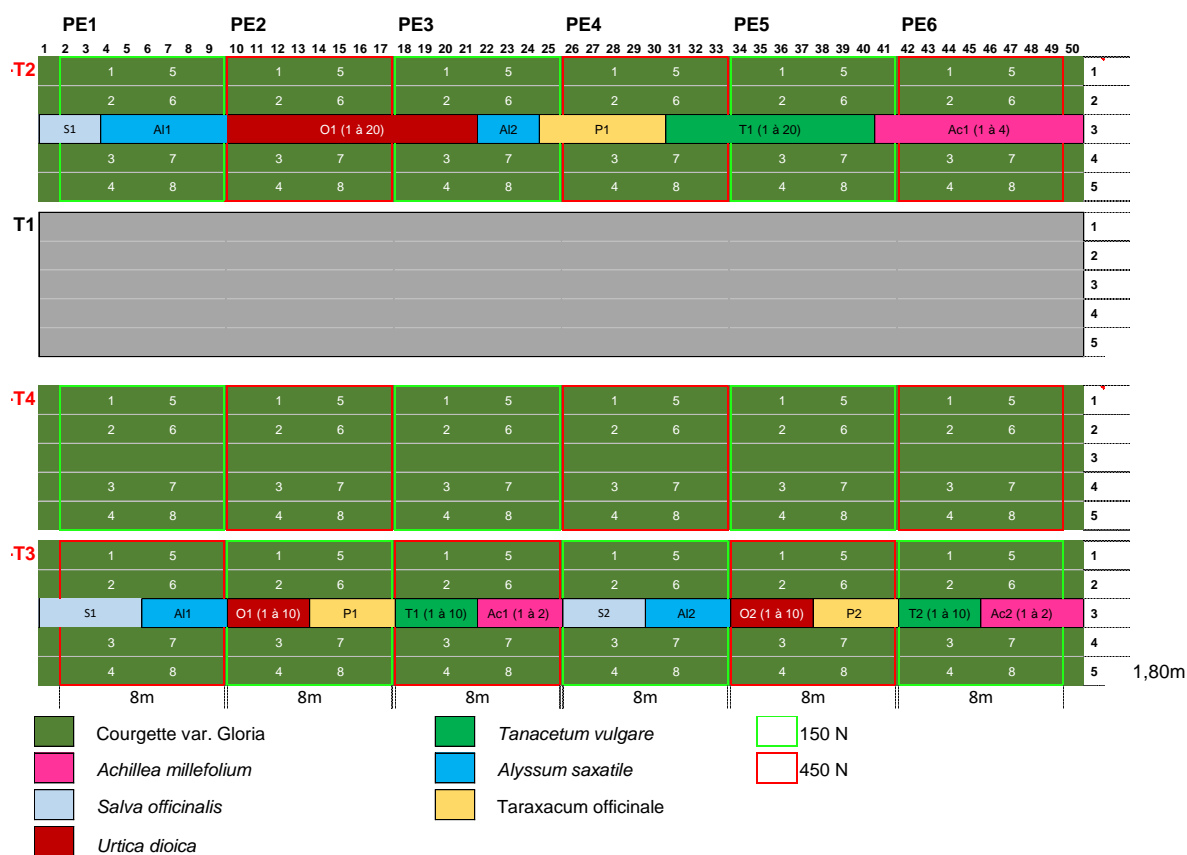


Figure 11 Plan du dispositif, T2 parcelle aménagée avec des plantes de services de 48 mois, T3 parcelle aménagée avec des plantes de services de 12 mois et T4 témoin non traité (extrait du protocole CTIFL).

d'humidité peuvent varier. Les sols du site sont majoritairement des sols limoneux, bien drainés et relativement fertiles, ce qui les rend adaptés aux cultures maraichères.

3.4. Dispositif expérimental (protocole CTIFL)

L'étude a été menée à l'intérieur de trois tunnels froids de 9x50 m (450 m²), chacun comprenant cinq planches de 1,80m de large, orientées selon un axe Nord-Est / Sud-Ouest (tunnels T2, T3 et T4). Les tunnels T2 et T3 ont été aménagés avec des patchs de plantes de service comprenant des plantes-banques (ortie (*Urtica dioica*), tanaïsie (*Tanacetum vulgare*) et achillée millefeuille (*Achillea millefolium*)) ainsi que des plantes nectarifères et/ou pollinifères (corbeille d'or (*Aurinaria saxatilis*), sauge officinale (*Salvia officinalis*) et pissenlit (*Taraxacum officinale*)). Ces plantes ont été installées sur la planche centrale en décembre 2020 pour le tunnel n°2 (patchs de 4 à 18 m² ; (Figure 11) et en février 2023 pour le tunnel n°3 (patchs de 6 m² ; (Figure 11)). Le tunnel T4 représente le tunnel témoin, où une planche supplémentaire de courgettes remplace les plantes de service. Dans les tunnels T2, T3 et T4, six parcelles élémentaires de 9x8 m (72 m²) ont été déterminées et matérialisées (parcelles élémentaires PE1 à PE6 ; (Figure 11)).

3.4.1. Fertilisation azotée des cultures

Dans les tunnels T2, T3 et T4, les planches ont été préparées à l'aide d'un fissurateur de sol (outil Demeter®, Actisol) et d'un cultirateur, deux mois avant la plantation des courgettes. Un apport d'engrais organique (Bochevo®) a ensuite été effectué un mois et demi avant la plantation des courgettes dans les parcelles élémentaires PE1, PE3 et PE5 des tunnels T2 et T4, ainsi que dans les parcelles élémentaires PE2, PE4 et PE6 du tunnel T3, afin que le sol contienne au total 150 unités d'azote (Figure 11). Au même moment, un apport d'engrais organique (Bochevo®) a été effectué dans les parcelles élémentaires PE2, PE4 et PE6 des tunnels T2 et T4, ainsi que dans les parcelles élémentaires PE1, PE3 et PE5 du tunnel T3, afin que le sol contienne au total 450 unités d'azote (Figure 11). Une fois les apports d'engrais effectués, les planches de culture ont été recouvertes avec un film en polyéthylène noir perforé de 17 µm d'épaisseur.

3.4.2. Plantation et entretien des cultures

Les courgettes (variété Gloria certifiée AB) ont été plantées dans chaque tunnel sur le film en polyéthylène noir le 17/04/24, à une densité de 0,64 plant/m² dans les tunnels T2 et T3, et de 0,79 plant/m² dans le tunnel T4 (1 rang par planche ; écartement sur le rang : 0,7 m). L'irrigation des courgettes a été réalisée à l'aide d'un dispositif d'irrigation au goutte-à-goutte.

3.4.3. Protection des cultures contre les maladies

La protection des courgettes contre les maladies a été assurée conformément aux exigences du cahier des charges de l'agriculture biologique (AB). L'oïdium a été contrôlé en aérant les tunnels, en éliminant les feuilles atteintes, et en appliquant de l'Armicarb pour le traiter.

3.4.4. Protection des cultures contre les ravageurs

Les populations d'acariens tétranyques ont été gérées à l'aide de *Phytoseilus persimilis* conformément aux préconisations du fournisseur d'auxiliaires (Biobest). Au cours de l'essai, aucun traitement insecticide n'a été autorisé, ni aucun lâcher d'ennemis naturels de pucerons.

3.4.5. Pollinisation

La pollinisation a été assurée par l'ajout de ruches de bourdons de l'espèce *Bombus terrestris*.

3.4.6. Aération des tunnels

L'aération des tunnels T2, T3 et T4 a été réalisée à l'aide d'ouvrants installés au niveau du faîtage ou sur les côtés. Les pignons situés sur les côtés Nord-Ouest et Sud-Est des tunnels ont été ouverts dès que les conditions climatiques le permettaient, c'est-à-dire lorsque la température à l'intérieur des tunnels était supérieure à 22°C.

3.4.7. Gestion des plantes-banques et des plantes nectarifères et/ou pollinifères

Les patches de tanaïsie et d'orties ont été fauchés à l'automne 2023 pour favoriser l'hibernation et la reprise des jeunes pousses l'année suivante. En revanche, les patches d'achillée millefeuille, de corbeille d'or et de sauge officinale n'ont pas été fauchés. Les pissenlits ont été semés à l'automne 2023. Un apport d'engrais organique (Bochevo©) a été réalisé au début du mois de mai sur les plantes de service. Avant la plantation des plants de courgette, les plantes-banques et les plantes nectarifères et/ou pollinifères ont été irriguées par aspersion (7 mm par apport) et désherbées manuellement. Après la plantation des courgettes, l'irrigation de ces plantes a été effectuée à l'aide d'un système de goutte-à-goutte.

3.5. Mesures et observations (protocole CTIFL)

3.5.1. Suivi phénologique des plantes nectarifères et/ou pollinifères

Une fois par semaine, à partir de la neuvième semaine et jusqu'à la dernière récolte de courgette, le stade phénologique des plantes nectarifères et/ou pollinifères a été déterminé dans chaque patch à l'aide du système d'un système de classe (Tableau 1).

Tableau 1 Système de classes pour caractériser la floraison des plantes-ressources.

Classe	Description
A	Pas de floraison
B	Début de floraison (pourcentage de plantes en fleurs < 50%)
C	Pleine floraison (pourcentage de plantes en fleurs ≥ 50%)
D	Grenaison (pourcentage de plantes montées à graines ≥ 50%)
E	Senescence (pourcentage de plantes sèches ≥ 50%)

Tableau 2 Échelle de classes pour estimer le niveau d'infestation des populations de pucerons sur les tiges d'ortie et de tanaïs.

Classe	Description
A	Absence de pucerons.
B	Présence de quelques pucerons isolés et répartis de façon éparse.
C	Présence d'au moins une femelle fondatrice entourée de quelques juvéniles (début de colonisation).
D	Présence d'une ou plusieurs colonies bien établies sur des plantes encore vigoureuses (tiges ou feuilles vigoureuses couvertes de pucerons).
E	Plantes infestées par les pucerons et moribondes.

Tableau 3 Échelle de classes pour estimer le niveau d'infestation des populations de pucerons dans les patchs d'achillée millefeuille.

Classe	Description
A	Absence de pucerons.
B	Présence de quelques pucerons répartis de façon éparse dans le quadrat.
C	Présence de pucerons en nombre plus conséquent, avec des individus dispersés sur plusieurs zones du quadrat, couvrant environ 25-50% de l'aire.
D	Nombre significatif de pucerons couvrant la majorité du quadrat (environ 50-75%), avec des zones visibles de forte concentration.
E	Couverture presque totale du quadrat (plus de 75%) par les pucerons, avec une présence dense et uniforme sur presque toutes les zones du quadrat.

Tableau 4 Échelle de classes pour estimer le taux de parasitisme des populations de pucerons.

Classe	Description
A	Absence de parasitisme.
B	Taux de parasitisme inférieur à 30%.
C	Taux de parasitisme compris entre 30 et 75%.
D	Taux de parasitisme supérieur à 75%.

Tableau 5 Échelle de classes pour estimer la taille des populations de pucerons sur les feuilles de courgettes.

Classe	Description
A	Absence de pucerons.
B	Présence de quelques pucerons isolés (1 à 15) ou d'une petite colonie.
C	Plusieurs dizaines de pucerons isolés ou plusieurs petites colonies.
D	Début de croissance exponentielle des populations de pucerons, vers une colonisation de l'ensemble de la feuille.
E	Feuille couverte de puceron.

3.5.2. Suivi des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons ainsi que du taux de parasitisme sur les plantes-banques

Dans les tunnels T2 et T3, le niveau d'infestation des plantes-banque par les pucerons, le niveau d'activité des prédateurs de pucerons sur le feuillage des plantes-banque et le taux de parasitisme des populations de pucerons par les hyménoptères parasitoïdes ont été estimés dans les patchs d'ortie, de tanaisie et d'achillée millefeuille une fois par semaine, de la 12^{ème} semaine précédant la plantation des courgettes jusqu'à la dernière récolte de courgette. Pour cela, 10 tiges d'ortie et 10 tiges de tanaisie ont été choisies au hasard dans chaque patch du tunnel T3, tandis que 20 tiges d'ortie et 20 tiges de tanaisie ont été choisies au hasard dans les patchs du tunnel T2. Ces tiges ont été identifiées par un numéro et conservées pendant toute la période d'expérimentation. Si une tige ne devenait plus représentative du patch, elle était remplacée par une autre tige sélectionnée de manière similaire. Le niveau d'infestation de l'achillée millefeuille par les pucerons a été estimé en effectuant deux séries de trois battages consécutifs de manière aléatoire à l'intérieur d'un collecteur de 14x14x2 cm dans chaque patch du tunnel T3. Dans le patch du tunnel T2, l'estimation a été réalisée par quatre séries de trois battages consécutifs, également de manière aléatoire, à l'intérieur d'un collecteur de 14x14x2 cm. Le niveau d'infestation de chaque tige ou collecteur par les pucerons a été estimé à l'aide d'une échelle de classes commune pour l'ortie et la tanaisie (Tableau 2) et d'une échelle de classes spécifique (Tableau 3) pour l'achillée millefeuille, tandis que les prédateurs de pucerons (larves et adultes de syrphes, de chrysopes, d'hémérobes, de coccinelles, de punaises prédatrices de la famille des Anthocoridae, des Nabidae ou des Miridae, larves de cécydomyies prédatrices etc.) présents sur la totalité de la tige ou à l'intérieur du collecteur ont été dénombrés de visu. Le taux de parasitisme des populations de pucerons par les hyménoptères parasitoïdes a été estimé quant à lui à l'aide de l'échelle de classes du tableau 4.

3.5.3. Suivi des populations de pucerons et de prédateurs de pucerons ainsi que du taux de parasitisme sur les plants de courgette

Dans chaque parcelle élémentaire des tunnels T2, T3 et T4, le niveau d'infestation des courgettes, l'activité des prédateurs de pucerons sur le feuillage des plantes et le taux de parasitisme des populations de pucerons par les hyménoptères parasitoïdes ont été évalués chaque semaine, de la plantation jusqu'à la dernière récolte de courgettes. Pour ce faire, 8 plants de courgettes ont été choisis de manière systématique dans chaque parcelle élémentaire, numérotés et identifiés (plants n°1 à 8 ; Figure 11) au moment de la plantation. Le niveau d'infestation par les pucerons des apex et de deux feuilles numérotées de chaque plant a été estimé chaque semaine à l'aide d'une échelle de classes (Tableau 5). En parallèle, le taux de parasitisme des populations de pucerons par les hyménoptères parasitoïdes a été évalué à l'aide de l'échelle de classes du tableau 4. Les prédateurs de pucerons (larves de

syrphes, chrysopes, hémérobes, coccinelles, punaises prédatrices des familles des Anthocoridae, Nabidae ou Miridae, larves de cécydomyies prédatrices, etc.) ont été dénombrés visuellement sur l'apex et les deux feuilles identifiées.

3.5.4. Structure spécifique des populations de pucerons

Dans chaque tunnel, lorsque les colonies de pucerons étaient suffisamment développées sur le feuillage des plantes, un échantillon de 50 pucerons a été prélevé de manière aléatoire sur au moins 10 tiges d'ortie, 10 tiges de tanaïs, 10 touffes d'achillée millefeuille et 10 plants de courgette, également répartis de manière aléatoire. Chaque individu a ensuite été identifié à l'espèce, et la structure des communautés de pucerons a été déterminée pour chaque type de plante.

3.5.5. Suivi de la teneur en azote nitrique du sol

La teneur en nitrates du sol a été mesurée toutes les 3 semaines dans chaque parcelle élémentaire des tunnels T2, T3 et T4, depuis la mise en place des plantes de service jusqu'à la dernière récolte des courgettes. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un outil d'analyse rapide de l'azote nitrique (Nitrachek®). Pour chaque parcelle élémentaire, 15 prélèvements de sol étaient réalisés à l'aide d'une tarière à une profondeur de 0 à 20 cm. Ces prélèvements étaient ensuite mélangés pour constituer un échantillon homogène, qui était analysé conformément au protocole Nitrachek®.

3.5.6. Suivi de la teneur en azote nitrique dans le feuillage des plantes

Dans les tunnels T2, T3 et T4, la teneur en nitrates du jus pétiole des courgettes a été mesurée tous les 15 jours, depuis la plantation jusqu'à la dernière récolte, dans chaque parcelle élémentaire. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un outil d'analyse rapide des nitrates (Nitrachek®), en utilisant la méthode PILAZO® développée par le CTIFL. Pour ce faire, des échantillons composés de 8 morceaux de 5 cm de pétioles de feuilles jeunes adultes étaient prélevés aléatoirement dans chaque parcelle élémentaire. Le jus était ensuite extrait à l'aide d'une presse à vis, dilué au vingtième avec de l'eau déminéralisée, puis le dosage des nitrates était réalisé avec le Nitrachek®.

3.5.7. Suivi de la température

La température de l'air et la pluviométrie ont été suivies tout au long de l'expérimentation à l'extérieur des tunnels, avec un pas de temps journalier, à l'aide d'une station météo CIMEL. Parallèlement, la température à l'intérieur des tunnels T2, T3 et T4 a été mesurée quotidiennement à l'aide de deux sondes de température placées dans chaque tunnel.

3.5.8. Production des tunnels

À chaque date de récolte (deux à trois récoltes par semaine), la production des cultures de courgette a été estimée dans les tunnels T2, T3 et T4 en dénombrant les colis de courgette à la sortie des tunnels. En parallèle, le nombre de fruits commercialisables par plante était déterminé sur trois plants courgette (plantes n°1, 3 et 6 ; Figure 11) dans chaque parcelle élémentaire des tunnels T2, T3 et T4. L'échantillonnage a été effectué sur les mêmes plantes tout au long de la période d'expérimentation. À deux reprises en cours de culture, 20 fruits ont été prélevés au hasard dans l'ensemble des caisses et pesés individuellement.

3.5.9. Traitements statistiques

Les tests statistiques ont été réalisées en fixant un seuil de significativité à 0,05. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes accompagnées de l'erreur standard (\pm SE) et la P-value associée pour évaluer la significativité des différences observées.

Les statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Rstudio et du site internet BiostaTGV.

Les conditions de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées à l'aide du test de Shapiro-Wilk et du test de Bartlett, respectivement, lorsque cela était nécessaire (Student et Anova)

Les tests du χ^2 ont été effectués sans utiliser la correction de Yates.

Comparaison de la dose d'azote apportée et de l'azote foliaire :

La comparaison de la dose d'azote apportée à celle présente dans le feuillage des plantes a été effectuée en réalisant un test t de Student bilatéral. Ce test a été choisi en raison de la nature comparative de cette analyse, où les données sont supposées normalement distribuées avec des variances homogènes.

Moyenne du poids des courgettes et nombre de fruits par plant :

La comparaison du poids moyen des courgettes et celle du nombre de fruits par plants entre les tunnels T2, T3 et T4 a été effectuée en réalisant une analyse de la variance (ANOVA). Ce test a été choisi pour évaluer les différences entre plusieurs groupes (plus de deux).

Effet des aménagements sur la sévérité d'infestation des courgettes par les pucerons dans les différents tunnels :

La comparaison de la sévérité de l'infestation des courgettes par les pucerons dans les tunnels T2, T3 et T4 a été effectuée en réalisant un test du χ^2 . Ce test a été sélectionné pour

évaluer l'effet des aménagements sur la distribution des niveaux d'infestation, les données étant de nature catégorielle.

Effet de l'azote sur les niveaux d'infestation des courgettes par les pucerons :

La comparaison du niveau d'infestation entre les modalités 150N et 450N dans les tunnels T2, T3 et T4 a été effectuée en réalisant un test du Chi². Ce test a été sélectionné pour évaluer l'effet des aménagements sur la distribution des niveaux d'infestation, les données étant de nature catégorielle.

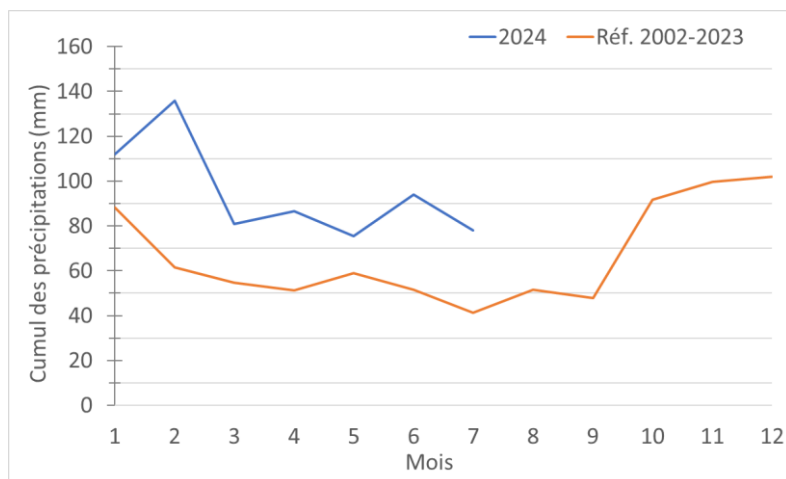


Figure 12 Cumul des précipitations mensuelles pour l'année 2024 et la période 2002-2023

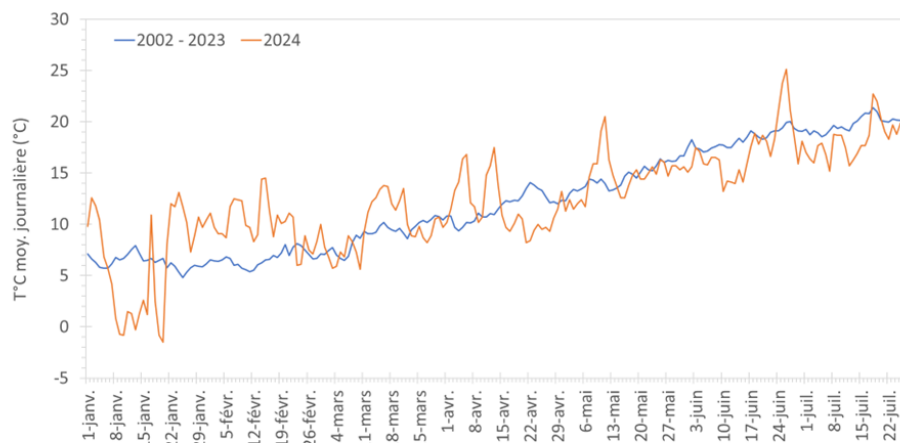


Figure 13 Températures moyennes journalières pour l'année 2024 et la période 2002-2023

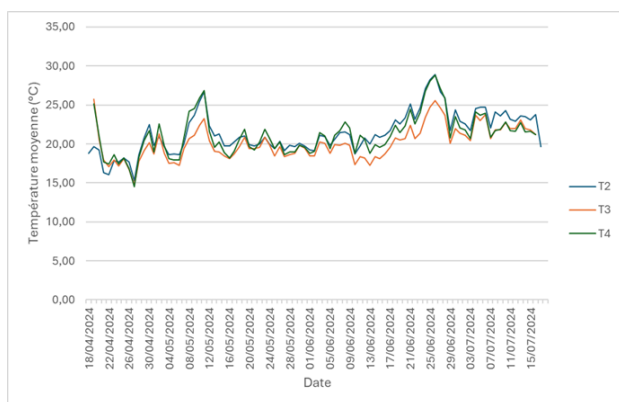


Figure 14 Températures moyennes journalières à l'intérieur des tunnels T2, T3 et T4

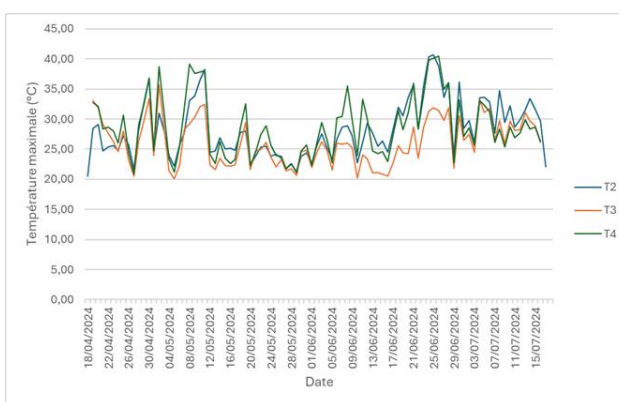


Figure 15 Températures maximales journalières à l'intérieur des tunnels T2, T3 et T4

4. Résultats

4.1. Conditions expérimentales

4.1.1. Conditions météorologiques

L'année 2024 s'est caractérisée par une météo particulièrement pluvieuse (Figure 12). La période hivernale a été marquée par des températures douces par rapport à la moyenne sur 22 ans, tandis que le printemps a connu des températures proches de la moyenne et l'été des températures plus fraîches (Figure 13). En janvier, les températures moyennes étaient proches des normales saisonnières, mais les mois de février et mars ont enregistré des températures nettement supérieures, avec des moyennes de 10 °C et 9,7 °C respectivement, soit +3,4 °C \pm 0,4 et +0,7 °C \pm 0,44 par rapport à la normale. La température moyenne de février 2024 (10 °C) a dépassé la température maximale moyenne enregistrée pour ce mois sur la période 2002-2023, qui était de 9,65 °C \pm 0,39 en 2020. La température moyenne de mars 2024 (9,7 °C) reste inférieure au maximum de 10,89 °C \pm 0,42 enregistré en 2003. Avril et mai ont connu des températures proches des normales de saison, tandis que juin et juillet ont affiché des températures plus fraîches, avec des moyennes de 17,1 °C et 17,6 °C respectivement, soit -1,3 °C \pm 0,51 et -1,1 °C \pm 0,35 par rapport à la normale. Les températures de juin et juillet 2024 sont proches des minimales observées en juin et juillet sur la période 2002-2023 qui étaient de 16,35 °C \pm 0,35 en juin 2013 et 17,53 °C \pm 0,29 observée en 2007. En ce qui concerne les précipitations, chaque mois de janvier à juillet a enregistré des niveaux bien supérieurs aux normales saisonnières, avec un total de 665 mm, comparé à une moyenne de 415,5 mm pour la période de référence. Ce total dépasse le maximum de précipitations observé sur la période 2002-2023, qui était de 583 mm en 2014. Cela représente un excédent de précipitations de 60 % par rapport à la moyenne des 22 dernières années.

A l'intérieur des tunnels, les températures ont connu une amplitude de température moyenne pouvant aller de 14,5°C au minimum à un maximum de 28,4°C sur la période de culture, avec de fortes variations entre les tunnels T2, T3 et T4. Au pic de température le 26/06, la température moyenne était de 25,6°C pour le tunnel T3 alors qu'elle était de 28,8°C pour les tunnels T2 et T4 (Figure 14). Ce jour, les températures maximales ont atteint une différence de presque 10°C avec une température maximale de 31,5°C dans le tunnel T3 contre 40,5°C dans les tunnels T2 et T4 (Figure 15).

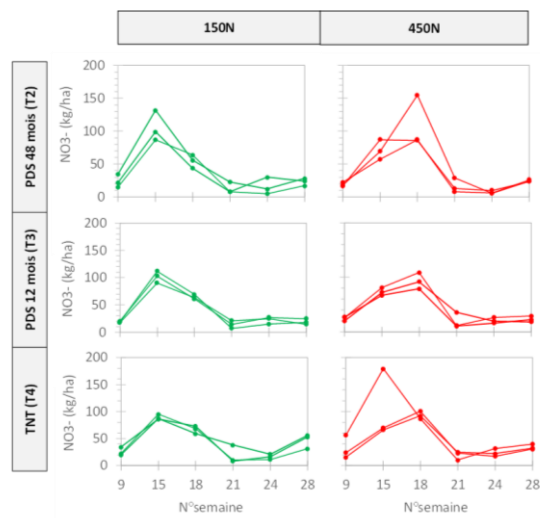


Figure 16 Teneur en nitrates du sol mesurée dans chaque parcelle élémentaire des tunnels T2, T3 et T4 pour les niveaux de fertilisation azotée 150N et 450N

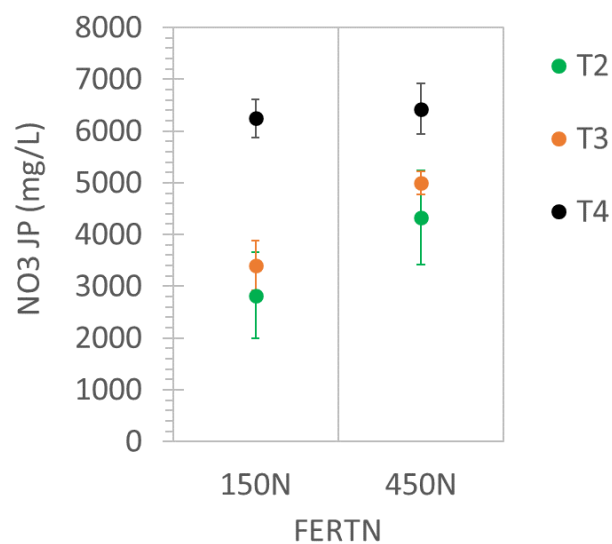


Figure 17 Teneur en nitrate moyenne du feuillage des plants de courgette des tunnels T2, T3 et T4 pour les niveaux de fertilisation azotée 150N et 450N

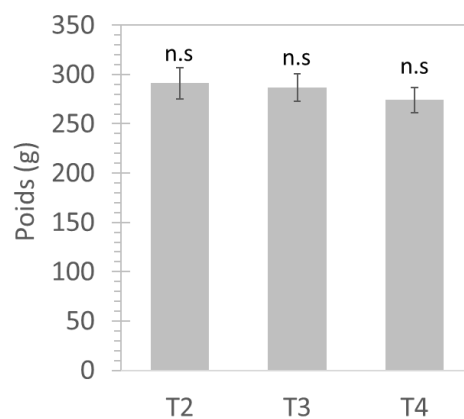


Figure 18 Poids moyen \pm SE d'un fruit pour les tunnels T2, T3 et T4. Aucune différence significative n'a été observée suite à la réalisation d'une ANOVA au seuil alpha de 5%

4.1.2. Teneur en nitrates du sol

Les parcelles élémentaires de la modalité 150N dans les tunnels T2, T3 et T4 ont atteint leur pic de minéralisation à la semaine 15, avec une teneur en nitrates d'environ 100 unités. Par la suite, cette teneur a diminué de manière linéaire pour atteindre des niveaux très faibles, compris entre 10 et 20 unités, à partir de la semaine 21. De même, les parcelles élémentaires de la modalité 450N dans les tunnels T2, T3 et T4 ont atteint leur pic de minéralisation à la semaine 18, également avec une teneur en nitrates d'environ 100 unités. Cette teneur a ensuite diminué de façon linéaire jusqu'à des niveaux très faibles, entre 10 et 20 unités, à partir de la semaine 21 (Figure 16). Enfin, les teneurs en nitrates du sol ont légèrement augmenté à partir de la semaine 24, suite à une refertilisation avec un engrais organique soluble.

4.1.3. Teneur en nitrates dans le feuillage des courgettes

Plusieurs mesures de l'azote foliaire ont été effectuées au cours de la saison, permettant de déterminer le pic de concentration d'azote foliaire. La concentration moyenne d'azote foliaire des trois parcelles élémentaires traitées avec 150N a ensuite été comparée à celle des trois parcelles élémentaires traitées avec 450N dans chaque tunnel au moment du pic (semaine 21 ; Figure 17). Un test t de Student a révélé une différence significative entre les deux modalités de fertilisation azotée dans le tunnel T3 $3400\text{mg/mL} \pm 477,5$ à 150N vs $4995\text{mg/mL} \pm 221,5$ à 450N ($P < 0,05$) mais n'a pas montré de différence significative pour les tunnels T2 $2822\text{mg/mL} \pm 836$ à 150N vs $4329\text{mg/mL} \pm 915,1$ à 450N et T4 $6246\text{mg/mL} \pm 364,6$ à 150N vs $6431\text{mg/mL} \pm 485,1$ à 450N.

4.2. Production

4.2.1. Poids moyen des courgettes

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour comparer le poids moyen des courgettes entre les trois tunnels étudiés. Le poids moyen d'une courgette est de $291 \pm 15,7$ g pour le tunnel T2, de $287 \pm 13,8$ g pour le tunnel T3, et de $274 \pm 12,8$ g pour le tunnel T4. Les résultats de l'ANOVA montrent que la différence observée d'une modalité à l'autre n'est pas significative. (Figure 18). Les conditions de croissance dans les trois tunnels n'ont pas eu d'effet significatif sur le poids moyen des courgettes.

4.2.2. Nombre moyen de fruits par plante

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour comparer le nombre de fruits par plante dans chaque tunnel. Le nombre moyen de fruits par plante est de $1,18 \pm 0,06$ dans le tunnel T2, de $1,28 \pm 0,07$ dans le tunnel T3, et de $1,26 \pm 0,06$ dans le tunnel T4. Là encore,

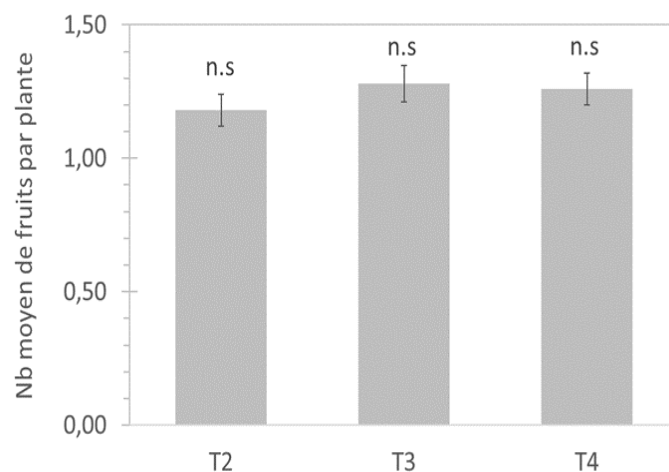


Figure 19 Nombre moyen de fruits par plants et par date pour les tunnels T2, T3 et T4. Aucune différence significative n'a été observée suite à la réalisation d'une ANOVA au seuil alpha de 5%

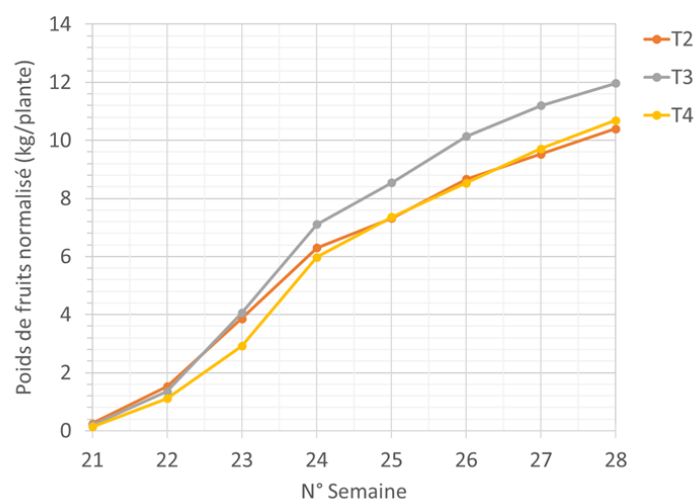


Figure 20 Poids de fruits normalisé cumulé de la semaine 21 à la semaine 28

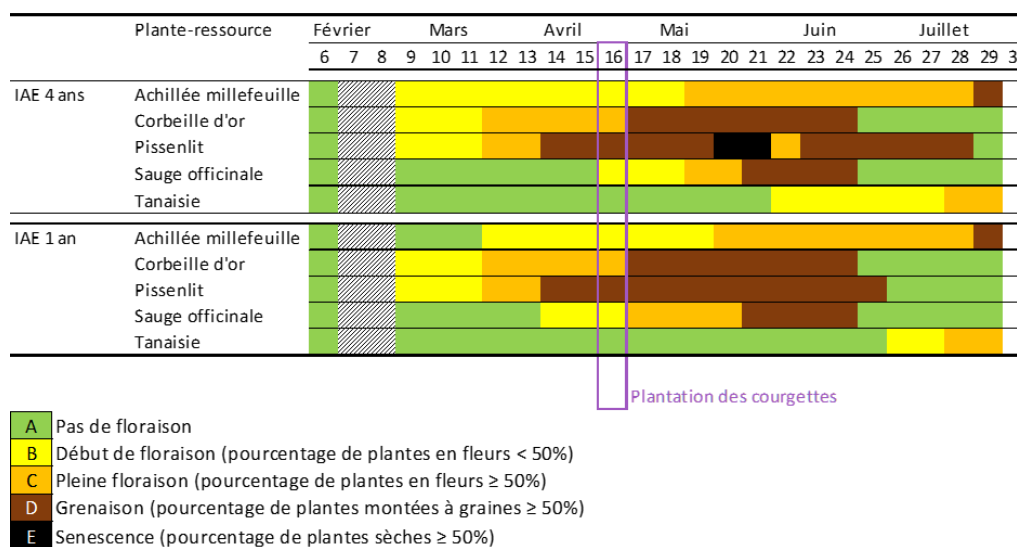


Figure 21 Diagramme de floraison des plantes nectarifères et/ou pollinifères pour les tunnels T2 et T3

les résultats de l'ANOVA montrent que la différence observée d'une modalité à l'autre n'est pas significative (Figure 19). Cela indique que les conditions de croissance dans les trois tunnels n'ont pas eu d'effet significatif sur le nombre de fruits produits par plant.

4.2.3. Production totale des tunnels

L'analyse de la production totale des tunnels, rapportée en Kg/plante sur l'ensemble de la période de culture, révèle que le tunnel T3 a enregistré la production la plus élevée, avec un cumul de 11,97 Kg/plante. En comparaison, le tunnel T2 a produit 10,41 Kg/plante et le tunnel T4, 10,69 Kg/plante, soit un écart respectif de 1,56 Kg/plante et 1,28 Kg/plante en faveur du tunnel T3 (Figure 20).

4.3. Floraison des plantes nectarifères et/ou pollinifères

Dans les tunnels T2 et T3, la période de pleine floraison a débuté à partir de la semaine 12. Pour T2, cette période s'est étendue jusqu'à la fin de la culture, à l'exception des semaines 17 et 18. Dans T3, la pleine floraison a couvert l'intégralité de la période de culture. Dans les deux tunnels, le pissenlit et la corbeille d'or ont fleuri en premier, avec une pleine floraison de 2 semaines pour le pissenlit et de 5 semaines pour l'achillée millefeuille. La pleine floraison de la sauge officinale a commencé en semaine 17 pour une période de 4 semaines, tandis qu'elle a démarré en semaine 19 dans le tunnel T2 et n'a duré que deux semaines. L'achillée a connu la période de pleine floraison la plus longue, débutant en semaine 19 dans T2 pour une durée de 10 semaines, et en semaine 20 dans T3 pour une durée de 9 semaines. Enfin, la tanaisie a fleuri à partir de la semaine 29 jusqu'à la fin de la culture. Le pissenlit du tunnel T2 est la seule plante nectarifère et/ou pollinifère à avoir connu une courte période de sénescence (Figure 21).

4.4. Niveau d'infestation des plantes banques par les pucerons

4.4.1. Infestation des patchs d'achillée millefeuille par les pucerons

Dans les patchs d'achillée millefeuille, suite à diverses observations effectuées lors des notations, la méthode d'évaluation a été modifiée. Initialement, les observations se faisaient à l'intérieur d'un collecteur déposé aléatoirement dans les patchs. Cette approche a été remplacée par un battage aléatoire des plantes, permettant de recueillir les pucerons à l'intérieur d'un collecteur, méthode jugée plus représentative. Ce changement a entraîné une

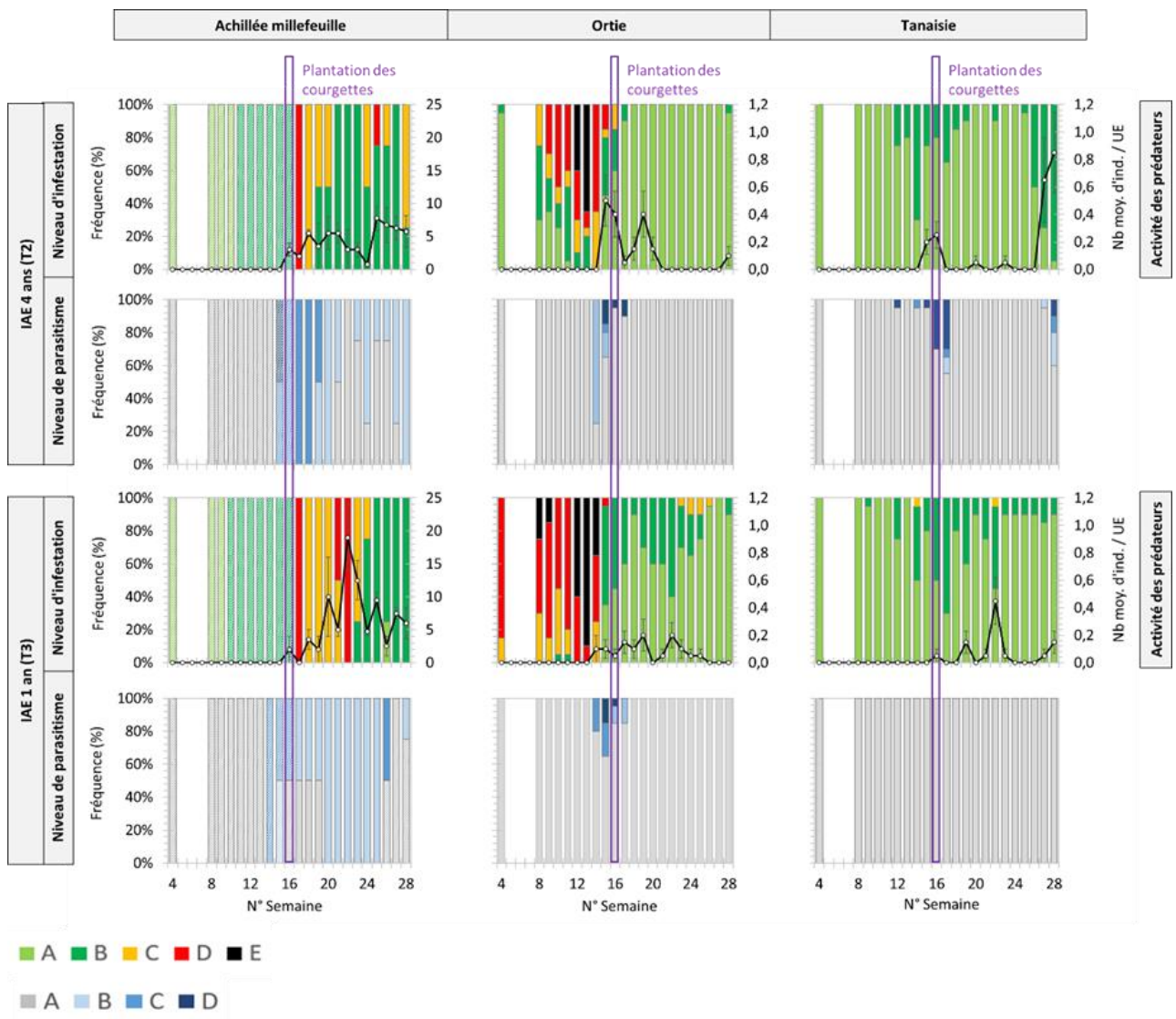


Figure 22 Pourcentage de feuilles / collecteur par classe d'infestation ou de parasitisme et niveau d'activité moyen des prédateurs de pucerons sur les plantes banques dans les tunnels T2 et T3 de la semaine 4 à la semaine 28

augmentation artificielle du niveau d'infestation entre les semaines 16 et 17, avec 100 % des collecteurs passant d'une classe B à une classe D. En réalité, les plantes étaient probablement déjà fortement infestées avant la semaine 17. De plus, la sévérité de l'infestation de classe D observée durant la semaine 17 dans les tunnels T2 et T3 pourrait être liée à l'ajustement de la nouvelle méthode, car la sévérité est revenue à un niveau d'infestation de classe C dès la semaine suivante. Ce changement de méthode est illustré par un hachurage des barres des histogrammes correspondants dans la figure 22. Les premiers pucerons ont été observés en semaine 11 dans le tunnel T2 et en semaine 10 dans le tunnel T3. Compte tenu de la sévérité des infestations observées en semaine 17, il est probable que la croissance exponentielle des pucerons ait débuté entre les semaines 12 et 15 dans les tunnels T2 et T3. Dans le tunnel T2, le pic d'infestation a été atteint en semaine 17, avec 100 % des collecteurs infestés en classe D. Dans le tunnel T3, le pic d'infestation a été atteint en semaine 22, également avec 100 % des collecteurs infestés en classe D. La période d'infestation s'est étalée des premières observations jusqu'à la fin de la période de culture des courgettes.

4.4.2. Infestation des patchs d'ortie par les pucerons

Dans le tunnel T2, les premiers pucerons ont été observés dès la semaine 4, avec une répartition initiale de 10 % des tiges classées en A et 90 % en B (Figure 22). La croissance exponentielle des pucerons a débuté en semaine 8, où l'on a noté 30 % des tiges classées en A, 45 % en B, et 25 % en C. Le pic d'infestation a été atteint en semaine 12, avec une distribution de 10 % des tiges classées en B, 20 % en C, 30 % en D, et 40 % en E. L'infestation a persisté de la semaine 4 à la semaine 17, avec 100 % des tiges classées en A jusqu'à la fin de la période de culture. Dans le tunnel T3, les pucerons ont également été détectés dès la semaine 4, avec des niveaux d'infestation déjà significatifs : 15 % des tiges classées en C et 85 % en D, indiquant que les pucerons avaient déjà atteint une phase de croissance exponentielle. Deux périodes d'infestation distinctes ont été observées dans ce tunnel, une infestation primaire et une secondaire. Le pic d'infestation primaire a eu lieu en semaine 11, avec 5 % des tiges classées en B, 15 % en C, et 80 % en D. Cette infestation primaire a pris fin en semaine 18, avec 90 % des tiges classées en A et 10 % en B.

4.4.3. Infestation des patchs de tanaisie par les pucerons

Dans le tunnel T2, les premiers pucerons ont été observés en semaine 12, avec 75 % des tiges classées en A et 25 % en B (Figure 22). Le pic d'infestation a été atteint en semaine 14, avec une répartition de 30 % des tiges classées en A et 70 % en B. L'infestation s'est prolongée de la semaine 12 à la semaine 19, puis a repris en semaine 25. Une croissance exponentielle a été observée de la semaine 25 à la semaine 28, où la répartition des tiges est passée de 95 % classées en A et 5 % en B à seulement 5 % classées en A et 95 % en B. Dans le tunnel T3, les pucerons ont fait leur apparition plus tôt, dès la semaine 9, avec une répartition

initiale de 95 % des tiges classées en A et 5 % en B. Le pic d'infestation a été atteint en semaine 17, où 30 % des tiges étaient classées en A et 70 % en B. L'infestation a duré de la semaine 9 à la semaine 28, restant à un niveau faible en semaine 28, avec 90 % des tiges classées en A et 10 % en B.

4.5. Activité et structures des communautés de prédateurs et parasitoïdes sur les plantes banques

4.5.1. Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur l'achillée

Dans les deux tunnels, les prédateurs sont arrivés aux alentours de la semaine 15. Leurs populations se sont ensuite développées en réponse au niveau d'infestation des pucerons, montrant une corrélation étroite entre l'abondance des pucerons et l'activité des prédateurs (Figure 22). Dans le tunnel T2, deux pics d'activité des prédateurs ont été observés : le premier en semaine 18 avec $5,5 \pm 0,5$ individus en moyenne par collecteur et le second en semaine 25 avec $7,75 \pm 1,80$ individus en moyenne par collecteur. Dans le tunnel T3, un pic d'activité a été enregistré en semaine 22, culminant à 19 ± 5 individus en moyenne par collecteur. Le niveau de parasitisme, quant à lui, a suivi le même développement que celui des pucerons tout au long de la période observée.

4.5.2. Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur l'ortie

Dans le tunnel T3, les prédateurs sont apparus à partir de la semaine 13, tandis qu'ils ont été observés à partir de la semaine 14 dans le tunnel T2 (Figure 22). Dans les deux tunnels, l'activité des prédateurs n'a pas été synchronisée avec les niveaux d'infestation des pucerons et est restée à un niveau relativement faible par rapport à ce qui a pu être observé les années précédentes. Aux pics d'activité des prédateurs, on a dénombré en moyenne $0,5 \pm 0,18$ individus par tige en semaine 15 dans le tunnel T2 et $0,2 \pm 0,12$ individus par tige en semaine 19 dans le tunnel T3. A titre de comparaison au moment des pics d'activités en 2023 on dénombrerait $3,5 \pm 0,8$ individus par tige en semaine 18 dans le tunnel T2 et $2,6 \pm 0,7$ individus par tige en semaine 19 dans le tunnel T3. Un faible niveau de parasitisme a également été observé au cours des semaines 14 à 17.

4.5.3. Activité des prédateurs et niveau de parasitisme sur la tanaïsie

Dans les deux tunnels aménagés, l'activité des prédateurs est restée à un niveau très faible, avec un pic en semaine 28 à $0,85 \pm 0,29$ individus par tige dans le tunnel T2 et un pic à $0,45 \pm 0,17$ individus par tige dans le tunnel T3 (Figure 22). A titre de comparaison au moment des pics d'activités en 2023 on dénombrerait $0,2 \pm 0,1$ individus par tige en semaine 19 dans le

Tableau 6 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par plante déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T2

T2	Anthocoridae	Chrysopidae	Coccinellidae	Nabidae	Syrphidae	Total Prédateurs
Achillée millefeuille	10.5%	1.4%	74.6%	12.4%	1.0%	209
Ortie	2.9%	0%	91.2%	0%	5.9%	34
Tanaisie	79.6%	0%	20.4%	0%	0%	54

Tableau 7 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques et par plante déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T3

T3	Anthocoridae	Chrysopidae	Coccinellidae	Nabidae	Syrphidae	Total Prédateurs
Achillée millefeuille	13.5%	1.8%	81.8%	2.9%	0%	274
Ortie	31.8%	0%	68.2%	0%	0%	22
Tanaisie	34.8%	8.7%	56.5%	0%	0%	23

Tableau 8 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par famille de prédateurs déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T2

T2	Achillée millefeuille	Ortie	Tanaisie	Total des prédateurs
Anthocoridae	33.3%	1.5%	65.2%	66
Chrysopidae	100%	0%	0%	3
Coccinellidae	78.8%	15.7%	5.6%	198
Nabidae	100%	0%	0%	26
Syrphidae	50%	50%	0%	6

Tableau 9 Structure des communautés de prédateurs de pucerons sur les plantes banques par famille de prédateurs déterminé sur la période d'expérimentation pour le tunnel T3

T3	Achillée millefeuille	Ortie	Tanaisie	Total des prédateurs
Anthocoridae	71.2%	13.5%	15.4%	52
Chrysopidae	71.4%	0%	28.6%	7
Coccinellidae	88.9%	6.0%	5.2%	252
Nabidae	100%	0%	0%	8

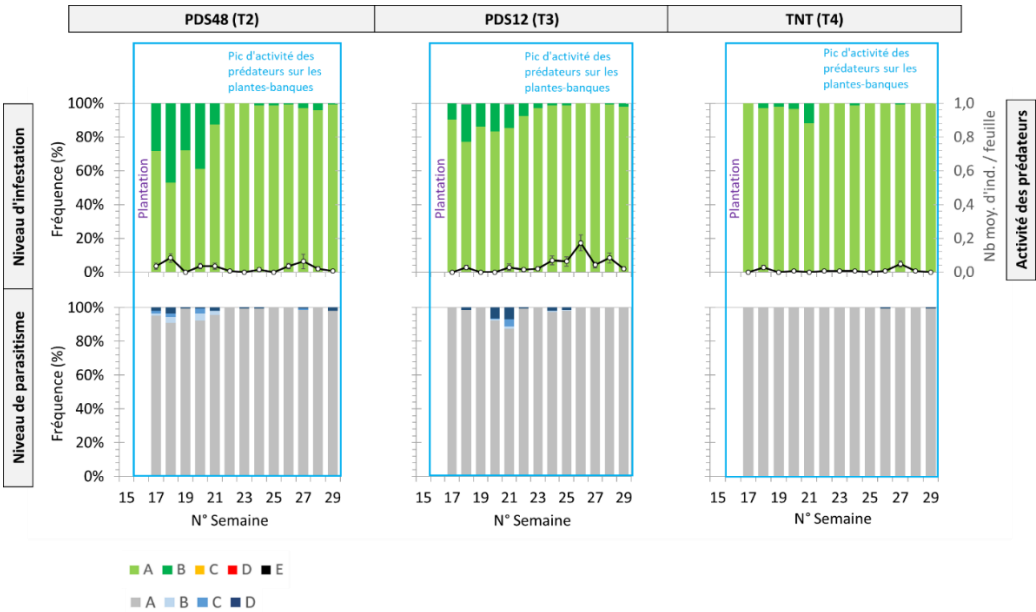


Figure 23 Pourcentage de feuilles par classe d'infestation ou de parasitisme et niveau d'activité moyen des prédateurs de pucerons sur les courgettes dans les tunnels T2, T3 et T4 de la semaine 17 à la semaine 29

tunnel T2 et $3,1 \pm 0,6$ individus par tige en semaine 21 dans le tunnel T3. Le parasitisme est également resté à un niveau très faible, avec un pic d'activité en semaines 16 et 17 dans le tunnel T2 et aucune activité observée dans le tunnel T3.

4.5.4. Structure des communautés de prédateurs sur les plantes-banque

Dans le tunnel T2, la répartition des prédateurs observés sur les plantes-banque révèle une prédominance des Coccinellidae, représentant 66,2 % des individus collectés. Les autres prédateurs présents incluent les Anthocoridae (22,1 %), les Nabidae (8,7 %), les Syrphidae (2 %), et les Chrysopidae (1 %). Dans le tunnel T3, la majorité des prédateurs appartiennent également à la famille des Coccinellidae, avec une proportion encore plus marquée de 79 %. Les Anthocoridae représentent 16,3 % des individus collectés, suivis des Nabidae (2,5 %) et des Chrysopidae (2,2 %). En examinant les données en détail, on observe que les Coccinellidae dominent sur l'achillée millefeuille dans les deux tunnels, avec 74,6 % dans T2 et 81,8 % dans T3. Sur l'ortie, ils représentent 91,2 % des prédateurs dans T2 et 68,2 % dans T3. Sur la tanaisie, les Anthocoridae dominent dans T2 avec 79,6 %, tandis que dans T3, la répartition est de 56,5 % de Coccinellidae et 34,8 % d'Anthocoridae. Concernant l'origine des Anthocoridae, 65,2 % proviennent de la tanaisie et 33,3 % de l'achillée millefeuille dans le tunnel T2. Dans le tunnel T3, 71,2 % des Anthocoridae sont collectés sur l'achillée millefeuille. 100 % des Nabidae dans les deux tunnels proviennent de l'achillée millefeuille (Tableaux 6, 7, 8 et 9).

4.6. Effet du type d'aménagement sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons

Le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons a atteint un pic dans les trois tunnels au cours des semaines 18 à 21 (Figure 23). Pour évaluer les différences d'infestation entre les tunnels, une analyse statistique a été réalisée à l'aide d'un test du chi-deux. Les résultats de l'analyse globale ont montré que les différences observées entre les modalités étaient significatives. ($P < 0,05$; Tableau 10). Dans le tunnel T2, le pourcentage de plantes sans pucerons sur le feuillage (plantes de classe A) pendant le pic d'infestation était de $69 \% \pm 6 \%$, tandis que $31 \% \pm 6 \%$ des plantes présentaient une infestation de classe B. Aucune des feuilles n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour atteindre une classe d'infestation supérieure à la classe B. En comparaison, dans le tunnel T3, le pourcentage de plantes sans pucerons sur le feuillage pendant le pic d'infestation était de $84 \% \pm 2 \%$, tandis que $15 \% \pm 2 \%$ des plantes présentaient une infestation de classe B. Moins de 1 % des feuilles ont atteint une infestation de classe C, et aucune n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour

Tableau 10 Fréquence moyenne par date \pm SE pour chaque classe d'infestation mesurée dans les tunnels T2, T3 et T4 pendant le pic d'infestation (semaine 17 à 21). Les modalités pour lesquelles des lettres différentes ont été attribuées sont significativement différentes (test du χ^2 au seuil alpha de 5%)

Tun.	Classe d'infestation						G. S.
	A	B	C	D	E	n	
T2	69% \pm 6%	31% \pm 6%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	5	a
T3	84% \pm 2%	15% \pm 2%	< 1% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	5	b
T4	96% \pm 2%	4% \pm 2%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	0% \pm 0%	5	c

Tun. : Tunnel ; G. S. Groupe statistique

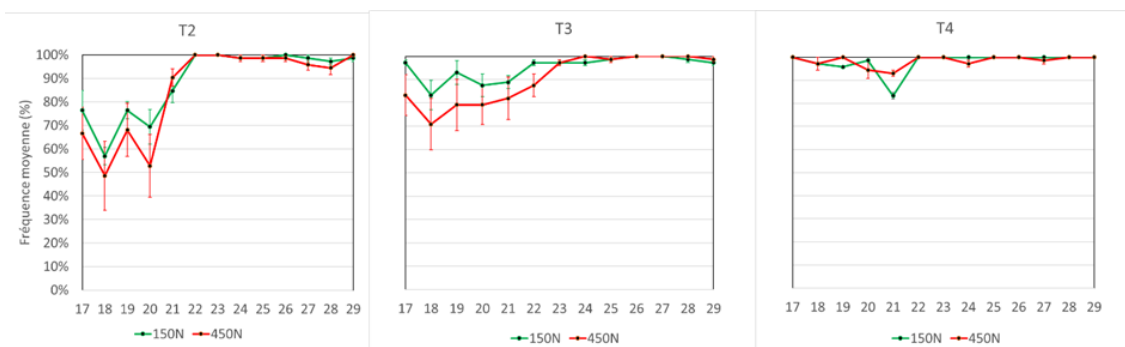


Figure 24 Pourcentage moyen \pm SE de plantes sans pucerons (plantes classées A) dans les parcelles élémentaires fertilisée avec 150 et 450 kg/Ha d'azote dans les tunnels T2, T3 et T4. Aucune différence significative n'a été observée suite à la réalisation d'un test du χ^2 au seuil alpha de 5%

Tableau 11 Pourcentage moyen \pm SE de plantes sans pucerons (plantes classées A) dans les parcelles élémentaires fertilisée avec 150 et 450 kg/Ha d'azote dans les tunnels T2, T3 et T4. Aucune différence significative n'a été observée suite à la réalisation d'un test du χ^2 au seuil alpha de 5%

T	Sem.	150N	450N	n	S
T2	17	76% \pm 8%	67% \pm 11%	3	n.s
	18	57% \pm 4%	49% \pm 15%	3	n.s
	19	76% \pm 4%	68% \pm 11%	3	n.s
	20	69% \pm 7%	53% \pm 13%	3	n.s
	21	85% \pm 5%	90% \pm 4%	3	n.s
	22	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	23	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	24	99% \pm 1%	99% \pm 1%	3	n.s
	25	99% \pm 1%	99% \pm 1%	3	n.s
	26	100% \pm 0%	99% \pm 1%	3	n.s
	27	99% \pm 1%	96% \pm 2%	3	n.s
	28	97% \pm 1%	94% \pm 3%	3	n.s
	29	99% \pm 1%	100% \pm 0%	3	n.s
T3	17	97% \pm 1%	83% \pm 9%	3	n.s
	18	83% \pm 6%	71% \pm 11%	3	n.s
	19	93% \pm 5%	79% \pm 11%	3	n.s
	20	88% \pm 5%	79% \pm 8%	3	n.s
	21	89% \pm 3%	82% \pm 9%	3	n.s
	22	97% \pm 1%	88% \pm 5%	3	n.s
	23	97% \pm 1%	97% \pm 1%	3	n.s
	24	97% \pm 1%	100% \pm 0%	3	n.s
	25	99% \pm 1%	99% \pm 1%	3	n.s
	26	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	27	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	28	99% \pm 1%	100% \pm 0%	3	n.s
	29	97% \pm 1%	99% \pm 1%	3	n.s
T4	17	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	18	97% \pm 1%	97% \pm 3%	3	n.s
	19	96% \pm 4%	100% \pm 0%	3	n.s
	20	99% \pm 1%	94% \pm 4%	3	n.s
	21	83% \pm 9%	93% \pm 1%	3	n.s
	22	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	23	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	24	100% \pm 0%	97% \pm 1%	3	n.s
	25	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	26	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	27	100% \pm 0%	99% \pm 1%	3	n.s
	28	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s
	29	100% \pm 0%	100% \pm 0%	3	n.s

être classée en D ou E. Enfin, dans le tunnel T4, le pourcentage de plantes sans pucerons sur le feuillage pendant le pic d'infestation était de $96 \% \pm 2 \%$, tandis que $4 \% \pm 2 \%$ des plantes présentaient une infestation de classe B. Aucune des feuilles n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour atteindre une classe supérieure à B. La comparaison des tunnels deux à deux montre que la différence observée d'un tunnel à l'autre est significative (test du χ^2 pour deux échantillons indépendants au seuil α de 5%) (Tableau 10).

4.7. Effet du niveau de fertilisation azotée sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons

Les pics d'infestation des plantes par les pucerons ont été observés au cours de la semaine 18 dans les tunnels T2 et T3, et au cours de la semaine 21 dans le tunnel T4. (Figure 24). Dans le tunnel T2, le pourcentage de plantes avec une infestation de classe B (quelques pucerons isolés ou une petite colonie) a atteint $43 \% \pm 4 \%$ à 150N vs $51 \% \pm 15 \%$ à 450N. Aucune des feuilles n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour atteindre une classe d'infestation supérieure à B. Dans le tunnel T3, les infestations de classe B au cours de la même semaine ont atteint $17 \% \pm 6 \%$ à 150N vs $29 \% \pm 11 \%$ à 450N. Moins de 1 % des feuilles ont atteint une infestation de classe C, et aucune n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour être classée en D ou E. Enfin, dans le tunnel T4, le niveau maximal d'infestation de classe B a été observé au cours de la semaine 21, avec $17 \% \pm 9 \%$ à 150N vs $7 \% \pm 1 \%$ à 450N. Aucune des feuilles n'a été infestée à un niveau suffisamment élevé pour atteindre une classe supérieure à B. Les différences observées entre les modalités 150N et 450N entre les tunnels T2, T3 et T4 ne se sont pas révélées significativement différentes à la suite de l'analyse statistique effectuée à l'aide d'un test du χ^2 (Tableau 11).

5. Discussion

5.1. Efficacité de la stratégie de lutte biologique par conservation

Le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons au cours de la culture reste faible dans tous les tunnels, avec respectivement $31 \% \pm 6 \%$, $15 \% \pm 2 \%$, et $4 \% \pm 2 \%$ des plantes classées en catégorie B (c'est-à-dire avec la présence de quelques pucerons isolés ou d'une petite colonie) au pic d'infestation pour les tunnels T2, T3 et T4, et quasiment aucune plante fortement infestée (plantes classées C, D ou E). D'après les retours d'un conseiller en santé des plantes, une faible pression a également été observée dans d'autres exploitations du secteur nord Loire. Les conditions climatiques particulières de l'année 2024 pourraient expliquer cette faible infestation, notamment des températures estivales inférieures aux normales saisonnières et une pluviométrie exceptionnelle, avec des précipitations de janvier à juillet dépassant de 60 % les moyennes saisonnières. Dans ces conditions de faible pression exercée par les pucerons sur les cultures de courgette, le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons est significativement différent d'un tunnel à l'autre ($P < 0,05$). Fait surprenant, les résultats obtenus sont à l'opposé des attentes : l'incidence d'infestation est plus élevée dans les tunnels aménagés que dans le tunnel témoin. De plus, cette incidence est plus forte dans le tunnel aménagé avec des plantes de service installées depuis 4 ans que dans le tunnel avec des plantes de service installées depuis 1 an. Néanmoins, les populations de pucerons présentes sur les plantes de ces tunnels stagnent et ne se mettent jamais à croître, même quand les températures deviennent pourtant favorables à leur accroissement. Les observations de terrain montrent que les quelques pucerons retrouvés sur les courgettes des tunnels aménagés proviennent en fait des plantes-banque adjacentes. Or, les pucerons retrouvés sur ces plantes ne sont pas des espèces s'attaquant à la courgette. Il est ainsi possible qu'ils aient migrés des plantes-banque vers les courgettes mais qu'ils n'aient ensuite pas pu se développer à cause d'un phénomène d'antibiose. Par conséquent, il est probable qu'ils n'aient été en réalité que des visiteurs temporaires, incapables de coloniser les courgettes de manière significative, ce qui expliquerait le faible niveau d'infestation. L'établissement de la structure des communautés de pucerons sur les courgettes aurait permis de vérifier cette hypothèse, cependant, le faible nombre de pucerons observé n'a pas permis de prélever suffisamment d'individus pour réaliser cette analyse. Malgré cela, les observations effectuées au cours des notations semblent appuyer cette hypothèse.

5.2. Impact de la fertilisation azotée sur la stratégie de lutte biologique par conservation

Bien que les deux modalités de fertilisation azotée (150N vs 450N) aient montré une différence significative dans le tunnel T3, aucune différence significative n'a été observée sur le niveau d'infestation par les pucerons entre ces deux modalités. Par ailleurs, aucune différence significative n'a été détectée entre les modalités de fertilisation (150N vs 450N) dans les tunnels T2 et T4, et l'analyse statistique du niveau d'infestation par les pucerons en fonction de ces modalités n'a également révélé aucune différence significative.

Ces résultats suggèrent que, dans notre expérience, le niveau d'azote n'a pas eu d'effet significatif sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons. Cependant, cette observation contraste avec la littérature existante, qui montre généralement que l'azote influence l'infestation par les pucerons dans de nombreux cas. Deux hypothèses peuvent expliquer cette divergence : d'une part, la différence entre les niveaux d'azote (150N et 450N) pourrait ne pas avoir été suffisamment marquée pour produire un effet observable. D'autre part, la faible sévérité de l'infestation et le faible nombre de pucerons observés, ainsi que l'absence de colonies de pucerons dans nos parcelles expérimentales, pourraient avoir limité notre capacité à détecter un éventuel impact de l'azote.

5.3. Des plantes de services aux performances contrastées

5.3.1. Plantes nectarifères et/ou pollinifères

Dans les deux tunnels aménagés, la période de pleine floraison a démarré 3 à 4 semaines avant l'arrivée des premiers auxiliaires et s'est étalée sur l'intégralité de la saison, à l'exception de deux semaines dans le tunnel T2, durant lesquelles quatre des cinq plantes nectarifères et/ou pollinifères étaient soit en début de floraison, soit à un stade de grenaison précoce. Puisqu'au moins une plante nectarifère et/ou pollinifère avait un niveau de floraison suffisant avant l'arrivée des prédateurs et ce, jusqu'à la fin de la période de culture, elles ont pleinement rempli leur rôle et ont donc été fonctionnelles. Le pissenlit du tunnel T2 a connu une période de sénescence suite à une forte infestation de pucerons spécifiques du pissenlit (*Uroleucon taraxaci*). Cet effet inattendu confirme l'intérêt du pissenlit, qui a permis d'obtenir une floraison abondante et précoce, mais lui confère également un rôle précieux de plante banque.

5.3.2. Plantes banques

Pour qu'une plante-banque soit considérée comme fonctionnelle, il est essentiel que les pucerons, servant de proies de substitution, s'établissent bien avant l'arrivée des pucerons nuisibles sur les cultures, idéalement au moins un mois à l'avance. De plus, le niveau d'infestation des plantes-banques par ces pucerons doit être suffisamment élevé, avec idéalement au moins 50 % des plantes fortement infestées au moment de la plantation (Picault, 2021a). Dans les deux tunnels aménagés, l'achillée millefeuille a pleinement rempli son rôle, ayant été infestée par les pucerons plus d'un mois avant l'implantation des cultures et atteignant un niveau d'infestation modéré à fort tout au long de la période de culture. Ces niveaux d'infestation, en phase avec l'arrivée des prédateurs de pucerons vers la semaine 14, ont permis un développement important de ces derniers sur l'achillée millefeuille, avec toutefois un développement légèrement tardif des prédateurs de pucerons au vu du niveau d'infestation des plantes d'achillée notamment dans le tunnel T3, ce qui pourrait s'expliquer par les températures moins élevées de ce dernier. En revanche, bien que l'ortie ait été fortement infestée dès les toutes premières semaines de l'année (S1 à S4), l'activité des populations de prédateurs de pucerons y est restée relativement faible (l'activité des prédateurs de pucerons sur les tiges d'ortie au moment du pic d'activité mesurée en 2024 est dix fois plus faible que celle qui avait été mesurée dans l'expérimentation menée en 2023). Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que le climat particulièrement doux de l'hiver 2024 a favorisé un développement très précoce et très intense des populations de pucerons. Cette infestation précoce a entraîné un dessèchement rapide des orties, avant même que les températures ne soient suffisamment élevées pour que les prédateurs de pucerons puissent être actifs. Par ailleurs, le rayonnement a été très faible pendant tout l'hiver 2024, ce qui n'a probablement pas permis aux températures des tunnels de croître rapidement en début d'année. Il est ainsi probable que la faible activité des populations de prédateurs de pucerons observée sur l'ortie en 2024 s'explique par un manque de synchronisme entre le développement des populations de pucerons sur les plantes banque et l'avènement de conditions météorologiques propices à l'activité de leurs prédateurs. Il est également intéressant de noter que l'activité des prédateurs de pucerons sur l'ortie est deux fois plus élevée dans le tunnel T2 que dans le tunnel T3. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le développement des pucerons a été plus précoce dans le tunnel T3 et que les orties se sont par conséquent desséchées plus tôt dans ce tunnel. Cette différence pourrait s'expliquer par l'âge des plantes de service (qui sont plus jeunes dans le tunnel T3 que dans le tunnel T2). Enfin, la tanaïsie n'a pas du tout joué son rôle de plante-banque, puisqu'elle n'a ni connu une infestation suffisamment précoce, ni atteint un niveau d'infestation suffisamment élevé dans les deux tunnels.

5.3.3. Des structures de communautés de pucerons sans danger pour les cultures

Plusieurs fois au cours de la saison, des échantillons de pucerons ont été prélevés sur les plantes de service. Les espèces observées sont les suivantes : *Microlophium carnosum* pour l'ortie, *Uroleucon taraxaci* pour le pissenlit, *Macrosiphoniella tapuskae*, *Myzus ascalonicus*, et *Colorado artemisiae* pour l'achillée millefeuille, ainsi que *Macrosiphoniella tanacetaria* pour la tanaïs. Ces espèces de pucerons sont spécifiques à leurs plantes hôtes respectives et ne présentent aucun danger pour la culture de courgettes.

5.4. Effet des tunnels sur la production

Le poids moyen des fruits récoltés lors de l'expérimentation (285g) dépasse celui généralement observé chez les producteurs (220g à 250g), avec des fruits acceptés jusqu'à 25 cm contre 21 cm maximum habituellement. En conséquence, les rendements en kg par plant sont légèrement supérieurs à ceux couramment observés dans les pratiques d'agriculture biologique (Seychal, Dayraud and Pons, 2018). Cette différence est attribuable à la taille plus grande des fruits autorisée par le client. Les résultats montrent que les différences observées entre les trois tunnels étudiés ne sont pas significatives pour ce qui concerne le poids moyen d'un fruit et le nombre moyen de fruits par plante, mais que la production totale de fruits est plus élevée dans le tunnel T3 que dans les tunnels T2 et T4. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le poids moyen d'un fruit et le nombre moyen de fruits par plante ont été calculés en ne prenant en compte que les fruits commercialisables (de 14 à 25 cm), alors que la production totale a été mesurée en prenant en compte à la fois les fruits commercialisables et les fruits non commercialisables (c'est-à-dire ceux dont la taille et/ou le poids dépassent les seuils commerciaux critiques). Or, il est possible que le nombre de fruits non commercialisables soit plus élevé dans le tunnel T3 que dans les deux autres tunnels. Le tunnel T3 a bénéficié de températures maximales plus basses que les tunnels T2 et T4 tout au long de la période de culture, avec des températures atteignant jusqu'à 40°C dans les tunnels T2 et T4, tandis que le tunnel T3 ne dépassait pas les 31°C. Cette condition a probablement contribué à limiter le stress thermique, ce qui aurait pu hâter la croissance des fruits dans le tunnel T3 alors que la fréquence de récolte était la même dans tous les tunnels, augmentant ainsi le risque de récolter des fruits trop gros et/ou trop lourds.

6. Conclusion et perspectives

Cette étude visait à évaluer d'une part l'efficacité d'une stratégie de lutte biologique par conservation sur le niveau d'infestation des courgettes par les pucerons, et d'autre part l'effet de la fertilisation azotée et de l'âge des bandes fleuries sur cette stratégie. Les résultats obtenus montrent que l'incidence d'infestation des courgettes par les pucerons est plus forte dans les tunnels aménagés que dans le tunnel témoin. Cependant, cela est dû à la présence de pucerons provenant des plantes-banque adjacentes, sans danger pour la courgette car leurs populations sont incapables de s'y développer. Le niveau d'infestation subséquent est donc in fine très faible dans les tunnels aménagés, et n'y est pas plus élevé que dans le tunnel témoin. La pression exercée par les pucerons étant très faible dans cette étude, y compris dans le tunnel témoin, il n'est pas possible de conclure quant à l'efficacité de la stratégie LBC testée. La discrimination insuffisante entre les modalités de fertilisation azotée et un niveau d'infestation globalement faible n'ont pas permis de répondre de manière satisfaisante à la question de l'impact de la fertilisation azotée sur la stratégie de lutte biologique par conservation. Concernant l'âge des bandes fleuries, il apparaît que les plantes de service plus jeunes (1 an) ont eu un effet positif sur le développement des proies de substitution par rapport aux bandes fleuries plus âgées (4 ans). De nouvelles questions émergent de cette étude, notamment la possibilité que des infestations trop précoces, combinées à des températures faibles, puissent limiter le développement des prédateurs. Pour explorer cette hypothèse, il serait pertinent de concevoir une expérimentation utilisant des cages de grande taille, représentant un microcosme, permettant de tester différentes modalités telles que la précocité d'infestation et l'arrivée plus ou moins précoce des prédateurs. L'intégration de techniques de fertilisation de précision, telles que la ferti-irrigation, pourrait améliorer la discrimination entre les modalités expérimentales. Bien que les plantes de service aient globalement montré une bonne fonctionnalité, la sauge s'est révélée peu intéressante en termes de floraison et d'hébergement des auxiliaires, tout en favorisant la prolifération des acariens tétranyques. En conclusion, bien que les résultats obtenus n'aient pas permis de valider pleinement l'efficacité de la stratégie de lutte biologique dans ces conditions expérimentales, ils offrent des pistes pour des améliorations futures et soulignent la nécessité de recherches supplémentaires pour affiner les pratiques de gestion des infestations de pucerons dans le cadre d'une stratégie de lutte biologique par conservation.

Bibliographie

Aqueel, M.A. *et al.* (2014) 'Effect of plant nutrition on aphid size, prey consumption, and life history characteristics of green lacewing', *Insect Science*, 21(1), pp. 74–82. Available at: <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12019>.

Argeste (2022) 'Infos Rapides Courgette n° 2022 - 074'.

Bass, C. *et al.* (2014) 'The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*', *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, pp. 41–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2014.05.003>.

Chen, Y., Olson, D.M. and Ruberson, J.R. (2010) 'Effects of nitrogen fertilization on tritrophic interactions', *Arthropod-Plant Interactions*, 4(2), pp. 81–94. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11829-010-9092-5>.

Couture, J.J., Servi, J.S. and Lindroth, R.L. (2010) 'Increased nitrogen availability influences predator–prey interactions by altering host-plant quality', *Chemoecology*, 20(4), pp. 277–284. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00049-010-0058-y>.

Erard, P. (2001) 'La courgette sous abri : des techniques de culture pour améliorer la productivité', *Infos-CTIFL* [Preprint], (169).

FranceAgriMer and Interfel (2023) 'LES IMPLICATIONS D'UNE HAUSSE DU TAUX D'AUTO-APPROVISIONNEMENT POUR LA FILIÈRE FRUITS ET LÉGUMES FRAIS'.

GAB and FRAB (2009) 'Les fiches Techniques du réseau GAB/FRAB. Fruits et Légumes Fiche n°13'.

Garratt, M.P.D., Wright, D.J. and Leather, S.R. (2010) 'The effects of organic and conventional fertilizers on cereal aphids and their natural enemies', *Agricultural and Forest Entomology*, 12(3), pp. 307–318. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2010.00480.x>.

Gash, A.F.J. (2012) 'Wheat Nitrogen Fertilisation Effects on the Performance of the Cereal Aphid *Metopolophium dirhodum*', *Agronomy*, 2(1), pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy2010001>.

Gilles, B. (2019) 'Les pucerons, des insectes passionnants et problématiques'. Available at: <https://passion-entomologie.fr/les-pucerons-insecte-passionnants-et-problematiques/> (Accessed: 21 July 2024).

Hosseini, M. *et al.* (2010) 'Performance and population growth rate of the cotton aphid, and associated yield losses in cucumber, under different nitrogen fertilization regimes', *International Journal of Pest Management*, 56(2), pp. 127–135. Available at: <https://doi.org/10.1080/09670870903248827>.

Nowak, H. and Komor, E. (2010) 'How aphids decide what is good for them: experiments to test aphid feeding behaviour on *Tanacetum vulgare* (L.) using different nitrogen regimes', *Oecologia*, 163(4), pp. 973–984. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1652-y>.

Picault, S. (2021a) *Protection des cultures d'aubergine contre les pucerons à l'aide de plantes-ressources et de plantes-banques infos_ctifl* 374. Available at: <https://www.ctifl.fr/protection-des-cultures-d-aubergine-contre-les-pucerons-a-l-aide-de-plantes-ressources-et-de-plantes-banques-infos-ctifl-374> (Accessed: 21 July 2024).

Picault, S. (2021b) *Une nouvelle approche pour évaluer les stratégies de lutte biologique par conservation infos_ctifl* 373. Available at: <https://www.ctifl.fr/une-nouvelle-approche-pour-evaluer-les-strategies-de-lutte-biologique-par-conservation-infos-ctifl-373> (Accessed: 1 July 2024).

Rathee, M., Dalal, P.K. and Mehra, S. (2018) 'Integrated pest management under protected cultivation: A review', *JOURNAL OF ENTOMOLOGY AND ZOOLOGY STUDIES*, 6.

Rathee, M., Singh, N.V. and Dalal, P.K. (2018) 'Integrated pest management under protected cultivation: A review', *Journal of Entomology and Zoology Studies* [Preprint].

Seychal, L., Dayraud, C. and Pons, R. (2018) 'COURGETTE PRECOCE SOUS ABRI FROID'.

Zamani, A.A. *et al.* (2006) 'Effect of temperature on biology and population growth parameters of *Aphis gossypii* Glover (Hom., Aphididae) on greenhouse cucumber', *Journal of Applied Entomology*, 130(8), pp. 453–460. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2006.01088.x>.

Résumé

Cette étude vise à évaluer l'efficacité de la lutte biologique par conservation (LBC) dans le contrôle de l'infestation de courgettes sous abri froid par les pucerons, tout en identifiant les facteurs de réussite ou d'échec, tels que l'âge des bandes fleuries et le niveau de fertilisation azotée. L'expérimentation a été menée au CTIFL sur son centre opérationnel de Carquefou dans trois tunnels froids : deux tunnels aménagés avec des plantes de service (plantes-banque et plantes nectarifères et/ou pollinifères) pour favoriser les ennemis naturels des pucerons, et un tunnel témoin sans aménagement. Dans chaque tunnel, deux niveaux de fertilisation ont été étudiés. Dans cette étude, l'incidence d'infestation des courgettes par les pucerons s'est révélée plus élevée dans les tunnels aménagés que dans le tunnel témoin, et plus forte dans le tunnel aménagé avec des plantes de service âgées de 4 ans que dans le tunnel aménagé avec des plantes de service âgées de 1 an. Néanmoins, les populations pucerons retrouvés sur les courgettes des tunnels aménagés ne sont pas développées. Ce résultat s'explique par le fait qu'il s'agit d'espèces de pucerons provenant des plantes-banque adjacentes, probablement incapables de se multiplier sur les courgettes à cause de phénomènes d'antibiose. Enfin, l'effet de la stratégie LBC d'une part, et du niveau de fertilisation azotée d'autre part, sur la sévérité de l'infestation n'a pas pu être évalué, la pression exercée sur la culture par les pucerons ayant été très faible en 2024.

Mots clés : Pucerons, prédateurs naturels, plantes banque, culture sous abri

Abstract

This study aims to evaluate the effectiveness of conservation biological control (CBC) in managing aphid infestation on zucchini in cold tunnels, while identifying factors contributing to success or failure, such as the age of flower strips and the level of nitrogen fertilization. The experiment was conducted at the CTIFL (Technical Center for Fruits and Vegetables) at its operational center in Carquefou, across three cold tunnels: two tunnels were equipped with service plants (banker plants and nectariferous and/or polliniferous plants) to promote natural enemies of aphids, and one control tunnel without any arrangement. In each tunnel, two levels of fertilization were studied. In this study, the incidence of zucchini infestation by aphids was found to be higher in the arranged tunnels compared to the control tunnel, and higher in the tunnel with 4-year-old service plants than in the tunnel with 1-year-old service plants. However, the aphid populations found on the zucchini in the arranged tunnels did not develop. This result can be explained by the fact that the aphids originated from the adjacent banker plants and were likely unable to multiply on the zucchini due to antibiosis effects. Finally, the impact of the CBC strategy on one hand, and the level of nitrogen fertilization on the other, on the severity of infestation could not be assessed, as the aphid pressure on the crop was very low in 2024.

Keywords: Aphids, natural predators, banker plants, greenhouse cultivation