



HAL
open science

Régulations biologiques en verger agroforestier - Suivi du potentiel de régulation et des dynamiques de bioagresseurs et d'auxiliaires

Hermine Sarthou, Pierre-Éric Lauri, Benoît Ricci

► To cite this version:

Hermine Sarthou, Pierre-Éric Lauri, Benoît Ricci. Régulations biologiques en verger agroforestier - Suivi du potentiel de régulation et des dynamiques de bioagresseurs et d'auxiliaires: Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome de l'INP ENSAT - Agro Toulouse. ENSAT; ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France. 2022. hal-04050760

HAL Id: hal-04050760

<https://hal.inrae.fr/hal-04050760>

Submitted on 29 Mar 2023

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

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



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

Mémoire de fin d'études

présenté par

Hermine SARTHOU

Spécialisation AGREST

« Agroécologie : du système de production au territoire »

REGULATIONS BIOLOGIQUES EN VERGER AGROFORESTIER

-

Suivi du potentiel de régulation et des dynamiques de bio- agresseurs et d'auxiliaires

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
de l'INP ENSAT - Agro Toulouse

Soutenu le 14 septembre 2022 devant le jury :

Maîtres de stage :

RICCI Benoît,
Chercheur INRAE dans
l'UMR ABSys

LAURI Pierre-Éric,
Chercheur INRAE dans
l'UMR ABSys

Correctrice :

OLLIVIER Mélodie,
Maîtresse de conférence
en entomologie agricole
INP-ENSAT,
Chercheuse INRAE dans
l'UMR Dynafor

Enseignant responsable :

SARTHOU Jean-Pierre,
Professeur en Agronomie
et Agroécologie INP-
ENSAT,
Chercheur CNRS dans
l'UMR 5245 CNRS –
UT3 – INPT

Avec la participation financière de :



Résumé

La réduction de l'usage de produits phytosanitaires est un enjeu majeur dans les vergers de pommiers. Un des leviers prometteurs aujourd'hui est basé sur la régulation biologique, qui est un des services écosystémiques fournis par les agroécosystèmes. Un approfondissement des connaissances du fonctionnement de cette régulation et des causes de sa variabilité est nécessaire. Ce service est à l'origine du concept de lutte biologique par conservation qui peut être favorisé par la mise en place d'infrastructures agroécologiques (IAE) mais aussi par la mise en œuvre de pratiques culturales innovantes, telle que l'agroforesterie. Le dispositif GAFAM est un verger de pommiers multistratifié conduit en agriculture biologique et à bas intrants intégré dans un cortège d'IAE. La strate haute est composée de noyers hybrides, la strate intermédiaire de pommiers et enfin, la strate basse d'une végétation herbacée dont des bandes enherbées et fleuries. Dans cette étude nous avons cherché à savoir si le contexte agroforestier ainsi que les IAE au sein et aux alentours du verger permettaient d'améliorer la régulation biologique de *Dysaphis plantaginea*, *Aphis pomi* et *Cydia pomonella*, trois bioagresseurs majeurs de vergers de pommier, ou s'ils avaient un impact sur leur dynamique d'infestation.

Le suivi du puceron cendré (*D. plantaginea*) a révélé que son infestation et son abondance était plus faible en contexte agroforestier, sans pouvoir conclure sur une meilleure régulation. Le suivi du puceron vert non migrant (*A. pomi*) a permis de voir que le contexte agroforestier n'avait pas le même effet sur lui que sur le puceron cendré, il semble favoriser ou ne pas impacter son infestation. Enfin, l'incidence du carpocapse (*C. pomonella*) était moins élevée en verger agroforestier qu'en verger seul. Aucun lien entre cette différence d'incidence et une meilleure régulation n'a pu être fait. Enfin, l'étude des communautés d'arthropodes des IAE a permis d'avoir une vision de la composition de la communauté d'arthropodes présents, notamment des différents ennemis naturels des ravageurs étudiés, sans pouvoir faire un lien direct avec la régulation de ces derniers.

Mots-clés : Agroforesterie - Pommier – Noyers hybrides – Lutte biologique par conservation – Puceron cendré – Puceron vert - Carpocapse

Abstract

The reduction of pesticide use is a major issue in apple orchards. One of the promising levers today is based on biological regulation, which is one of the ecosystem services provided by agroecosystems. A deeper understanding of the functioning of this regulation and the causes of its variability is needed. This service contributes to the concept of conservation biological control, which can be promoted by the implementation of agroecological infrastructures but also by the implementation of innovative cultural practices, such as agroforestry. The GAFAM system is a multi-stratified apple orchard managed under organic and low-input farming methods and integrated into a series of AEIs. The top layer is composed of hybrid walnut trees, the middle layer of apple trees and finally, the bottom layer of herbaceous vegetation including grass and flower strips. In this study we investigated whether the agroforestry context and the AEIs in and around the orchard improved the biological regulation of *Dysaphis plantaginea*, *Aphis pomi* and *Cydia pomonella*, three major pests of apple orchards, or whether they had an impact on their infestation dynamics.

Rosy apple aphid (*D. plantaginea*) had lower infestation and abundance were lower in an agroforestry context, without being able to conclude on a better regulation. Green apple aphid (*A. pomi*) monitoring showed that the agroforestry context did not have the same effect on it as on the ash aphid; the agroforestry context either favour its infestation or had a neutral effect. Finally, the incidence of codling moth (*C. pomonella*) was lower in the agroforestry orchard than in the orchard alone. No link could be made between this difference in incidence and a better regulation. Finally, the study of the arthropod communities of the AEIs provided a vision of the composition of the arthropod community present, in particular of the different natural enemies of the pests studied, without being able to make a direct link with the regulation of the latter.

Key-words : Agroforestry – Apple tree – Hybrid walnut tree – Conservation biological control – Rosy apple aphid – Green apple aphid – Codding moth

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Benoît RICCI, pour son aide, son encadrement, ses conseils et son soutien durant toute la période de ce stage. Je remercie également Pierre-Eric LAURI, mon deuxième encadrant qui a su m'éclairer pendant cette période, avec toute son expérience et sa bonne humeur. Merci à eux deux pour leur pédagogie, leurs précieux conseils et la confiance qu'ils m'ont accordée pour ce travail.

Je tiens également remercier Jean-Pierre SARTHOU, mon tuteur école, pour son encadrement pendant ce stage et à Mélodie OLLIVIER pour avoir accepté de tenir le rôle de correctrice pour ce rapport.

Je remercie le GIS Fruit et le département de l'Hérault pour leur soutien financier dans ce projet qui m'a permis d'effectuer ce stage enrichissant.

Je remercie également les participants du projet ALTO, avec qui les rencontres ont toujours été enrichissantes. Je remercie tout particulièrement Sylvaine SIMON qui m'a ouvert la porte de ce projet durant ma césure, sans qui je n'aurais jamais pris part à un tel projet.

Ensuite, je remercie l'UMR ABSys dans laquelle j'ai pu évoluer et rencontrer des personnes passionnantes, de stagiaires aux chercheurs, en passant par les techniciens.

Pour finir, je remercie chaleureusement et avec beaucoup d'émotions mes parents et mes sœurs, qui m'ont épaulée durant toutes mes années de cursus, et qui ont su dire les bons mots quand l'avenir semblait flou et incertain. Je tiens à remercier particulièrement mon père, qui a su tenir le rôle difficile d'enseignant tout au long de mes années ENSAT mais aussi d'encadrant pendant ce projet de fin d'études tout en m'apportant le soutien d'un père à sa fille.

Table des matières

Table des figures	i
Table des tableaux	iii
Liste des sigles et abréviations	iv
Index des annexes	v
Introduction	1
Contexte, état de l'art et question de recherche	3
1. Etat des lieux des enjeux de la pomiculture	3
1.1. L'agriculture post-seconde guerre mondiale, la naissance d'une dépendance	3
1.2. La pomme : la culture fruitière la plus traitée en climat tempéré	3
1.3. Les principaux ravageurs des vergers de pommiers du sud-est de la France	4
1.4. La faune auxiliaire	7
2. Recherche d'alternatives : le rôle de l'agrobiodiversité	8
2.1. Agroécologie et protection agroécologique des cultures	8
2.2. Agroécologie et agroforesterie en arboriculture fruitière	10
3. Question de recherche	12
Matériels et méthodes	13
1. Contexte de la parcelle d'étude	13
1.1. Contextes géographique et pédoclimatique du verger d'étude	13
1.2. Le dispositif expérimental : historique, matériel végétal, design et environnement	13
1.3. Conduite du verger	15
2. Protocoles, variables et analyses statistiques	15
2.1. Méthodes et protocoles de suivi	16
2.2. Variables étudiées et analyses statistiques associées à certaines	19
Résultats	22
1. Suivi des ravageurs (<i>D.plantaginea</i>, <i>A.pomi</i> et <i>C. pomonella</i>)	22
1.1. Suivi de l'incidence du puceron vert non migrant (<i>A.pomi</i>)	22
1.2. Suivi de l'incidence du carpocapse des pommes et des poires (<i>C.pomonella</i>)	22
1.3. Suivi de l'incidence du puceron cendré (<i>D. plantaginea</i>)	23
1.4. Suivi de la dynamique des foyers du puceron cendré (<i>D.plantaginea</i>)	24
2. Suivi du potentiel de prédation	25
2.1. Suivi de la prédation des œufs de carpocapse des pommiers et des poiriers	25
2.2. Suivi de la prédation du puceron vert du pois (<i>Acyrtosiphon pisum</i>)	26
3. Description du cortège d'auxiliaires	27
3.1. Le cortège d'auxiliaires dans les foyers suivis	27
3.2. Ennemis naturels observés lors des battages	28
3.3. Ennemis naturels observés dans les transects	30
3.4. Auxiliaires observés dans les assiettes colorées	32
3.5. Auxiliaires observés dans les pots barber	32
Discussion et perspectives	33
1. Influence directe ou indirecte des noyers sur les dynamiques des bio-agresseurs et leurs ennemis naturels.	33
1.1. Des dynamiques différentes des pucerons entre 2021 et 2022 : en lien avec des températures plus élevées en 2022 ?	33

1.2.	Une incidence et une abondance de <i>D. plantaginea</i> qui diffèrent entre les modalités d'étude	33
1.3.	L'incidence du puceron vert : une occupation des modalités complémentaire avec celle du puceron cendré ?	34
1.4.	L'influence du contexte agroforestier sur l'incidence de <i>C. pomonella</i>	35
1.5.	Une influence mitigée du contexte agroforestier sur les ennemis naturels des ravageurs étudiés	36
2.	Les bandes enherbées et fleuries, à la jonction entre les pommiers et les infrastructures agroécologiques périphériques	37
3.	Limites de l'expérimentation	38
3.1.	Limites internes au dispositif	38
3.2.	Influence potentielle des alentours du verger	38
3.3.	Limites communes aux différents suivis	39
	<i>Conclusion</i>	40
	<i>Retour d'expérience</i>	41
	<i>Bibliographie</i>	I
	<i>Annexes</i>	XIII

Table des figures

Figure 1 : Colonie de <i>D. plantaginea</i> (Ephytia-INRAE)	4
Figure 2 : Cycle de développement de <i>Dysaphis plantaginea</i> (© Delphine Bourdais, in Nicolas et al.,2013)	4
Figure 3 : Enroulement de feuilles de <i>M.domestica</i> en raison d'une infestation de <i>D.plantaginea</i> (Source : personnelle).	5
Figure 4 : Cycle de développement de <i>A. pomi</i> (Marc, 2004).	5
Figure 5 : Cycle de développement de <i>C. pomonella</i> dans le sud de la France (Boivin & Sauphanor, 2007).	6
Figure 6 : Schéma de l'organisation des services écosystémiques en interaction avec un agroécosystème (d'après Le Roux et al.,2008)	8
Figure 7 : Schématisation des techniques de mise en place de la LBC (d'après Deguine et Ratnadass,2017)	9
Figure 8 : Schématisation du rôle des différents aspects d'un verger dans la structuration de la biodiversité environnante. (*) fitness : capacité d'un individu d'un génotype à se reproduire	10
Figure 9 : Schématisation des bénéfices de l'agroforesterie	11
Figure 10 : Schématisation du verger d'étude et des dispositifs de suivi mis en place	14
Figure 11 : Synthèse des opérations réalisées sur les pommiers en 2021 et 2022. En vert sont indiquées les opérations de fertilisation, en violet l'apport d'amendement, en noir les opérations 'physiques', en rouge les opérations phytosanitaires, en bleu la pose de dispositifs de confusion sexuelle.	15
Figure 12 : Schéma récapitulatif des protocoles et variables étudiées ainsi que les fréquences d'exécution	16
Figure 13 : Dégâts à la surface de la pomme (© INRA)	17
Figure 14 : Schéma récapitulatif du choix de modèle à utiliser	20
Figure 15 : Schéma récapitulatif de l'analyse statistique	21
Figure 16 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de l'incidence de <i>A.pomi</i> au cours du temps en (A) 2021 et (B) 2022.	22
Figure 17 : Modélisation (données prédites) de l'incidence du carpocapse en 2021 aux stades 50% G1 et 100% G1. En rouge : moyennes prédites de l'incidence.	22
Figure 18 : Modélisation (données prédites) de l'incidence du carpocapse en 2022 aux stades 50% G1 et (ii) 100% G1. En rouge : moyennes prédites de l'incidence.	23
Figure 19 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de l'incidence du puceron cendré en (A) 2021 et en (B) 2022.	23
Figure 20 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de la dynamique des foyers de pucerons cendrés en (A) 2021 et en (B) 2022.	24
Figure 21 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) des œufs de carpocapse en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2021.	25
Figure 22 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) des œufs de carpocapse en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2022.	25
Figure 23 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) de pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2021.	26
Figure 24 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) de pucerons <i>Acyrtosiphon pisum</i> en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2022.	26
Figure 25 : Evolution du nombre moyen d'auxiliaires (\pm écart-type) par foyer en fonction de la modalité d'étude en 2022.	27
Figure 26 : Evolution du nombre moyen (\pm écart-type) par foyer de (A) Syrphidae, (B) Cecidomyidae et (C) Coccinellidae selon les modalités agroforestières en 2022.	27
Figure 27 : (A) Effectif des familles d'intérêts observées et (B) contribution de chaque modalité dans cet effectif (%).	30

Figure 28 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Araneae au cours des transects en 2022.	31
Figure 29 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Coleoptera observés dans les transects en 2022.	31
Figure 30 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Diptera observés dans les transects en 2022.	31
Figure 31 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Hemiptera observés dans les transects en 2022.	31
Figure 32 : (A) Effectif total des familles d'intérêts observées dans les battages et (B) contribution de chaque modalité dans cet effectif (%).	28
Figure 33 : Distribution dans le temps et par modalité d'étude des différentes familles d'intérêt regroupées par ordre échantillonnées dans les battages.	29
Figure 34 : Effectif des différentes familles d'intérêts échantillonnées dans les dispositifs d'assiettes colorées.	32
Figure 35 : Effectifs des différentes familles d'intérêt échantillonnées dans les pots Barber.	32
Figure 36 : Effectif moyen par pot Barber des différents familles d'intérêt en fonction de la localisation des pots.	32

Table des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des rôles des principaux ennemis naturels du puceron et du carpocapse (adapté de Ricard et al.,2012).....	7
Tableau 2 : Récapitulatif des infrastructures présentes dans et autour du verger expérimental.	14
Tableau 3 : Récapitulatif du protocole des cartes de prédation.	18
Tableau 4 : Récapitulatif des variables récupérées. En orange les variables potentiellement explicatives et en vert les variables à expliquer.....	19
Tableau 5 : Récapitulatif des modèles statistiques retenus pour chaque variable.	20

Liste des sigles et abréviations

°C.j : Degrés-jours

A. pomi : *Aphis pomi*

AB : Agriculture Biologique

AC : Agricultural Control

AFIR : AgroForestry on the Inter Row

AFR : AgroForestry on the Row

AIC : Critère d'Akaike

BE : Bande Enherbée

BF : Bande Fleurie

C. pomonella : *Cydia pomonella*

CETA : Centre d'Etudes Techniques Agricoles

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

D. plantaginea : *Dysaphis plantaginea*

G1 : Première génération de *C. pomonella*

GAFAM : Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean

GLM : Generalized Linear Model

GLMM : Generalized Linear Mixed Model

ha : hectare

IAE : Infrastructures agroécologiques

IFT : Indicateur de Fréquence de Traitement

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

LBC : Lutte Biologique par Conservation

P : p-value

PAEC : Protection Agroécologique des Cultures

PPP : Produits Phytopharmaceutiques

RMSE : Root Mean Square Error

Index des annexes

Annexe 1 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022	XIII
Annexe 2 : Modélisation et comparaison entre les dates de l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022.....	XIII
Annexe 3 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du carpocapse en (A) 2021 et en (B) 2022.....	XIV
Annexe 4 : Comparaison par paires entre les modalités pour chaque date (test post hoc de Tukey) sur le GLMM modélisant l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022.....	XIV
Annexe 5 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du puceron cendré en (A) 2021 et (B) 2022.....	XV
Annexe 6 : Comparaison par paires des modalités pour chaque date (test post hoc) des GLMM	XVI
<i>Annexe 7 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant la dynamique des foyers de D. plantaginea en (A) 2021 et (B) 2022</i>	<i>XVII</i>
Annexe 8 : Modélisation et comparaison entre les dates de l'incidence du puceron cendré (A) en 2021 et (B) en 2022.	XVII
Annexe 9 : Résultats du test de comparaison par paires (test post-hoc de Tukey) entre les modalités pour chacune des dates de comptage des rameaux repérés en 2021	XVIII
Annexe 10 : Modélisation et comparaison entre les dates de la dynamique du nombre de pucerons cendrés au sein de trois foyers par arbre en (A) 2021 et (B) 2022.	XIX
Annexe 11 : Résultats du test de comparaison par paires (test post-hoc de Tukey) entre les modalités pour chacune des dates de comptage des foyers de pucerons cendrés en 2022.....	XX
<i>Annexe 12 : Résultats des ANOVAs effectuées sur les GLMM modélisant le taux de prédation des œufs de carpocapse en (A) 2021 et en (B) 2022.</i>	<i>XXI</i>
Annexe 13 : Résultats des ANOVAs effectuées sur les GLMM modélisant le taux de prédation du puceron Acyrthosiphon pisum en (A) 2021 et en (B) 2022.....	XXI
Annexe 14 : Bar-plot des effectifs totaux des différents ennemis-naturels observés dans les foyers de D. plantaginea, toutes modalités et dates confondues.	XXII
Annexe 15 : Représentation (A) des effectifs des classes et (B) des contributions des modalités (%) dans ces classes observées au cours des battages en 2022.....	XXII
Annexe 16 : Représentation (A) des effectifs des ordres et (B) des contributions des modalités (%) dans ces ordres observés au cours des battages en 2022.Seuls les ordres observés plus de trois fois sont présentés	XXIII
Annexe 17 : Distribution dans le temps des différentes classes observées lors des transects en 2022, toutes modalités confondues.....	XXIII
<i>Annexe 18 : Distribution dans le temps et selon les modalités agroforestières des deux classes observées dans les transects en 2022.</i>	<i>XXIII</i>
Annexe 19 : Distribution dans les temps des différents ordres de la classe Insecta observés au cours des transects en 2022.	XXIV
<i>Annexe 20 : Représentation de (A) l'effectif total par famille observée dans les transects (n>1) et (B) contribution de chaque modalité dans ces observations (%). En rouge : nom de l'ordre auquel appartiennent les familles. Dipt. : Diptera ; Lepido. : Lepidoptera ; Odo. : Odonata ; Ort : Orthoptera</i>	<i>XXIV</i>
Annexe 21 : Représentation des effectifs des 4 classes observées dans les assiettes colorées en 2022	XXV
Annexe 22 : Effectif de chaque ordre observé dans les assiettes colorées en 2022.....	XXV
Annexe 24 : Effectif des différentes classes échantillonnées dans les pots Barber en 2022.	XXV
Annexe 23 : : Effectif de toutes les familles échantillonnées dans les assiettes colorées.....	XXV
<i>Annexe 25 : Effectif des différents ordres échantillonnés dans les battages en 2022.</i>	<i>XXV</i>

Introduction

Comme la majorité des productions agricoles de nos jours, la pomiculture n'a pas échappé à l'intensification des facteurs de production, *i.e.* à l'augmentation de la productivité des facteurs de production économiques (capital foncier, matériel et main d'œuvre, ramenés à leur unité comptable) et à l'augmentation de leur usage concernant les facteurs de production techniques (eau, éléments fertilisants et produits phytosanitaires, considérés en valeur absolue). Cette intensification s'est donc traduite par une optimisation avant tout économique des systèmes de production combinant plusieurs facteurs, avec comme conséquences la simplification des systèmes et l'usage massif d'intrants (Malézieux *et al.*, 2009).

Dans un contexte de production où les exigences imposées par l'aval de la filière est de plus en plus contraignantes (produits identiques et sans défauts, offre quasi illimitée, etc.), la filière arboricole, comme beaucoup d'autres, a opté pour une simplification des agrosystèmes, passant par un matériel végétal performant souvent issu d'une sélection génétique et variétale basée sur la qualité esthétique du produit final, sa conservation et sa résistance au transport (Lamine *et al.*, 2015) mais aussi sur une modification de la conduite technique et de l'architecture des arbres (taille, densité de plantation, etc.) dans une optique d'optimiser la production par unité de surface (Jackson *et al.*, 1980).

L'intensification des agrosystèmes parallèlement à la simplification des paysages agraires, soit l'intensification des agroécosystèmes, a largement favorisé le développement des bioagresseurs, non seulement en pomiculture mais plus largement en production végétale (Rusch *et al.*, 2010).

Ainsi, le modèle de protection chimique s'est imposé, avec l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (PPP) (Aubertot *et al.*, 2005) qui étaient alors économiquement abordables et permettaient ainsi de privilégier la productivité des facteurs de production économiques au détriment de risques phytosanitaires accrus. La pomiculture n'échappant pas à cela, en plus d'être le plus étendu, le verger de pommiers français est le plus traité (Codron *et al.*, 2003).

Cette intensification des agroécosystèmes et, son corollaire, l'utilisation massive des PPP, sont largement remises en question par les citoyens de même que par une partie de la communauté scientifique. En effet, elles ont de lourdes conséquences sur l'environnement (Gill et Garg, 2014), la santé (humaine (Inserm, 2021) ou animale) et sur la biodiversité (Krebs *et al.*, 1999 ; Easac, 2015). S'ajoutent à cela des résistances de plus en plus nombreuses des ravageurs des cultures aux molécules insecticides (Urech *et al.*, 1999), voire le très fort ralentissement de la croissance des rendements mondiaux qui est en partie imputable à cette baisse d'efficacité de la protection chimique des cultures (Oerke et Dehne, 2004).

Face à ces constats assez alarmants, la durabilité des systèmes de production agricole est vivement remise en question. Sortir de la forte dépendance aux intrants chimiques nécessite un rétablissement des interactions biotiques au sein de nos agroécosystèmes afin d'assurer la fourniture de services écosystémiques essentiels à la transition agroécologique, dont ceux de régulation des bioagresseurs des cultures (Bommarco *et al.*, 2013).

Diverses alternatives sont envisagées pour réduire cette dépendance aux PPP, dont la lutte biologique par conservation. Cette dernière, a pour but de favoriser la biodiversité fonctionnelle au sein des systèmes agricoles afin d'accroître les populations d'ennemis naturels des ravageurs présents (Landis *et al.*, 2000) et repose notamment sur une diversification des systèmes de production.

Contrairement à ce que prétendent beaucoup de détracteurs, il ne s'agit pas de revenir à des modes de production anciens, ne correspondant plus à notre société actuelle mais de repenser la protection intégrée à la lumière de nos connaissances scientifiques actuelles. De nombreux travaux portent sur l'optimisation de ces régulations biologiques via la mise en place d'infrastructures agroécologiques (IAE) et/ou une diversification des unités productives. L'arboriculture, de par la pérennité de ses

systèmes et la possibilité d'associer plusieurs strates de végétation, est un axe de recherche intéressant pour la mise en place de systèmes complexes abritant une faune d'auxiliaires stable et diversifiée.

C'est dans cette optique que le projet ALTO a vu le jour, afin de concevoir de nouveaux modes de production en arboriculture, bénéficiant d'un regard systémique sur les expérimentations mises en place, afin de mettre fin à la vision très sectorielle que les secteurs agricole et agronomique ont pu avoir ces dernières décennies. Dans ce cadre, l'Unité Mixte de Recherche (UMR) ABSys (INRAE – Montpellier) a mis en place un verger agroforestier afin d'étudier, entre autres, les mécanismes de régulation biologique en verger de pommiers associés à d'autres arbres. Mon stage s'inscrit donc dans ce projet à travers l'étude de la régulation biologique du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*, Passerini, 1860), du puceron vert (*Aphis pomi*, De Geer, 1773) et du carpocapse (*Cydia pomonella*, Linnaeus, 1758) dans un verger agroforestier mêlant des noyers hybrides (*Juglans nigra* x *Juglans regia* NG23) et des pommiers (*Malus domestica*), ainsi que diverses infrastructures agroécologiques.

Dans un premier temps, ce rapport présentera le contexte de l'étude dans une approche détaillée des différents enjeux auxquels nous sommes confrontés dans cette étude. Ces derniers concernent l'usage des produits phytosanitaires en pomiculture, les services écosystémiques et les infrastructures pour les améliorer, la lutte biologique par conservation et pour finir l'agroforesterie. Après avoir explicité la question de recherche, seront présentées les différentes méthodes utilisées pour tenter de répondre aux problématiques évoquées. La partie suivante sera axée sur la présentation de ces résultats, suivie d'une discussion qui apportera une interprétation des analyses statistiques inférentielles et descriptives permettant alors d'aborder des perspectives aux travaux effectués. Enfin, le rapport se terminera par la conclusion de cette étude et de ce stage.

Contexte, état de l'art et question de recherche

1. Etat des lieux des enjeux de la pomiculture

1.1. L'agriculture post-seconde guerre mondiale, la naissance d'une dépendance

La sortie de la seconde guerre mondiale signe un virage pour les paysages et systèmes agricoles français. La rationalisation de nos agroécosystèmes dans le but de subvenir au maximum aux besoins de la population amène à uniformisation totale des systèmes agricoles, des sols au territoire. Ces systèmes passent alors d'une agriculture paysanne et diversifiée à une agriculture intensive (Reteau, 2017).

Les systèmes agricoles sont organisés en bassins de production spécialisés, appuyés par une vaste gamme d'intrants (fertilisants, herbicides, insecticides, etc.) (Tilman *et al.*, 2002 ; Foley *et al.*, 2005 ; Malézieux *et al.*, 2009). Malgré une hausse incontestable des rendements, les impacts de cette agriculture sont multiples : baisse de la biodiversité (Krebs *et al.*, 1999) accompagnée par la pollution des sols (Wolejko *et al.*, 2020) et de l'eau (Moss, 2008) menant de fait à un risque sanitaire, pour l'humain et l'environnement (Baldi *et al.*, 1998 ; Lee *et al.*, 2004 ; Agopian *et al.*, 2009).

L'usage de ces biocides est également à l'origine de résistances des mêmes bio-agresseurs contre lesquels ils sont utilisés ; ni les insecticides (Bass *et al.*, 2015), ni les fongicides (Lucas, Hawkins et Fraaije, 2015), ni les herbicides (Powles & Yu, 2010) ne sont épargnés par ce phénomène. En parallèle, de 'nouveaux ravageurs' ont pu faire leur apparition, en raison de la disparition de leurs ennemis naturels due à l'utilisation d'insecticides, souvent à large spectre.

La simplification des agroécosystèmes combinée aux pratiques intensives a donc mené à une dépendance accrue aux PPP (Altieri, 1999). Ces perturbations néfastes amènent à une remise en question des pratiques de protection des cultures, et par la suite, aux objectifs de conception des systèmes de culture (Aubertot *et al.*, 2005).

1.2. La pomme : la culture fruitière la plus traitée en climat tempéré

En 2021, la production française de pommes de table s'élevait à 1,3 Mt sur une surface de production de 40 000 hectares (ha) (Agreste, 2022). La France est le troisième pays européen producteur de pommes derrière la Pologne et l'Italie (FranceAgriMer, 2021), les grandes régions productrices sont les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (24,6% de la production de 2020), Occitanie (20,3%), Nouvelle-Aquitaine (18,1%) et Pays de la Loire (17,4%) (Agreste, 2021).

L'arboriculture est une production particulière de par son aspect pérenne. La présence permanente des arbres, sur 15-20 ans en moyenne actuellement, ajoutée à l'intensification évoquée en introduction, rend le risque de développement de bio-agresseurs plus élevé et les dégâts se répercutent sur plusieurs années (Aubertot *et al.*, 2005). Face à cela, la réponse est souvent celle des pesticides : l'arboriculture fruitière constitue 1% de la surface agricole française mais représentait, en 1998, 4% et 21% des ventes respectives des fongicides et insecticides (Codron *et al.*, 2003).

Le pommier est soumis à de nombreuses attaques, de la floraison jusqu'au stade de la récolte (Sauphanor *et al.*, 2009 ; Pissonnier *et al.*, 2016). La recherche d'un produit sans défaut, conforme aux normes de commercialisation, implique une gestion de ces bio-agresseurs, via des PPP. En 2018, l'indicateur de fréquence de traitements (IFT) de la pomme conduite en conventionnel était de 31,5 et 18,5 pour les pommes conduites en agriculture biologique (AB) (Agreste, 2021), faisant de cette production l'une des plus traitées, loin devant la vigne (IFT_{moyen}=18,0). Ces fortes valeurs d'IFT sont principalement liées aux fongicides (IFT_{fongicide}=19,5) utilisés contre la tavelure (maladie cryptogamique transmise par *Venturia inaequalis*). Cependant, dans le sud-est de la France, le risque tavelure est assez faible, en raison des conditions climatiques peu propices au développement et à la diffusion du champignon et les principaux traitements sont les insecticides (IFT_{insecticide}=8,1) qui ciblent particulièrement le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*) et le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*) (Thomas *et al.*, 2016).

1.3. Les principaux ravageurs des vergers de pommiers du sud-est de la France

a. Les pucerons

Les pucerons (Insecta : Hemiptera : Aphididae) sont des ravageurs phytophages de type piqueurs-suceurs, leur rostre leur permettant de pénétrer les cellules végétales et de se nourrir de sève. Les dégâts directs de ces ravageurs sont la dépigmentation des feuilles, une possible déformation des feuilles et des pousses et/ou une chute prématurée du matériel végétal infesté, ce qui affecte la production de manière variable selon les espèces. En outre, ils peuvent être vecteurs de pathogènes (Kennedy *et al.*, 1962 ; Massonnié *et al.*, 1976), mais aussi, de par leur sécrétion de miellat, être à l'origine du développement de maladies fongiques, comme la fumagine (Angeli et Simoni, 2006).

Le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*)

D. plantaginea, ou puceron cendré (figure 1), est un des ravageurs les plus nuisibles en verger de pommier (Lathrop, 1928 ; Blommers *et al.*, 2004), notamment en AB (Cross *et al.*, 2007).



Figure 1 : Colonie de *D. plantaginea* (Ephytia-INRAE)

Le cycle biologique (figure 2) de ce puceron est caractérisé par :

- Un cycle biologique complet, dit holocyclique : la reproduction des individus peut se faire via (i) une reproduction sexuée et (ii) une reproduction parthénogénétique correspondant à une forme de reproduction asexuée durant laquelle des femelles non fécondées (parthénogénétiques) produisent une descendance génétiquement uniforme.
- Un cycle biologique dioécique : le cycle complet se fait sur deux plantes hôtes de famille botanique distincte. Dans le cas de *D. plantaginea*, l'hôte principal est le pommier *M. domestica* et l'hôte secondaire le plantain *Plantago* spp. (Lamiales : Plantaginaceae). Le plantain lancéolé *Plantago lanceolata* semble être l'espèce privilégiée par ce puceron (Blommers, 1999).

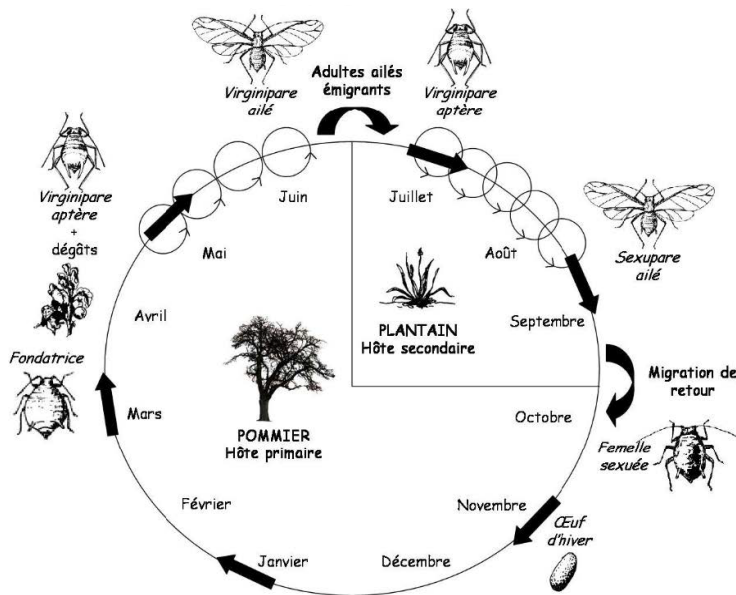


Figure 2 : Cycle de développement de *Dysaphis plantaginea* (© Delphine Bourdais, in Nicolas *et al.*, 2013)

Après passage de l'automne et de l'hiver sur pommier sous forme d'œufs (Bonnemaison, 1959), les premiers individus éclosent au début du printemps, coïncidant avec le gonflement des bourgeons, ce sont les fondatrices aptères (Hull et Starner, 1983). Ces dernières sont des femelles virginipares donnant naissance à des fondatrices aptères qui vont se reproduire par parthénogénèse. Ces dernières sont à l'origine de 3 à 6 générations de fondatrices vivipares, les premières générations vont être aptères, mais dès la troisième génération, la naissance de fondatrices ailées annonce le début du vol de migration sur le plantain. La reproduction parthénogénétique se poursuit sur l'hôte secondaire, produisant des individus aptères. Le changement de la photopériode, au début de l'automne, entraîne la naissance d'une génération de femelles sexupares, à l'origine des individus sexués (Bonnemaison, 1959). Cette dernière génération sexuée et ailée est celle qui va effectuer le vol retour sur l'hôte primaire, lieu de la seule reproduction sexuée du cycle. Les œufs issus de cette reproduction sont la forme sous laquelle *D. plantaginea* hiverne (Bonnemaison, 1959), ils

sont souvent déposés à la base des bourgeons, mais peuvent aussi se trouver à la base des rameaux ou sur le tronc.

L'infestation du puceron cendré provoque de graves déformations des organes végétaux. Les premiers signes d'infestation sont visibles dès le début du printemps, avec une légère décoloration puis déformation des feuilles externes de la rosette et des pousses végétatives. Avec l'agrandissement des colonies, les dégâts sont de plus en plus visibles. Les feuilles se déforment et s'enroulent sur elles-mêmes (figure 3), offrant par la même occasion une certaine protection aux pucerons. Cela a pour conséquence la diminution de la croissance des arbres infestés mais aussi de la production de l'année, ainsi que celle des suivantes (Blommers *et al.*, 2004 ; Wilkaniec et Trzcinski 1997). Sans contrôle efficace, la part de fruits non commercialisables peut se situer entre 20 et 40% (Blommers *et al.*, 2004).



Figure 3 : Enroulement de feuilles de *M.domestica* en raison d'une infestation de *D.plantaginea* (Source : personnelle).

Le puceron vert non migrant (*Aphis pomi*)

A.pomi, ou puceron vert non migrant, est aussi une espèce holocyclique (figure 4), mais monoécique, les plantes hôtes ne font donc partie que d'une seule famille botanique, les Rosacées.

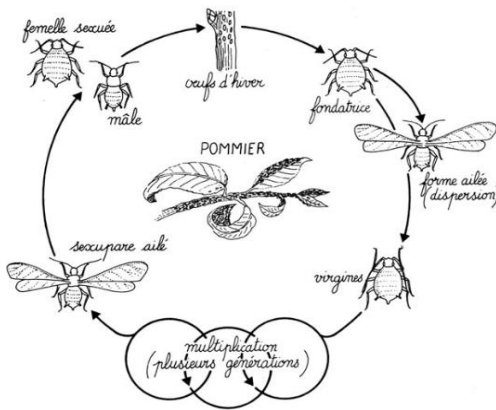


Figure 4 : Cycle de développement de *A. pomi* (Marc, 2004).

Après l'hivernation (automne et hiver) passée sous la forme d'œufs, les fondatrices aptères émergent au printemps, lors du débourrement. Par parthénogénèse, elles engendrent des virginipares aptères qui vont se reproduire, jusqu'à l'apparition d'une génération de femelles sexupares à l'automne (Carroll et Hoyt, 1984). Ces individus sexués et ailés vont alors se reproduire (reproduction sexuée) afin de pondre des œufs sur l'hôte. En parallèle, à la fin du printemps et lorsque les densités des colonies augmentent, des individus virginipares ailés apparaissent (Baker et Turner, 1916), dont leur rôle principal est la dispersion.

A.pomi est particulièrement présent sur les pousses en croissance. Ainsi, après l'arrêt de la croissance des pousses au début de l'été, les colonies de ce puceron vont rapidement régresser et se regrouper sur les quelques pousses qui continuent de croître. Ils peuvent parfois provoquer une déformation des feuilles et des pousses, pouvant entraîner une diminution voire l'arrêt de la croissance des rameaux. Ces pucerons sont souvent groupés sur les pousses en gaines compactes pouvant atteindre plusieurs centaines d'individus. Ils envahissent la face inférieure des feuilles terminales qui s'enroulent et se recroquevillent légèrement.

Les dégâts les plus importants de ces pucerons sont souvent sur les jeunes arbres vigoureux, en pépinière ou en jeune verger pas encore productif (Oatman et Legner, 1969).

Les pucerons et la myrmécophilie

D.plantaginea et *A.pomi* sont deux pucerons établissant une relation mutualiste avec les fourmis en vergers de pommier (Miñarro *et al.*, 2010). Les fourmis se nourrissent du miellat excrété par les pucerons (Naguy *et al.*, 2013), et les pucerons profitent du fait que les fourmis leur fournissent des espaces favorables à leur développement. En effet, ces dernières vont réduire la présence d'autres pucerons non myrmécophiles (Styrsky et Eubanks, 2007), réduisant ainsi la compétition, mais vont aussi protéger les pucerons myrmécophiles de leurs ennemis naturels (Yao *et al.*, 2000 ; Kaneko, 2003). Cette protection a donc un effet sur l'abondance des pucerons myrmécophiles, augmentant ainsi leurs dégâts sur les pommiers (Miñarro *et al.*, 2010). La présence des fourmis est donc un élément à suivre lorsqu'il est question de lutte biologique contre les pucerons *D.plantaginea* et *A.pomi*.

b. Le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*)

Les dégâts de *Cydia pomonella* (Insecta : Lepidoptera : Tortricidae) sont causés par la larve (ou chenille). En Europe, *C. pomonella* s'attaque principalement aux vergers de pommiers et est le principal ravageur, en termes de dégâts, dans le sud de la France (Sauphanor *et al.*, 2006). Les hôtes de ce papillon font partie de la famille des Rosacées (pommier *M. domestica*, poirier *Pyrus communis*, prunier *Prunus domestica*, etc.) ou des Juglandacées, comme le noyer commun *Juglans regia* (INRAE Ephytia).

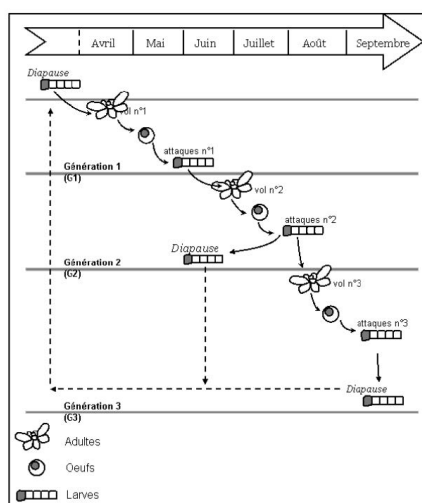


Figure 5 : Cycle de développement de *C. pomonella* dans le sud de la France (Boivin & Sauphanor, 2007).

Les adultes de première génération émergent de fin avril à fin mai (selon les régions) et ont une longévité moyenne de 15 à 18 jours. Ils s'accouplent à une température supérieure à 15°C puis pondent sur les feuilles, les rameaux ou les jeunes fruits. Une femelle peut pondre entre 30 et 50 œufs. La durée d'évolution de l'œuf est de 18 jours à 15°C et 6 jours à 25°C ; ils éclosent fin mai (Trillot *et al.*, 2002 ; Ricard *et al.*, 2012 ; Walgenbach *et al.*, 2014). Le développement larvaire est composé de 5 stades et s'étend de 20 à 30 jours, la larve passera de 1,8mm de long à 16 à 20mm avant diapause. Après éclosion, la chenille est au stade dit 'baladeur', qui correspond à la période d'exploration : après quelques morsures sur les fruits (« piqures sèches »), la chenille va pénétrer jusqu'à la cavité carpellaire et se nourrir de la chair et des pépins. Une fois son développement terminé, la chenille quitte le fruit et peut avoir deux comportements : (i) se nymphoser et donner un papillon (nouvelle génération) ou (ii) entrer en diapause lorsque les jours raccourcissent en fin d'été.

Elles hivernent alors au cinquième stade dans un cocon tissé dans les anfractuosités de l'écorce ou dans divers abris au sol. La chrysalide se forme en avril et se développe en 20 à 28 jours (Walgenbach *et al.*, 2014).

En climat méditerranéen, il peut avoir jusqu'à trois générations par an (figure 5) (Trillot *et al.*, 2002).

Les fruits présentant des piqures sèches, bien qu'ils ne présentent pas le ravageur en leur sein, sont souvent non commercialisables, ou avec un prix d'achat réduit. Les fruits infestés finissent par tomber, et sont donc inconsommables.

Les larves et adultes localisent leurs hôtes et leurs fruits via des composés volatiles (Yan *et al.*, 1999), permettant ainsi l'utilisation de la confusion sexuelle, via des phéromones, afin d'entraver la reproduction sexuée.

Il est à noter que la présence de *C. pomonella* peut être confondue avec celle d'une autre tordeuse, la tordeuse orientale *Grapholita molesta*. La différenciation entre les deux chenilles se fait sur la présence (tordeuse orientale) ou non (carpocapse) d'un peigne anal.

c. Le développement du phénomène de résistance aux insecticides

C. pomonella est un bon exemple d'apparition de résistance aux PPP : le premier cas de résistance rapporté date de 1928 aux Etats-Unis mais le phénomène touche désormais toutes les régions productrices de pommes (Reyes *et al.*, 2007) avec la présence de populations résistantes à une multitude de substances actives de familles chimiques différentes (Aubertot *et al.*, 2005) ainsi qu'à des biopesticides tel que le virus de la granuloze (CpGV) (Sauphanor *et al.*, 2006). Les populations de *D. plantaginea* (Delorme *et al.*, 1997) et *A. pomi* (Tamas *et al.*, 2015) présentent également des résistances à divers composés, comme certains organophosphorés ou carbamates.

Ainsi, avec le développement de ces phénomènes de résistance, de nouvelles méthodes de gestion doivent être mises en place et développées.

1.4. La faune auxiliaire

a. Les ennemis naturels des pucerons et carpocapse

Dans l'environnement, les populations de ravageurs sont régulées par ce que l'on appelle des ennemis naturels, ou auxiliaires des cultures. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux arthropodes (les principaux arthropodes ennemis naturels des trois ravageurs étudiés sont présentés dans le tableau 1), mais il existe aussi des champignons entomopathogènes (Milner, 1997 ; Down *et al.*, 2009) et des virus (Falcon *et al.*, 1968 ; Berling *et al.*, 2009).

Ces ennemis peuvent être de plusieurs types : (i) les prédateurs, se nourrissant des ravageurs et potentiellement d'autres arthropodes et (ii) les parasitoïdes, dont le développement, souvent larvaire, se fait au détriment du ravageur hôte après que l'imago ait pondu dedans ou dessus. Pour certaines familles d'auxiliaires, tous les stades de développement ne sont pas actifs. Pour les syrphes, le stade actif est le stade larvaire : la larve se nourrit de pucerons mais l'adulte est floricole. Concernant les coccinelles, la larve et l'imago se nourrissent toutes deux de pucerons (entre autres). Enfin, certains ennemis naturels sont dits 'spécifiques', *i.e.* ils ne consomment (ou parasitent) qu'un seul type de ravageurs, et d'autres sont dits 'généralistes', dont la gamme de proies est variée. La diversité des ennemis naturels (type et stade de régulation, spécificité, etc.) permet une exploitation diversifiée du milieu et donc limite la compétition intra et interspécifique.

Tableau 1 : Récapitulatif des rôles des principaux ennemis naturels du puceron et du carpocapse (adapté de Ricard *et al.*, 2012).

En vert : régulation avérée ; en orange : pas d'effet de régulation ; en jaune : régulation potentielle (en fonction de l'espèce).

O : Œuf ; L : Larve ; C : Chrysalide ; I : Imago

ORDRE	FAMILLE(S)	TYPE D'AUXILIAIRE	STADE ACTIF	RAVAGEUR(S) ET STADE DE DEVELOPPEMENT CIBLES	
				Pucerons	Carpocapse
Dermoptera	<i>Forficulidae</i>	Prédateur	L + I		L+O
	<i>Cecidomyiidae</i>		L		
Diptera	<i>Syrphidae</i>	Prédateur	L		
	<i>Tachinidae</i>	Parasitoïde	L		L
Hymenoptera	<i>Aphelinidae</i>	Parasitoïde	L		O
	<i>Braconidae</i>				L
	<i>Bethylidae</i>				L
	<i>Trichogrammatidae</i>				O
	<i>Ichneumonidae</i>				L
	<i>Pteromalidae</i>				C
	<i>Eupelmidae</i>				O+L
	<i>Eulophidae</i>				L
Heteroptera	<i>Anthocoridae</i>	Prédateur	L + I		O
	<i>Miridae</i>		L + I		O
	<i>Nabidae</i>		L + I		
Nevroptera	<i>Chrysopidae</i>	Prédateur	L		O+L
	<i>Hemerobiidae</i>		L + I		O+L
	<i>Coniopterygidae</i>		L + I		
Coleoptera	<i>Coccinellidae</i>	Prédateur	L + I		L
	<i>Carabidae</i>		L + I		L
	<i>Staphylinidae</i>		L + I		L
	<i>Cantharidae</i>		L+I		L
Mesostigmata	<i>Phytoseiidae</i>	Prédateur	L + I		
Trombidiformes	<i>Anystidae</i>	Prédateur	L + I		O
Aranae	<i>Theridiidae / Philodromidae / Clubionidae / Salticidae / Linyphiidae</i>	Prédateur	Juvenile + Adulte		L

b. Impact de l'agriculture moderne sur cette faune

Le modèle agricole dominant impacte la diversité des invertébrés (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019 ; Wagner, 2020). En verger, l'utilisation des PPP diminue la diversité des espèces et les effectifs de population d'auxiliaires (notamment les araignées de frondaison (Markó *et al.*, 2009) et les carabes (Ricard *et al.*, 2012)) ce qui réduit leur activité et donc la régulation naturelle des ravageurs (Rusch *et al.*, 2016). L'accroissement des populations de ravageurs qui en résulte renforce les méthodes de lutte

curatives basées sur l'utilisation de PPP, engendrant ainsi une dépendance croissante aux intrants pour la production de denrées alimentaires (Pretty, 2008 ; Tilman *et al.*, 2002).

Dans le cas des fruits, les consommateurs ont des attentes fortes quant à leur production (Simon *et al.*, 2009). Tout en ayant des fruits répondant à des critères de qualité stricts, ils demandent à ce que la production soit plus respectueuse de l'environnement et de la biodiversité.

Ainsi, depuis plusieurs années, le rôle de la biodiversité au sein même des agrosystèmes devient un intérêt majeur, notamment pour la régulation des ravageurs (Zhang *et al.*, 2007), permettant alors de réduire la dépendance des producteurs aux PPP et de fait, aux industries pharmaceutiques.

2. Recherche d'alternatives : le rôle de l'agrobiodiversité

2.1. Agroécologie et protection agroécologique des cultures

Dans cette recherche d'alternatives à l'intensification de l'agriculture basée sur l'usage massif d'intrants de synthèse et d'énergie fossile, le défi est donc de combiner les systèmes de production agricole avec le respect de l'environnement et de la biodiversité. Ainsi, l'agroécologie fait partie intégrante des solutions alternatives recherchées, en valorisant les potentialités écologiques d'un territoire, en vue de l'établissement d'agroécosystèmes durables (Altieri, 1987).

a. Les services écosystémiques

Le concept d'agroécologie est notamment basé sur les multiples services que peuvent rendre un écosystème (ou « services écosystémiques ») à la production agricole. Ces services sont définis par le Millenium Ecosystem Assessment (2005) comme étant les « biens et services que les hommes peuvent tirer des écosystèmes, directement ou indirectement, pour assurer leur bien-être ». Ainsi, ils sont étroitement liés à l'agriculture, car en façonnant le paysage, l'agriculture façonne également la biodiversité qui est présente (Le Roux *et al.* 2008), et qui est à l'origine, pour une grande partie, des services écosystémiques. Ces derniers sont divisés en trois catégories : les services de production, les

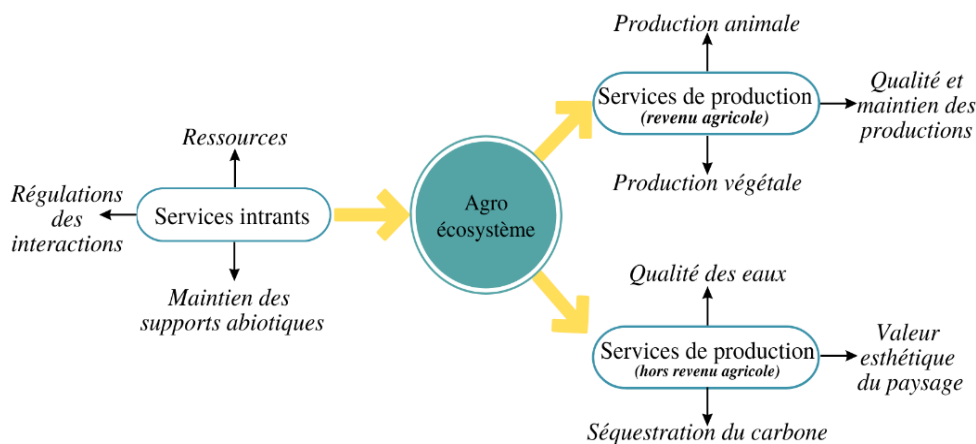


Figure 6 : Schéma de l'organisation des services écosystémiques en interaction avec un agroécosystème (d'après Le Roux *et al.*, 2008)

services de support et de régulation et enfin les services culturels (Haines-Young et Potschin, 2018). Cependant, la classification de ces services a été revue et modifiée afin de mettre spécifiquement en lumière les services fournis par la biodiversité des agroécosystèmes (figure 6) (Le Roux *et al.*, 2008). Ils sont donc regroupés au sein des catégories suivantes : les services intrants (en amont de l'agroécosystème) ; les services produits contribuant au revenu agricole et les services produits ne contribuant pas au revenu agricole (en aval de l'agroécosystèmes).

Dans un verger de pommes conventionnel, la seule catégorie de services subsistant est celle de la production, participant au revenu agricole. Cela s'explique en grande partie par la destruction des interactions complexes qui soutiennent le bon fonctionnement d'un agroécosystème. L'enjeu de la reconception des systèmes, arboricoles ou autres, est de passer de systèmes monofonctionnels à des systèmes complexes multifonctionnels (Lauri *et al.*, 2020).

b. La protection agroécologique des cultures et la lutte biologique par conservation

La gestion des bioagresseurs dans une approche agroécologique repose sur la favorisation des processus

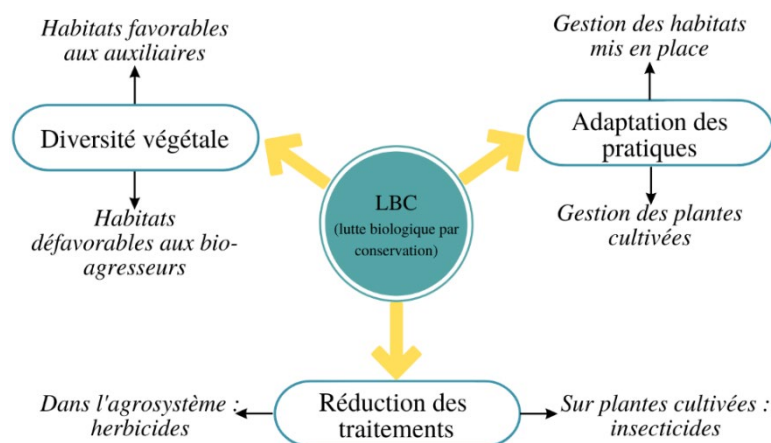


Figure 7 : Schématisation des techniques de mise en place de la LBC (d'après Deguine et Ratnadass, 2017)

écologiques : la protection agroécologique des cultures (PAEC) repose notamment sur une adaptation des pratiques culturales dans le but de façonner des habitats pour favoriser la présence d'ennemis naturels aux bio-agresseurs. Cette réflexion sur la protection des cultures prend en compte une échelle spatio-temporelle et des mécanismes plus complexes que la lutte chimique curative.

L'un des piliers de la PAEC est la lutte biologique par conservation

(LBC) (figure 7). Contrairement à la lutte biologique par introduction ou augmentation, l'objectif est de favoriser la présence dans le temps d'ennemis naturels indigènes en modifiant l'environnement (mise en place d'infrastructures agroécologiques ou IAE) et les pratiques culturales (Eilenberg *et al.* 2001, Deguine *et al.*, 2016).

c. IAE et implication sur la faune auxiliaire

Le terme d'IAE se réfère à tout habitat semi-naturel d'un agroécosystème voyant se développer, en son sein et autour, une végétation spontanée ou semée, mais sciemment non récoltée, devenant ainsi un lieu de vie permettant la reproduction, l'alimentation, le refuge et l'estivation ou hibernation d'une grande diversité d'êtres vivants (Sarhou, 2016). Les principales IAE sont les haies, les bandes enherbées (BE) ou fleuries (BF), les prairies permanentes, les bosquets (Albert *et al.*, 2017) ; on peut également citer les arbres isolés, la flore spontanée, les friches, les jachères, les fossés, les plans d'eau, et dans une certaine mesure, les nichoirs (Ricard *et al.*, 2012).

Ces IAE peuvent offrir des sites d'hivernation (Landis *et al.*, 2000 ; Sarhou *et al.*, 2014), des sites de protection (Collins *et al.*, 2002), des ressources alimentaires (nectar, pollen et proies alternatives) permettant le développement et la survie de plusieurs auxiliaires en l'absence de ces ressources dans la parcelle (Landis *et al.*, 2000 ; Rusch *et al.*, 2010 ; Villenave *et al.*, 2005). Les IAE peuvent être composées de plantes constituant l'habitat des auxiliaires (Heimpel et Jervis, 2005 ; Stang *et al.*, 2006 ; Pffiffer *et al.*, 2013) mais aussi de plantes relais de proies alternatives. Ces dernières vont permettre la présence d'auxiliaires en dehors de la période de présence du ravageur inféodé à une culture, tout en améliorant la croissance et la fécondité des auxiliaires (Albert *et al.*, 2017).

Outre la nécessaire réflexion de la composition des IAE, il est primordial d'intégrer une dimension spatio-temporelle dans leur maintien ou leur mise en place. En effet, la succession dans le temps de la disponibilité de la ressource alimentaire, permet de maintenir la population cible. Par exemple, lors de la mise en place d'une BF, implanter des espèces à floraison précoce peut conditionner la présence d'auxiliaires dès le début de l'infestation du ravageur (Welch et Harwood, 2014). Cette dimension est d'autant plus importante dans la régulation du puceron car ce dernier, se reproduisant précocement par parthénogénèse, son abondance peut être exponentielle et l'arrivée précoce de ses ennemis naturels est primordiale (Albert *et al.*, 2016). La dimension spatiale est également à prendre en compte car la proximité des IAE avec la culture peut influencer l'abondance de certains auxiliaires, comme les araignées (Miliczky et Horton, 2005), les syrphes (Bowie, 1999) et les hyménoptères parasitoïdes (Lavandero *et al.*, 2005).

A plus grande échelle, les IAE sont des structures constitutives du paysage dont la composition et la structure impactent très largement les communautés présentes et les interactions qui les lient (Bianchi *et al.*, 2006). Cependant, reposant sur des processus biologiques complexes, la mise en place de tels aménagements peuvent se révéler aussi bien bénéfiques que préjudiciables (Bischoff *et al.*, 2016 ; Landis *et al.*, 2000 ; Simon *et al.*, 2010). La combinaison des aménagements à plusieurs échelles (parcellaire et paysagère) peut être une stratégie prometteuse dans la régulation des ravageurs par leurs ennemis naturels, à condition d'aboutir aux combinaisons temporelles et spatiales les plus adaptées pour favoriser les auxiliaires et leur activité.

2.2. Agroécologie et agroforesterie en arboriculture fruitière

a. La biodiversité en arboriculture fruitière

Les vergers constituent un agroécosystème complexe sur plusieurs aspects. Le lien avec la biodiversité, externe et interne au verger, est structuré par leurs caractéristiques intrinsèques de systèmes pérennes et multistratifiés, par les pratiques culturales qui y sont effectuées, notamment l'utilisation de pesticides, mais aussi par la structuration des alentours du verger, à diverses échelles (figure 8).

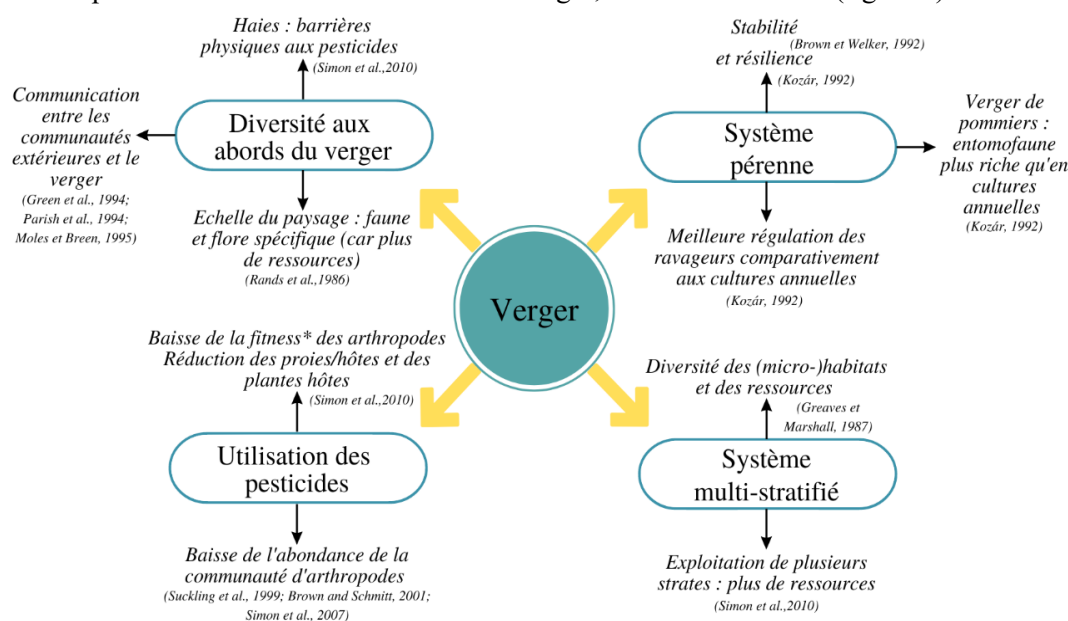


Figure 8 : Schématisation du rôle des différents aspects d'un verger dans la structuration de la biodiversité environnante. (*) fitness : capacité d'un individu d'un génotype à se reproduire

La pérennité de ces systèmes fait que les réseaux trophiques sont stables et résilients (Brown et Weber, 1992 ; Kozár, 1992) mais, à l'inverse, permet aussi le maintien dans le temps des inocula et populations de bio-agresseurs (Simon *et al.*, 2010). Comparativement aux cultures annuelles, la régulation des bio-agresseurs est meilleure (Kozár, 1992), car les systèmes étant moins perturbés, ils peuvent abriter un plus grand nombre d'auxiliaires, en condition de faibles pression phytosanitaire.

La structure multi-stratifiée, composée d'une strate arborée et d'une strate enherbée, en inter-rang offre une gamme de ressources et d'habitats pour les auxiliaires mais aussi pour les ravageurs (Simon *et al.*, 2010). Wyss (1995) a observé une bonne efficacité de la présence de BF en verger de pommier dans la régulation de *D.plantaginea*. Bien que le complexe multistratifié que constitue un verger favorise la communauté d'arthropodes (sites d'hivernation, de reproduction, ressources alimentaires, etc.), cette dernière n'est pas toujours plus fonctionnelle concernant la régulation des bio-agresseurs que fonctionnel (Vogt *et al.*, 1998 ; Miliczky *et al.*, 2000).

La complexité d'un verger et son lien avec la biodiversité ne s'arrête pas à ses limites, les abords du verger ainsi que le paysage dans lequel il est inscrit sont tout aussi important (*c.f.* §II.1.c.). Il est démontré que les arthropodes extérieurs au verger peuvent y entrer, car il peut être source de nourritures (pollen, nectar, proies, etc.) (Green *et al.*, 1994 ; Parish *et al.*, 1994 ; Moles et Breen, 1995). Ainsi, ces

arthropodes entrants peuvent se révéler être des ennemis naturels des ravageurs et améliorer leur régulation.

Les pratiques culturales, et plus particulièrement l'utilisation des pesticides, peuvent avoir un effet dévastateur sur la biodiversité (*c.f.* §I.4.b.), via des effets directs (mortalité grandissante, baisse de la fitness) ou indirects (réduction de la biomasse telle que les proies ou les plantes hôtes) (Simon *et al.*, 2010).

Cette complexité fait des vergers des candidats idéaux pour le développement de la lutte biologique par conservation (Landis *et al.*, 2000 ; Simon *et al.*, 2010, 2017). En effet, il est possible d'influencer la diversité végétale ainsi que la complexité des habitats via la gestion des arbres producteurs (densité, architecture, etc.), mais aussi via la composition de la strate herbacée et enfin, à une échelle plus large, la diversité autour du verger (haies, BF, etc.) (Simon *et al.* 2010).

A ce jour, la diversification des vergers se voit porter un intérêt croissant en vue de la réduction du recours aux PPP et autres intrants, notamment sur la diversification des strates productives et non productives.

b. Une diversification en arboriculture : l'agroforesterie pour renforcer la LBC

L'agroforesterie en arboriculture

Cette recherche de diversification dans un système multi-stratifié rejoint les enjeux associés à l'agroforesterie. L'agroforesterie est définie comme « l'ensemble des pratiques, associant arbres, cultures et/ou animaux sur une même parcelle agricole en bordure ou en plein champ » (Association Française d'Agroforesterie, 2020 ; Den Herder *et al.*, 2017) et permettant « de diversifier et maintenir la production afin d'améliorer les conditions sociales, économiques et environnementales de l'ensemble des utilisateurs de la terre » (Geves, 2020). Il ne s'agit pas d'une simple juxtaposition de différents éléments, mais d'une association à gérer de manière dynamique afin d'assurer à la fois une production mais aussi la protection de l'environnement.

En 1985, Nair établit une classification des systèmes agroforestiers dont il ressort trois grands types : (i) le sylvopastoralisme, système dans lequel cohabitent des arbres et des animaux d'élevage, (ii) l'agrosylviculture, système mélangeant culture agricole et des arbres et enfin (iii) l'agrosylvopastoralisme, qui est un mélange des deux systèmes précédents. L'intégration d'arbres dans les systèmes agricoles 'classiques' modifie fortement les conditions locales, microclimatiques et biotiques du milieu (Dupraz *et al.*, 2008). Les bénéfices que l'agroforesterie peut apporter à diverses productions et à l'environnement sont multiples (figure 9).

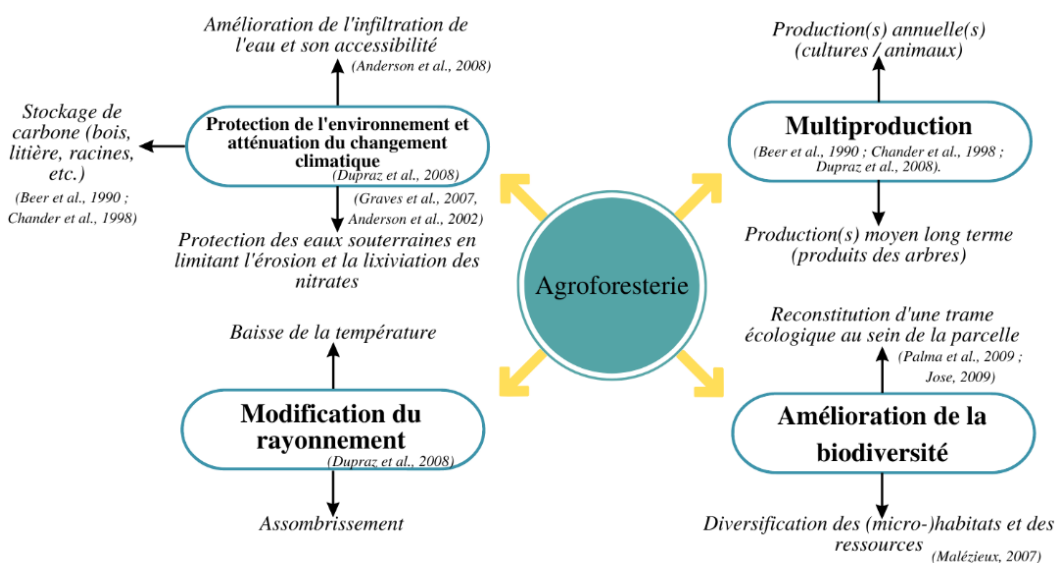


Figure 9 : Schématisation des bénéfices de l'agroforesterie

Les vergers classiques sont souvent composés de deux strates : (i) la strate haute occupée par les arbres fruitiers et (ii) la strate basse, composée des plantes herbacées (BE et parfois BF). L'agroforesterie en arboriculture est à l'origine de systèmes plus complexes combinant des arbres plus grands que l'arbre fruitier, devenant alors une strate intermédiaire, ou des arbustes avec éventuellement des plantes annuelles en strate basse. Lovell *et al.* (2018) définissent ces systèmes agroforestiers complexes comme des systèmes de « polycultures ligneuses multifonctionnels » (« Multifunctional Woody Polyculture », MWP). En verger de pommiers, la multi-stratification en intégrant ces derniers en strate intermédiaire, *i.e.* sous une autre strate plus haute, est un système agroforestier à explorer.

La régulation biologique en agroforesterie

Tout comme la mise en place d'IAE, l'agroforesterie permet une diversification des habitats et participe donc au maintien des communautés d'arthropodes (Palma *et al.*, 2007 ; Jose *et al.*, 2009). Les arbres peuvent aussi avoir un rôle de barrière physique pour certaines communautés mais aussi un rôle de corridor jusque dans la parcelle pour d'autres. De plus, ces systèmes permettent la formation de microclimats (Gosme *et al.*, 2016) pouvant favoriser, ou non, la présence de certains arthropodes.

L'agroforesterie permettrait l'augmentation de l'abondance des ennemis naturels de bio-agresseurs des systèmes étudiés, mais pas nécessairement leur diversité (Pumariño *et al.*, 2015). Cependant, cela ne résulte pas toujours en une meilleure régulation des bio-agresseurs, il semblerait que le différentiel d'abondance entre systèmes conventionnel et agroforestier soit davantage une question de l'identité du ravageur étudié, du microclimat induit par l'agroforesterie et de l'attrait du ravageur pour ce microclimat (Schrott *et al.*, 2000).

En plus d'être une source de diversification en ressources pour les arthropodes, les arbres de la strate haute, pourraient avoir une influence sur un ensemble de variables. La compétition pour la lumière, la formation d'un microclimat plus doux (Gosmes *et al.*, 2016) peuvent influencer (i) l'architecture et la croissance des pommiers (Pitchers *et al.*, 2021), mais aussi (ii) le développement des bio-agresseurs ainsi que leurs ennemis naturels ; la combinaison de tout cela impactant la régulation biologique des bio-agresseurs.

De plus, le fait d'avoir une strate basse fleurie permettrait (i) l'arrivée précoce d'ennemis naturels, (ii) moins de colonies de pucerons, (iii) moins de fruits endommagés par les pucerons et (iv) plus de pollinisateurs par-rapport à l'absence de cette strate fleurie (Staton *et al.*, 2021).

Cette combinaison permettrait donc d'obtenir un système arboricole multi-stratifié (Lauri et Simon, 2019), a priori favorable aux ennemis naturels et donc au contrôle biologique des ravageurs (Pumariño *et al.*, 2015). Bien que de tels systèmes en arboriculture fruitière soient peu documentés en climat tempéré (Lauri et Simon, 2019 ; Lauri *et al.*, 2016), les résultats issus de travaux de recherches en milieu tropical encouragent le développement de ces systèmes en zone tempérée. Ces derniers pourraient être favorables à la diminution ou même la suppression de l'usage des PPP, mais aussi au maintien de la biodiversité, à l'optimisation des régulations biologiques et à la stabilité des agroécosystèmes (Altieri, 1999 ; Stamps et Linit, 1998 ; Sarthou et Smits, 2006 ; Sarthou et Simon, 2018).

3. Question de recherche

A la lumière des enjeux décrits, nous cherchons à répondre à la question suivante :

Le contexte agroforestier associé à d'autres infrastructures permettent-ils d'améliorer la régulation des ravageurs en verger ?

Nous appuyant sur le dispositif GAFAM, nous explorons deux hypothèses : (i) la présence d'arbres de haut jet influence les dynamiques des communautés d'arthropodes présentes sur les arbres fruitiers réduisant directement et/ou indirectement la pression des ravageurs ; (ii) les différentes IAE présentes hébergent des communautés d'arthropodes qui offre une certaine complémentarité avec les ennemis naturels déjà présents, permettant ainsi d'optimiser la régulation biologique des ravageurs suivis.

Matériels et méthodes

1. Contexte de la parcelle d'étude

1.1. Contextes géographique et pédoclimatique du verger d'étude

Le verger d'étude, ou GAFAM (Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean), se situe dans le Domaine Départemental de Restinclières, à Prades-Le-Lez (Hérault). Cette commune de la métropole de Montpellier se trouve à 16 km de sa capitale régionale, au nord-est, à 70 m au-dessus du niveau de la mer.

Depuis 1995, l'INRAE dispose d'une quarantaine d'hectares (ha) pour mener des essais en agroforesterie, la parcelle GAFAM s'inscrit dans ces recherches, au sud du domaine, sur une surface de 0,2 ha.

Le climat auquel est soumis la zone géographique est méditerranéen. Les températures minimale et maximale moyennes sont respectivement de 8.2°C et 14.6°C (Météo-France, 2022). Quant à la pluviométrie, celle-ci s'élève, en moyenne, à 870 mm (1990-2020). Une grande disparité dans la répartition des pluies est à souligner, l'automne (épisodes cévenols) et le printemps étant soumis à des épisodes particulièrement intenses en termes de pluviométrie.

Une parcelle proche de celle étudiée possède une station météorologique, pour plus de précision, nous nous baserons sur ces données dans la suite du rapport.

En termes de pédologie, le domaine se situant en la bordure de garrigue, le sous-sol est de type calcaire. De plus, étant bordée par le Lirou et le Lez, le sol, de texture argilo-limoneuse, est constitué d'alluvions, faisant de ce dernier un fluviosol.

1.2. Le dispositif expérimental : historique, matériel végétal, design et environnement

Afin de mener un essai en agroforesterie, des noyers hybrides (*Juglans nigra* x *Juglans regia* NG23) destinés à la production de bois, sont plantés en février 1995, selon une orientation est-ouest, avec un interrang de 13 m et un espacement entre les arbres d'un même rang de 4 m. Suite à une ou plusieurs opérations d'arrachage, destinée(s) à favoriser les plus vigoureux, moins de 100 noyers subsistent sur la parcelle, contre environ 220 initialement.

Les pommiers (*Malus domestica*), unité productive de l'essai GAFAM, ont été plantés en mars 2016. Le choix variétal s'est porté sur Dalinette, greffée sur G202. Cette variété est reconnue pour sa résistance à la tavelure et sa faible sensibilité à l'oïdium et au feu bactérien (Schöneberg et al., 2015). Le porte-greffe, semi-nain, est également résistant au feu bactérien, mais aussi au phytophthora et au puceron lanigère. De plus, il serait moins sensible à la « fatigue du sol » (Auvil, 2011), phénomène contre lequel le traitement a longtemps été la fumigation du sol (Auvil, 2011). 148 pommiers ont été plantés : 141 de la variété Dalinette et 7 pollinisateurs de la variété Story. La distance de plantation est de 6.5x1.3 m (distance inter-rang de 6.5 m et distance intra-rang 1.3m).

Les pommiers sont plantés selon trois modalités (figure 10) : (i) une modalité témoin dans laquelle les pommiers sont en plein soleil et plantés à plus de 15m des noyers (Agricultural Control, AC) ; (ii) une modalité au sein de laquelle les pommiers sont plantés entre deux rangs de noyers à 6.5m de chaque rang (AgroForestry on the Inter Row, AFIR) ; et enfin (iii) une modalité où les pommiers sont sur le rang des noyers (AgroForestry on the Row, AFR).

Parmi les 148 arbres, 45 pommiers (15 par traitement) ont été sélectionnés en 2017 (figure 10), de manière à obtenir un gradient de section transversale des troncs d'environnement lumineux au sein de chacune des modalités (Pitchers, 2021).



Figure 10 : Schématisation du verger d'étude et des dispositifs de suivi mis en place

La localisation de la parcelle ainsi que plusieurs infrastructures qui lui sont propres sont susceptibles d'influencer la biodiversité (tableau 1).

Tableau 2 : Récapitulatif des infrastructures présentes dans et autour du verger expérimental.

En vert sont les infrastructures couramment considérées comme étant des IAE.

Infrastructure	Composition initiale	Composition en 2022	Localisation
Taillis à courte rotation (TCR)	Peupliers	Peupliers coupés et broyés en avril 2022	Ouest des 6 premiers rangs de pommiers Est et sud des 3 derniers rangs
Bandes enherbées (BE)	Luzerne jusqu'en 2019, remplacée par du sainfoin	La flore spontanée est composée de diverses graminées et astéracées, en plus de quelques repousses de sainfoin et luzerne	Inter-rang des pommiers
Bandes fleuries (BF)	2020 : semis à la volée de diverses plantes attractives d'auxiliaires sur 1.15m 5 espèces : cosmos, bleuet, œillet d'Inde, souci officinal et phacélie.	Quelques pieds de <i>Calendula officinalis</i> sont encore présents	Milieu de la BE
Strate herbacée (autre que BE et BF)	2010 : semis de fétuque	Vestige du semis initial, se comportant plutôt comme une flore spontanée	Dispositif entier (hors inter-rangs)
Arbres rivulaires	Diverses espèces		Bord du Lez (ouest)
Haies composites			Bord du Lirou (sud-est)
			Nord et nord-est

L'assemblage complexe de toutes ces infrastructures forme un réseau avec l'environnement semi-naturel et est susceptible de favoriser la biodiversité en favorisant des habitats et/ou le déplacement de certaines espèces.

1.3. Conduite du verger

Le verger est conduit selon le cahier des charges de l'AB, et les conseils et préconisations du Centre d'Etudes Techniques Agricoles (CETA) du Vidourle. La figure 11 résume les opérations réalisées sur les pommiers du verger en 2021 et 2022.

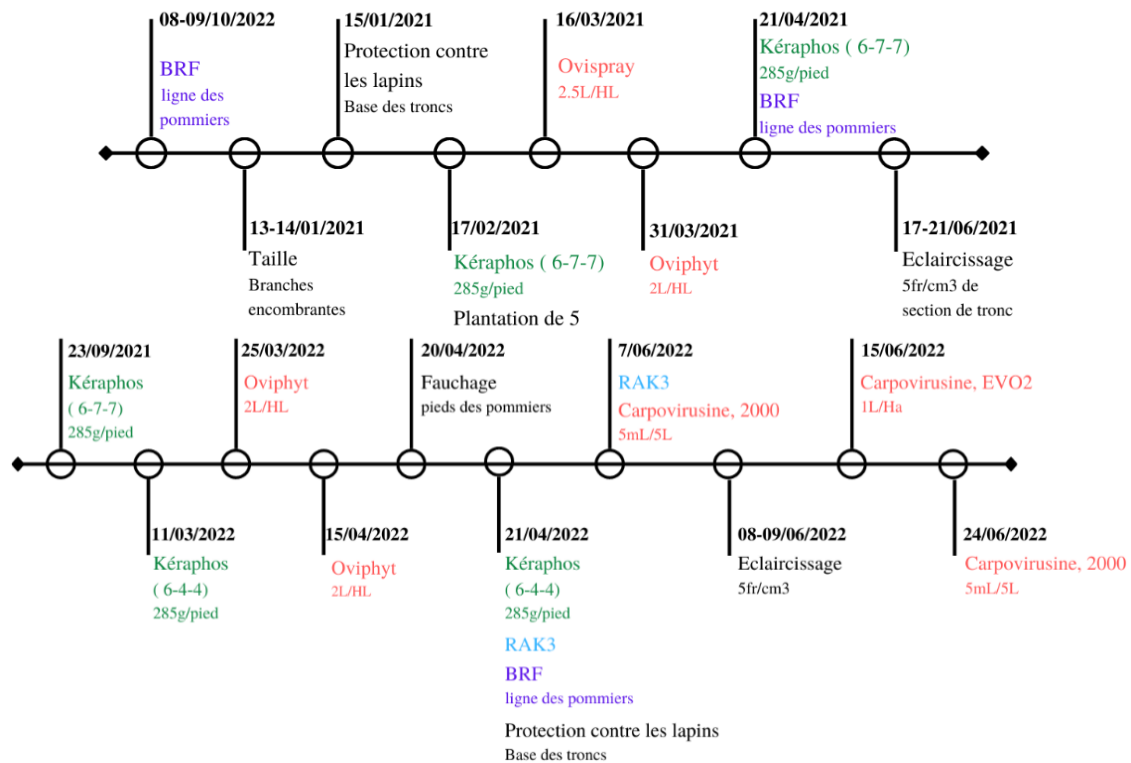


Figure 11 : Synthèse des opérations réalisées sur les pommiers en 2021 et 2022. En vert sont indiquées les opérations de fertilisation, en violet l'apport d'amendement, en noir les opérations 'physiques', en rouge les opérations phytosanitaires, en bleu la pose de dispositifs de confusion sexuelle. Le Kéraphos est un engrais organique. Le BRF (Bois Raméal Fragmenté), issu des TCR, est un amendement.

En 2021, l'IFT était de 2, correspondant à deux traitements avec de l'huile blanche insecticide, agent de lutte contre le puceron (Oviphyt et Ovispray). En 2022, en plus de ces mêmes traitements, en raison d'une forte pression du carpocapse, il a été décidé de pulvériser un traitement à base de granulovirus du carpocapse (Carpovirusine™), à raison de 3 interventions, en plus de l'utilisation de la confusion sexuelle (RAK3). Ainsi, en 2022, l'IFT total est de 5 et l'IFT hors biocontrôle est de 2, ce qui est inférieur à un verger classique, conduit selon le cahier des charges AB ou non. En effet, en 2018, les IFT total et hors biocontrôle moyens en verger de pommiers non AB était de 31.5 et 26.6, et pour un verger conduit en AB ces derniers étaient de 18.5 et 9.0 (Agreste, 2018).

2. Protocoles, variables et analyses statistiques

Les suivis que j'ai effectués sont axés sur trois ravageurs : le puceron cendré, le puceron vert et le carpocapse du pommier. Sont suivis (i) l'incidence des trois ravageurs (pourcentage d'unités suivies (rameaux ou fruits) impacté par la présence du dit ravageur), (ii) la dynamique des pucerons cendrés (nombre de pucerons cendrés par rameaux), (iii) la dynamique des auxiliaires dans les foyers de pucerons cendrés (nombre d'auxiliaires dans les foyers), (iv) le service de prédation et enfin (v) le cortège d'arthropodes présents sur site (figure 12). En 2022, j'ai effectué ces suivis entre avril et juin.

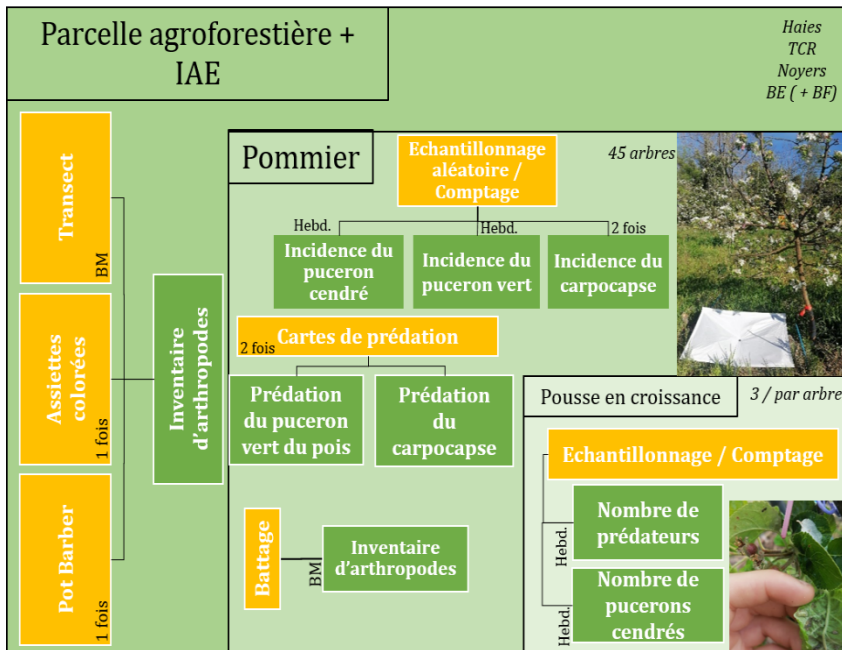


Figure 12 : Schéma récapitulatif des protocoles et variables étudiées ainsi que les fréquences d'exécution

En jaune : protocole suivi ; en vert : variables étudiées. « BM » : Bimensuel ; « Hebd. » : Hebdomadaire.

2.1. Méthodes et protocoles de suivi

a. Suivi de la dynamique du puceron cendré et des auxiliaires à l'échelle de la pousse

Ce suivi, à l'échelle du rameau, a pour objectif d'évaluer la dynamique de *D. plantaginea* et du complexe d'auxiliaires associé, selon une méthode de comptage visuelle non-destructive adaptée de celle formalisée par Simon S. et Capowiez Y. (2010). A la fin du mois de mars (début de la période d'infestation), sur chacun des 45 arbres, un marquage est effectué sur trois pousses florifères de l'année (rameaux) infestées par *D. plantaginea*. Ces dernières, distinguées par un code numérique, sont situées sur la face sud de l'arbre. Une fois le marquage effectué, est compté le nombre de pucerons cendrés et autres arthropodes sur chacune des pousses marquées.

Si au cours de la période un foyer vient à disparaître, une autre pousse est marquée en remplacement, pour assurer la continuité du suivi de la dynamique d'infestation. Si un arbre possède moins de 3 rameaux infestés, il est noté un effectif nul pour chacune des pousses manquantes.

Une distinction est faite entre pucerons aptères et ailés afin de pouvoir avoir une date approximative de l'apparition de ces derniers, signe du début de la migration sur l'hôte secondaire.

En 2021 le suivi est effectué tous les 4 jours, du 19/03/2021 au 08/06/2021, avec un total de 17 relevés. En 2022, j'ai effectué le même suivi, mais tous les 7 jours, du 31/03/2022 au 09/06/2022, soit un total de 11 relevés.

b. Suivi de l'incidence du puceron cendré et du puceron vert à l'échelle du pommier

L'objectif de ce suivi est de caractériser l'évolution de l'incidence du puceron cendré et du puceron vert au cours de la période d'infestation. Il s'agit ainsi d'évaluer le pourcentage de pousses de l'année présentant au moins un puceron selon une méthode visuelle et non-destructive (Simon, 2010).

A chaque session d'observation, sur chacun des pommiers, sont échantillonnés, au hasard, 50 pousses de l'année, 25 face sud et 25 face nord du pommier.

La figure ci-contre réunit ces aspects au sein d'un même schéma dont le but est d'avoir une représentation globale de l'interaction du complexe ravageurs-auxiliaires au sein des trois échelles d'étude, dans un contexte agroforestier. Comme évoqué précédemment, les pommiers sur lesquels les relevés sont effectués sont les 45 (15 par modalité).

En 2021, en cas de volume d'échantillonnage trop faible, seulement 30 pousses sont sélectionnées, 15 pousses face sud et 15 pousses face nord. Ce suivi s'est fait du 20/04/2021 au 08/06/2021, à raison d'une observation tous les 4 jours.

En 2022, ce suivi a été réalisé du 19/04/2022 au 07/06/2022, à raison d'une observation par semaine, soit 8 au total.

c. Suivi de l'incidence du carpocapse à l'échelle du pommier



Figure 13 : Dégâts à la surface de la pomme (© INRA)

Les deux dates d'observation correspondent à (i) 50% d'éclosion de la première génération (G1) et (ii) 100% d'éclosion de la G1. Ces estimations sont basées sur les informations communiquées par le CETA du Vidourle via les bulletins du Réseau SudArbo®.

Un fruit attaqué par le carpocapse présente des traces de piqûres et, quelques fois, des déjections, à la surface (figure 13). Certaines piqûres peuvent être « sèches » (la larve n'est pas rentrée à l'intérieur du fruit), ce qui explique pourquoi nous parlons de fruits symptomatiques et non de fruits infestés.

En 2021, ce suivi a consisté à évaluer le pourcentage d'inflorescences avec au moins un fruit présentant des symptômes de carpocapse, toutes les inflorescences des 45 arbres ont été observées. Cette opération a été réalisée le 17/06/2021 et le 04/07/2021.

En 2022, le suivi a pour but d'évaluer le pourcentage de fruits, présentant des symptômes. Pour cela, 40 fruits sont échantillonnés au hasard, 20 face sud et 20 face nord de l'arbre, et est noté le nombre de fruits symptomatiques. Les deux comptages ont été réalisés le 03/06/2022 et le 20/06/2022.

A noter qu'entre ces deux comptages, en 2021 et 2022, par souci de prophylaxie et d'éclaircissage, un maximum de fruits impactés par le carpocapse du pommier a été enlevé.

d. Suivi du complexe d'arthropodes à l'échelle du pommier

Afin de suivre le complexe d'arthropodes présent dans les arbres, plusieurs battages sont réalisés, à raison d'une branche par arbre (taille des branches homogène). Le battage est effectué à l'aide d'un parapluie japonais (visible sur la figure 12) et d'un bâton. Les arthropodes tombés sur le parapluie, après trois coups portés sur la branche, étaient récupérés et mis dans l'alcool, avant identification.

e. Evaluation du potentiel du service de prédation

Cette évaluation se fait à l'aide de cartes de prédation, selon le protocole issu du projet SEBIOPAG (Thomas et al., 2016). Les proies sentinelles utilisées ici sont le puceron vert du pois (*Acyrtosiphon pisum*) et des œufs de *Cydia pomonella*. L'utilisation de deux proies distinctes, à des stades différents permet de viser deux types d'auxiliaires : les auxiliaires oophages (se nourrissant d'œufs) et les auxiliaires entomophages (se nourrissant d'insectes). Les deux proies sentinelles ont été fournies par l'unité de recherche « Plantes et Systèmes de culture Horticoles » (PSH) de l'INRAE d'Avignon. Les pucerons ont été élevés sur un pied de féverole jusqu'à la confection des cartes, et les œufs sont fournis sur une feuille de ponte.

Pour confectionner ces cartes de prédation, des carrés (5x5 cm²) de feuilles de papier de verre sont découpées. Pour les cartes de prédation dont la proie sentinelle est le puceron, 3 pucerons frais étaient collés dessus à l'aide de la colle UHU® liquide. Concernant les œufs, des lots de 10 œufs en moyenne (de 9 à 11) étaient repérés et découpés, puis collés sur les cartes à l'aide de la colle à bois SADER®. Une fois cette étape terminée, les cartes étaient conservées à -20°C jusqu'à la date de pose. Le jour de la pose des cartes, une carte de prédation de chacune des deux proies sentinelles était posée sur les 45 arbres suivis.

Le tableau 3 résume toutes le protocole de fabrication, stockage et pose des cartes de prédation.

Tableau 3 : Récapitulatif du protocole des cartes de prédation.

	<i>A.PISUM</i>	<i>C.POMONELLA</i>
PREPARATION DES CARTES	3 pucerons collés / carte	Lot de 10 œufs / carte
STOCKAGE DES CARTES	-20°C	
POSE DES CARTES	1 ^{ère} pose : 1100 degrés-jours (°C.jour) 2 ^{ème} pose : 1500 °C.jour	
RECUPERATION DES CARTES	J+1 (24h)	J+4
LECTURE DES CARTES	Loupe binoculaire	
TAUX DE PREDATION	$\frac{\text{Nombre de pucerons prédatés}}{3}$	$\frac{\text{Nombre d'oeufs prédatés}}{\text{Nombre d'oeufs initial}}$
DATES EFFECTIVES DE POSE	2021 : 03/05/2021 (1196°C.jour ^a) et 31/05/2021 (1703°C.jour) 2022: 05/05/2022 (1132°C.jour) et 30/05/2022 (1655 °C.jour)	

^A : LES DEGRES-JOURS INDICUES AUX DATES EFFECTIVES DE POSE SONT BASEES SUR LES RELEVES DE LA STATION METEOROLOGIQUE DE LA STATION DE LA PARCELLE VOISINE.

f. Description du complexe d'arthropodes à l'échelle du verger et des IAE

Le complexe d'arthropodes à l'échelle du verger et des IAE environnantes est évalué via 4 protocoles différents, dont 1 seul est non destructif.

Transects linéaires – Détermination des arthropodes volants et de la strate herbacée

Les arthropodes présents dans inter-rangs (BE et BF), sont identifiés grâce à une méthode non destructive : le transect linéaire. Les arthropodes sont identifiés jusqu'à la famille si cela est possible, puis ramenés au groupe fonctionnel. La flore concernée par une visite est également identifiée, au minimum à l'échelle de la famille. Cela consiste à marcher lentement le long du linéaire, balayer du regard la zone concernée et noter tout arthropode observé. Il est à noter que les BF, semées en 2020, sont souvent résiduelles, et que la densité de couverture varie, ce qui fait que les observations sur certaines portions du transect sont faites sur du sol nu.

Au total 13 transects ont été repérés (figure 10), le suivi s'est fait du 31/03/2022 au 10/06/2022 (fin de floraison), tous les 15 jours, soit 7 relevés.

Pots Barber – Détermination des arthropodes présents au sol

La méthode des pots Barber est une méthode destructive et non-attractive permettant de collecter les individus se déplaçant à la surface du sol. Les pots utilisés sont des objets de forme conique avec une contenance de 130 ml. Est versé dans ce contenant un mélange d'eau saturée en sel avec quelques gouttes de liquide tensioactif, afin d'enlever la tension superficielle de l'eau et de provoquer la noyade immédiate de tout arthropode tombé dans le piège.

Ces pièges sont enterrés de telle sorte qu'il y ait une continuité entre le bord du pot et la surface du sol. Après être restés fermés quelques jours, afin d'avoir un milieu le moins perturbé possible au moment du piégeage, ils sont ouverts, pendant 5 journées pleines.

Dans le but d'obtenir un échantillon propre et exploitable, un tri est effectué au laboratoire après récupération du contenu. Par la suite, les individus échantillonnés sont placés dans de l'alcool à 90° jusqu'à identification.

25 pots sont installés dans la parcelle (figure 10) : 15 dans les inter-rangs des pommiers, 7 aux pieds des différentes haies en bordure et 3 dans les îlots de peupliers conduits en TCR. Ils ont été posés le 23/05/2022 au matin et récupérés après 5 jours pleins le 27/05/2022 en fin de journée.

Assiettes colorées – Détermination des diptères, hyménoptères et coléoptères du site

La méthode des assiettes colorées est une méthode destructive et attractive. Le support utilisé est composé de deux étages, chacun comportant un lot de trois assiettes (une bleue, une blanche et une jaune). Ce triptyque de couleur permet de couvrir une large gamme de longueur d'onde, correspondant

aussi en grande partie aux couleurs des fleurs et attirant ainsi une grande diversité d'arthropodes. La couleur jaune a pour but d'attirer les diptères et hyménoptères, et les deux autres attireraient les coléoptères (Roth et Couturier, 1965).

Les supports sont placés à trois endroits différents (figure 10), afin de couvrir au maximum la superficie du verger. Les supports ont été placés le 23/05/2022 et le contenu a été récupéré le 25/05/2022.

Identification des différents arthropodes observés/récoltés

Du fait du temps alloué et des compétences disponibles, il a été décidé d'identifier les arthropodes au taxon 'Famille'. En effet, cette échelle d'étude est bien souvent suffisante pour appréhender le rôle d'un arthropode (ravageur, auxiliaire, etc.). C'est ainsi, qu'après l'identification taxonomique, les arthropodes sont regroupés au sein de groupes fonctionnels en lien avec notre question d'étude. L'approche par biodiversité fonctionnelle permet de regrouper des taxons différents sous une même fonction écologique (Ricard *et al.*, 2012). Ce regroupement permet aussi de limiter les erreurs lors de l'identification.

Afin d'avoir une idée de la redondance fonctionnelle au sein de notre système d'étude, les inventaires décrits ci-dessous comportent aussi le nombre d'individus et le stade, car tous les stades ne sont pas regroupés dans les mêmes groupes fonctionnels (*cf. tableau 1, §1.4.c*).

2.2. Variables étudiées et analyses statistiques associées à certaines

a. Variables brutes

Le tableau 4 résume l'ensemble des variables récupérées, ainsi que les suivis concernés.

Tableau 4 : Récapitulatif des variables récupérées. En orange les variables potentiellement explicatives et en vert les variables à expliquer.

Echelle	Suivi	Variable brute
Pousse / Pommier		Date
		Modalité
		Numéro du pommier
		Rang du pommier
Pousse	<i>Dynamique du puceron cendré et du complexe associé</i>	Nombre de pucerons cendrés par foyer Nombre d'auxiliaires par foyer
Pommier	<i>Incidence du puceron cendré</i>	Nombre de pousses échantillonnées Nombre de pousses avec au moins un puceron cendré
	<i>Incidence du puceron vert</i>	Nombre de pousses échantillonnées Nombre de pousses avec au moins un puceron vert
	<i>Incidence du carpocapse du pommier</i>	Nombre de fruits échantillonnés Nombre de fruits symptomatiques
	<i>Taux de prédation du carpocapse</i>	Nombre d'œufs initial Nombre d'œufs final
	<i>Taux de prédation du puceron du pois</i>	Nombre de pucerons initial Nombre de pucerons final
	<i>Complexe d'arthropodes (battage)</i>	Effectif de chaque famille identifiée
	Verger/IAE	<i>Complexe d'arthropodes (pots Barber)</i>
<i>Complexe d'arthropodes (assiettes colorées)</i>		Effectif de chaque famille identifiée

b. Variables et analyses statistiques

L'effet du type de plantation du verger agroforestier (AFR ou AFIR), comparativement au témoin (AC) sur la dynamique du puceron cendré, l'incidence des pucerons et du carpocapse et les taux de prédation a été analysé à l'aide de modèles linéaires. Pour tenir compte de possible variation de cet effet au cours de la saison de suivi, une interaction avec la date a été introduite et conservés uniquement lorsqu'elle était significative.

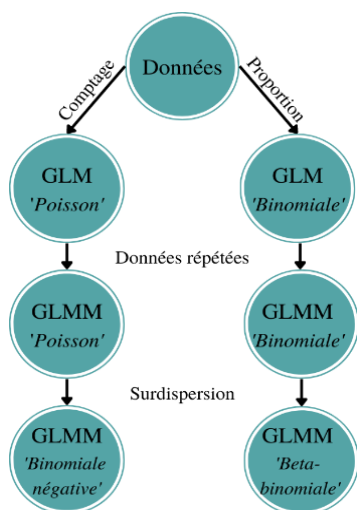


Figure 14 : Schéma récapitulatif du choix de modèle à utiliser

Les données de dynamique sont de type 'comptage' et celles d'incidence et de taux de prédation sont des 'proportions' et doivent donc être analysées avec des distributions non gaussiennes (modèle linéaire généralisé, GLM). En première approche une distribution 'Poisson' a été utilisée pour les données de comptage et 'Binomiale' pour les proportions (figure 14). Cependant, il a été constaté pour tous les modèles une sur-dispersion trop importante avec ces distributions (rapport entre la déviance résiduelle du modèle et ses degrés de liberté résiduels largement supérieur à 1), et il a été préféré une distribution 'Négative binomiale' pour les données de comptage et 'Bêtabinomiale' pour les proportions. De plus, les données sont répétées dans le temps sur les mêmes arbres, ce qui a été pris en compte (modèle mixte, GLMM). Enfin, les arbres observés sont regroupés en rangs, ce qui peut être pris en compte en introduisant un effet aléatoire hiérarchisé 'arbre dans rang'.

La structure d'effets aléatoires la mieux adaptée (hiérarchisée ou non)

a été définie en comparant la performance des modèles dans les deux options à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC), de l'écart quadratique moyen (RMSE) et de la déviance. Les interactions non significatives ont été supprimées des modèles concernés.

Les données concernant les complexes d'arthropodes ne se prêtaient pas à des analyses statistiques poussées de l'effet de la modalité agroforestière (pas de répétition temporelle et/ou positionnement non spécifique à une modalité) et ont été analysées de manière descriptive pour faire ressortir des différences de composition des communautés entre les trois modalités ou entre le verger et les IAE.

Les analyses statistiques des données et les graphiques présentés ont été effectués avec le logiciel R (version 2022.02.3). Toutes ces analyses, ainsi que les données traitées, sont résumés dans la tableau 4.

Tableau 5 : Récapitulatif des modèles statistiques retenus pour chaque variable.

SUIVIS	VARIABLE A EXPLIQUER	PACKAGE / FONCTION	FONCTION DE LIEN	DISTRIBUTION D'ERREUR	FORMULE	COMMENTAIRES
INCIDENCE DU PUCERON CENDRE (2021&2022)	Proportion de pousses infestées	glmmTMB / glmmTMB()	Logit	Bêtabinomiale	Modalité * Date + (1 Rang) + (1 Rang : Arbre)	Interaction entre la modalité et la date Modèle hiérarchisé
INCIDENCE DU PUCERON VERT (2021&2022)	Proportions de pousses infestées	glmmTMB / glmmTMB()	Logit	Bêtabinomiale	Modalité + Date + (1 Arbre)	Pas d'interaction Modèle non hiérarchisé
INCIDENCE DU CARPOCAPSE (2022)	Proportion de fruits symptomatiques	glmmTMB / glmmTMB()	Logit	Binomiale	Modalité + Date + (1 Arbre)	Pas d'interaction Modèle non hiérarchisé
DYNAMIQUE DU PUCERON CENDRE (2021)	Effectif total des 3 pousses	glmmTMB / glmmTMB()	Log	Négative binomiale	Modalité + Date + (1 Arbre)	Pas d'interaction Modèle non hiérarchisé
DYNAMIQUE DU PUCERON CENDRE (2022)	Effectif total des 3 pousses	glmmTMB / glmmTMB()	Log	Négative binomiale	Modalité * Date + (1 Arbre)	Interaction entre la modalité et la date Modèle non hiérarchisé
TAUX DE PREDATION DU CARPOCAPSE (2021&2022)	Proportion d'œufs prédatés	glmmTMB / glmmTMB()	Logit	Bêtabinomiale	Modalité + Session + (1 Arbre)	Sans interaction Modèle non hiérarchisé
TAUX DE PREDATION DU PUCERON DU POIS (2021&2022)	Proportion de pucerons prédatés	glmmTMB / glmmTMB()	Logit	Bêtabinomiale	Modalité + Session + (1 Arbre)	Sans interaction Modèle non hiérarchisé

Une fois le bon modèle établi, l'analyse de ce dernier (figure 15) se fait via (i) une ANOVA qui

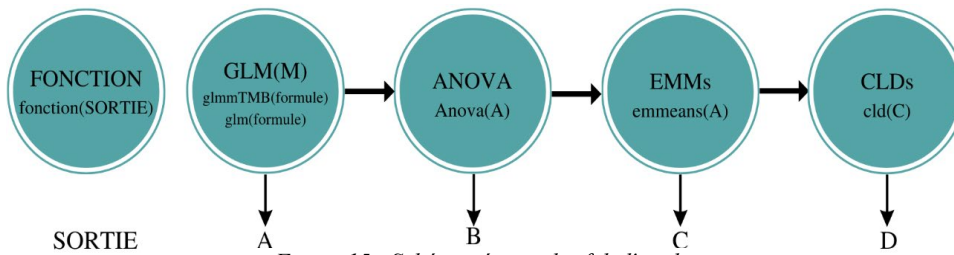


Figure 15 : Schéma récapitulatif de l'analyse statistique

d'identifier la significativité ou non de l'effet global des traitements (AC, AFR, AFIR) ; (ii) une comparaison par paires des EMMs (Estimated

Marginals Means) qui permet de quantifier les différences deux à deux entre les paires de modalités et leur significativité (fonction `cld()`, Compact Letter Display, package 'multcomp' qui permet d'attribuer graphiquement deux lettres différentes quand deux modalités sont significativement différentes deux à deux).

Pour l'ensemble des tests utilisés, une p-value est considérée comme significative si celle-ci est inférieure à un risque alpha de 0.05. Cela veut donc dire que dans 5% des cas, lorsque l'hypothèse nulle est vraie, l'expérimentateur la rejettera.

Résultats

1. Suivi des ravageurs (*D.plantaginea*, *A.pomi* et *C. pomonella*)

Tous les résultats et figures de cette partie sont issus d'une modélisation statistique (cf. *§Matériels et Méthode, tableau 5*). Les p-values de comparaisons entre groupes deux à deux sont issues des tests post-hoc effectués sur ces modèles.

1.1. Suivi de l'incidence du puceron vert non migrant (*A.pomi*)

En 2021 et 2022 la totalité des arbres observés présentaient au moins un puceron vert. La figure 16 présente la modélisation de l'incidence du puceron vert (non migrant) en fonction du temps et des modalités en 2021 (A) et en 2022 (B).

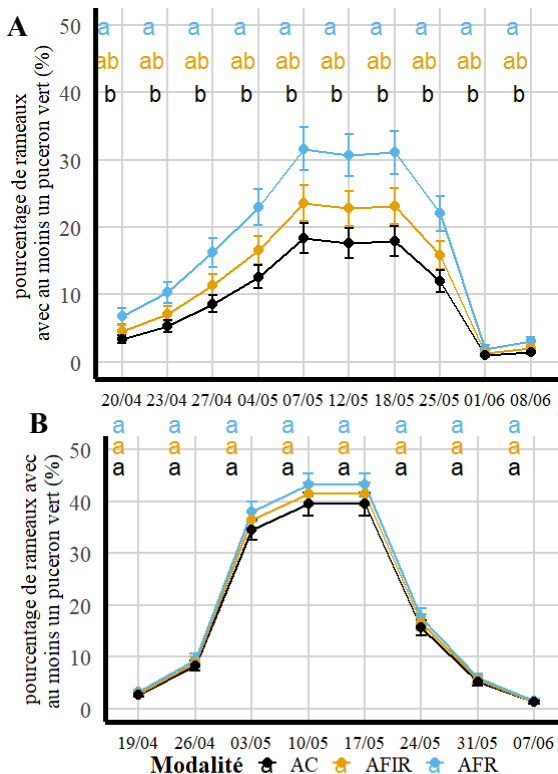


Figure 16 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de l'incidence de *A.pomi* au cours du temps en (A) 2021 et (B) 2022.

Deux lettres différentes signifient une p-value < 0,05 au test post-hoc.

modalités en 2021 (A) et en 2022 (B).

En 2021, la variable 'Date' a un effet significatif sur le pourcentage de rameaux d'un arbre présentant au moins un puceron vert ($P < 0,001$; annexe 1.A), tout comme le facteur 'Modalité' ($P < 0,001$). D'après la modélisation, le pic d'infestation se situe entre le 7 et le 18 mai (annexe 2.A). Les arbres de la modalité AFR ont une incidence significativement supérieure à ceux de la modalité AC, tout au long de la période de présence du puceron vert ($P < 0,05$; annexe 3.A). L'incidence pour la modalité AFIR n'est pas différente significativement de celles des deux autres modalités (figure 16.A). Au pic d'infestation, la modalité AFR a une incidence atteignant entre 28 et 35% de pousses infestées, la modalité AFIR entre 20 et 27% et AC entre 16% et 20%.

En 2022, l'incidence du puceron vert varie significativement selon la variable 'Date' ($P < 0,001$; annexe 1.B), mais pas selon la modalité agroforestière ($P = 0,466$; détails annexe 3.B). D'après le modèle et la comparaison entre les dates par modalité (annexe 2.B), le pic d'incidence du puceron vert se situe entre le 3 et 17 mai en 2022 et atteint entre 33 et 45%.

1.2. Suivi de l'incidence du carpocapse des pommes et des poires (*C.pomonella*)

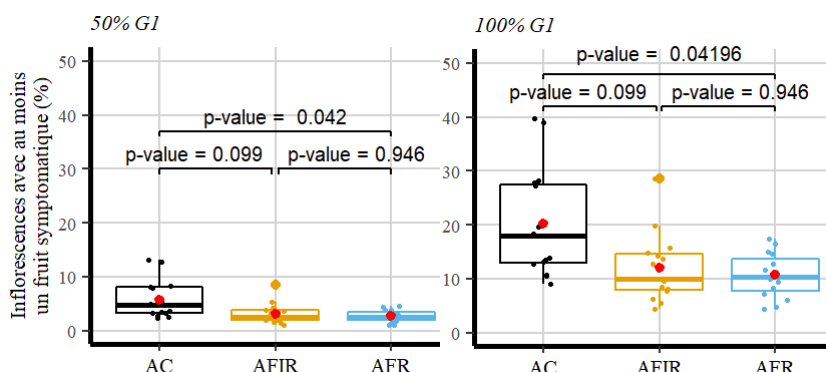


Figure 17 : Modélisation (données prédites) de l'incidence du carpocapse en 2021 aux stades 50% G1 et 100% G1. En rouge : moyennes prédites de l'incidence.

En 2021, la variable suivie est le pourcentage d'inflorescences par arbre présentant au moins un fruit symptomatique du carpocapse. La figure 17 est issue de la modélisation de l'incidence du ravageur en 2021 en fonction des modalités agroforestières aux stades (i) 50% d'éclosion de la première génération

(« 50% G1 ») et (ii) 100% d'éclosion de la première génération (« 100% G1 »).

Le facteur 'Stade' (50% G1 ou 100% G1) a un effet significatif ($P < 0,001$; annexe 4.A) sur le pourcentage d'inflorescences avec au moins un fruit symptomatique, tout comme le facteur 'Modalité' ($P = 0,024$). A chaque stade, l'incidence du carpocapse est significativement différente entre les modalités AC et AFR, et entre AC et AFIR ($P < 0,05$; figure 17), mais ne l'est pas entre AFIR et AFR. L'incidence moyenne du carpocapse en AC varie de 3 à 7% au stade '50%G1' et de 13 à 25% au stade '100% G1'. En AFIR, elle varie de 2 à 4% au stade '50%G1' et de 7 et 16% au stade '100% G1' ; en AFR, ils passent de 1 à 4%, au premier stade, à 6 à 14% au second.

En 2022, la variable suivie est le pourcentage de fruits symptomatiques par arbre, définie par la suite comme l'incidence du carpocapse.

Cette incidence est significativement différente selon (i) le stade d'éclosion de la G1 ($P < 0,001$; annexe 4.B) et (ii) la modalité ($P < 0,001$).

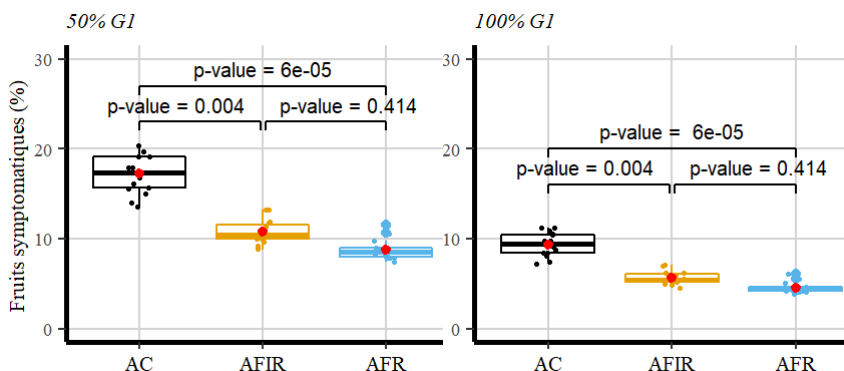


Figure 18 : Modélisation (données prédites) de l'incidence du carpocapse en 2022 aux stades 50% G1 et (ii) 100% G1. En rouge : moyennes prédites de l'incidence.

A chaque stade, les modalités AC et AFIR ont une incidence significativement différente (figure 18), tout comme les modalités AC et AFR ($P < 0,001$). Les modalités AFIR et AFR ne sont pas significativement différentes, pour aucun des deux stades étudiés.

Au premier stade, la modalité AC a une incidence moyenne entre 14 et 20%, la modalité AFIR entre 8 et 13% et enfin, la modalité AFR entre 7 et 11%. Au stade 100% d'éclosion de la G1, chacune des modalités voit le pourcentage de fruits symptomatiques chuter de moitié (AC : 7 à 11% ; AFIR : 4 à 7% ; AFR : 3 à 6%).

1.3. Suivi de l'incidence du puceron cendré (*D. plantaginea*)

En 2021, 43 pommiers sur 45 ont présenté au moins une fois un puceron cendré sur un rameau. En 2022, les 45 arbres ont eu au moins une fois un puceron cendré sur un rameau. La figure 19 présente la modélisation du pourcentage de rameaux présentant au moins un puceron cendré (incidence), en fonction du temps et de la modalité.

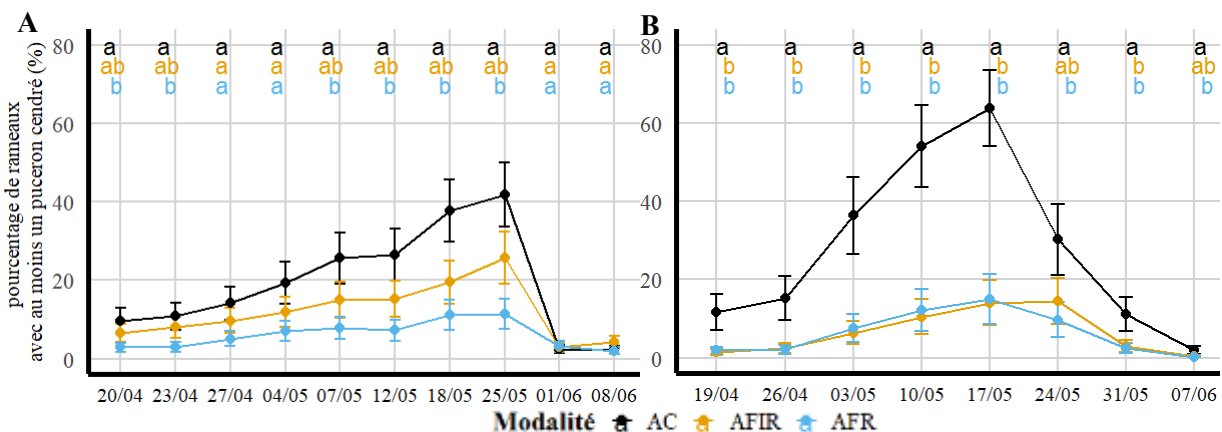


Figure 19 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de l'incidence du puceron cendré en (A) 2021 et en (B) 2022. Deux lettres différentes signifient une p -value $< 0,05$ au test post-hoc.

L'interaction entre la variable 'Date' et le facteur 'Modalité' est significative en 2021 ($P = 0,003$; annexe 5.A) et en 2022 ($P < 0,001$; annexe 5.B). La variable 'Date' a aussi un effet significatif en 2021

et en 2022 ($P < 0,001$), à la différence du facteur 'Modalité', qui a un effet significatif en 2022 ($P < 0,001$) mais pas en 2021 ($P = 0,0549$).

En 2021, les modalités AC et AFIR n'ont pas une incidence significativement différente, ni les modalités AFR et AFIR (annexe 6.A), et ce tout au long de la période d'étude (figure 19.A). Cependant, la modalité AC est plus infestée que la modalité AFR (annexe 6.A). Le pic d'incidence est atteint en même temps pour chaque modalité : entre le 18 et le 25 mai 2021 (annexe 7.A). La modalité AC atteint entre 30 et 50% d'incidence, la modalité AFIR entre 13 et 33%, et la modalité AFR entre 7 et 15%.

Durant la campagne 2022 (figure 19.B), l'incidence en AC est plus élevée que celle en AFR ($P < 0,05$; annexe 6.B) et en AFIR ($P < 0,05$), à l'exception des 24/05 et 7/06 ($P > 0,05$). Les modalités AFIR et AFR ont des incidences statistiquement similaires. Le pic d'incidence du puceron cendré est compris entre le 10 et le 17 mai 2022 dans modalité AC, avec une incidence comprise entre 43 et 74% (annexe 7.B). Dans les modalités AFIR et AFR, il est compris entre le 10 et le 24 mai 2022, avec une incidence comprise entre 5 et 21%.

1.4. Suivi de la dynamique des foyers du puceron cendré (*D.plantaginea*)

La variable étudiée est la somme de l'effectif des pucerons cendrés au sein de trois foyers par arbre, suivie dans le temps (dynamique temporelle, figure 20).

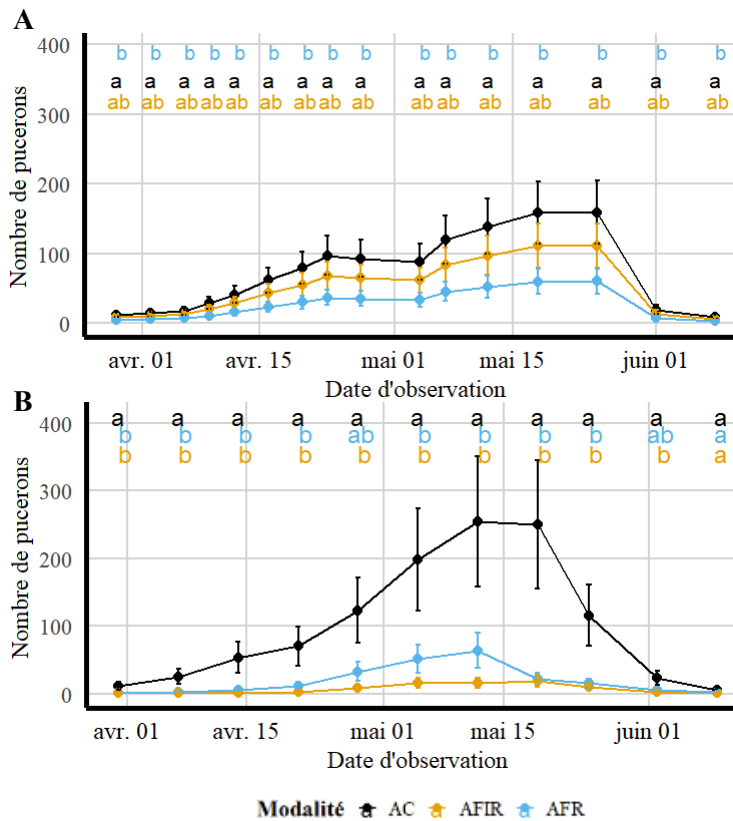


Figure 20 : Modélisation (données prédites \pm standard error) de la dynamique des foyers de pucerons cendrés en (A) 2021 et en (B) 2022. Deux lettres différentes signifient une p -value $< 0,05$ au test post-hoc.

En 2021, la date ($P = 0,0$) et la modalité ($P = 0,0409$) ont un effet significatif sur la dynamique des foyers (annexe 8.A).

En 2021, le nombre de pucerons de en AC est significativement plus élevé qu'en AFR ($P = 0,03$, figure 20.A, annexe 9). Il n'y a en revanche pas de différence entre AC et AFIR, ni entre AFR et AFIR. D'après la comparaison entre les dates au sein des modalités (annexe 10.A), le pic d'effectif est atteint, pour toutes les modalités, entre le 12 et le 25 mai. La modalité AC atteint entre 86 et 204 pucerons pour trois pousses, la modalité AFIR entre 60 et 143 pucerons et enfin, la modalité AFR entre 32 et 78 pucerons.

En 2022, on retrouve les mêmes effets significatifs de la 'Date' ($P < 0,001$; annexe 8.B) et de la 'Modalité' ($P = 0,006$) mais l'interaction entre les deux est significative ($P = 0,0148$). Le nombre de pucerons cendrés en AC est significativement supérieur à

celui en AFIR ($P < 0,05$ sauf le 09/06 ; annexe 11). Le nombre de pucerons cendrés est également significativement supérieur en AC qu'en AFR ($P < 0,05$; annexe 11) du 31/03 au 28/04, puis du 12/05 au 25/05. La somme étudiée n'est pas différente significativement entre les modalités AFIR et AFR tout au long de la période d'étude. D'après la comparaison entre les dates au sein de toutes les modalités (annexe 10.B), le pic d'abondance des pucerons n'est pas atteint exactement aux mêmes dates : la modalité AC atteint le pic entre le 5/05 et le 19/05 (entre 122 et 344 pucerons pour trois rameaux) ; la

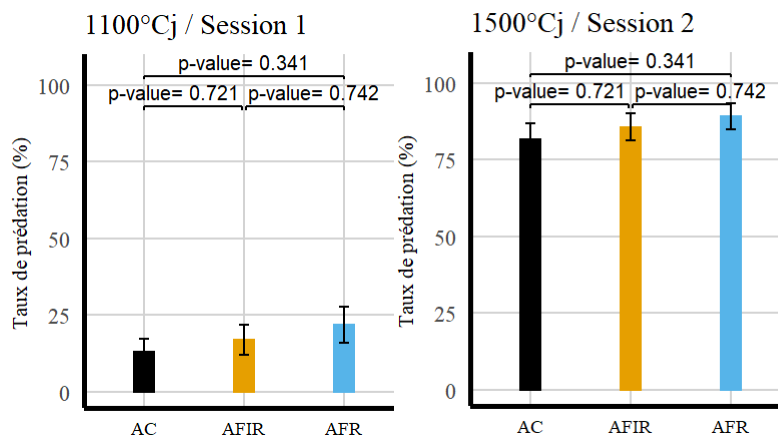
modalité AFIR atteint le pic entre le 28/04 et le 25/05 (entre 4 et 28 pucerons pour trois rameaux) et la modalité AFR atteint le pic entre le 28/04 et le 12/05 (entre 19 et 90 pucerons pour trois rameaux).

2. Suivi du potentiel de prédation

Tous les résultats et figures de cette partie sont issus d'une modélisation statistique, les modèles utilisés ont été présentés dans la partie *Matériels et Méthode* (tableau 5).

2.1. Suivi de la prédation des œufs de carpocapse des pommiers et des poiriers

La variable étudiée est le taux de prédation d'œufs de carpocapse. Les figures ci-dessous présentent le taux de prédation des œufs en fonction de la modalité à deux sessions correspondant à 1100°Cj et 1500°Cj (2021 : figure 21 ; 2022 : figure 22).



En 2021, il y a un effet de 'Session' ($P < 0,001$) mais pas d'effet 'Modalité' sur le taux de prédation des œufs de carpocapse (annexe 12.A). Le taux de prédation moyen en AC passe de $13 \pm 4\%$ à $82 \pm 5\%$ entre la première et la deuxième session, de $17 \pm 5\%$ à $86 \pm 4\%$ en AFIR et de $22 \pm 6\%$ à $89 \pm 4\%$ en AFR (figure 21).

Figure 21 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) des œufs de carpocapse en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2021.

En 2022, le taux de prédation des œufs varie significativement selon la 'Session' ($P < 0,001$) mais pas selon la 'Modalité' (annexe 12.B). Le taux de prédation moyen en AC passe de $58 \pm 4\%$ à $89 \pm 2\%$ entre la première et la deuxième session, de $62 \pm 4\%$ à $90 \pm 2\%$ en AFIR et de $67 \pm 4\%$ à $92 \pm 2\%$ en AFR (figure 22).

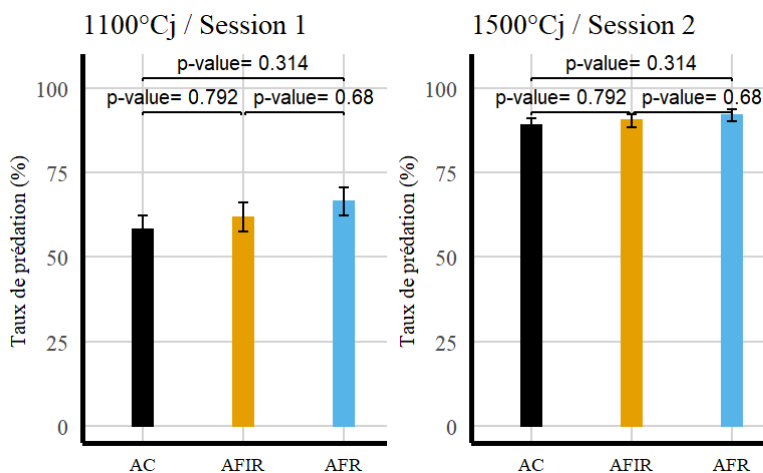


Figure 22 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) des œufs de carpocapse en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2022.

2.2. Suivi de la prédation du puceron vert du pois (*Acyrtosiphon pisum*)

La variable étudiée est le taux de prédation des pucerons *Acyrtosiphon pisum*. Les figures ci-dessous présentent le taux de prédation des pucerons en fonction de la modalité à deux sessions correspondant à 1100°Cj et 1500°Cj en (2021 : figure 23 ; 2022 : figure 24).

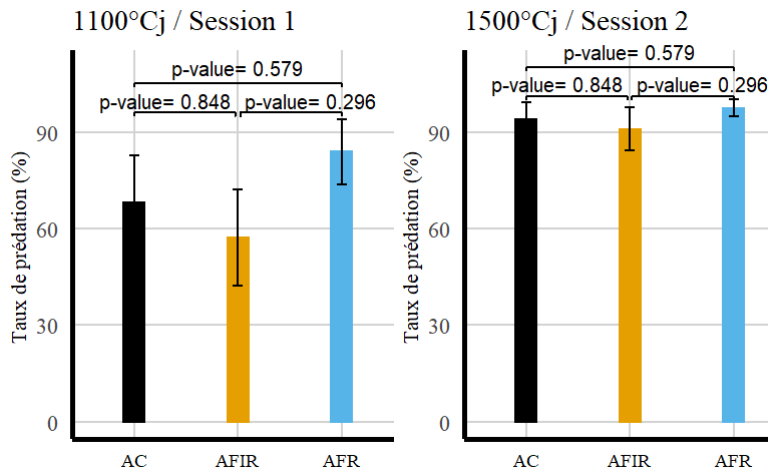


Figure 23 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) de pucerons *Acyrtosiphon pisum* en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2021.

En 2021, il y a un effet 'Session' ($P < 0,05$) mais pas d'effet 'Modalité' sur le taux de prédation du puceron du pois (annexe 13.A). Le taux de prédation moyen en AC passe de $68 \pm 15\%$ à $94 \pm 5\%$ entre la première et la deuxième session, en AFIR de $57 \pm 15\%$ à $90 \pm 7\%$ et en AFR de $84 \pm 10\%$ à $98 \pm 3\%$ (figure 23).

En 2022, il y a un effet 'Session' ($P < 0,05$) mais pas d'effet 'Modalité' sur le taux de prédation du puceron du pois (annexe 13.B).

Entre la première et la deuxième session, les taux de prédation moyens augmentent tous d'environ 20% : (i) modalité AC : $63 \pm 7\%$ à $87 \pm 4\%$; (ii) modalité AFIR : $69 \pm 7\%$ à $89 \pm 4\%$ et (iii) modalité AFR de $74 \pm 6\%$ à $91 \pm 3\%$ (figure 24).

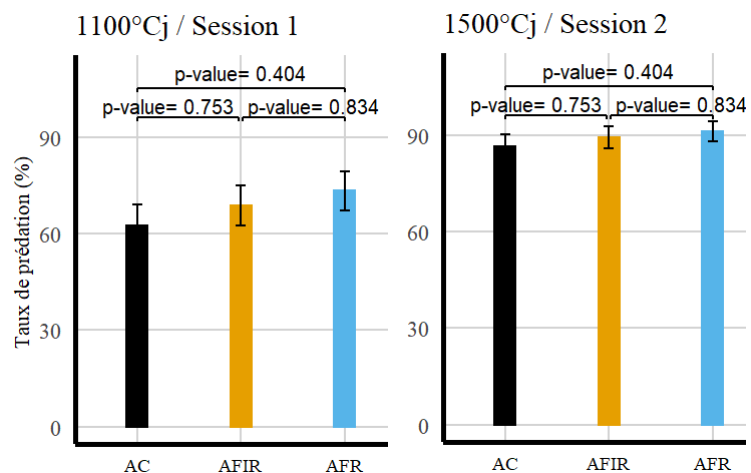


Figure 24 : Modélisation (données prédites \pm standard error) du taux de prédation (%) de pucerons *Acyrtosiphon pisum* en fonction de la modalité agroforestière et des degrés-jours en 2022.

3. Description du cortège d'auxiliaires

Les résultats présentés ci-dessous sont issus d'une approche descriptive (cf. §*Matériels et Méthodes*) des données issues des différents protocoles mis en œuvre. Dans les transects, 1146 individus ont été identifiés à vue ; 1462 individus ont été échantillonnés et identifiés à la loupe binoculaire dans les battages ; 818 dans les pots Barber et 181 dans les assiettes colorées.

3.1. Le cortège d'auxiliaires dans les foyers suivis

a) Nombre moyen d'auxiliaires par foyer de *D. plantaginea*

Les ennemis naturels n'étant présents au stade actif que là où les proies le sont aussi, il a été décidé de ramener le nombre d'auxiliaires total au nombre de rameaux réellement infestés (« foyers »), pour ne pas surreprésenter une modalité, qui aurait un nombre de foyers plus élevé et donc un potentiel de présence plus élevé.

En raison d'une grande variabilité du nombre moyen d'ennemis naturels par foyer, il n'est pas possible de conclure sur une différence entre les modalités (figure 25).

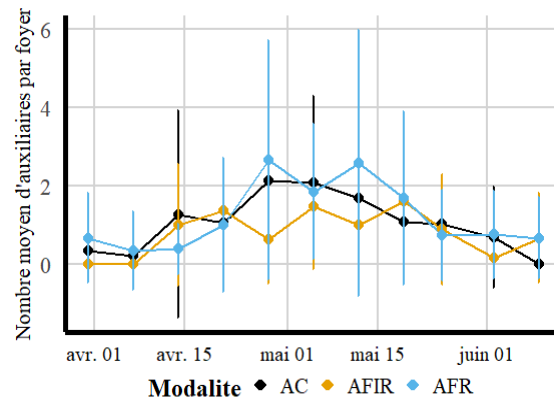


Figure 25 : Evolution du nombre moyen d'auxiliaires (\pm écart-type) par foyer en fonction de la modalité d'étude en 2022.

b) Les principaux ennemis naturels observés

Les trois principaux ennemis naturels présents dans les foyers de pucerons cendrés suivis sont : (i) les Syrphidae (n=603), (ii) les Cecidomyidae (n=101) et (iii) les Coccinellidae (n=65) (annexe 14). Pour la première et la dernière famille, tous les stades ont été observés, contrairement à la famille des Cecidomyidae, qui n'a été observée qu'au stade larvaire.

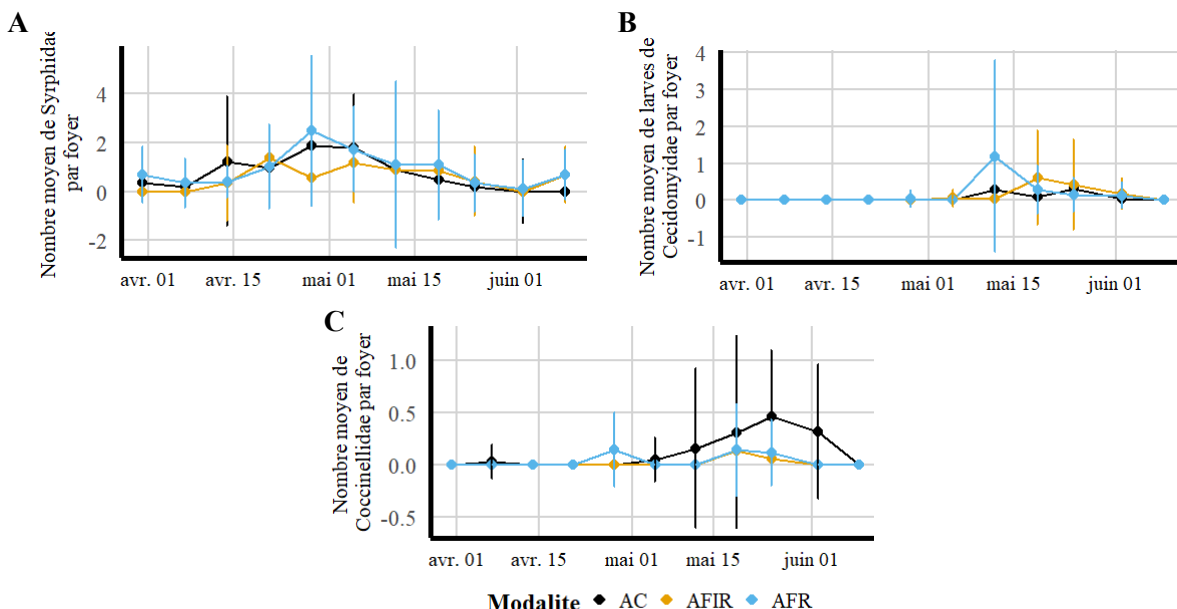


Figure 26 : Evolution du nombre moyen (\pm écart-type) par foyer de (A) Syrphidae, (B) Cecidomyidae et (C) Coccinellidae selon les modalités agroforestières en 2022.

Comme pour l'ensemble des auxiliaires, il y a une forte variabilité du nombre moyen de chacune de ces trois familles au sein des modalités, et pas de différence apparente entre modalités (figure 26). Il semble que les Syrphidae soient les ennemis naturels les plus précoces, avec un léger pic de présence à la fin avril, suivis par les larves de Cecidomyidae, plus présentes dès la mi-mai, et enfin les Coccinellidae sont les plus tardives (mi-mai, début juin).

3.2. Ennemis naturels observés lors des battages

a) Classes et ordres d'intérêts

Afin de mieux appréhender les résultats, les ordres présentés sont ceux qui ont été observés plus de 3 fois, tout au long de la période d'étude.

Au cours des battages, 4 classes différentes ont été observées (annexe 21.A) : Arachnida (n=193), Diplopoda (n=147), Insecta (n=1124) et Malacostraca (n=1). Les classes d'intérêts dans notre étude sont (i) la classe Arachnida et (ii) la classe Insecta. Au sein de la classe Arachnida, 40% des individus sont observés en AFIR, 33% en AFR et 27% en AC (annexe 21.B). La part des individus appartenant à la classe Insecta est similaire entre modalités (AC : 34% ; AFIR : 35% et AFR : 31%).

Dans la classe Arachnida, 3 ordres d'intérêt différents ont été observés (annexe 22.A) : (i) Araneae (n=164) ; (ii) Mesostigmata (n=21) ; (iii) Trombidiformes (n=5). Dans la classe Insecta, sur 10 ordres différents observés, seuls 6 sont d'intérêts : (i) Coleoptera (n=243) ; (ii) Dermaptera (n=19) ; (iii) Diptera (n=24) ; (iv) Hemiptera (n=253) ; (v) Hymenoptera (n=213) ; (vi) Neuroptera (n=6).

b) Familles d'intérêt

Description globale du cortège des familles d'intérêt

Sur 40 familles observées dans les battages, seules 17 sont des familles ayant des espèces d'intérêt. Il est possible de voir que certaines familles ne sont pas représentées de façon similaire selon les modalités d'étude (figure 32), mais l'effectif de chaque famille d'intérêt variant également avec parfois des effectifs très faibles, il n'est pas possible de conclure sur une différence entre les modalités. Cela concerne les familles suivantes : Anystidae, Nabidae, Braconidae et Pteromalidae.

La famille la plus observée lors des battages est celle des Miridae (n=82), suivie par les Coccinellidae (n=66) et les Staphylinidae (n=41). Les autres familles d'intérêts observées ont un effectif inférieur à 30.

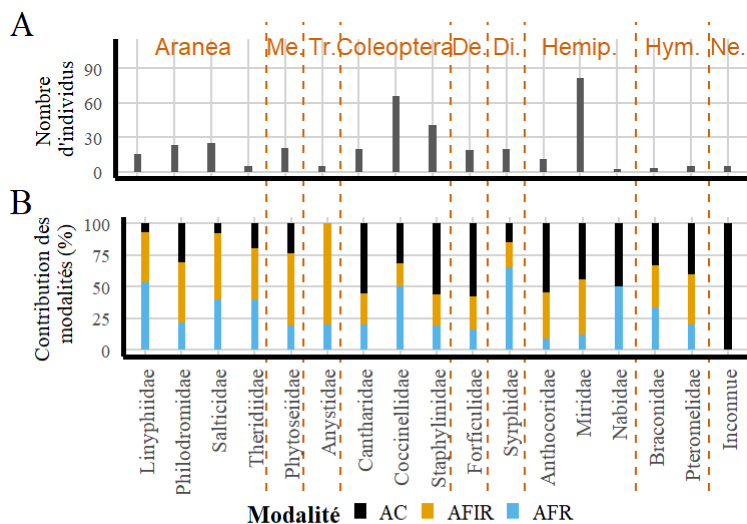


Figure 27 : (A) Effectif total des familles d'intérêts observées dans les battages et (B) contribution de chaque modalité dans cet effectif (%). Les effectifs correspondent à la somme des individus échantillonnés sur les 45 arbres suivis.

Me. : Mesostigmata ; Tr. : Trombidorformes ; De. : Dermaptera ; Di. : Diptera ; Hemip. : Hemiptera ; Hym. : Hymenoptera ; Ne. : Neuroptera

Parmi les 4 familles de l'ordre des Araneae, les familles Linyphiidae, Salticidae et Theridiidae sont davantage observées en AFIR et AFR. Les Philodromidae sont plus représentées en AC (30%) que les autres familles, mais restent majoritairement observées en AFIR (48%). Dans la famille Phytoseiidae (Arachnida : Mesostigmata) les individus observés le sont majoritairement en AFIR (57%). Parmi les 3 familles de l'ordre Coleoptera, les Cantharidae et les Staphylinidae sont observés à plus de 50% dans la modalité AC. La troisième famille, les Coccinellidae, est majoritairement observée en AFR (50%). Au sein de l'ordre Dermaptera, les Forficulidae sont majoritairement observés en AC. 65% des Syrphidae (Insecta : Diptera) ont été échantillonnés en AFR, le reste dans les deux autres modalités. Au sein de l'ordre Hemiptera, 3 familles d'intérêt sont présentes lors des battages, mais seulement 2 ont un effectif supérieur à 5 : les Anthocoridae et les Miridae. La modalité AC est celle dans laquelle le plus d'individus Anthocoridae ont été observés, ils sont très peu nombreux dans la modalité AFR. Les Miridae sont autant

présentes dans la modalité AC que dans la modalité AFIR (44%). Au sein de l'ordre Neuroptera une famille d'intérêt non identifiée est observée uniquement dans la modalité AC.

Distribution dans le temps des familles d'intérêts

Afin de mieux appréhender l'évolution des effectifs au cours de la saison, il a été choisi de regrouper les familles d'intérêt par ordre (ci-après « ordres d'intérêt », figure 33). Cela permet d'augmenter les effectifs, et de mieux visualiser les éventuelles différences entre modalités. Les ordres d'intérêt avec le plus d'individus sont les Coléoptera ($n_{\max}=29$), les Hemiptera ($n_{\max}=18$), les Mesostigmata ($n_{\max}=12$) et enfin les Diptera ($n_{\max}=11$). Les autres ordres présentent des effectifs maximaux inférieurs à 10.

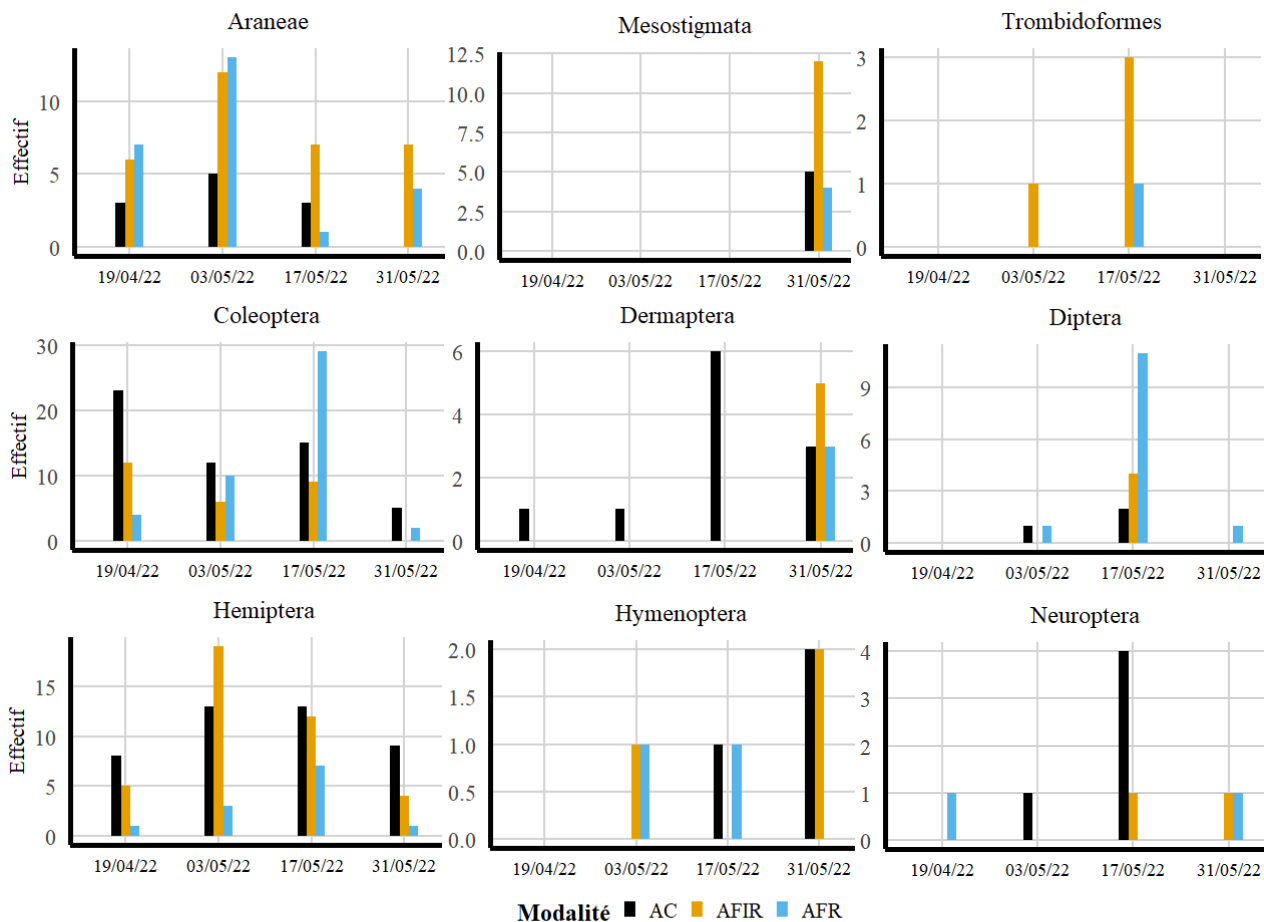


Figure 28 : Distribution dans le temps et par modalité d'étude des différentes familles d'intérêt regroupées par ordre échantillonnées dans les battages. Les effectifs par modalité correspondent à la somme des échantillonnages des 15 arbres suivis.

Les Araneae sont présents en AC du 19/04 au 17/04, avec un effectif variant de 3 à 5 individus. Elles sont présentes dans les modalités AFIR et AFR sur l'ensemble de la période d'échantillonnage, avec un pic le 03/05 ($n_{AFIR}=12$; $n_{AFR}=13$).

Les Phytoseiidae (Arachnida : Mesostigmata) sont échantillonnés pour la première fois le 31/05, et sont plus présents en AFIR que dans les deux autres modalités ($n_{AC}=5$; $n_{AFIR}=12$; $n_{AFR}=4$).

Les Coleoptera sont présents du 19/04 au 31/05 avec un effectif maximal le 17/05 et une majorité d'individus dans la modalité AFR ($n_{AFR}=29$), bien qu'ils soient aussi présents le 19/04, majoritairement en AC ($n_{AC}=23$).

Les Dermaptera (ici uniquement Forficulidae), sont présents en AC sur l'ensemble de la période, mais n'apparaissent dans l'échantillonnage des modalités AFIR et AFR qu'à la dernière date (31/05).

Les Syrphidae (Insecta : Diptera) sont surtout présentes le 17/05 et majoritairement en AFR ($n_{AFR}=11$, $n_{AC}=2$; $n_{AFIR}=4$).

Les individus Hemiptera sont présents dans toutes les modalités sur l'ensemble de la période d'étude. La modalité AFR semble être celle présentant le moins d'individus (de 1 à 5) en comparaison avec les modalités AC (de 8 à 13) et AFIR (de 4 à 18).

3.3. Ennemis naturels observés dans les transects

a) Classes observées et ordres d'intérêts

Les deux classes observées dans les transects sont (i) la classe Arachnida (n=93) et (ii) la classe Insecta (n=746) (annexe 17). Les inter-rangs des modalités AFIR et AFR ont plus d'individus de la classe Arachnida par rapport à ceux de la modalité AC (annexe 18). La période à laquelle le plus d'individus de cette classe ont été observés se situe entre fin avril ($n_{AFR}=26$; $n_{AFIR}=15$; $n_{AC}=5$) et mi-mai ($n_{AFR}=7$; $n_{AFIR}=15$; $n_{AC}=0$). Dans la classe Insecta, il n'y a pas de grandes différences entre les inter-rangs des différentes modalités (annexe 18), à l'exception du 13/05, date à laquelle le plus d'individus ont été observés ($n_{AFR}=66$; $n_{AFIR}=66$; $n_{AC}=112$).

Le seul ordre de la classe Arachnida observé est celui des Araneae. La distribution est donc la même que celle de la classe Arachnida. Dans la classe Insecta, 8 ordres ont été observés (annexe 17), dont 5 incluent des ennemis naturels des ravageurs étudiés : Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Hymenoptera et Neuroptera (annexe 18). Au sein même de ces ordres, seules certaines familles sont ennemis naturels des ravageurs étudiés.

b) Familles d'intérêts

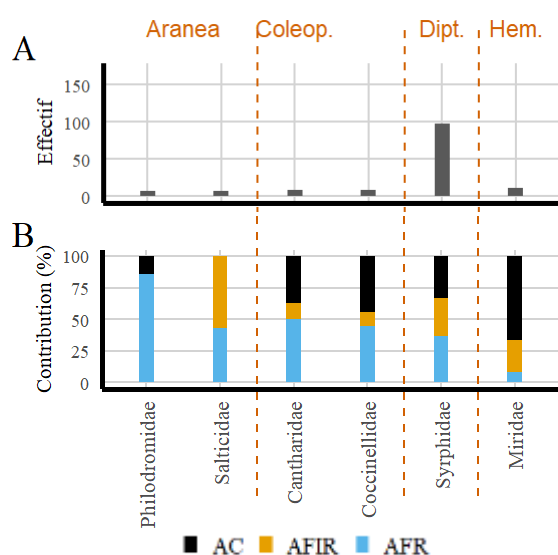


Figure 29 : (A) Effectif des familles d'intérêts observées et (B) contribution de chaque modalité dans cet effectif (%). Coleop. : Coleoptera ; Dipt. : Diptera ; Hem. : Hemiptera

Au total, 30 familles différentes ont été observées (annexe 19). Dans la suite nous allons nous concentrer sur les familles dont certaines espèces sont prédatrices ou parasitoïdes des ravageurs étudiés (« familles d'intérêt », figure 27 ; cf. §1.4, tableau1).

Seules 6 de ces familles ont des ennemis naturels du puceron ou du carpocapse. 2 familles sont de l'ordre des araignées (Arachnida : Araneae) ; 2 de l'ordre des coléoptères (Insecta : Coleoptera) ; 1 de l'ordre des diptères (Insecta : Diptera) et 1 de l'ordre des hémiptères (Insecta : Hemiptera). Les 2 familles d'Araneae sont surtout présentes dans les modalités AFR et AFIR. Les Cantharidae et Coccinellidae le sont surtout dans les modalités AC et AFR. Les Syrphidae sont répartis de manière homogène entre les trois modalités et les Miridae sont surtout présentes dans la modalité AC.

La plupart des effectifs des familles d'intérêts étant faibles, les résultats sont présentés ci-dessous en regroupant par ordre ces familles.

Ordre Araneae

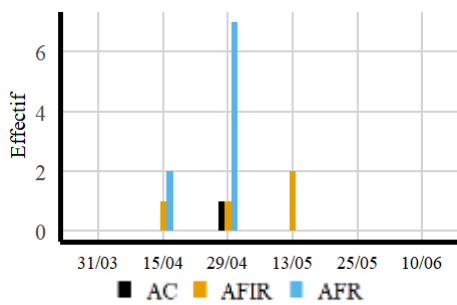


Figure 30 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Araneae au cours des transects en 2022.

Les deux seules familles d'intérêt dans l'ordre Araneae sont les Philodromidae et Salticidae. Elles ne sont observées qu'à une date en AC (29/04 ; n=1, figure 28).

Elles sont plus abondantes en AFR (n=9) qu'en AFIR (n=4), mais sont observées à deux dates (15/04 ; 29/04) contre trois en AFIR (15/04 ; 29/04 ; 13/05).

Ordre Coleoptera

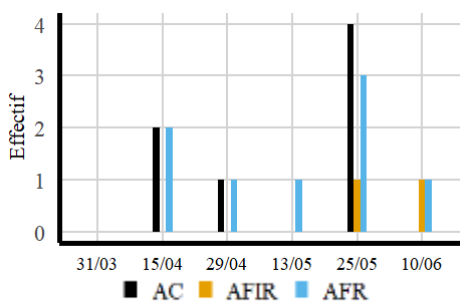


Figure 31 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Coleoptera observés dans les transects en 2022.

Les deux seules familles d'intérêt observées de l'ordre Coleoptera sont les Cantharidae et les Coccinellidae.

Dans la modalité AFIR, seulement 2 individus d'intérêt de l'ordre des Coleoptera ont été observés (25/05 et 10/06 ; figure 29). Ces individus sont présents en AFR du 15/04 au 10/06, avec jusqu'à trois individus observés (25/05). En AC, ils ont été observés de manière intermittente le 15/04, le 29/04 et le 25/05.

Malgré le regroupement en ordre, les effectifs restent faibles, et ne permet pas de conclure sur une grande tendance entre les trois modalités étudiées.

Ordre Diptera

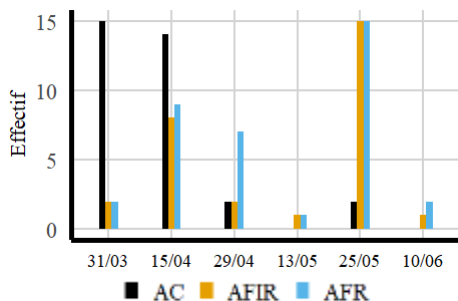


Figure 32 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Diptera observés dans les transects en 2022.

La seule famille d'intérêt observée de cet ordre est celle des Syrphidae.

En AC, ils sont plus abondants au début de la période ($n_{AC}=\pm 15$) puis leur effectif chute fin avril ($n_{AC}=\pm 2$, figure 30). En AFIR et AFR, il apparaît un premier pic mi-avril ($n_{AFIR}=8$) puis un second plus important fin mai ($n_{AFIR}=15$).

Ordre Hemiptera

La seule famille d'intérêt observée de cet ordre est celle des Miridae (figure 31). Les individus de cette famille sont observés du 15/04 au 25/05. Ils semblent être plus présents dans en AC que dans les deux autres modalités, mais les faibles effectifs observés ne permettent pas vraiment de conclure.

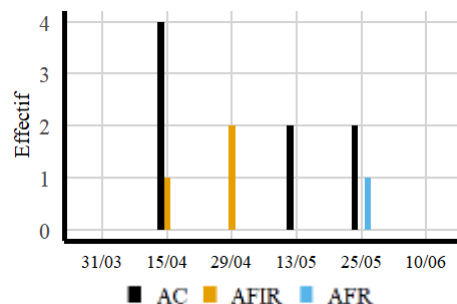


Figure 33 : Evolution dans le temps et selon la modalité agroforestière des effectifs cumulés des familles d'intérêt de l'ordre Hemiptera observés dans les transects en 2022.

3.4. Auxiliaires observés dans les assiettes colorées

Lors de l'échantillonnage effectué grâce aux assiettes colorées, 181 arthropodes répartis dans 4 classes différentes ont été échantillonnés : (i) Arachnida (n=14), (ii) Collembola (n=1), (iii) Insecta (n=164) et (iv) Malacostraca (annexe 23). Seules deux de ces classes comportent des espèces d'intérêt : les classes Arachnida et Insecta. Au sein de la première, un seul ordre a été observé, celui des Araneae (annexe 24).

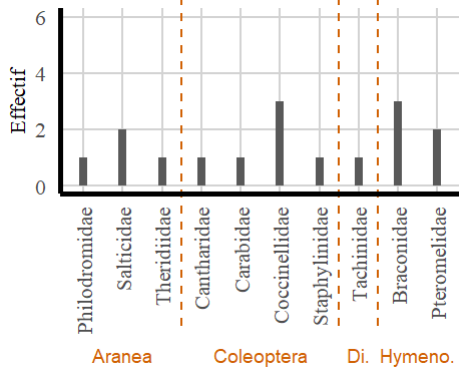


Figure 34 : Effectif des différentes familles d'intérêts échantillonnées dans les dispositifs d'assiettes colorées.

Di. : Diptera ; Hymeno. : Hymenoptera

Au total, 7 ordres différents de la classe Insecta ont été échantillonnés dont 4 d'intérêt pour notre sujet : (i) Coleoptera (n=32), (ii) Diptera (n=33), (iii) Hemiptera (n=61) et (iv) Hymenoptera (n=25).

Parmi les 55 familles échantillonnées (annexe 25), seules 10 sont des familles d'intérêt (figure 34) : 3 de l'ordre Aranea, 4 de l'ordre Coleoptera, 1 de l'ordre Diptera et 2 de l'ordre Hymenoptera. Parmi elles, deux n'avaient pas été observées dans les autres échantillonnages : les Carabidae (Insecta : Coleoptera) et les Tachinidae (Insecta : Tachinidae). Les effectifs de ces familles restent faibles (inférieurs à 5), il n'est pas possible de comparer leur abondance.

3.5. Auxiliaires observés dans les pots barber

Dans les pots barber, 5 classes différentes ont été observées : (i) Arachnida (n=205) ; (ii) Collembola (n=4) ; (iii) Diplopoda (n=2) ; (iv) Insecta (589) ; (v) Malacostraca (n=18) (annexe 24). Les classes contenant des familles d'intérêt sont les classes Arachnida et Insecta. Au sein de la première classe, un seul ordre comprenant des familles d'intérêt a été échantillonné (Araneae) (annexe 25). Au sein de la

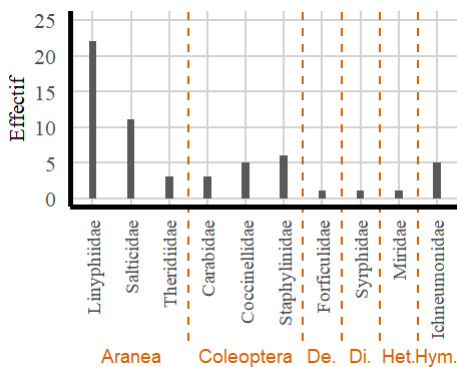


Figure 35 : Effectifs des différentes familles d'intérêt échantillonnées dans les pots Barber.

Di. : Diptera ; Hymeno. : Hymenoptera

classe Insecta ces ordres sont au nombre de 5 (Coleoptera, Dermaptera, Diptera, Heteroptera et Hymenoptera).

Au total, 10 familles d'intérêt ont été échantillonnées dans les pots Barber (figure 35).

Les 2 principales familles d'intérêt échantillonnées sont les Linyphiidae (n=22) et Salticidae (n=11). 3 familles ne sont représentées que par un seul individu : les Forficulidae, les Syrphidae et les Miridae. Les 5 autres familles ont un effectif compris entre 3 et 6. Parmi ces familles, deux n'avaient pas été observées dans les autres échantillonnages (hors assiettes) : les Carabidae et les Ichneumonidae.

En moyenne, les Salticidae sont plus présentes à l'extérieur du verger qu'à l'intérieur (figure 36), tout comme les Ichneumonidae, qui sont absentes du verger. Inversement, les Carabidae, Forficulidae, Syrphidae et Miridae sont absents des pots Barber situés à l'extérieur du verger.

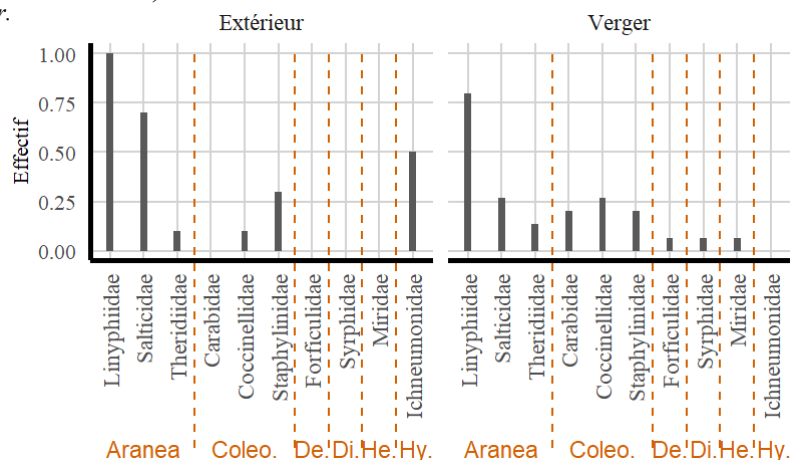


Figure 36 : Effectif moyen par pot Barber des différentes familles d'intérêt en fonction de la localisation des pots.

Coleo. : Coleoptera ; De. : Dermaptera ; Di. : Diptera ; He. : Heteroptera ; Hymeno. : Hymenoptera

Discussion et perspectives

1. Influence directe ou indirecte des noyers sur les dynamiques des bio-agresseurs et leurs ennemis naturels.

1.1. Des dynamiques différentes des pucerons entre 2021 et 2022 : en lien avec des températures plus élevées en 2022 ?

L'incidence et la dynamique des foyers des deux ravageurs diffèrent entre 2021 et 2022. Les incidences maximales des deux ravageurs sont atteintes une semaine avant en 2022 par rapport à 2021, et atteignent des valeurs plus élevées en 2022 : +10% pour le puceron cendré toutes modalités confondues et jusqu'à +22% en AC ; de +10 à 18% en fonction des modalités pour le puceron vert. Concernant les foyers, le nombre maximal de pucerons pour trois rameaux suivis est atteint une à deux semaines plus tôt en 2022 qu'en 2021, il est également plus élevé en 2022 dans la modalité AC (+90 pucerons en moyenne au pic). Ces différences pourraient s'expliquer par un différentiel de température entre 2021 et 2022. L'optimum de température pour la reproduction de *D. plantaginea* et *d'A. pomi* est de 15°C et 20°C respectivement (Graf *et al.*, 1985). Or, la température moyenne journalière dépasse les 20°C dès le 7 mai en 2022 et seulement à partir du 5 juin en 2021.

La hausse de température en 2022 a aussi un impact sur le carpocapse des pommes et des poires : selon la modélisation des courbes d'éclosions des trois générations du carpocapse (Ctifl, Sud-Expé), l'année 2022 est très en avance et cela pourrait avoir comme conséquence l'apparition d'une quatrième génération.

1.2. Une incidence et une abondance de *D. plantaginea* qui diffèrent entre les modalités d'étude

En 2021 et 2022, l'incidence du puceron cendré est plus élevée dans la modalité AC. En 2021, au pic d'infestation, cette incidence est environ 30% supérieure dans la modalité AC par rapport à la modalité AFR. En 2022, l'incidence du puceron cendré au pic d'infestation dans la modalité AC est supérieure d'environ 45% par rapport aux modalités AFIR et AFR. L'abondance du puceron cendré dans les foyers est aussi plus grande dans la modalité AC que dans les autres. En 2021, l'abondance maximale de ce puceron au sein de trois rameaux dans la modalité AC est supérieure de 44 à 90 individus. En 2022, la modalité AC a entre 180 et 220 pucerons de plus que dans les autres modalités (AFIR et AFR), au moment du pic d'abondance.

La plus faible infestation du puceron cendré dans les modalités agroforestières peut être expliquée par le fait que la proximité des noyers entraîne la formation d'un microclimat au niveau des pommiers (Gosme *et al.*, 2016 ; Pitchers, 2021). Ce microclimat se caractérise notamment par une température plus basse et une hygrométrie plus grande, qui sont susceptibles d'influencer directement le développement des bio-agresseurs et de la faune auxiliaire, de façon positive ou négative. La température seuil de développement et la température optimale de reproduction de *D. plantaginea* sont de 4,5°C et 15°C respectivement (Graf *et al.*, 1985). Il est possible d'imaginer que ces températures sont atteintes plus tard dans les modalités agroforestières (AFIR et AFR) par rapport à la modalité témoin (AC), ce qui entraîne un développement plus précoce dans cette dernière et donc un potentiel d'infestation plus grand car la période de croissance des foyers est plus longue.

La présence des noyers peut aussi avoir un effet indirect sur la l'infestation et l'abondance du puceron cendré. En 2022, un stage en parallèle de celui-ci, sur la même parcelle, et sur les mêmes pommiers, a montré une différence significative, entre les modalités, de la surface de section de tronc, un des indicateurs de la vigueur de l'arbre. En AC, cet indicateur est supérieur en AC par rapport à AFIR, et en AFIR par rapport à AFR. Bien que d'autres indicateurs soient nécessaires pour conclure sur une différence significative de vigueur entre les arbres des différentes modalités, il est possible d'émettre cette hypothèse à partir de la mesure de sections des troncs. Le puceron cendré colonise principalement les jeunes pousses en croissance et Rousselin *et al.* (2017) ont montré que l'infestation de *D. plantaginea*

est en accord avec l'hypothèse que la vigueur de la plante est positivement corrélée avec la présence et l'abondance de *D. plantaginea* (« Plant Vigour Hypothesis » ; Price, 1991). Il semblerait donc les noyers exerce une influence sur la vigueur des pommiers, ayant elle-même une influence sur l'infestation et l'abondance du puceron cendré. Afin de valider cette hypothèse, il serait nécessaire de relever la vigueur des pousses en croissance, car l'abondance de *D. plantaginea* est reliée à la vigueur de l'arbre mais aussi à la vigueur des pousses en croissance (Rousselin *et al.*, 2017).

Le potentiel de prédation de la parcelle, étudié via les résultats des dispositifs de cartes de prédation, n'ont pas montré de différence entre les modalités, ce qui laisse penser que ces différences ne sont pas reliées à une meilleure régulation. Cependant, les pucerons déposés via les cartes étaient des pucerons du pois, morts, ayant été congelés pendant plusieurs jours et englués sur du papier de verre. Bien que cela soit un indicateur de prédation, il semble probable que certains prédateurs et/ parasitoïdes n'aient pas été attirés ou capables d'exercer une influence (ex : larves de syrphé).

En résumé, le fait que l'incidence et l'abondance du puceron cendré soient plus réduites en contexte agroforestier pourrait être lié à : (i) un effet direct des noyers via l'établissement d'un microclimat défavorable, au moins dans un premier temps, à son développement et/ou (ii) un effet indirect des noyers, qui, par compétition, diminueraient la vigueur des pommiers influençant négativement la présence et l'abondance du puceron. L'hypothèse selon laquelle les populations de *D. plantaginea* ont pu être régulées par leurs ennemis naturels est discutée plus en détails au paragraphe I.5).

1.3. L'incidence du puceron vert : une occupation des modalités complémentaire avec celle du puceron cendré ?

Concernant l'incidence du puceron vert, en 2021 elle était plus importante dans la modalité AFR par rapport à la modalité AC : + 13,5% en moyenne durant le pic d'infestation. En 2022, aucune différence entre les modalités n'a été statistiquement identifiée. L'hypothèse selon laquelle le développement du puceron vert serait privilégié dans la modalité AFR n'est pas cohérente avec l'hypothèse de formation d'un microclimat en contexte agroforestier et les besoins – au moins en température – du puceron vert. En effet, comme déjà évoqué, le microclimat formé par les arbres de haut jet se caractérise notamment par une température plus basse, or la température seuil de développement et la température optimale de reproduction du puceron vert sont de 5,9°C et 20°C respectivement (Graf *et al.*, 1985). De ce fait, les températures plus basses caractérisant le contexte agroforestier ne semblent pas un critère favorable au développement du puceron vert. De plus, si ces températures étaient atteintes de manière anticipée dans la modalité AFR, le développement du puceron cendré devrait également y être privilégié (ses mêmes températures indicatrices étant inférieures). De plus, en 2021, le nombre de pucerons verts par foyer (résultats non présentés) n'est pas différent entre les modalités d'étude, ce qui montre bien que le puceron vert ne semble pas mieux se développer dans le contexte agroforestier.

En revanche, une hypothèse basée sur (i) les températures de développement et de reproduction plus hautes que pour le puceron cendré et (ii) la mobilité accrue du puceron vert via sa forme ailée à partir du mois d'avril permettant sa dispersion (Trillot *et al.*, 2002) pourrait apporter une explication sur cette différence entre les pucerons vert et cendré. Au vu des températures de développement et de reproduction du puceron cendré, son apparition et son développement est plus précoce que celui du puceron vert, comme le montrent les résultats de 2021 et 2022. De plus, il est plus présent dans la modalité témoin que dans les modalités agroforestières. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse qu'il y ait une compétition qui se crée entre les deux pucerons lors du développement d'*A.pomi* dans la modalité AC. Cette compétition entraînerait la dispersion du puceron vert dans les autres modalités : en 2021, la modalité AFR est la moins infestée par le puceron cendré mais la plus infestée par le puceron vert. Simon *et al.* (2006) ont montré une différence similaire, sur plusieurs années, entre les infestations des pucerons vert et cendré : les arbres présentant plus de pucerons cendrés présentaient moins de pucerons verts et inversement, les auteurs l'expliquant également par l'hypothèse d'une compétition en ressources.

Une autre hypothèse est basée sur le caractère ailé du puceron vert. Bien que la modalité AC atteigne plus tôt des températures plus adéquates pour le développement des pucerons, les températures deviennent très élevées assez tôt dans la saison. Il est possible que la dispersion des pucerons verts soit aussi liée à la recherche de températures plus clémentes une fois un certain seuil dépassé. Arbab et al. (2006) rapportent que la mortalité du puceron vert est maximale à partir de 34°C, ce qui laisse penser que dès 30°C les pucerons verts auront tendance à migrer vers des températures plus douces. Cette dispersion ne peut pas se faire par le puceron cendré car la forme ailée n'apparaît qu'à la fin de la période d'infestation dans le but unique de migrer sur l'hôte secondaire, le plantain.

Il semble donc que l'incidence du puceron vert pourrait être liée à plusieurs phénomènes : (i) son développement se fait plus tardivement que celui du puceron cendré et cela mène alors à une compétition pour la ressources entre les deux, le puceron vert étant ailé, il se disperse ; (ii) son caractère ailé lui permet de fuir des conditions de températures devenues trop extrêmes en verger seul et se réfugie alors en verger agroforestier avec des températures plus clémentes (microclimat).

Cependant cette différence entre les modalités dans l'infestation du puceron vert n'était pas significative en 2022, bien que la même tendance se dessine. Il est possible que l'infestation de cette année était telle (entre 38 et 43% d'incidence maximale selon les modalités) que le puceron vert ne s'est pas dispersé plus globalement, indépendamment du niveau d'infestation du puceron cendré. En effet, nous avons pu constater un certain nombre de pousses de l'année infestée à la fois par le puceron cendré et le puceron vert, notamment dans la modalité AC. Il aurait été intéressant de noter de manière spécifique ces pousses doublement infestées et de comparer l'année 2021 et 2022.

1.4. L'influence du contexte agroforestier sur l'incidence de *C. pomonella*

En 2021, l'incidence du carpocapse est plus élevée dans la modalité AC par rapport à la modalité AFR : + 3% et 9% en fonction du stade d'éclosion de la G1. En 2022, l'incidence de ce même ravageur est plus élevée dans la modalité AC que dans les modalités AFIR et AFR : +6% (stade '50%G1') et +5% (stade '100%G1') par rapport à la modalité AFIR ; + 8% (stade '50%G1') et +5% (stade '100%G1') par rapport à la modalité AFR. Il n'est toutefois pas possible de comparer l'année 2021 avec l'année 2022 en raison (i) du fait que les protocoles utilisés pour évaluer l'incidence étaient différents et (ii) du fait de plusieurs traitements contre le carpocapse en 2022. De plus, au sein d'une même année, les deux sessions d'étude ne peuvent pas être comparées car l'éclaircissage ayant eu lieu entre les deux comptages, la de la population échantillonnée n'est pas la même.

Au moment de l'émergence du carpocapse, l'individu est sous la forme d'imago, donc volant et à même de se disperser entre modalité. A l'échelle d'un verger, il semble donc difficile que les noyers affectent directement les dégâts de la G1. Cependant, il est possible que le contexte agroforestier favorise les prédateurs et/ou parasitoïdes du carpocapse, ayant alors un impact sur la population de carpocapse. Bien que le potentiel de prédation évalué via les cartes de prédation ne montre pas de différences entre les modalités étudiées, ces résultats portent uniquement sur les œufs de carpocapse, or un certain nombre de prédateurs et de parasitoïdes ont un impact sur les chenilles (*cf. Discussion et perspectives, §I.5*). Toutefois, le lien entre la présence d'ennemis naturels du carpocapse observés dans les transects et battages et sa régulation, une année donnée, est à établir avec précaution car ces échantillonnages ne correspondent pas à la période d'émergence et d'activité du carpocapse. Par ailleurs, la régulation du carpocapse ne se fait pas uniquement via les arthropodes et la macrofaune a un rôle majeur (oiseaux et chauves-souris). Le suivi de cette dernière pourrait être intéressante afin de voir si le contexte agroforestier favorise leur présence et leur rôle dans la régulation de *C. pomonella*.

En 2020, dans une stratégie de lutte biologique par introduction-acclimation contre le carpocapse, des lâchers de *Mastrus ridens* (Hymenoptera : Ichneumonidae) ont été effectués. *M. ridens* est un hyménoptère parasitoïde spécialiste du carpocapse utilisé dans des vergers de pommier pour lutter contre ce dernier (Mills, 2005 ; Tortosa *et al.*, 2014). A ce jour un suivi est en cours, cependant des relevés de larves ont été effectués afin de tester la présence de ce parasitoïde ainsi que son action sur *C. pomonella*. Si sa présence est confirmée il serait intéressant de comparer les taux de parasitisme entre les chenilles échantillonnées dans les différentes modalités.

1.5. Une influence mitigée du contexte agroforestier sur les ennemis naturels des ravageurs étudiés

Comme évoqué précédemment, le microclimat induit par le contexte agroforestier peut exercer une influence sur les ennemis naturels des ravageurs. Bien qu'au sein des foyers aucune différence n'ait été démontrée, les résultats des battages montrent une différence, pour certaines familles, entre les modalités. Dans les battages, certaines familles d'intérêt semblent plus présentes au sein des modalités agroforestières (AFIR et/ou AFR), comme des familles d'intérêt de l'ordre Araneae (AFIR et AFR), les Phytoseiidae (AFIR), les Anytidae (AFIR) ou encore les Syrphidae (AFR). Cette préférence n'est pas valable pour tous les ennemis naturels du puceron, les Forficulidae sont plus présents dans la modalité témoin (AC), et les familles d'intérêts observées de l'ordre Hemiptera – essentiellement la famille des Miridae – sont plus présentes dans les modalités AC et AFIR.

L'observation des familles d'intérêt d'Araneae dans les transects confirme la tendance de ces dernières à préférer le contexte agroforestier, tout particulièrement dans la modalité AFR. Cette abondance plus grande dans un contexte agroforestier peut-être dû au fait que les noyers offrent un microclimat plus favorable (ex. : rayonnement plus faible) mais cela peut aussi être lié à l'habitat additionnel constitué par ces arbres, qui est à l'origine d'une diversité et d'une abondance accrues chez les araignées (Dennis et al., 1998), ce qui inclut potentiellement des espèces prédatrices à la fois du puceron et du carpocapse. Toutefois, Dib et al. (2010) ont montré que l'effet des araignées sur les individus *D. plantaginea* aptères, individus présents durant toute la période d'infestation, n'était pas significatif. Concernant le puceron, toutes les araignées peuvent être prédatrices, indépendamment de leur stratégie de chasse et de leur localisation (Boreau de Roince et al., 2013). Cependant, les araignées étant également des prédateurs intraguilles (Hodge, 1999), leur présence n'a pas toujours un impact positif dans la régulation des bio-agresseurs. Pour la régulation de *D. plantaginea*, leur rôle semble cependant essentiel tôt dans la saison. Certaines araignées restent actives en hiver et sont à la recherche de proies quand les températures sont encore basses (Korenko et al., 2010). Boreau de Roince et al. (2013) ont montré que les araignées ont un rôle essentiel à ce moment-là dans la prédation du puceron cendré (œufs et fondatrices). Certaines araignées ont une température seuil à partir de laquelle elles vont avoir une activité de prédation inférieure à la température de développement des deux pucerons étudiés (Korenko et al., 2010). De ce fait, leur présence dans les vergers tôt dans la saison peut avoir un impact important dans la régulation de *D. plantaginea* et *A. pomi*. Les araignées tisseuses peuvent également avoir un rôle clé dans la régulation de *D. plantaginea* : Cahenzli et al. (2017) ont montré qu'une augmentation de la superficie des toiles d'Araneidae et de Tetragnathidae en automne réduisait le nombre de fondatrices au printemps mais aussi la proportion de fruits endommagés. Il est probable que le rôle des araignées tisseuses soit aussi important dans la régulation du puceron vert lors des vols de dispersion. Concernant les araignées chassant au sol, les Lycosidae peuvent être des prédatrices de pucerons dans les champs de blé (Nyffeler et Benz, 1988), et il est donc possible que celles-ci aient un rôle dans la prédation de pucerons dans les vergers, notamment après une pluie, si certains pucerons tombent de l'arbre. Les Gnaphosidae, qui chassent aussi au sol, ont un rôle important dans la prédation des œufs de carpocapse (Marliac et al., 2015). Dans les pots Barber installés dans le verger, les Lycosidae et Gnaphosidae (résultats non présentés) étaient plus abondantes dans les inter-rangs des modalités agroforestières (8 par pot) que dans la modalité conventionnelle (4 par pot). Les Lycosidae étaient les plus abondantes (80%).

Il apparait donc que le rôle majeur des araignées dans la régulation du puceron cendré réside dans la prédation des œufs et des fondatrices à la fin hiver / début printemps ainsi qu'au moment du vol retour en automne. Il serait judicieux d'étudier cette population durant ces moments clés dans les différentes modalités afin de voir si le contexte agroforestier influe sur ces populations.

Concernant les Syrphidae, dans les battages les larves étaient plus présentes dans les arbres dans la modalité AFR. Bien que le pic de présence soit à la fin du pic d'abondance des foyers de pucerons, les larves échantillonnées étaient très probablement âgées au vu de leur taille. Au premier stade larvaire, les larves de syrphes sont difficiles à capturer par battage car très petites (quelques millimètres) et peuvent donc mieux s'accrocher aux feuilles mais aussi se protéger dans les enroulements des feuilles, nombreux

en présence de pucerons cendrés. Ainsi, il est possible de penser que les larves étaient déjà présentes 10 à 15 jours avant cette date (le développement larvaire durant 2 à 3 semaines). Dans les transects, les Syrphidae observés étaient, dans un premier temps, majoritairement présents dans la modalité AC (jusque mi-avril) puis à la fin mai les observations ont majoritairement été faites dans les modalités AFIR et AFR. Les adultes observés étaient dans la majorité des cas les mêmes espèces que les larves échantillonnées (*Episyrphus balteatus* et *Epistrophe eligans*). Leur présence au début de la période d'observation dans la modalité témoin peut être liée à (i) une ressource alimentaire plus abondante dans la modalité AC et (ii) au fait qu'il y ait plus de pucerons dans la modalité AC que dans les autres, poussant les femelles à pondre dans ces pommiers. Dans la plupart des cas les inter-rangs des pommiers dans la modalité AC présentaient plus de vestiges des anciennes bandes fleuries que dans les modalités agroforestières, appuyant donc l'hypothèse liée à une ressource alimentaire plus importante. Cette présence accrue des larves dans les modalités AFIR et surtout AFR pourrait aussi être expliquée par le microclimat induit par la présence des noyers qui attirerait plus les adultes. Une hypothèse qui pourrait expliquer la présence d'adultes en début de saison dans la modalité AC sans y avoir échantillonné de larves est le fait que les larves ont pu mourir à cause de la température trop élevée. Par exemple, les larves d'*Episyrphus balteatus* ont une mortalité élevée à partir de 25°C (Noël *et al.*, 2022) et Hart *et al.* (1997) ont montré qu'aucune larve ne survivait au-delà du deuxième stade à partir de 30°C. En 2022, dès les premiers jours de mai, la température a dépassé les 30°C, et cela pendant plusieurs heures par jour (6 à 10 heures) et cette mortalité a été constatée dans certains foyers étudiés.

Il semble donc que le contexte agroforestier influence dans un certaine mesure la présence des Syrphidae. En cas de fortes chaleurs les adultes préféreraient des températures plus douces procurées par le microclimat généré par l'agroforesterie. Ce qui pourrait alors favoriser leur ponte à cet endroit. Les larves quant à elle aurait y une probabilité de survie plus élevée.

La présence accrue des Forficulidae dans la modalité AC peut être expliquée par (i) une abondance de proies plus élevée et (ii) leur capacité à s'abriter. En effet, contrairement aux larves de Syrphidae, les Forficulidae ont la capacité de se cacher dans la litière du sol en cas de fortes chaleurs, ce qui peut les protéger. Il ne semble pas que la présence des Forficulidae ait eu un impact majeur sur la prédation du carpocapse car l'incidence de ce dernier dans la modalité AC y est supérieure.

En ce qui concerne les Miridae, toutes les espèces de cette famille ne sont pas prédatrices et un bon nombre d'entre elles sont même phytophages. La distinction des espèces n'ayant pas été faite dans cette étude en raison de la complexité de l'identification, il n'est pas possible de conclure sur leur rôle dans la régulation des ravageurs.

Plus généralement, il est difficile de conclure sur le rôle global de ces ennemis naturels dans notre contexte car bien qu'entre les modalités les différences de certains ravageurs sont semblables à l'incidence et l'abondance du puceron cendré, il ne semble pas avoir de différences similaires pour le puceron vert.

2. Les bandes enherbées et fleuries, à la jonction entre les pommiers et les infrastructures agroécologiques périphériques

En 2022, les BE et BF, bien qu'incomplètes, ont sûrement été source de nourriture pour un bon nombre d'espèces observées. Sur la flore spontanée mêlée aux quelques espèces restantes initialement semées des BF, il a été observé de nombreux de pollinisateurs, ennemis naturels (araignées, syrphes, coccinelles, etc.) mais aussi des proies alternatives pour ces derniers (pucerons, divers coléoptères, etc.). Le développement des BF et BE est également visuellement impactées par la présence des noyers (compétition lumineuse, hydrique, etc.) : elles étaient moins développées en contexte agroforestier que dans la modalité témoin, ce qui a pu avoir un impact sur certains arthropodes. A l'inverse, dans les observations sur les transects, il a été constaté que certains ennemis naturels étaient présents préférentiellement dans les inter-rangs des pommiers en agroforesterie, tout au long de la période d'étude (araignées) ou sur une période plus courte (syrphes). Il serait intéressant de mettre en

place une BF composée de plantes tolérantes au contexte agroforestier, tout en étant attractives pour les ennemis naturels, notamment les syrphes. Sa composition doit aussi être réfléchi afin d'avoir une succession de floraison de mars/avril à juin.

Les deux autres méthodes n'ont pas permis de bien caractériser l'effet des IAE sur la régulation biologique : les assiettes colorées ne permet pas de se rendre compte de la diversité des individus présents sur la parcelle (Robert, 2021 ; communications personnelles) mais ont permis de constater la présence d'hyménoptères parasitoïdes de familles d'intérêt dans la régulation des ravageurs étudiés ; les pots Barber permettent d'avoir une idée de la richesse spécifique d'un milieu (Robert et Tosser, 2015).

3. Limites de l'expérimentation

3.1. Limites internes au dispositif

La mesure de l'effet du contexte agroforestier dans le cadre de notre étude peut être limitée par le dispositif lui-même. La plantation des noyers est très antérieure à celle du verger, et leur distribution actuelle est héritée de l'historique de cette parcelle. De plus, la mise en place du verger d'étude ainsi que le choix des arbres suivis ont été faits pour des objectifs autres que le suivis des régulations biologiques. En conséquence, le plan d'échantillonnage des arbres n'est pas homogène dans l'espace : (i) tous les pommiers AC se retrouvent à l'est du verger ; (ii) 4 pommiers en AFR sont à l'ouest et (iii) 9 pommiers en AFIR sont également à l'ouest. Ces pommiers à l'ouest de la parcelle sont bien plus proches du Lez et du Lirou, deux cours d'eau qui peuvent conférer un microclimat particulier mais sans lien avec le contexte agroforestier. Sans le même nombre d'arbres (AC, AFIR et AFR) dans cette zone, il est impossible de constater l'effet additionnel de la proximité de ces cours d'eau.

De plus, la distance entre les différentes modalités est trop faible pour établir une différence avérée des dynamiques étudiées, surtout lorsqu'il s'agit d'organismes ayant des distances de déplacement aussi grandes, comme les syrphes ou les coccinelles. Il serait donc judicieux de travailler sur des modalités éloignées, afin d'obtenir des modalités d'étude plus ou moins isolées des autres.

3.2. Influence potentielle des alentours du verger

Avec les deux méthodes de piégeage utilisées (assiettes colorée et pots Barber) nous avons été confrontés à plusieurs limites : (i) la période d'échantillonnage s'est faite pendant une période durant laquelle les températures étaient très élevées ; (ii) il n'y a eu qu'une seule période de piégeage et (iii) ils n'étaient pas forcément adaptés à notre étude.

Afin de voir la participation des IAE environnantes, notamment des haies, dans la présence d'ennemis naturels dans le verger, il aurait été plus judicieux d'utiliser des pièges cornés dirigés vers les haies et/ou vers le verger afin d'étudier les mouvements des populations cibles. Il serait aussi intéressant de faire ce genre de relevé à différents moments dans la saison, notamment au début de l'infestation afin d'évaluer une présence plus précoce d'ennemis naturels grâce à la présence d'IAE et non grâce au contexte agroforestier. Les pots Barber sont utiles pour les invertébrés du sol, mais au vu du rôle précoce des araignées, il serait intéressant de faire ces relevés à la fin hiver – début printemps.

Comme déjà évoqué, le verger est entouré d'IAE plus ou moins diversifiées, ce qui a été réfléchi de manière à maximiser les différents services mais qui peut biaiser l'évaluation de l'impact spécifique du contexte agroforestier sur les arthropodes étudiés (Marshall *et al.*, 2003 ; Holland *et al.*, 2017). Les IAE environnantes peuvent fournir des ressources aux ennemis naturels étudiés (Landis *et al.*, 2000). Cette fourniture peut être positive ou négative : elle peut à la fois changer la dynamique temporelle des ennemis naturels (Welch *et al.*, 2014) et favoriser leur présence en début d'infestation afin de favoriser une meilleure régulation ; elle peut aussi fournir des proies alternatives détournant les ennemis naturels des ravageurs présents dans la parcelle agricole (Koss et Snyder, 2005) ou même favoriser la prédation intra-gilde (Straub *et al.*, 2007). Ainsi, les effets observés dans notre expérimentation ont pu être confondus entre ceux liés au contexte agroforestier et ceux liés aux IAE environnantes. La matrice paysagère est aussi susceptible d'exercer une influence sur les mécanismes de régulation observés, ayant

donc la même conséquence que les IAE aux alentours (Pelosi *et al.*, 2010). En effet, jusqu'à environ 30% de la communauté d'arthropodes peut être expliquée par l'environnement local et régional du verger (Debras *et al.*, 2006).

Dans l'idéal, afin d'évaluer l'impact de l'agroforesterie en contrôlant les effets des IAE et du paysage, ces suivis devraient être faits dans différents vergers, avec des contextes structuraux et paysagers différents.

3.3. Limites communes aux différents suivis

Comme évoqué précédemment, le microclimat induit par la présence des noyers n'a pas été suivi cette année. Il aurait été intéressant, pendant toute la période de suivi, d'avoir différentes données (températures dans les trois modalités, hygrométrie, etc.) et de les analyser conjointement avec les différents processus suivis.

D'autres facteurs, non suivis dans ce stage, peuvent jouer un rôle important dans le processus d'infestation et de régulation. L'architecture et la vigueur du pommier peuvent influencer ces mécanismes (Simon, 2012) et les noyers, par la mise en place d'un microclimat, peuvent influencer le comportement et la vigueur des arbres (Pitchers, 2021). Certaines mesures ont été faites cette année via un autre stage, il serait intéressant de mutualiser les données des deux stages afin d'établir la présence ou non d'un lien entre des paramètres intrinsèques aux arbres (influencés ou non par l'agroforesterie) et les mécanismes d'infestation et de régulation des ravageurs suivis. La présence d'*A.pomi* est positivement corrélée à la croissance et longueur des pousses (Stoeckli *et al.*, 2008), et ce paramètre n'a pas été suivi.

Le fait que certains pommiers suivis soient à côté peut influencer l'infestation des pucerons mais aussi du carpocapse, les pommiers n'étant pas taillés, leurs branches et leurs fruits peuvent se toucher. Il serait judicieux de suivre des pommiers 'isolés', de façon à avoir au moins un pommier entre deux unités suivies.

Conclusion

L'effet du contexte agroforestier sur la régulation biologique de ravageurs a été étudié dans un système multi-strates basé sur des pommiers. Ce système est construit de manière à ce que les pommiers soient la strate intermédiaire, entre des noyers (strate supérieure) et une bande enherbée avec des vestiges de bande fleurie (strate basse).

La première hypothèse étudiée était basée sur le fait selon lequel les noyers auraient un effet direct ou indirect sur les dynamiques de trois ravageurs du pommier (puceron cendré, puceron vert et carpocapse) et sur leurs ennemis naturels. D'après les résultats de 2021 et 2022 il semblerait que le contexte agroforestier influence négativement la dynamique d'infestation du puceron cendré mais positivement, ou de manière neutre, celle du puceron vert. Cette même proximité des noyers influence, directement et/ou indirectement, négativement le carpocapse. Cependant, ces influences peuvent être mêlées au contexte spatial dans lequel est inséré le dispositif d'étude.

La seconde hypothèse concernait le rôle des IAE : il n'est pas possible de conclure si les différentes IAE du site hébergent des communautés d'arthropodes spécifiques, notamment à cause des dispositifs de suivis mis en place.

Globalement, l'étude est limitée par sa dimension spatiale. Les mécanismes et les interactions écologiques s'opèrent à une échelle spatiale plus grande que celle du site d'étude. Ainsi de nombreux mécanismes influençant potentiellement les résultats de l'étude n'ont pas pu être considérés ou l'ont été sans le savoir, d'autant plus que ces mécanismes sont encore peu renseignés.

L'environnement direct du dispositif et la matrice paysagère permettent la présence d'une diversité d'arthropodes au sein du verger étudié. Cette biodiversité assure le service de régulation biologique mais également les services de pollinisation et de recyclage des nutriments.

L'environnement direct du verger est également favorable à des ennemis-naturels non-arthropodes comme les oiseaux et les chiroptères dont la quantification de leur impact est délicate. C'est d'autant plus le cas dans cette étude qui ne possède pas de réel témoin, car les arbres considérés comme non agroforestiers peuvent quand même bénéficier de l'effet des noyers (abondance d'ennemis naturels volants donc qui se dispersent).

Il est toutefois nécessaire d'évaluer l'impact des IAE sur la présence et la dynamique d'ennemis naturels, ainsi que les ressources qu'elles peuvent fournir, afin de pouvoir au maximum séparer l'impact du contexte agroforestier de celui de la présence d'IAE.

Les résultats de l'étude doivent être nuancés au regard du dispositif expérimental de l'étude. Un suivi sur plusieurs années permet de voir une certaine tendance dans la dynamique des ravageurs, mais les mécanismes de régulation par les ennemis naturels sont complexes et ne peuvent donc pas être étudiés de manière précise dans un tel dispositif. Afin de confirmer les premiers résultats obtenus, il serait intéressant d'élargir ces suivis à d'autres vergers insérés dans des contextes structuraux et paysagers différents.

Retour d'expérience

Ces 6 mois de stage ont été l'occasion d'acquérir une riche expérience dans le monde de l'expérimentation et de l'arboriculture. J'ai eu la chance d'appréhender toute la complexité qu'un tel essai système représente, des contraintes liées à la recherche scientifique à celles liées à la production elle-même.

Au travers d'une étude avec un sujet de recherche très spécifique, j'ai pu acquérir des compétences que je considère inestimables pour la suite de mon parcours professionnel. Ce travail m'a permis de comprendre la rigueur et la prise de recul nécessaires et indispensables à chaque étape d'une expérimentation, de l'élaboration d'un protocole à l'analyse des données.

Il m'a aussi importé de participer, autant que possible, à la 'vie' du verger en discutant et en aidant les techniciens. Il me tient à cœur de ne jamais oublier, que sans eux, de telles expérimentations ne pourraient pas être mises en place.

Au cours de ces mois j'ai aussi eu la chance de participer à des réunions réunissant divers profils du monde de la recherche et du conseil en arboriculture. Ces diverses rencontres m'ont permis de prendre du recul et de réaffirmer le fait qu'à mon sens, une bonne expérimentation est une expérimentation qui essaye de répondre à des problématiques auxquelles les producteurs font face.

Durant ce stage, j'ai aussi réalisé que le rôle d'un ingénieur agronome en expérimentation est très varié. Nous devons faire face à des périodes très différentes avec une charge de travail qui peut s'avérer conséquente. En effet, je suis passée de plusieurs mois de terrain à mettre en œuvre des protocoles et récupérer des données à une autre période partagée entre de l'identification entomologique et du traitement et de l'analyse de données. Je remercie chaleureusement mon encadrant Benoît RICCI de m'avoir recentrée quelques fois face à mes nombreuses idées dans le but de rendre un travail, me semble-t-il, sérieux et de qualité. C'est une des pistes à améliorer dans mon approche du travail : essayer de mieux prévoir la charge de travail et le temps que cela implique afin de rester dans les attentes et/ou les dates buttoirs.

Chargée de mon expérience personnelle et des différents échanges enrichissants, avec mes encadrants, mes collègues stagiaires et les autres professionnels rencontrés durant ce stage, il m'apparaît clair aujourd'hui que le domaine de l'expérimentation est un domaine dans lequel je m'épanouirais professionnellement.

Bibliographie

- Agopian, J., Navarro, J.-M., Gac, A.-C., Lecluse, Y., Briand, M., Grenot, P., Gauduchon, P., Ruminy, P., Lebailly, P., Nadel, B., & Roulland, S. (2009). Agricultural pesticide exposure and the molecular connection to lymphomagenesis. *The Journal of Experimental Medicine*, 206(7), 1473-1483. <https://doi.org/10.1084/jem.20082842>
- Agreste - Conjoncture fruit. (s. d.). Surfaces et production de fruits (réalisées et prévues). *Agreste*. Consulté en juillet 2022, à l'adresse <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/FRUITSCONJ/detail/>
- Agreste - Statistique agricole annuelle. (s. d.). Cultures fruitières. *Agreste*. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/SAANR_FRUITS/detail/
- Agreste. (2021). Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018 - IFT et nombre de traitements. *Chiffres & Données*, n° 8, 1-11. [Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018IFT et nombre de traitements \(agriculture.gouv.fr\)](https://agreste.agriculture.gouv.fr/2018IFT-et-nombre-de-traitements-agriculture-gouv-fr)
- agricoles*, n°422, 3 p.
- Albert, L., Franck, P., Gilles, Y., & Plantegenest, M. (2017). Impact of Agroecological Infrastructures on the Dynamics of *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera : Aphididae) and Its Natural Enemies in Apple Orchards in Northwestern France. *Environmental Entomology*, 46(3), 528-537. <https://doi.org/10.1093/ec/nvx054>
- Albert, L., Gilles, Y., Plantegenest, M., & Franck, P. (2016). Régulation naturelle du puceron cendré en verger cidricole : Rôle des aménagements fleuris. *Pomme à cidre*, 41, 11-14.
- Altieri, M. A. (1987). *Agroecology: The Scientific Basis of Alternative Agriculture*. Westview Press, Boulder, p. 227
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6)
- Anderson, S., Udawatta, R., Seobi, T., & Garrett, H. (2008). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75, 5-16. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>
- Angeli, G., & Simoni, S. (2006). Apple cultivars acceptance by *Dysaphis plantaginea* Passerini (Homoptera : Aphididae). *Journal of Pest Science*, 79, 175-179. <https://doi.org/10.1007/s10340-006-0129-6>
- Arbab A., Kontodimas D.C., Sahragard A. (2006) Estimating Development of *Aphis pomi* (DeGeer) (Homoptera: Aphididae) Using Linear and Nonlinear Models. *Environmental Entomology*, Volume 35, Issue 5, 1 October 2006, Pages 1208–1215.
- Aubertot J.N., J.M. Barbier, A. Carpentier, J.J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, M. Voltz (éditeurs), 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.
- Auvil, T.D., Schmidt, T.R., Hanrahan, I., Castillo, F., McFerson, J.R. and Fazio, G. (2011). Evaluation of dwarfing rootstocks in washington apple replant sites. *Acta Hort.* 903, 265-271. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.33>

- Baker, A. C., & Turner, W. F. (1916). Morphology and biology of the green apple aphid. *Journal of Agricultural Research*, 58.
- Baldi, I., Mohammed-Brahim, B., Brochard, P., Dartigues, J. F., & Salamon, R. (1998). [Delayed health effects of pesticides : Review of current epidemiological knowledge]. *Revue D'epidemiologie Et De Sante Publique*, 46(2), 134-142.
- Bass, C., Denholm, I., Williamson, M. S., & Nauen, R. (2015). The global status of insect resistance to neonicotinoid insecticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.04.004>
- Beer, J., Bonnemann, A., Fassbender, H., Imbach, A., & Martel, I. (1990). Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 12, 229-249. <https://doi.org/10.1007/BF00137286>
- Berling, M., Blachere-Lopez, C., Soubabere, O., Lery, X., Bonhomme, A., Sauphanor, B., & Lopez-Ferber, M. (2009). *Cydia pomonella* granulovirus Genotypes Overcome Virus Resistance in the Codling Moth and Improve Virus Efficiency by Selection against Resistant Hosts. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(4), 925-930. <https://doi.org/10.1128/AEM.01998-08>
- Bianchi, F. j. j. a, Booij, C. j. h, & Tschamtker, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes : A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1595), 1715-1727. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3530>
- Bischoff, A., Pollier, A., Lamarre, E., Salvadori, O., Cortesero, A.-M., Le Ralec, A., Tricault, Y., & Jaloux, B. (2016). Effects of spontaneous field margin vegetation and surrounding landscape on Brassica oleracea crop herbivory. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.029>
- Bisseleua, H. B. D., Fotio, D., Yede, Missou, A. D., & Vidal, S. (2013). Shade Tree Diversity, Cocoa Pest Damage, Yield Compensating Inputs and Farmers' Net Returns in West Africa. *PLOS ONE*, 8(3), e56115. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056115>
- Blommers, L. H. M. (1999). Probing the natural control of rosy aphid *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae). *IOBC-WPRS, Bulletin 22(7)* : 53-56.
- Blommers, L., Helsen, H. H. M., & Vaal, F. (2004). Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and as migrant to apple. *Journal of Pest Science*, 77, 155-163. <https://doi.org/10.1007/s10340-004-0046-5>
- Boivin, T., & Sauphanor, B. B. (2007). Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes. *Innovations Agronomiques*, INRAE, 1, 23-27. hal-02653515
- Bommarco, Riccardo; Kleijn, David; Potts, Simon G. (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230–238. doi:10.1016/j.tree.2012.10.012
- Bonnemaison L. (1959). Le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* Pass.) – Morphologie et biologie – Méthodes de lutte. In : *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique*, Série C, *Epiphyties*, 10, p. 257-322.
- Bureau de Roince, C.; Lavigne, C.; Mandrin, J.-F.; Rollard, C.; Symondson, W.O.C. (2013). Prédation précoce des pucerons par les araignées actives en hiver dans les vergers de pommiers révélée par

- PCR diagnostique. *Bulletin of Entomological Research*, 103(2), 148-154. doi:10.1017/s0007485312000636
- Bowie, M. H. (1999). Effects of distance from field edge on aphidophagous insects in a wheat crop and observations on trap design and placement. *International Journal of Pest Management*, 45(1), 69-73. <https://doi.org/10.1080/096708799228076>
- Brown, S. K., & Maloney, K. E. (2003). Genetic improvement of apple : Breeding, markers, mapping and biotechnology. *Apples: botany, production and uses*, 31-59. <https://doi.org/10.1079/9780851995922.0031>
- Cahenzli, F., Pfiffner, L. & Daniel, C., (2017). Reduced crop damage by self-regulation of aphids in an ecologically enriched, insecticide-free apple orchard. *Agronomy for Sustainable Development*. 37, 65. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0476-0>
- Carroll, D. P., & Hoyt, S. C. (1984). Natural Enemies and Their Effects on Apple Aphid, *Aphis pomi* DeGeer (Homoptera : Aphididae), Colonies on Young Apple Trees in Central Washington. *Environmental Entomology*, 13(2), 469-481. <https://doi.org/10.1093/ee/13.2.469>
- Chander, K., Goyal, S., Nandal, D. P., & Kapoor, K. K. (1998). Soil organic matter, microbial biomass and enzyme activities in a tropical agroforestry system. *Biology and Fertility of Soils*, 27(2), 168-172. <https://doi.org/10.1007/s003740050416>
- Claire C. Lamine, Jean Pluvinage, Régis Aubenas, Vincent Faugier, Sylvaine Simon, et al.. Innovation variétale en Prunus, 1960-2013 : les enseignements d'une analyse socio-historique co-construite avec les acteurs. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, Paris : Institut national de la recherche agronomique Délégation permanente à l'environnement, 2015, 65 (65), pp.5-18.
- Codron, Jean-Marie & HABIB, Robert & Jacquet, Florence & Sauphanor, Benoît. (2003). Bilan et perspectives environnementales de la filière arboriculture fruitière. Agriculture, Territoire, Environnement dans les Politiques Européennes. 31-67.
- Collins, K. L., Boatman, N. D., Wilcox, A., Holland, J. M., & Chaney, K. (2002). Influence of beetle banks on cereal aphid predation in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 337-350. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00340-1)
- Cross, J. V., Cubison, S., Harris, A., & Harrington, R. (2007). Autumn control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), with aphicides. *Crop Protection*, 26(8), 1140-1149. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.10.007>
- Cs, N., Cross, J., & Markó, V. (2013). Sugar feeding of the common black ant, *Lasius niger* (L.), as a possible indirect method for reducing aphid populations on apple by disturbing ant-aphid mutualism. *Biological Control*, 65, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.01.005>
- Debras J.-F., Torre F., Rieux R., Kreiter S., Garcin M.S., Van Helden M., Buisson E., Dutoit T. (2006) Discrimination between agricultural management and the hedge effect in pear orchards (south-eastern France), *Ann. Appl. Biol.* 149, 347–355
- Deguine, J.-P. (ed), Gloanec, C. (ed), Laurent, P. (ed), Ratnadass, A. (ed), & Aubertot, J.-N. (ed). (2016). *Protection agroécologique des cultures* (Quae). <https://agritrop.cirad.fr/579228/>
- Deguines, N., Julliard, R., de Flores, M., & Fontaine, C. (2016). Functional homogenization of flower visitor communities with urbanization. *Ecology and Evolution*, 6(7), 1967-1976. <https://doi.org/10.1002/ece3.2009>

- Delorme, R., Auge, D., Touton, P., & Villatte, F. (1997). Insecticide resistance in *Dysaphis plantaginea* in France. *Fourth international conference on pests in agriculture, 6-7-8 January 1997, le Corum, Montpellier, France, Volume 1.*, 45-52.
- Den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada R.M., Palma J.H.N., Sidiropoulou A., Santiago Freijanes J.J., Crous-Duran J., Paulo J.A., Tomé M., Pantera A., Et Al. (2017). Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 121–132.
- Dennis, P., Young, M. R., & Gordon, I. J. (1998). Distribution and abundance of small insects and arachnids in relation to structural heterogeneity of grazed, indigenous grasslands. *Ecological Entomology*, 23(3), 253-264. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2311.1998.00135.x>
- Dennis, P., Young, M. R., & Gordon, I. J. (1998). Distribution and abundance of small insects and arachnids in relation to structural heterogeneity of grazed, indigenous grasslands. *Ecological Entomology*, 23(3), 253-264. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2311.1998.00135.x>
- Dib H, Simon S, Sauphanor B, Capowiez Y (2010) The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. *Biol Control* 55(2):97–109. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.07.005>
- Down, R. E., Cuthbertson, A. G. S., Mathers, J. J., & Walters, K. F. A. (2009). Dissemination of the entomopathogenic fungi, *Lecanicillium longisporum* and *L. muscarium*, by the predatory bug, *Orius laevigatus*, to provide concurrent control of *Myzus persicae*, *Frankliniella occidentalis* and *Bemisia tabaci*. *Biological Control*, 50(2), 172-178. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.03.010>
- Dupraz C., Liagre F. (2008). Agroforesterie – Des arbres et des cultures. *Paris, Editions France Agricole*, 413 p.
- E.-C. Oerke; H.-W. Dehne (2004). Safeguarding production—losses in major crops and the role of crop protection. , 23(4), 275–285. doi:10.1016/j.cropro.2003.10.001
- Eilenberg, J., Hajek, A., & Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387-400. <https://doi.org/10.1023/A:1014193329979>
- European Academies Science Advisory Council, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (Éds.), 2015. Ecosystem services, agriculture and neonicotinoids, EASAC Secretariat, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina.
- Falcon, L. A., Kane, W. R., & Bethell, R. S. (1968). Preliminary Evaluation of a Granulosis Virus for Control of the Codling Moth¹. *Journal of Economic Entomology*, 61(5), 1208-1213. <https://doi.org/10.1093/jee/61.5.1208>
- Foley, J. A. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574. doi:10.1126/science.1111772
- FRANCEAGRIMER. (2020). La pomme en 2020-2021 [en ligne]. Bilan de campagne. 6 p. Disponible sur : < [Le marché de la pomme en 2020-2021 \(franceagrimer.fr\)](https://www.franceagrimer.fr/la-pomme-en-2020-2021) > (consulté le : 16/07/2022).
- GEVES. (2020). Qu'est-ce que l'agroforesterie [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.geves.fr/expertises-varietes-semences/especes-forestieres/lagroforesterie/>> (consulté le : 11/08/2022).

- Gill, H. K., & Garg, H. (2014). Pesticide: environmental impacts and management strategies. *Pesticides-toxic aspects*, 8, 187.
- Gosme M., Dupraz C., Dufour L. (2016). Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. 3rd European Agroforestry Conference – Montpellier, 23-25 May 2016, *Agroforestry and climate change* (oral), Abstract number 44, INRA, UMR 1230 SYSTEM, F-34000, 5 p.
- Graf, B., Baumgärtner, J., & Delucchi, V. (1985). Simulation models for the dynamics of three apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, *Rhopalosiphum insertum*, and *Aphis pomi* (Homoptera, Aphididae) in a Swiss apple orchard. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*, 99(1-5), 453-465. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1985.tb02011.x>
- Green R.E., Osborne P.E., Sears E.J. (1994) The distribution of passerine birds in hedgerows during the breeding season in relation to characteristics of the hedgerow and adjacent farmland, *J. Appl. Ecol.* 31, 677–692.
- Haines-Young, R., & Potschin-Young, M. (2018). Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A Policy Brief. *One Ecosystem*, 3, e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
- Hart, A. J., Bale, J. S., & Fenlon, J. S. (1997). Developmental threshold, day-degree requirements and voltinism of the aphid predator *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *Annals of Applied Biology*, 130(3), 427-437.
- Heimpel, G. E., & Jervis, M. A. (2005). Does floral nectar improve biological control by parasitoids? In *Plant-Provided Food for Carnivorous Insects* (p. 267-304). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542220.010>
- Hodge, M. A. (1999). The Implications of Intraguild Predation for the Role of Spiders in Biological Control. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 351-362.
- Holland J.M., James L., Stevenson D.R.W., Kor L., Douma J.C., Crowley L., Smith B.M. (2017). Semi-natural habitats support biological control, pollination and soil conservation in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, n° 4, p. 23.
- Hull, L. A., & VanStarter, R. (1983). Effectiveness of Insecticide Applications Timed to Correspond with the Development of Rosy Apple Aphid (Homoptera : Aphididae) on Apple1. *Journal of Economic Entomology*, 76(3), 594-598. <https://doi.org/10.1093/jee/76.3.594>
- Inserm (dir.). Pesticides et effets sur la santé - Nouvelles données. Collection Expertise collective. Montrouge : EDP Sciences, 2021. XIX - 1009 p. - <http://hdl.handle.net/10608/10641>
- Jackson, J.E., Parry, M.S. and Stephens, C.P. (1981). INTENSIFICATION OF TREE FRUIT PRODUCTION: CURRENT CONSTRAINTS, RELEVANT RESEARCH AND AN ALTERNATIVE SYSTEM STRATEGY FOR THE 1980s. *Acta Hort.* 114, 399-406. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1981.114.57>
- Kaneko, S. (2003). Different impacts of two species of aphid-attending ants with different aggressiveness on the number of emerging adults of the aphid's primary parasitoid and hyperparasitoids. *Ecological Research*, 18(2), 199-212. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2003.00547.x>
- Kellerhals, M. (2009). Introduction to Apple (*Malus × domestica*). In: Folta, K.M., Gardiner, S.E. (eds) *Genetics and Genomics of Rosaceae*. Plant Genetics and Genomics: Crops and Models, vol 6. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77491-6_4

- Kennedy, J. S., Day, M. F., & Eastop, V. F. (1962). A conspectus of aphids as vectors of plant viruses. *A Conspectus of Aphids as Vectors of Plant Viruses*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19620500921>
- Korenko, S., Pekar, S. & Honek, A. (2010) Predation activity of two winter-active spiders (Araneae: Anyphaenidae, Philodromidae). *Journal of Thermal Biology*, 35, 112–116.
- Korenko, S., Pekár, S., & Honěk, A. (2010). Predation activity of two winter-active spiders (Araneae : Anyphaenidae, Philodromidae). *Journal of Thermal Biology*, 35(2), 112-116. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2009.12.004>
- Koss, A. M., & Snyder, W. E. (2005). Alternative prey disrupt biocontrol by a guild of generalist predators. *Biological Control*, 32(2), 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.10.002>
- Kozár, F., Brown, M. W., & Lightner, G. (1994). Spatial distribution of homopteran pests and beneficial insects in an orchard and its connection with ecological plant protection. *Journal of Applied Entomology*, 117(1-5), 519-529. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1994.tb00769.x>
- Krebs, J., Wilson, J., Bradbury, R. et al. The second Silent Spring?. *Nature* 400, 611–612 (1999). <https://doi.org/10.1038/23127>
- Landis, Douglas A.; Wratten, Stephen D.; Gurr, Geoff M. (2000). Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45(1), 175–201. doi:10.1146/annurev.ento.45.1.175
- Lathrop, F.H. (1928). The biology of apple aphids. *The Ohio Journal of Science*, 28 : 177–204.
- Lauri, P. É., Mézière, D., Dufour, L., Gosme, M., Simon, S., Gary, C., Jagoret, P., Wery, J., Dupraz, C. (2016). Fruit-trees in agroforestry systems - Review and prospects for the temperate and mediterranean zones. *Proceedings of the 3rd European Agroforestry Conference*. Montpellier, France. Gosme M et al. (eds). May 2016. ISBN: 978-2-87614-717-1. EAN: 9782876147171. pp 106-109.
- Lauri, P. É., Pitchers, B., Dufour, L., & Simon, S. (2020). Apple farming systems – current initiatives and some prospective views on how to improve sustainability. *Acta Horticulturae*, 1281, 307-322. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.42>
- Lauri, P.-E., & Simon, S. (2019). Advances and challenges in sustainable apple cultivation. In *Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries : Volume 2 : Case Studies* (Vol. 54, p. 340 p.). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.22>
- Lavandero, B., Wratten, S., Shishehbor, P., & Worner, S. (2005). Enhancing the effectiveness of the parasitoid *Diadegma semiclausum* (Helen) : Movement after use of nectar in the field. *Biological Control*, 34(2), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.04.013>
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., & Trommetter, M. (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies (Expertises Collectives, p. 116 p.) [Other]. INRA. <https://doi.org/10.15454/chz5-0922>
- Lee, W. J., Blair, A., Hoppin, J. A., Lubin, J. H., Rusiecki, J. A., Sandler, D. P., Dosemeci, M., & Alavanja, M. C. R. (2004). Cancer incidence among pesticide applicators exposed to chlorpyrifos in the Agricultural Health Study. *Journal of the National Cancer Institute*, 96(23), 1781-1789. <https://doi.org/10.1093/jnci/djh324>

- Lovell, S.T., Dupraz, C., Gold, M., Jose, S., Revord, R., Stanek, E., And Wolz, K. (2018). Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agroforestry Systems*, 92(5), 1397– 1415.
- Lucas, J. A., Hawkins, N. J., & Fraaije, B. A. (2015). The evolution of fungicide resistance (S. Sariaslani & G. M. Gadd, Éd.s.; Vol. 90, p. 29-92). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2014.09.001>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C. et al. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 43–62 (2009). <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>
- Markó, V., Keresztes, B., Fountain, M., & Cross, J. (2009). Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities. *Biological Control*, 48, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.10.002>
- Marliac, G., Simon, S., Mazzia, C. et al. Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol. *BioControl* 60, 805–815 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10526-015-9687-y>
- Marshall E. J. P., Brown V. K., Boatman N. D., Lutman P. J. W., Squire G. R., Ward L. K. (2003). The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research*, vol. 43, n° 2, p.77-89.
- Massonié, G., Maison, P. and Mazy, K. (1976). Contribution to the study of sharka transmission by *myzus persicae* sulz. *Acta Hortic.* 67, 179-184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1976.67.21>
- Météo-France (2022). Fiche climatologique. *Meteo-France.fr*. Consultée le : 05/09/2022. Disponible sur : [FICHECLIM_34217001.pdf \(meteofrance.fr\)](https://www.meteo.fr/fr/fiche-climatologique/34217001)
- Miliczky, E. R., & Horton, D. R. (2005). Densities of beneficial arthropods within pear and apple orchards affected by distance from adjacent native habitat and association of natural enemies with extra-orchard host plants. *Biological Control*, 33(3), 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.03.002>
- Mills N.J. (2005). Selecting effective parasitoids for biological control introductions:codling moth as a case study. *Biological Control*, 34, 274–282.
- Milner, R. J. (1997). Prospects for biopesticides for aphid control. *Entomophaga*, 42(1), 227-239. <https://doi.org/10.1007/BF02769900>
- Miñarro, M., Fernández-Mata, G., & Medina, P. (2010). Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological Entomology*, 35(2), 206-215. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x>
- Moles R.T., Breen J. (1995) Long-term change within lowland farmland bird communities in relation to field boundary attributes, *Biology Environment - Proc. R. Ir. Acad.* 95, 203–215.
- Moss, B. (2008). Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 659–666. doi:10.1098/rstb.2007.2176
- Noel, G., Caetano, J., Blanchard, S., Boullis, A., & Francis, F. (2022). High temperatures adversely affect the hoverfly *Episyrphus balteatus*(Diptera: Syrphidae) fitness and aphid prey consumption. *Turkish Journal of Zoology*: Vol. 46: No. 2, Article 2. <https://doi.org/10.55730/1300-0179.3047> Available at: <https://journals.tubitak.gov.tr/zoology/vol46/iss2/2>

- Nyffeler, M., & Benz, G. (1988). Feeding ecology and predatory importance of wolf spiders (*Pardosa* spp.) (Araneae, Lycosidae) in winter wheat fields1. *Journal of Applied Entomology*, 106(1-5), 123-134. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1988.tb00575.x>
- Oatman, E. R., & Legner, F. E. (1961). Bionomics of the Apple Aphid, *Aphis pomi*, on Young Nonbearing Apple Trees1. *Journal of Economic Entomology*, 54(5), 1034-1037. <https://doi.org/10.1093/jee/54.5.1034>
- orchard with flowering strips? *Bulletin OILB/SROP*, 22, 39-46.
- Palma J.H.N., Graves A.R., Bunce R.G.H., Burgess P.J., Filippi R., De Keesman K.J., Van Keulen H., Liagre F., Mayus M., Moreno G., Reisner Y., Herzog F. (2007). Modelling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture Ecosystem & Environment*, vol 119, 6-12 p.
- Parish T., Lakhani K.H., Sparks T.H. (1994) Modelling the relationship between bird population variables and hedgerow and the other field margin attributes: species richness of winter, summer and breeding birds, *J. Appl. Ecol.* 31, 764–775.
- Pelosi, C., Goulard, M., & Balent, G. (2010). The spatial scale mismatch between ecological processes and agricultural management : Do difficulties come from underlying theoretical frameworks? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(4), 455-462. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.09.004>
- Pfiffner L., Schärer G.J., Luka H. (2013). Functional biodiversity to improve pest control in organic cropping systems. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 78, 215–222.
- Pissonnier, S., Toubon, J.-F., Lavigne, C., & Le Gal, P.-Y. (2016). Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level. *Crop Protection*, 88, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.06.007>
- Pitchers, B. (2021). Architecture and fruiting of apple tree in agroforestry – linking architectural development, flowering and xylem flow. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut agro : montpellier supagro. Ecologie fonctionnelle et sciences agronomiques école doctorale gaia. Portée par l'umr absys cirad – inrae – iamm – montpellier supagro. 214 p
- Pitchers, B., Do, F., Pradal, C., Dufour, L., & Lauri, P.-É. (2021). Apple tree adaptation to shade in agroforestry : An architectural approach. *American Journal of Botany*, 108(5), 732. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1652>
- Powles, S. B., & Yu, Q. (2010). Evolution in Action : Plants Resistant to Herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, 61(1), 317-347. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112119>
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability : Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>
- Price, P. W. (1991). The Plant Vigor Hypothesis and Herbivore Attack. *Oikos*, 62(2), 244-251. <https://doi.org/10.2307/3545270>
- Pumariño L., Weldesemayat Sileshi G., Gripenberg S., Kaartinen R., Barrios E., Nyawira Muchane M., Midega C., Jonsson M. (2015). Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 16(7), 573-592.
- Reateau A. 2017. Regard critique d'un historien des sciences sur l'évolution de la protection des cultures. In: Deguine Jean-Philippe et al. (Eds.), *Protection agroécologique des cultures*.

- Reyes, M., Franck, P., Charmillot, P.-J., Ioriatti, C., Olivares, J., Pasqualini, E., & Sauphanor, B. (2007). Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*, 63(9), 890-902. <https://doi.org/10.1002/ps.1421>
- Ricard J. M., Garcin A., Jay M., Mandrin J. F. et collaborateurs. (2012). *Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière*. CTIFL. 471 p.
- Robert C., Tosser V. (2015). Auxiliaires rampants – Les bons comptes font les bons amis. *Perspectives*
- Roincé, C. B. de, Lavigne, C., Mandrin, J.-F., Rollard, C., & Symondson, W. O. C. (2013). Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bulletin of Entomological Research*, 103(2), 148-154. <https://doi.org/10.1017/S0007485312000636>
- Roth, M., & Couturier, G. (s. d.). Les plateaux colorés en écologie entomologique. *Annales de la Société Entomologique de France*, 2, 361-370.
- Rousselin, A., Bevacqua, D., Sauge, M.-H., Lescourret, F., Mody, K., & Jordan, M.-O. (2017). Harnessing the aphid life cycle to reduce insecticide reliance in apple and peach orchards. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5), 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0444-8>
- Rusch, A & Valantin-Morison, M. & Sarthou, J-P. & Roger-Estrade, J.. (2010). Biological Control of Insect Pests in Agroecosystems: Effects of Crop Management, Farming Systems, and Seminatural Habitats at the Landscape Scale: A Review. *Advances in Agronomy*. 109. 10.1016/S0065-2113(10)09006-1.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Thies, C., Tschardtke, T., Weisser, W. W., Winqvist, C., Woltz, M., & Bommarco, R. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control : A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.039>
- Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.-P., & Roger-Estrade, J. (2011). Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landscape Ecology*, 26(4), 473-486. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9573-7>
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna : A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Sarthou J.P., Simon S. (2018). Auxiliaires entomophages et contrôle des ravageurs : du paysage aux pratique de gestion. Services écosystémiques rendus par l'agroforesterie dans les territoires et exploitations agricoles. *Colloque de ENSAT-INRAE UMR AGIR Toulouse et INRAE UERI Gotheron*,
- Sarthou, J.-P. (2016). Infrastructure agroécologique : Définition. *Dictionnaire d'agroécologie*. <https://doi.org/10.17180/Q9H6-F326>
- Sarthou, J.-P., & Smits, N. (2006, mai). Effets des systèmes agroforestiers sur l'écologie et la gestion des populations d'insectes ravageurs. *Colloque du GEA*. <https://hal.inrae.fr/hal-02756036>
- Sarthou, J.-P., Badoz, A., Vaissière, B., Chevallier, A., & Rusch, A. (2014). Local more than landscape parameters structure natural enemy communities during their overwintering in semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 194, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.018>

- Sauphanor, B., Berling, M., Toubon, J.-F., Reyes, M., Delnatte, J., & Allemoz, P. (2006). Carpopapse des pommes. Cas de résistance au virus de la granulose en vergers biologique. *Phytoma*, 590, 24-27.
- Sauphanor, B., Simon, S., Boisneau, C., Capowiez, Y., Rieux, R., Bouvier, J.-C., Defrance, H., picard, camille, & Toubon, J.-F. (2009). Protection phytosanitaire et biodiversité en agriculture biologique. Le cas des vergers de pommiers. *Innovations Agronomiques*, 4, 217-228.
- Schöneberg, A., Perren, S., et Naef, A. (2015). En quête de variétés tolérantes – pour une gestion durable du feu bactérien. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (1) : 4–11.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte Aguilar, J. A., & Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 50(3), 199-241. <https://doi.org/10.1023/A:1006468103914>
- Shennan, C. (2008). Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 717-739. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2180>
- Simon S, Capowiez Y. (2010). Rosy apple aphid dynamics on apple in spring. QuantIPest, INRA, 2 p.
- Simon S. (2010). Evaluation of severity of rosy apple aphid infestation in spring. Quantipest, INRA, 2 p.
- Simon, S. S., Sauphanor, B. B., Defrance, H., & Lauri, P.-E. (2009). Manipulations des habitats du verger biologique et de son environnement pour le contrôle des bio-agresseurs. Des éléments pour la modulation des relations arbre-ravageurs-auxiliaires. *Innovations Agronomiques*, 4, 125-134
- Simon, S., Bouvier, J.-C., Debras, J.-F., & Sauphanor, B. (2010). Biodiversity and pest management in orchard systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 139-152. <https://doi.org/10.1051/agro/2009013>
- Simon, S., Lesueur-Jannoyer, M., Plénet, D., Lauri, P.-É., & Le Bellec, F. (2017). Methodology to design agroecological orchards : Learnings from on-station and on-farm experiences. *European Journal of Agronomy*, 82, 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.004>
- Simon, S., Morel, K., Durand, E., Brevalle, G., Girard, T., & Lauri, P.-E. (2012). Aphids at crossroads : When branch architecture alters aphid infestation patterns in the apple tree. *Trees - Structure and Function*, 26(1), 273-282. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0629-8>
- Stamps, W. T., & Linit, M. J. (1997). Plant diversity and arthropod communities : Implications for temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 39(1), 73-89. <https://doi.org/10.1023/A:1005972025089>
- Stang, M., Klinkhamer, P. G. L., & Van Der Meijden, E. (2006). Size constraints and flower abundance determine the number of interactions in a plant–flower visitor web. *Oikos*, 112(1), 111-121. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2006.14199.x>
- Stoeckli, S., Mody, K., & Dorn, S. (2008). *Aphis pomi* (Hemiptera: Aphididae) population development, shoot characteristics, and antibiosis resistance in different apple genotypes. *Journal of economic entomology*, 101(4), 1341-1348.
- Straub, C. S., Finke, D. L., & Snyder, W. E. (2008). Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals? *Biological Control*, 45(2), 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.05.013>

- Styrsky, J. D., & Eubanks, M. D. (2007). Ecological consequences of interactions between ants and honeydew-producing insects. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1607), 151-164. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3701>
- Tamaš, N., Dojnov, B., Margetić, A., Vujčić, M., Špirović, B., Miletić, N., Stević, M., & Vujčić, Z. (2015). Resistance to common organophosphate and carbamate insecticides in *Aphis pomi* (Hemiptera : Aphididae). *Fruits*, 70(3), 135-142. <https://doi.org/10.1051/fruits/2015005>
- Thomas C., Cortello J., Lavigne C. (2016). Evaluation du potentiel de régulation biologique en vergers à l'aide de « carte de prédation ». Plantes et systèmes de culture horticoles, INRA, Agroparc, Domaine Saint-Paul, 84814, Avignon cedex 9, France, 205-212.
- Tilman, D., Cassman, K., Matson, P. et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677 (2002). <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Tortosa O.E., Carmona A., Martinez E., Manzano P., Giardina M. (2014). Liberación y establecimiento de *Mastrus ridens* (Hymenoptera: Ichneumonidae) para el control de *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) en Mendoza Argentina. *Revista de la Sociedad Entomologica Argentina*, 73, 109-118.
- Trillot, M., Masseron, A., Mathieu, V., Bergougnoux, F., Hutin, C., & Lespinasse, Y. (2002). *Le pommier. Monographie* (p. 287 p.). CTIFL. <https://hal.inrae.fr/hal-02833950>
- Urech, Pierre A.; Staub, Theo; Voss, Günther (1997). Review: Resistance as a concomitant of modern crop protection. *Pesticide Science*, 51(3), 227–234. doi:10.1002/(sici)1096-9063(199711)51:3<227::aid-ps646>3.0.co;2-x
- Villenave, J., Thierry, D., Al Mamun, A., Lodé, T., & Rat-Morris, E. (2005). The pollens consumed by common green lacewings *Chrysoperla* spp. (Neuroptera : Chrysopidae) in cabbage crop environment in western France. *European Journal of Entomology*, 102(3), 547-552. <https://doi.org/10.14411/eje.2005.078>
- Vogt, H., Weigel, A. (1999). Is it possible to enhance the biological control of aphids in an apple
- Wagner, D. L. (2020). Insect Declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology*, 65(1), 457-480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025151>
- Walgenbach J. (2014). Codling moth [en ligne]. *NC State Extension Publications*. Disponible sur :<<https://content.ces.ncsu.edu/codling-moth>> (consulté le : 11/08/2022).
- Welch, K. D., & Harwood, J. D. (2014). Temporal dynamics of natural enemy–pest interactions in a changing environment. *Biological Control*, 75, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.01.004>
- Wilkaniec B., trzcinski P. (1997). Effect of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homoptera; Aphididae), feeding on fruits of the Primula variety. *Progress in Plant Protection*, 37, 36–39. <https://www.cabi.org/ISC/abstract/19991106539>
- Wołejko, Elżbieta; Jabłońska-Trypuć, Agata; Wydro, Urszula; Butarewicz, Andrzej; Łozowicka, Bożena (2019). Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – A review. *Applied Soil Ecology*, (), 103356–. doi:10.1016/j.apsoil.2019.09.006
- Wyss, E. (1995). The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in an apple orchard. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 75(1), 43-49. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1995.tb01908.x>

- Yan, F., Bengtsson, M., & Witzgall, P. (1999). Behavioral Response of Female Codling Moths, *Cydia pomonella*, to Apple Volatiles. *Journal of Chemical Ecology*, 25, 1343-1351. <https://doi.org/10.1023/A:1020978826346>
- Yao, I., Shibao, H., & Akimoto, S. (2000). Costs and benefits of ant attendance to the drepanosiphid aphid *Tuberculatus quercicola*. *Oikos*, 89(1), 3-10. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.890101.x>
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 64(2), 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>

Annexes

Annexe 1 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022

A

Modèle^a : Modalité + Date+ (1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	328.13876	1	0.0000000	***
Modalité	14.41833	2	0.0007398	***
Date	626.34733	9	0.0000000	***

^a Famille = BétaBinomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B

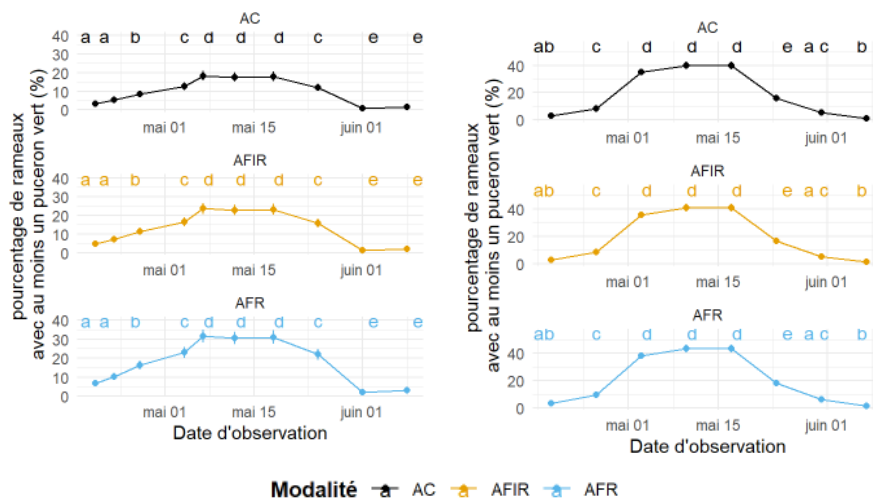
Modèle^a : Modalité + Date + (1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	371.241836	1	0.0000000	***
Modalité	1.529311	2	0.4654942	
Date	1024.143591	7	0.0000000	***

^a Famille = BétaBinomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 2 : Modélisation et comparaison entre les dates de l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022



Annexe 4 : Comparaison par paires entre les modalités pour chaque date (test post hoc de Tukey) sur le GLMM modélisant l'incidence du puceron vert en (A) 2021 et (B) 2022

A

Modèle^a : Modalité + Date + (1|Pommier)

contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
AC / AFIR	0.7270352	0.1400702	436	1	-1.654632	0.2240522
AC / AFR	0.4849010	0.0927656	436	1	-3.783478	0.0005162
AFIR / AFR	0.6669567	0.1266968	436	1	-2.132158	0.0846003

^a Famille = Béta-binomiale

B

Modèle^a : Modalité + Date + (1|Pommier)

contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
AC / AFIR	0.9577365	0.1034063	393	1	-0.3999517	0.9156312
AC / AFR	0.8775585	0.0945315	393	1	-1.2124987	0.4464594
AFIR / AFR	0.9162839	0.0984996	393	1	-0.8133010	0.6950045

^a Famille = Béta-binomiale

Annexe 3 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du carpocapse en (A) 2021 et en (B) 2022

A

Modèle^a : Modalité + Stade +(1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	55.065465	1	0.0000000	***
Modalité	7.440319	2	0.0242301	.*
Stade	185.588093	1	0.0000000	***

^a Distribution d'erreur : Binomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B

Modèle^a : Modalité + Stade +(1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	298.59316	1	0.00e+00	***
Modalité	22.90056	2	1.06e-05	***
Stade	34.42157	1	0.00e+00	***

^a Distribution d'erreur : Binomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 5 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant l'incidence du puceron cendré en (A) 2021 et (B) 2022

A

Modèle^a: Modalité * Date + (1|Rang) + (1|Rang:Pommier)

	LR Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
(Intercept)	37.364686	1	0.0000000	***
Modalité	5.804452	2	0.0549009	.
Date	294.997568	9	0.0000000	***
Modalité:Date	39.291427	18	0.0026036	**

^a Famille : Béta-binomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B

Modèle^a: Modalité*Date + (1|Rang) + (1|Rang:Pommier)

	LR Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
(Intercept)	21.25551	1	0.0000040	***
Modalité	21.15582	2	0.0000255	***
Date	444.71282	7	0.0000000	***
Modalité:Date	39.81211	14	0.0002729	***

^a Famille : Béta-binomiale

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 6 : Comparaison par paires des modalités pour chaque date (test post hoc) des GLMM

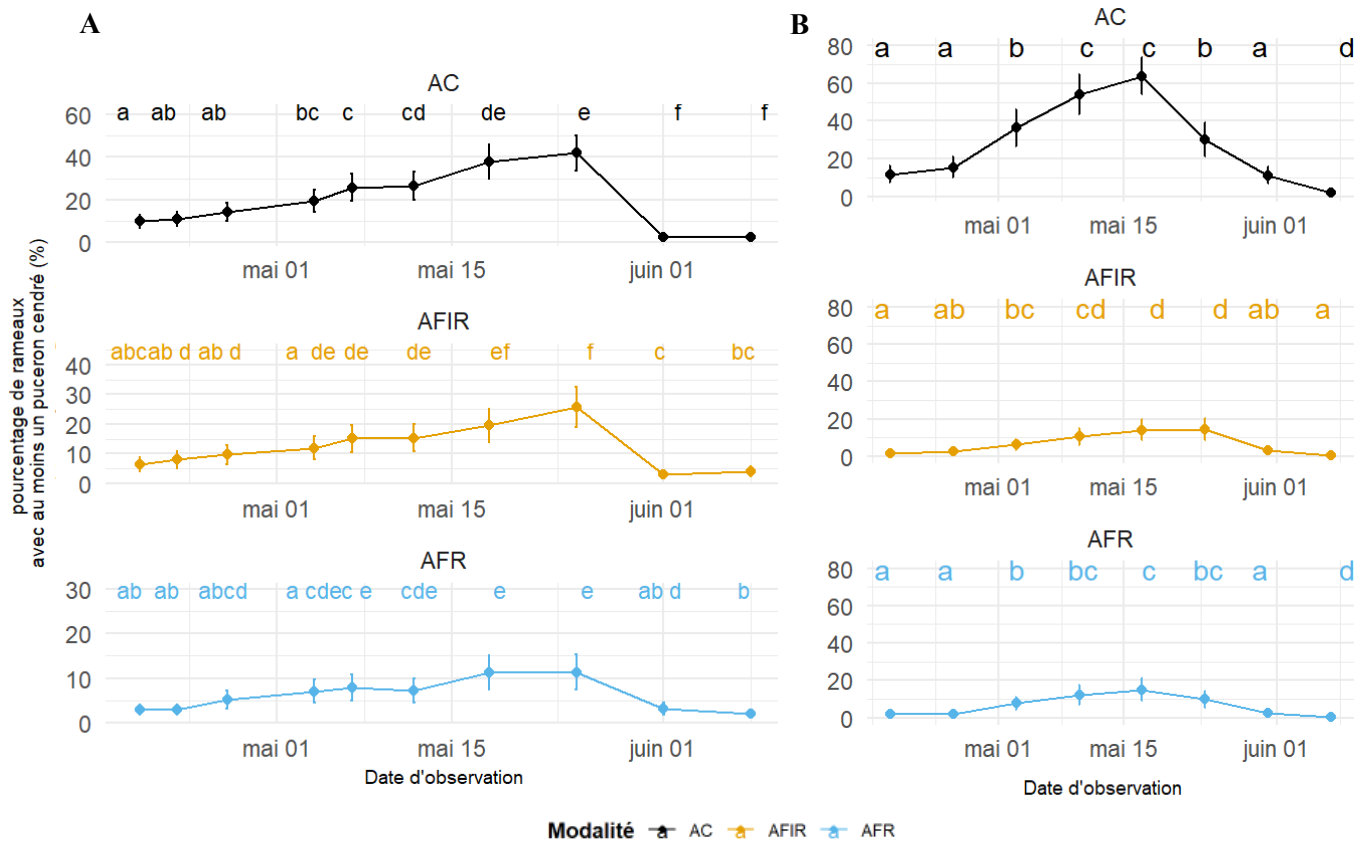
A

contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
20/04/2021						
AC / AFIR	1.5516574	0.7293954	417	1	0.9345821	0.6187090
AC / AFR	3.5788323	1.8955459	417	1	2.4072972	0.0434810
AFIR / AFR	2.3064578	1.3188001	417	1	1.4615835	0.3105815
23/04/2021						
AC / AFIR	1.3926438	0.6413884	417	1	0.7191417	0.7522979
AC / AFR	3.9897228	2.0968831	417	1	2.6327963	0.0238128
AFIR / AFR	2.8648551	1.6194845	417	1	1.8618955	0.1511698
27/04/2021						
AC / AFIR	1.5358596	0.6908368	417	1	0.9539479	0.6064325
AC / AFR	3.0384411	1.5253474	417	1	2.2137613	0.0700277
AFIR / AFR	1.9783326	1.0762146	417	1	1.2541422	0.4220818
04/05/2021						
AC / AFIR	1.7532244	0.7714437	417	1	1.2759964	0.4095425
AC / AFR	3.1637317	1.5571158	417	1	2.3401182	0.0515207
AFIR / AFR	1.8045218	0.9673808	417	1	1.1011190	0.5139072
07/05/2021						
AC / AFIR	1.9476544	0.8413856	417	1	1.5431172	0.2718904
AC / AFR	4.0391501	1.9506532	417	1	2.8907200	0.0112552
AFIR / AFR	2.0738536	1.0930162	417	1	1.3839561	0.3502300
12/05/2021						
AC / AFIR	1.9947348	0.8599542	417	1	1.6016977	0.2460384
AC / AFR	4.6054217	2.2195772	417	1	3.1688728	0.0046716
AFIR / AFR	2.3087890	1.2158156	417	1	1.5889063	0.2515424
18/05/2021						
AC / AFIR	2.5134927	1.0681618	417	1	2.1687905	0.0778085
AC / AFR	4.8031003	2.2695114	417	1	3.3211205	0.0027996
AFIR / AFR	1.9109267	0.9904362	417	1	1.2494433	0.4247993
25/05/2021						
AC / AFIR	2.0921103	0.8815555	417	1	1.7518351	0.1873585
AC / AFR	5.6369590	2.6649092	417	1	3.6580028	0.0008360
AFIR / AFR	2.6943890	1.3922601	417	1	1.9181772	0.1348036
01/06/2021						
AC / AFIR	0.8605888	0.4982739	417	1	-0.2593102	0.9636147
AC / AFR	0.7664323	0.4534731	417	1	-0.4495918	0.8946128
AFIR / AFR	0.8905906	0.5383769	417	1	-0.1916745	0.9799509
08/06/2021						
AC / AFIR	0.5441182	0.3068321	417	1	-1.0792360	0.5274938
AC / AFR	1.1328974	0.6928965	417	1	0.2040148	0.9773171
AFIR / AFR	2.0820794	1.2614535	417	1	1.2104517	0.4476272

B

contrast	odds.ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
19/04/2022						
AC / AFIR	8.9207706	5.5359856	333	1	3.5263923	0.0013917
AC / AFR	7.0841851	3.9591017	333	1	3.5032889	0.0015118
AFIR / AFR	0.7941226	0.6052842	333	1	-0.3024350	0.9508386
26/04/2022						
AC / AFIR	7.1566775	4.1450985	333	1	3.3979094	0.0021923
AC / AFR	8.2338942	4.5354811	333	1	3.8274181	0.0004533
AFIR / AFR	1.1505191	0.8382131	333	1	0.1924547	0.9797893
03/05/2022						
AC / AFIR	8.5036758	4.5014572	333	1	4.0436029	0.0001930
AC / AFR	6.9204004	3.5749991	333	1	3.7447092	0.0006218
AFIR / AFR	0.8138128	0.5492497	333	1	-0.3052631	0.9499387
10/05/2022						
AC / AFIR	10.0515646	5.1491636	333	1	4.5048637	0.0000274
AC / AFR	8.4846217	4.3226579	333	1	4.1970213	0.0001028
AFIR / AFR	0.8441096	0.5540413	333	1	-0.2582006	0.9639205
17/05/2022						
AC / AFIR	10.7698160	5.4865764	333	1	4.6654107	0.0000133
AC / AFR	9.9941353	5.1000998	333	1	4.5109870	0.0000266
AFIR / AFR	0.9279764	0.6057311	333	1	-0.1145149	0.9927965
24/05/2022						
AC / AFIR	2.5751941	1.3155696	333	1	1.8516240	0.1546327
AC / AFR	4.0100074	2.0822482	333	1	2.6745470	0.0213707
AFIR / AFR	1.5571670	1.0289520	333	1	0.6702157	0.7809592
31/05/2022						
AC / AFIR	4.2255145	2.4283589	333	1	2.5076863	0.0336923
AC / AFR	4.9604471	2.7535926	333	1	2.8850077	0.0115862
AFIR / AFR	1.1739274	0.8464586	333	1	0.2223912	0.9731058
07/06/2022						
AC / AFIR	4.4737160	3.8693514	333	1	1.7322304	0.1947165
AC / AFR	7.8800769	6.2311347	333	1	2.6106223	0.0255236
AFIR / AFR	1.7614165	1.8509324	333	1	0.5387393	0.8522778

Annexe 8 : Modélisation et comparaison entre les dates de l'incidence du puceron cendré (A) en 2021 et (B) en 2022.



Annexe 7 : Résultats des ANOVAs effectués sur les GLMM modélisant la dynamique des foyers de *D. plantaginea* en (A) 2021 et (B) 2022

A

Modèle^a: Modalité + Date+(1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	56.856675	1	0.000000	***
Modalité	6.390955	2	0.040947	*
Date	531.684426	15	0.000000	***

^a Distribution d'erreur : Binomiale négative

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B

Modèle^a: Modalité * Date+(1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level ^b
Intercept	25.70630	1	0.0000004	***
Modalité	14.69179	2	0.0006452	***
Date	266.33228	10	0.0000000	***
Modalité:Date	36.14072	20	0.0148055	*

^a Distribution d'erreur : Binomiale négative

^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 9 : Résultats du test de comparaison par paires (test post-hoc de Tukey) entre les modalités pour chacune des dates de comptage des rameaux repérés en 2021

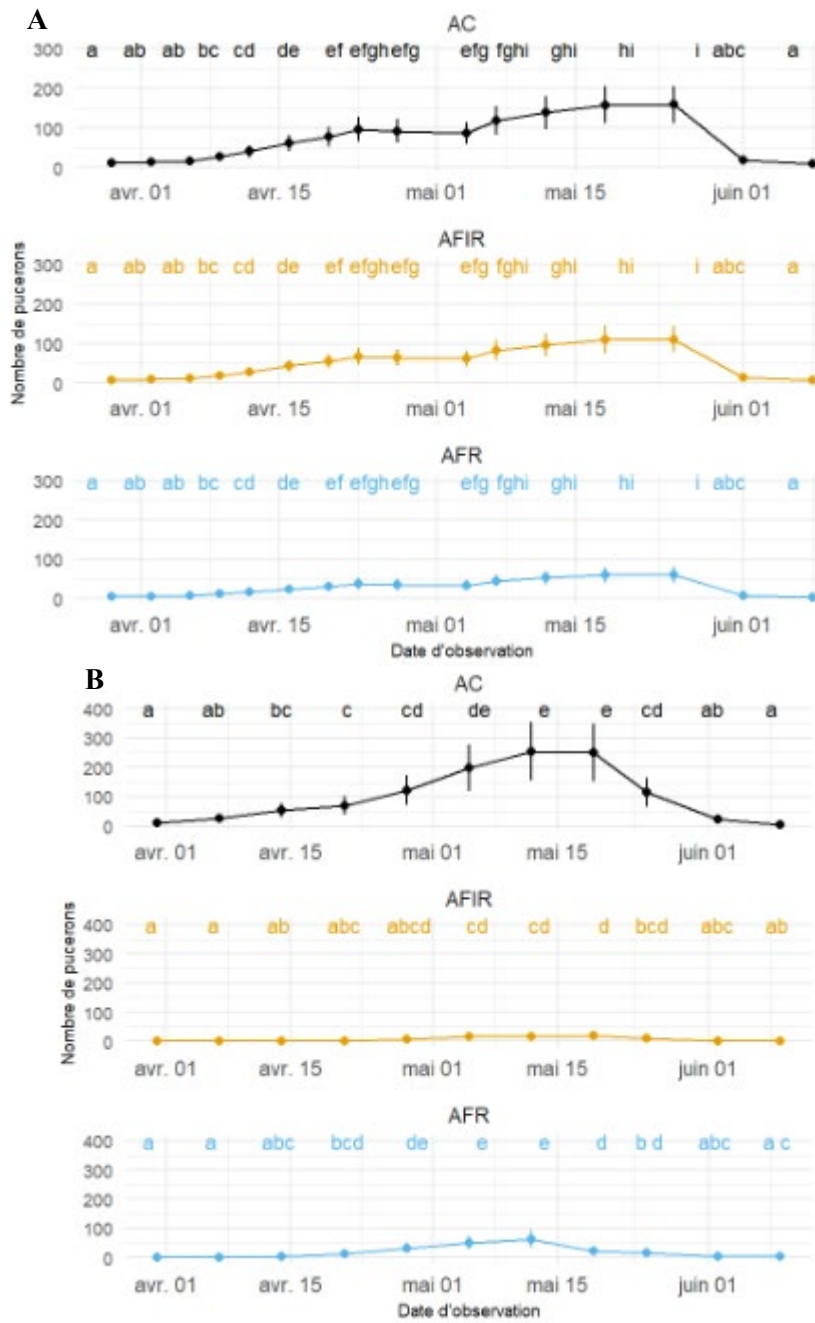
Modèle^a: Modalité * Date+(1|Pommier)

contrast	ratio	SE	df	null	t.ratio	p.value
AC / AFIR	1.427993	0.5448408	699	1	0.9337601	0.6190919
AC / AFR	2.651965	1.0320932	699	1	2.5060372	0.0332445
AFIR / AFR	1.857128	0.7239739	699	1	1.5879303	0.2515044

^a Distribution d'erreur : Binomiale négative

* Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 10 : Modélisation et comparaison entre les dates de la dynamique du nombre de pucerons cendrés au sein de trois foyers par arbre en (A) 2021 et (B) 2022.



Annexe 11 : Résultats du test de comparaison par paires (test post-hoc de Tukey) entre les modalités pour chacune des dates de comptage des foyers de pucerons cendrés en 2022

31/03/2022								AC / AFIR	12.1359024	7.3222326	460	1	4.1371608	0.0001236
AC / AFIR	33.7216798	39.6817405	460	1	2.9897283	0.0082583	AC / AFR	3.8275653	2.1326936	460	1	2.4089109	0.0432079	
AC / AFR	15.8295494	14.6955828	460	1	2.9749954	0.0086472	AFIR / AFR	0.3153919	0.1930746	460	1	-1.8849873	0.1441642	
AFIR / AFR	0.4694176	0.6273291	460	1	-0.5658958	0.8383082	19/05/2022							
07/04/2022								AC / AFIR	16.2749848	9.7402487	460	1	4.6611925	0.0000123
AC / AFIR	22.2017597	18.2094764	460	1	3.7798596	0.0005201	AC / AFR	3.9923910	2.1965949	460	1	2.5161796	0.0326314	
AC / AFR	11.5529521	8.3114799	460	1	3.4012465	0.0021027	AFIR / AFR	0.2453084	0.1484745	460	1	-2.3217257	0.0538268	
AFIR / AFR	0.5203620	0.4674603	460	1	-0.7271556	0.7475087	25/05/2022							
14/04/2022								AC / AFIR	13.3662023	7.9580112	460	1	4.3547242	0.0000488
AC / AFIR	34.8450802	28.0567306	460	1	4.4100581	0.0000383	AC / AFR	11.7505352	6.7470280	460	1	4.2910937	0.0000643	
AC / AFR	10.5531401	7.0473898	460	1	3.5286351	0.0013335	AFIR / AFR	0.8791230	0.5463081	460	1	-0.2073150	0.9765860	
AFIR / AFR	0.3028588	0.2598354	460	1	-1.3922714	0.3457700	02/06/2022							
21/04/2022								AC / AFIR	11.5544018	7.2688044	460	1	3.8898267	0.0003383
AC / AFIR	24.2922877	17.9300835	460	1	4.3221359	0.0000562	AC / AFR	7.5210892	4.4844301	460	1	3.3840162	0.0022337	
AC / AFR	5.8422207	3.6249041	460	1	2.8448113	0.0128684	AFIR / AFR	0.6509285	0.4272057	460	1	-0.6542041	0.7900764	
AFIR / AFR	0.2404969	0.1848746	460	1	-1.8537952	0.1535224	09/06/2022							
25/05/2022								AC / AFIR	9.4884232	7.6515843	460	1	2.7902247	0.0151290
AC / AFIR	15.7666265	10.1502176	460	1	4.2839187	0.0000663	AC / AFR	4.4605741	3.0422091	460	1	2.1924186	0.0735264	
AC / AFR	3.7661974	2.1659750	460	1	2.3057633	0.0559904	AFIR / AFR	0.4701070	0.3922214	460	1	-0.9046789	0.6376174	
AFIR / AFR	0.2388715	0.1558860	460	1	-2.1940603	0.0732436	AC / AFIR	4.2500517	4.1321481	460	1	1.4882168	0.2975044	
05/05/2022								AC / AFR	2.2848060	1.8595237	460	1	1.0152557	0.5675894
AC / AFIR	12.1359024	7.3222326	460	1	4.1371608	0.0001236	AFIR / AFR	0.5375949	0.5220356	460	1	-0.6391485	0.7985804	
AC / AFR	3.8275653	2.1326936	460	1	2.4089109	0.0432079	^a Distribution d'erreur : Binomiale négative							
AFIR / AFR	0.3153919	0.1930746	460	1	-1.8849873	0.1441642	^b Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1							

Annexe 12 : Résultats des ANOVAs effectuées sur les GLMM modélisant le taux de prédation des œufs de carpocapse en (A) 2021 et en (B) 2022.

A
Modèle^a : Modalité + Session + (1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level [*]
Intercept	24.977552	1	0.0000006	***
Modalité	1.994761	2	0.3688444	
Session	53.640812	1	0.0000000	***

^a Famille = Bétabinomiale
^{*} Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B
Modèle^a : Modalité + Session + (1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level [*]
Intercept	3.194512	1	0.0738858	.
Modalité	2.143944	2	0.3423327	
Session	62.721718	1	0.0000000	***

^a Famille = Bétabinomiale
^{*} Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Annexe 13 : Résultats des ANOVAs effectuées sur les GLMM modélisant le taux de prédation du puceron Acyrthosiphon pisum en (A) 2021 et en (B) 2022

A
Modèle^a : Modalité + Session + (1|Pommier)

	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level [*]
Intercept	1.234042	1	0.2666225	
Modalité	2.291154	2	0.3180403	
Session	9.000104	1	0.0026996	**

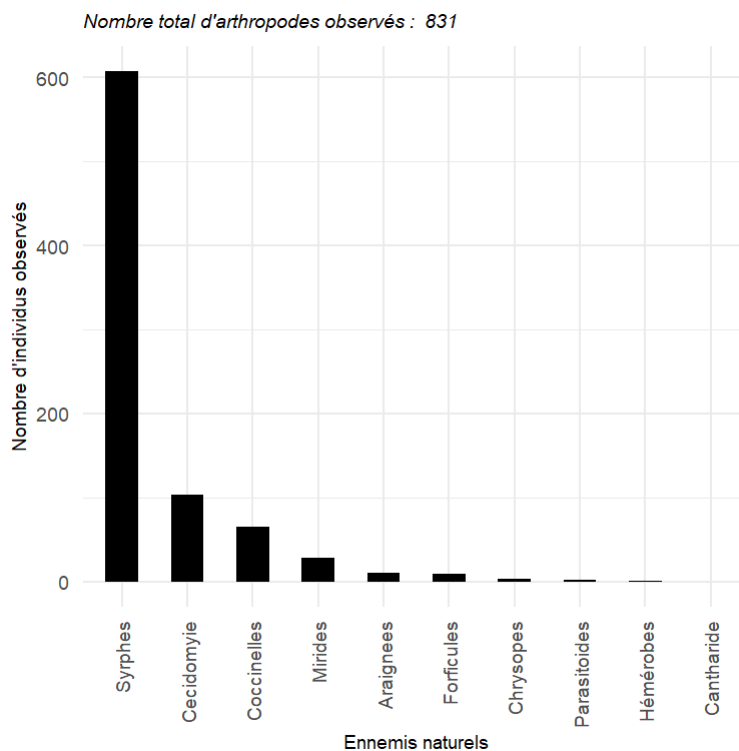
^a Famille = Bétabinomiale
^{*} Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

B
Modèle^a : Modalité + Session + (1|Pommier)

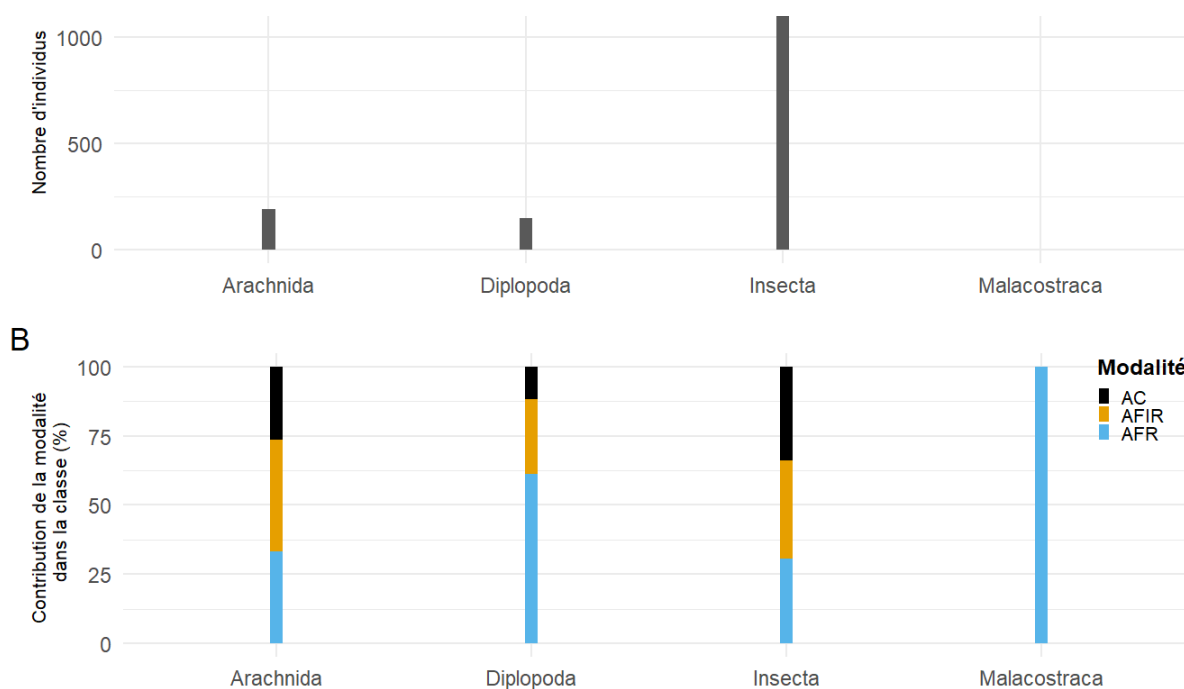
	Chisq	Degree of Freedom	Pr(>Chisq)	Significance level [*]
Intercept	3.110555	1	0.0777865	.
Modalité	1.481125	2	0.4768456	
Session	16.115934	1	0.0000596	***

^a Famille = Bétabinomiale
^{*} Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

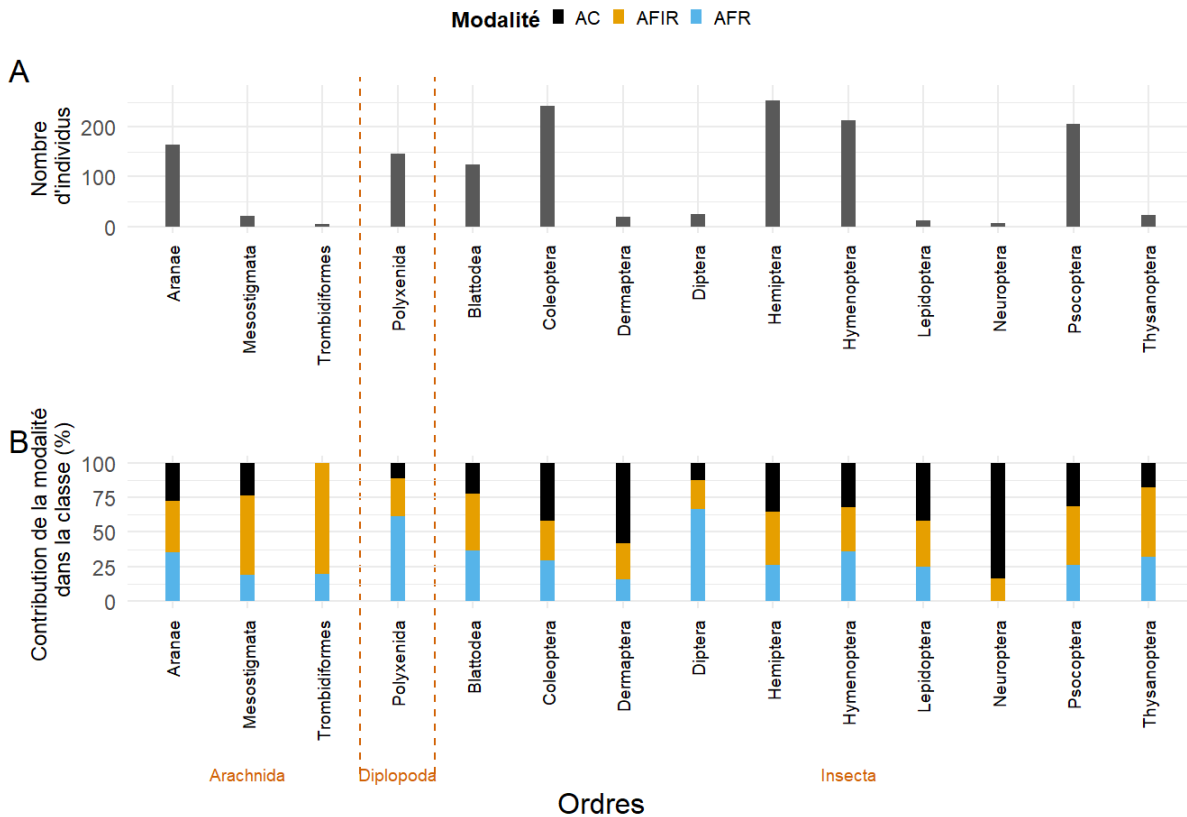
Annexe 14 : Bar-plot des effectifs totaux des différents ennemis-naturels observés dans les foyers de D. plantaginea, toutes modalités et dates confondues.



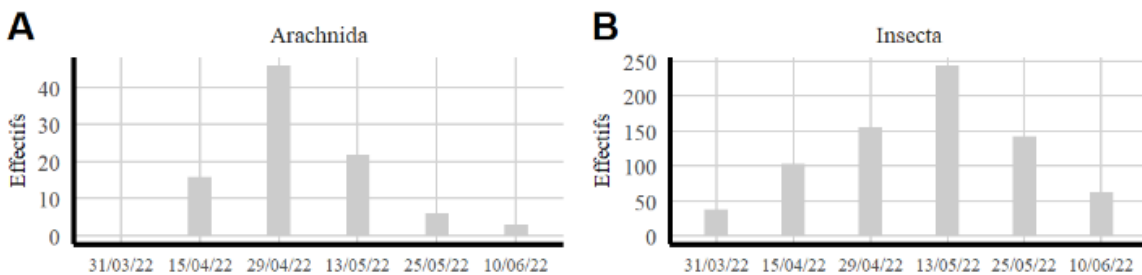
Annexe 15 : Représentation (A) des effectifs des classes et (B) des contributions des modalités (%) dans ces classes observées au cours des battages en 2022.



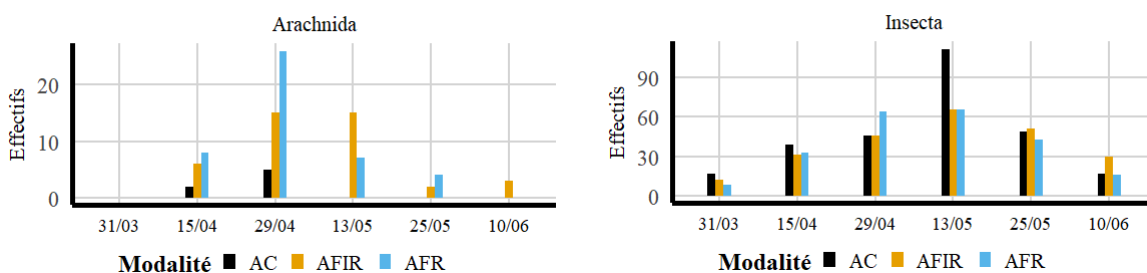
Annexe 16 : Représentation (A) des effectifs des ordres et (B) des contributions des modalités (%) dans ces ordres observés au cours des battages en 2022. Seuls les ordres observés plus de trois fois sont présentés



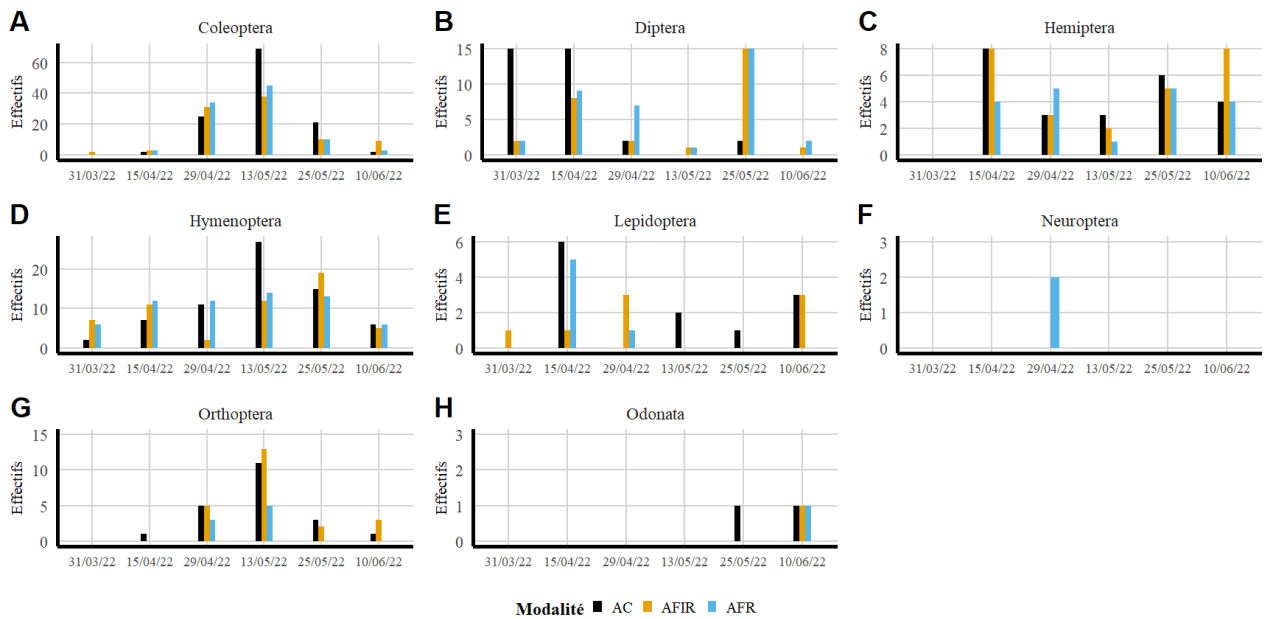
Annexe 17 : Distribution dans le temps des différentes classes observées lors des transects en 2022, toutes modalités confondues



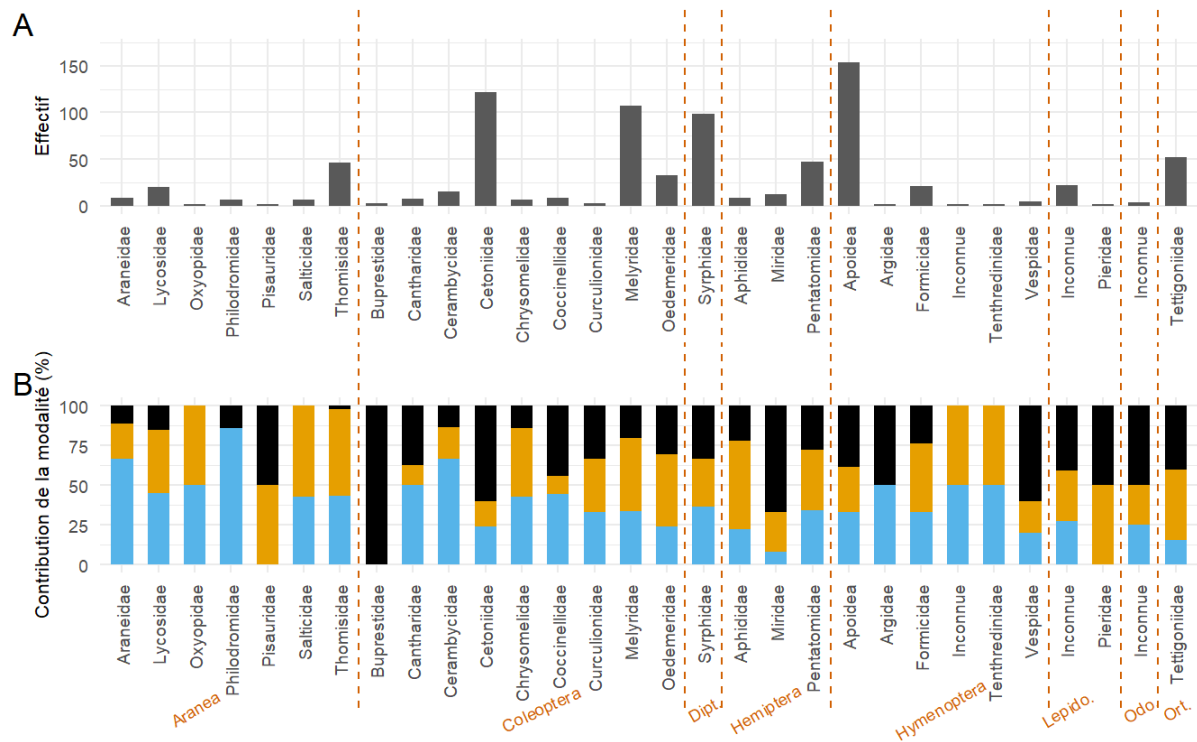
Annexe 18 : Distribution dans le temps et selon les modalités agroforestières des deux classes observées dans les transects en 2022.



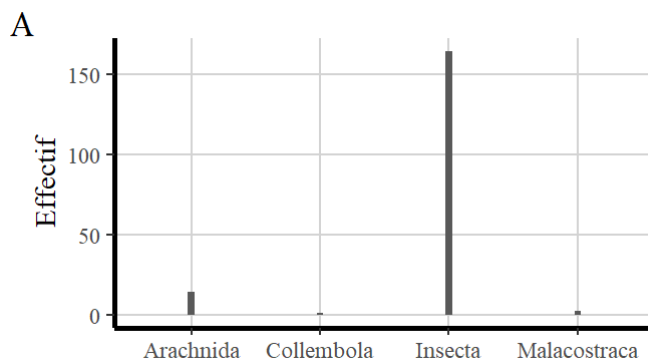
Annexe 19 : Distribution dans les temps des différents ordres de la classe Insecta observés au cours des transects en 2022.



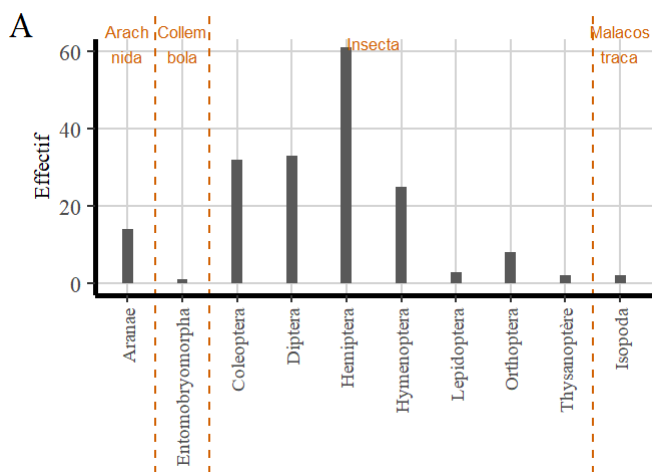
Annexe 20 : Représentation de (A) l'effectif total par famille observée dans les transects (n>1) et (B) contribution de chaque modalité dans ces observations (%). En rouge : nom de l'ordre auquel appartient les familles. Dipt. : Diptera ; Lepido. : Lepidoptera ; Odo. : Odonata ; Ort : Orthoptera



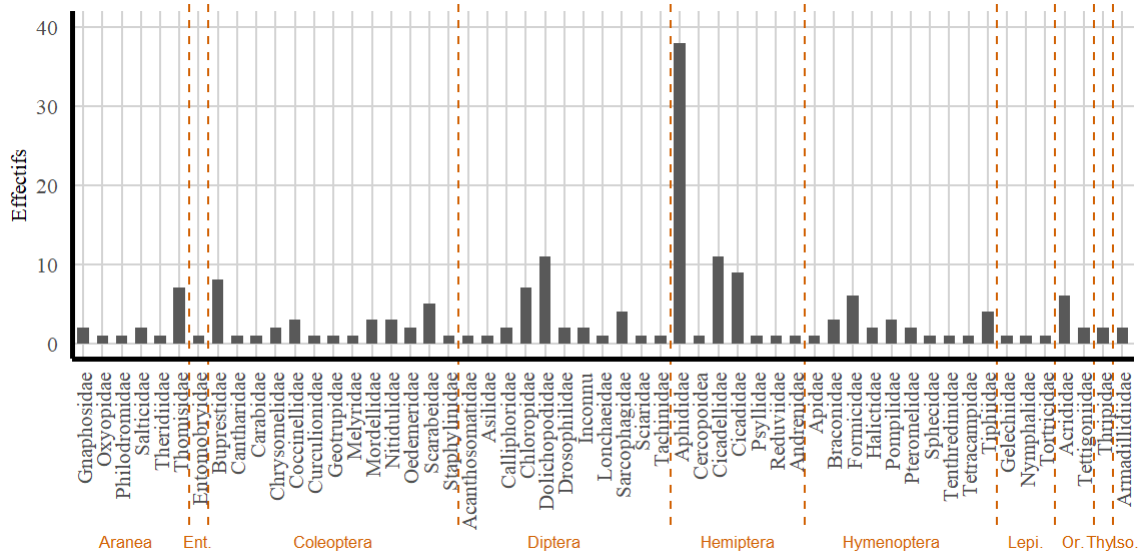
Annexe 21 : Représentation des effectifs des 4 classes observées dans les assiettes colorées en 2022



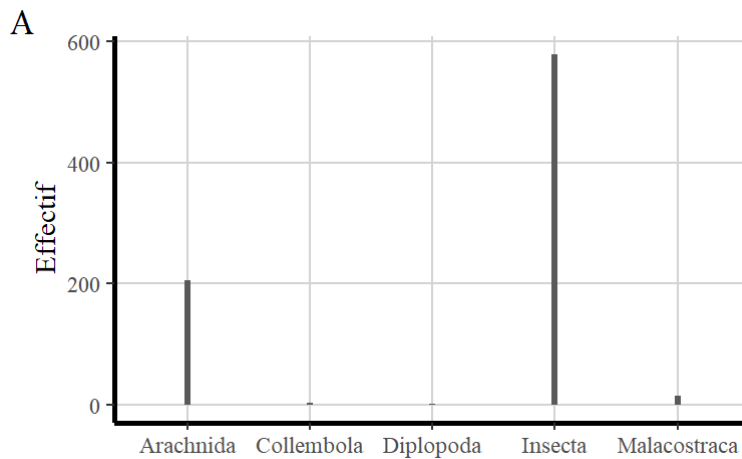
Annexe 22 : Effectif de chaque ordre observé dans les assiettes colorées en 2022



Annexe 24 : Effectif de toutes les familles échantillonnées dans les assiettes colorées



Annexe 23 : Effectif des différentes classes échantillonnées dans les pots Barber en 2022.



Annexe 25 : Effectif des différents ordres échantillonnés dans les battages en 2022.

