



HAL
open science

Le pommier en agroforesterie : Dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels

Masquin Paul, Pierre-Éric Lauri, Nathalie Cassagne

► To cite this version:

Masquin Paul, Pierre-Éric Lauri, Nathalie Cassagne. Le pommier en agroforesterie : Dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels. [Stage] INRAE. 2020. hal-03030308

HAL Id: hal-03030308

<https://hal.inrae.fr/hal-03030308v1>

Submitted on 30 Nov 2020

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.

Le pommier en agroforesterie : Dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels.



Mémoire de fin d'étude
Promotion 118
Septembre 2020

MASQUIN Paul
Elève-Ingénieur ESA
Patron de mémoire :
CASSAGNE Nathalie
Maitre de stage :
LAURI Pierre-Éric

Légende couverture :

Dans le sens antihoraire :

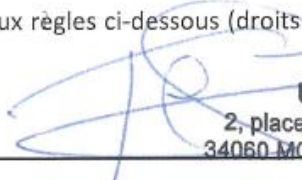

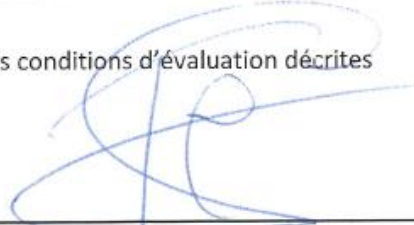
- *Stephanitis pyri* – Tigre du poirier
- Chenille de *Lymantria dispar* - Bombyx disparate
- *Aphis pomi* – Puceron vert du pommier
- *Cydia pomonella* – Carpocapse des pommes et des poires
- *Sphaerophoria scripta* - Syrphe porte-plume
- Larve de syrphidae – Syrphe
- Larve de chrysopidae – Chrysope
- *Propylea quatuordecimpunctata* - Coccinelle à damier
- *Coccinella septempunctata* - Coccinelle à 7 points

Photographies réalisées sur le site d'étude (GAFAM), 2020.

CONFIDENTIALITE ET DIFFUSION

Année 2019-2020

Mémoire de : PAUL MASQUIN Organisme d'accueil : INRAE - UMR ABCys

<p><u>Confidentialité requise par l'organisme d'accueil¹</u></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui</p> <p>Si Oui, <input type="checkbox"/> 1 an <input type="checkbox"/> 3 ans <input type="checkbox"/> 5 ans <input type="checkbox"/> > 5ans (durée :)</p> <p>Motif (si >5ans) :</p> <p><input type="checkbox"/> Accès externe autorisé <input type="checkbox"/> Mémoire consultable à la Médiathèque</p> <p>Titre du mémoire confidentiel :</p> <p><input type="checkbox"/> oui <input checked="" type="checkbox"/> non</p> <p>A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant).</p> <p>Date et signature du tuteur de stage² : <u>2/9/2020</u> </p>		<p>CIRAD UMR System 2, place Pierre Viala - Bât. 27 34060 MONTPELLIER CEDEX 2</p>
<p><u>Droits d'auteur (stagiaire)</u></p> <p>L'auteur³ autorise la diffusion de son travail (archive numérique)</p> <p><input type="checkbox"/> Référence bibliographique⁴</p> <p><input type="checkbox"/> Référence bibliographique et résumé</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Texte intégral du mémoire</p> <p>L'auteur atteste que la version numérique est conforme à l'exemplaire imprimé remis au jury.</p> <p>Autorisez-vous la consultation à la médiathèque ? <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non</p> <p>Date et signature de l'auteur : <u>03/09/2020</u> </p>		
<p><u>Autorisation de diffusion par l'enseignant-référent de l'ESA</u></p> <p>Mémoire de référence pour diffusion postérieure.</p> <p><input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si non, seul le Résumé apparaîtra dans la base d'archivage numérique</p> <p>Date et signature de l'enseignant :</p>		
<p><u>Conditions de soutenance</u></p> <p><input type="checkbox"/> Soutenance à huis-clos selon les conditions d'évaluation décrites</p> <p>Date et signature du tuteur : <u>2/9/2020</u> </p>		
<p><u>Informations particulières</u></p>		

¹ L'administration, les enseignants et le service de documentation de l'E.S.A. s'engagent à respecter cette confidentialité

² Signature et cachet de l'organisme

³ Auteur = étudiant qui réalise son Mémoire de Fin d'Études

⁴ La référence bibliographique (=Nom de l'auteur, titre du Mémoire, année de soutenance, diplômé, spécialité et spécialisation/option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

MASQUIN Paul

Promotion 118

Le pommier en agroforesterie : Dynamique des ravageurs et de leurs ennemis naturels.

76 pages. 63 figures. 11 tableaux. 196 bibliographies. 11 annexes.

Pommier ; Agroforesterie ; Infrastructure Agroécologique ; Ravageurs ; Régulation biologique par conservation

RESUME D'AUTEUR

La culture de pommier (*Malus domestica*) est l'une des principales productions fruitières en climat tempéré. En production fruitière, la gestion des ravageurs repose sur un usage intensif des pesticides afin d'assurer l'absence de défaut visuel sur les fruits. Ces systèmes conventionnels sont désormais remis en question de par leurs impacts négatifs sur la biodiversité, la santé humaine et la qualité des sols, de l'air et de l'eau. Le développement de la biodiversité à l'intérieur des parcelles agricoles est une alternative potentielle pour répondre à ces enjeux environnementaux, sanitaires et agronomiques. Les mécanismes de régulation biologique peuvent permettre un contrôle des populations de ravageurs phytophages grâce à leurs ennemis-naturels. Ces ennemis-naturels sont des prédateurs ou des parasitoïdes qui détruisent les ravageurs. Les ennemis naturels sont nombreux et leur diversité est importante pour la régulation biologique, car ils sont complémentaires (dans l'espace, le temps et les fonctions). Pour bénéficier naturellement de ces ennemis-naturels, les parcelles doivent être aménagées afin de leur offrir une continuité de ressources et d'habitats. Pour ce faire, on peut intégrer des infrastructures agroécologiques afin de pérenniser les ennemis-naturels : c'est la lutte biologique par conservation. Cependant il existe de nombreuses infrastructures agroécologiques et leurs effets ne sont pas tous bien renseignés. Dans le contexte méditerranéen, on sait que l'agroforesterie apporte des bénéfices agronomiques aux vergers de pommiers. L'objectif de l'étude est d'évaluer l'effet de l'agroforesterie sur les arthropodes et les mécanismes de régulation biologique de trois ravageurs : le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), le puceron vert (*Aphis pomi*) et le carpocapse (*Cydia pomonella*).

L'expérimentation a lieu sur une parcelle associant des noyers à bois et des pommes (variété Dalinette). Elle est située dans un environnement semi-naturel et conduite en agriculture biologique. En fonction de leur distance des noyers, les pommiers sont agencés selon trois modalités d'un gradient agroforestier. Sur les pommiers, on réalise des suivis dynamiques approfondis des arthropodes et/ou de leurs dégâts. Les résultats sont analysés en fonction du gradient agroforestier et des différents blocs de la parcelle afin d'évaluer la présence d'un gradient parcellaire.

La proximité de noyers diminue la présence du carpocapse dans les pommiers. Le pourcentage de fruits infestés par le carpocapse est plus faible à proximité de noyers. Les hypothèses explicatives sont : 1/ La partie aérienne des noyers forme un effet barrière, qui limite la propagation du carpocapse. 2/ Les rangs de noyers forment des couloirs de chasse pour les chiroptères, qui régulent le carpocapse au stade adulte. 3/ La compétition des noyers (racinaire et aérienne) diminue le nombre de fruits des pommiers proches, réduisant leur attractivité pour la ponte des femelles adultes. En revanche, la proximité des noyers favorise la présence de fourmis, de pucerons verts et de certains arthropodes détritivores dans les pommiers. Les hypothèses explicatives sont : 1/ Les fourmis, favorisées par l'agroforesterie, diminuent la régulation biologique, en protégeant les pucerons. En effet la survie et la longévité des foyers de pucerons verts sont étroitement liées à la présence de fourmis dans ces foyers. 2/ Le microclimat généré par les noyers est favorable au puceron vert pendant la période chaude et sèche de la saison. L'effet de l'agroforesterie sur le puceron cendré n'a pas pu être évalué.

Un effet parcellaire est mis en évidence. Il est provoqué principalement par une haie de bordure, qui constitue un corridor écologique pour certains arthropodes, notamment les fourmis. Cette haie favorise la présence du puceron vert dans la parcelle.

BIBLIOGRAPHICAL RECORD

MASQUIN Paul

Promotion 118

Apple trees in agroforestry system: Dynamics of pests and their natural enemies.

76 pages. 63 figures. 11 tables. 196 bibliographical articles. 11 appendices.

Apple tree ; Agroforestry ; Agro-Ecological Infrastructure; Pest ; Biological control by conservation

ABSTRACT

Apple tree cultivation (*Malus domestica*) is one of the main fruit productions in temperate climate. In fruit arboriculture, pest controls are based on intensive use of pesticides to ensure visually flawless fruits. These conventional systems are being questioned for their negative impacts on biodiversity, human health and the quality of soil, air and water. The development of biodiversity within agricultural plots is a potential alternative to meet these environmental, health and agronomic challenges. Biological regulation mechanisms can allow the control of phytophagous pest populations thanks to their natural enemies. These natural enemies are predators or parasitoids which destroy pests. Natural enemies are numerous and their diversity is important for biological regulation because they are complementary (in space, time, and functions). To benefit from these natural enemies naturally, the plots must be designed to provide them continuous resources and habitats. To achieve this, we can integrate agro ecological infrastructures in order to perpetuate natural enemies, which is the stand of biological control by conservation. However, there are many agro ecological infrastructures and their effects are not all well known. In the Mediterranean context, we know that agroforestry brings agronomic benefits to apple orchards. The aim of this study is to evaluate the effect of agroforestry on arthropods and the biological regulation mechanisms of three pests: the ash aphid (*Dysaphis plantaginea*), the green aphid (*Aphis pomi*) and the codling moth (*Cydia pomonella*).

The experimentation takes place on a plot combining walnut trees and apple trees (cultivar Dalinette). It is located in a semi-natural environment and carried out in organic farming. Depending on how far they are from the walnut trees, the apple trees are arranged according to three modalities of agroforestry gradient. On apple trees, dynamic monitoring of arthropods and / or the damage they cause is carried out. The results are analyzed according to the agroforestry gradient, and to the different blocks of the plot, in order to assess the presence of a plot gradient.

The proximity of walnut trees reduces the presence of codling moth in apple trees. The rate of infested fruits by the codling moth is lower near the walnut trees. The explanatory hypotheses are: 1 / The aerial part of walnut trees forms a barrier effect, which limits the propagation of the codling moth. 2 / The rows of walnut trees form hunting lanes for bats, thus regulating the codling moth when adults. 3 / The competition from walnut trees (root and aerial) reduces the number of fruits on nearby apple trees, lowering their attractiveness for the laying of adult females. On the other hand, the proximity of walnut trees favors the presence of ants, green aphid and of some detritivorous arthropods in apple trees. The explanatory hypotheses are: 1 / Ants, favored by agroforestry, reduce biological regulation by protecting aphids. Indeed, the survival and longevity of green aphid outbreaks are closely linked to the presence of ants in these outbreaks. 2 / The microclimate generated by walnut trees is favorable to the green aphid during the hot and dry period of the season. The effect of agroforestry on the ash aphid could not be assessed.

A plot gradient effect is highlighted. It is caused mainly by a border hedge which constitutes an ecological corridor for certain arthropods, in particular ants. This hedge promotes the presence of the green aphid within the plot.

Remerciements

Je souhaite remercier l'ensemble des acteurs rencontrés au cours de cette mission, que ce soit les employés d'INRAE ou leurs partenaires, pour leur accueil, leur aide et leurs conseils.

Je tiens particulièrement à remercier Pierre-Éric Lauri pour son encadrement, son écoute, sa disponibilité, ses conseils et ses remarques enrichissantes. Merci également pour sa confiance tout au long de cette mission, et les nombreux échanges sur des sujets variés.

Merci à tous les agents INRAE qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre tout au long de cette mission : Lydie Dufour, Benjamin Pitcher, Nathalie Smith, Yvan Bouisson, Clément Enard, Viviane Marty, Jean-Claude Streito, Carole Picard et Karine Morel.

Merci également aux partenaires d'INRAE rencontrés pour leur aide et/ou leurs conseils : Philippe Blanc, Raphael Metral et Bertrand Alison.

Merci à l'ensemble des acteurs du projet ALTO pour tous les échanges, les discussions et les débats : Pierre-Éric Lauri, Sylvaine Simon, Jean-Michel Ricard, Michel Jay, Solène Borne, Blandine Rosies, Maureen Masson et Emilie Perronne ; ainsi qu'aux partenaires Pierre Franck, Cecile Thomas et Sandrine Maugin pour les cartes de prédation.

Merci à Nathalie Cassagne, ma patronne de mémoire ESA, pour son support à la rédaction de ce mémoire et ses conseils.

Enfin, merci aux camarades de terrain Samuel Roissé, Alain Sellier et Jean-François Bourdoncle pour leur compagnie, leur support technique et tous nos échanges.

Sigles et abréviations

AC : Agricultural control – Modalité témoin

AFIR : AgroForestry Inter-Row – Modalité agroforestière, inter-rang

AFR : AgroForestry – Modalité agroforestière, intra-rang

ALTO : Systèmes en ArboricuLture et Transition agrOécologique

ANOVA : Analysis of Variance – Analyse de la variance

BRF : Bois Raméal Fragmenté

GAFAM : Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

IAE : Infrastructure AgroEcologique

IAMM : Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

IFPC : Institut Français des Productions Cidricoles

IFT : Indice de Fréquence de Traitements phytosanitaires

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

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

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

Km : Kilomètre

MAE : Millenium Ecosystem Assessment

SYSTEM : tropical and Mediterranean cropping SYSTEM functioning and management

TCR : Taillis à Courte Rotation

UERI : Unité Expérimentale de Recherches Appliquées

UMR : Unité Mixte de Recherche

°C : Degrés Celsius

Table des matières

Sigles et abréviations

Table des matières

<u>Introduction</u>	1
<u>Chapitre 1 – Contexte et Bibliographie</u>	2
A – Présentation de la mission.....	2
B – Contexte de l’entreprise d’accueil.....	3
C – Etat de l’art	5
Partie 1 – Principaux enjeux de la pomiculture.....	5
A/ Les enjeux de l’agriculture moderne.....	5
B/ La pomiculture au cœur des problématiques modernes.....	5
Partie 2 - L’agrobiodiversité, alternative pour répondre à ces enjeux	6
A/ Agriculture et biodiversité.....	6
B/ Service de régulation biologique et stratégies de lutte biologique.....	7
C/ Lutte biologique par conservation ; connaissances et perspectives.....	9
Partie 3 - Lutte par conservation en verger de pommiers : acteurs et mécanismes.....	12
A/ Les principaux ravageurs du pommier.....	12
B/ Les ennemis naturels de ces ravageurs.....	17
C/ Mécanismes écologiques de la régulation biologique.....	18
Partie 4 – La diversification des infrastructures agroécologiques: la clef d’une régulation biologique efficace.....	21
A/ Habitats et ressources.....	21
B/ Dimension spatiale.....	22
C/ Dimension temporelle.....	23
Partie 5 – Une IAE des vergers innovante en climat méditerranéen : l’agroforesterie.....	24
D – Question de recherche.....	26
<u>Chapitre 2 – Méthodologie</u>	27
A – Présentation du site d’étude.....	27
B – Définition des groupes taxonomiques d’arthropodes évalués.....	30
C – Suivis des ennemis naturels.....	32
D – Suivis des ravageurs.....	33
E – Autres suivis.....	34
F – Dispositif expérimental.....	34
G – Calendrier de travail.....	38
H – Traitements statistiques.....	38

<u>Chapitre 3 – Résultats</u>	39
A – Suivi des ravageurs.....	39
Partie 1 – Puceron cendré (<i>Dysaphis plantaginea</i>).....	39
Partie 2 – Puceron vert (<i>Aphis pomi</i>).....	41
A/ Evaluations de l'incidence.....	41
B/ Suivi des foyers de pucerons verts.....	43
C/ Evaluation de la prédation du puceron vert.....	49
Partie 3 – Le carpocapse des pommes et des poires (<i>Cydia pomonella</i>).....	51
A/ Ajustement de la variable d'étude.....	51
B/ Evaluation du taux d'infestation du carpocapse.....	53
C/ Evaluation de la prédation des œufs de carpocapse.....	57
Partie 4 – Le tigre du poirier (<i>Stephanitis pyri</i>).....	59
B – Suivi des arthropodes sur le site.....	61
C – Suivi des ressources en fleurs.....	62
D – Données météorologiques de la saison 2020.....	63
 <u>Chapitre 4 : Discussion</u>	 65
A – Les ravageurs.....	65
B – Suivi des autres arthropodes.....	72
C – Ressources en fleurs.....	73
D – Limites de l'étude.....	73
E – Perspectives.....	75
 <u>Conclusion</u>	 76

Bibliographie

Table des figures

Annexes

Introduction

J'ai réalisé mon stage de fin d'étude au sein de l'unité mixte de recherche (UMR) SYSTEM (fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens), située à Montpellier, au sein d'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement). J'ai été encadré par Monsieur Pierre-Eric LAURI, chercheur en systèmes agricoles à forte biodiversité, spécialisé sur le développement des espèces fruitières.

Les vergers conventionnels français, basés sur une forte utilisation de produits phytosanitaires, sont aujourd'hui remis en question pour leur durabilité. En effet ces systèmes ne sont pas sans conséquence pour la santé humaine, l'environnement ou encore la biodiversité. Face à ce constat, des instituts de recherche agronomique comme INRAE sont subventionnés pour étudier des solutions alternatives et durables.

La gestion des ravageurs est un aspect crucial des productions fruitières car la qualité visuelle des fruits est un critère primordial. C'est cette gestion qui justifie une utilisation intensive d'insecticides en arboriculture conventionnelle. Il est donc nécessaire de trouver des alternatives aux insecticides pour contrôler les ravageurs.

Parmi ces alternatives, la lutte biologique par conservation consiste à favoriser la biodiversité dite « fonctionnelle » au sein des systèmes agricoles afin qu'elle maîtrise les populations de ravageurs. Cette alternative est intéressante car elle permet de répondre aux enjeux sanitaires et environnementaux tout en favorisant la biodiversité. Il est toutefois nécessaire d'approfondir la recherche à ce sujet pour évaluer son efficacité et son adéquation aux enjeux économiques des producteurs.

Dans ce contexte, l'UMR SYSTEM propose d'évaluer l'impact de l'agroforesterie sur les mécanismes de régulation biologique en verger de pommiers. L'objectif de cette étude est de mettre en avant l'effet d'un dispositif agroforestier sur le développement et la régulation des ravageurs du pommier.

Ce rapport relate les enjeux de la lutte biologique en pomiculture, la méthodologie mise en place, les résultats obtenus, les conclusions et les perspectives de l'étude.

Ce stage s'est déroulé du 2 mars au 28 août 2020. Suite aux conditions sanitaires exceptionnelles de l'année 2020, le travail présentiel a été interrompu du 16 mars au 18 mai. Aucune donnée n'a pu être relevée durant cette période, ce qui a fortement limité les capacités de l'étude. Les stades clefs du développement de certains arthropodes n'ont pas pu être évalués. Les suivis dynamiques des populations ont été restreints. Nous y reviendrons en discussion.

L'ensemble des photographies présentées sans source dans ce rapport sont la propriété intellectuelle de Paul Masquin. Leur utilisation et leur diffusion sont libres de droits sous condition que l'auteur soit cité. Contact : paul.masquin@outlook.fr

Chapitre 1 – Contexte et bibliographie

A - Présentation de la mission

L'ensemble de l'étude est réalisée sur un unique site d'étude ; le site GAFAM (Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean). Cette parcelle est située dans le Domaine Départemental de Restinclières, à proximité de Montpellier, donc en climat méditerranéen. Elle est composée d'un verger d'environ 150 pommiers (dans leur 5^{ème} année de croissance en 2020) répartis sur 10 rangs et d'un dispositif agroforestier de noyers (dans leur 26^{ème} année de croissance en 2020). Ces derniers sont présents uniquement sur certains rangs, ce qui forme différentes modalités agroforestières influençant les pommiers.



Figure 1 : Photographie du site d'étude, 20/05/20.

La parcelle est également constituée de différents aménagements susceptibles de favoriser la biodiversité tels que des haies en bordure, de la flore spontanée, du bois raméal fragmenté (BRF) le long des rangs de pommiers et des bandes fleuries semées en inter-rangs. Ces aménagements sont toutefois répartis de manière homogène, contrairement aux noyers, il est donc difficile de quantifier leurs effets.

L'objectif premier du site GAFAM est l'évaluation des différentes modalités forestières sur la croissance et l'architecture des pommiers. Ces travaux font l'objet d'une thèse réalisée par Benjamin Pitchers depuis 2018. Depuis 2019, INRAE s'intéresse aussi aux mécanismes de régulation biologique associés au concept de « lutte biologique ». Suite à la première année d'étude sur ce sujet réalisée par Camille Perseval en 2019, ma mission consiste à approfondir les connaissances des phénomènes de régulation sur le site GAFAM.

L'objectif principal de la mission est de mettre en évidence l'effet des différentes modalités agroforestières sur la pression des ravageurs et sur leur régulation par leurs ennemis naturels arthropodes. Pour ce faire, il faudra réaliser un suivi dynamique des populations des ravageurs ainsi que de leurs ennemis naturels et quantifier la régulation exercée par ces derniers. On cherchera également à mettre en évidence les facteurs susceptibles d'influencer directement ou indirectement ces dynamiques (e.g. les ressources disponibles ou la connectivité des différents milieux semi-naturels).

En parallèle, le stage propose une certaine autonomie pour aborder d'autres aspects susceptibles d'améliorer la compréhension des mécanismes écologiques du site. J'ai décidé d'essayer d'évaluer l'impact des différentes infrastructures agroécologiques du site (haies, flore spontanée, BRF, bandes fleuries) sur la communauté d'arthropodes présente sur la parcelle. J'ai également décidé de réaliser un inventaire des arthropodes observés sur le site durant la saison 2020.

Enfin, l'organisme d'accueil attend à la fin de la mission des recommandations à la fois pour améliorer le contrôle des ravageurs directement ou indirectement (notamment en optimisant la lutte biologique) et pour proposer de nouveaux axes d'études pertinents sur le site.

B – Contexte de l'entreprise d'accueil

➤ UMR SYSTEM

L'unité mixte de recherche SYSTEM, est composée d'une quarantaine de salariés permanents. Elle est sous tutelle du CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), d'INRAE, de Montpellier SupAgro et de l'IAMM (Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier). L'objectif de cette unité est de produire des connaissances et des outils pour évaluer et concevoir des systèmes de cultures (tropicaux et méditerranéens) alliant performances économiques et productions de services environnementaux. Le siège de l'UMR est situé sur le campus universitaire de Montpellier SupAgro, à Montpellier (région Occitanie, département de l'Hérault).

J'ai intégré cette équipe par l'intermédiaire d'INRAE, l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. Cet institut a été créé en janvier 2020 suite à la fusion de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et de l'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture).

➤ Projet GAFAM

En 1992, le département de l'Hérault fait l'acquisition d'un site historique de 240 hectares le « Domaine de Restinclières » pour préserver ce patrimoine naturel et culturel en l'aménageant au public. Dès 1995, et suite à la demande de Monsieur Christian Dupraz, le département de l'Hérault met à disposition de l'INRA 40 hectares du Domaine, répartis sur 27 parcelles (figure 2). Plusieurs essences forestières sont alors plantées sur ces parcelles (notamment du noyer) afin de réaliser des expérimentations d'agroforesterie. Des essais d'association culture/sylviculture sont alors lancés en combinant les arbres à différentes cultures : blé, orge, colza, pois et pommier.

Au printemps 2016, le dispositif GAFAM (Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean) est mis en place à l'initiative et sous la responsabilité de Pierre-Eric Lauri. Sur ce site composé de rangs de noyers sont plantés des pommiers dans les rangs de noyers ou en inter-rangs, ainsi que dans quelques rangs témoins. Les rangs de noyers du site ne sont cependant pas tous complets et homogènes. Certains noyers ont été abattus suite à des accidents et des travaux de recherche sur le bois.

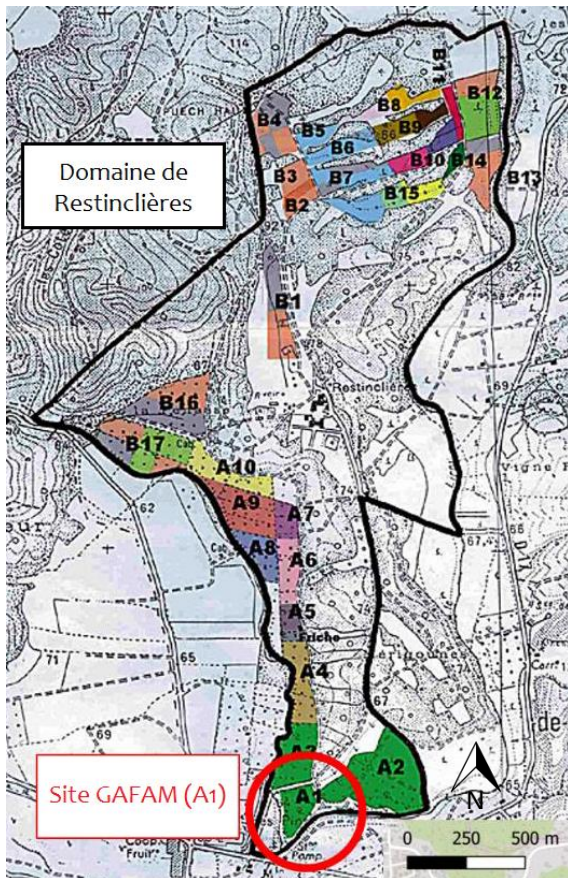


Figure 2 : Représentation des parcelles d'expérimentation en agroforesterie sur le domaine de Restinclières (© INRAE).

➤ Projet ALTO

Le dispositif GAFAM est l'un des trois dispositifs expérimentaux qui composent le projet ALTO (Systèmes en Arboriculture et Transition agroÉcologique, 2018-2023). L'objectif du projet ALTO est de développer de nouveaux systèmes de production de fruits très bas intrants, voire sans pesticides. Ce projet répond à l'appel à projet Ecophyto2 EXPE et aux différents enjeux liés à la diminution des produits phytosanitaires, notamment en arboriculture. Le principal levier d'étude est la diversification des espèces fruitières et des plantes associées, afin de maximiser les services écosystémiques (notamment la régulation biologique via l'hébergement d'une faune d'auxiliaires).

Les deux autres dispositifs sont situés sur le domaine de Gotheron (région Provence-Alpes-Côtes-d'Azur, département de la Drôme) et sur le centre de Balandran (région Occitanie, département du Gard). Le domaine de Gotheron est piloté par l'UERI (Unité Expérimentale de Recherches Appliquées) rattachée à INRAE. Le centre de Balandran est piloté par le CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes). Sur les trois sites du projet ALTO, l'étude porte sur les arbres fruitiers, et notamment le pommier.

Dans le cadre du projet ALTO, plusieurs échanges sont organisés entre les équipes afin de partager leurs sujets d'étude, leurs connaissances et leurs retours d'expériences. C'est dans cette logique de travail commun que sont pilotés les différents dispositifs, en utilisant notamment des protocoles harmonisés au niveau ALTO.

C – Etat de l’art

Partie 1 : Principaux enjeux de la pomiculture

A/ Les enjeux de l’agriculture moderne

Les systèmes agricoles intensifs traditionnels sont principalement basés sur la productivité de monocultures, grâce à l’utilisation de fertilisants, d’irrigation et de produits phytosanitaires (Tilman et al., 2002 ; Foley et al., 2005 ; Malézieux et al., 2009). Ces systèmes sont désormais largement remis en question de par leurs impacts négatifs sur la biodiversité (Krebs et al., 1999), la santé humaine (Baldi et al., 1998 ; Lee et al., 2004 ; Simon et al., 2007), la qualité des sols (Tsiafouli et al., 2015) et de l’eau (Moss, 2008). De plus, ils reposent sur une utilisation importante d’énergies fossiles (Malézieux et al., 2009) et ils exercent une pression de sélection entraînant l’apparition de résistance chez certains ravageurs (Boivin & Sauphanor, 2017).

L’intensification de la production agricole a également conduit à une forte homogénéisation du paysage agricole (Robinson and Sutherland, 2002 ; Benton et al., 2003), une dégradation et une fragmentation des espaces naturels et semi-naturels (Foley et al., 2005) et de la biodiversité associée à ces espaces (Le Roux et al., 2008 ; Tilman et al., 2001).

La simplification du paysage et les pratiques intensives ont conduit, du fait de la dégradation de l’environnement et de la biodiversité, à une diminution des services écologiques de régulation de la qualité de l’air, de l’eau, du climat, des bioagresseurs et de la fertilité de sols (Foley et al., 2005 ; Kremen and Miles, 2012 ; MEA, 2005 ; Zhang et al., 2007). L’augmentation de la productivité agricole s’est donc accompagnée d’une très forte dépendance aux intrants chimiques (Altieri, 1999).

Face à ces impacts négatifs il devient vital de développer des systèmes agricoles plus durables, avec de plus faibles impacts environnementaux, moins dépendants des intrants et du pétrole, capables de produire une alimentation saine en quantité, mais également plus résilients aux évolutions climatiques à venir (Bommarco et al., 2013 ; Koohafkan et al., 2011).

B/ La pomiculture au cœur des problématiques modernes

La culture de pommier (*Malus domestica*) compte parmi les principales productions fruitières en climat tempéré (Lauri et Simon, 2008). En 2018, la production française de pommes s’élève à 1,7 million de tonnes sur 50 mille hectares et la production européenne à 19,6 millions de tonnes sur 1 million d’hectares (FAO, 2020).

Tout comme pour les autres productions fruitières, la gestion des vergers de pommiers repose donc sur un usage intensif des pesticides afin de contrôler les organismes nuisibles (ravageurs, plantes adventices, pathogènes) (Sauphanor et al., 2009). En effet en arboriculture fruitière la qualité standard commerciale repose particulièrement sur l’absence de défaut visuel des fruits et donc sur la gestion des ravageurs (Simon et al., 2009). En 2003, alors que les vergers français occupaient seulement 1% de la surface agricole ils représentaient 21% des ventes nationales d’insecticides (Codron et al., 2003). En France, l’IFT (Indice de Fréquence de Traitements phytosanitaires) moyen de la production de

pommes est de 35, l'un des plus élevés parmi les productions fruitières des climats tempérés (Labeyrie et al., 2018).

La production de pommes est donc particulièrement concernée par les enjeux environnementaux et sanitaires, qui se traduisent par des attentes sociétales d'une production de fruits sains, respectueuse de l'environnement (Simon et al., 2009).

En effet, la prise de conscience des consommateurs de l'utilisation intensive des pesticides en arboriculture fruitière a impacté très négativement la perception des fruits, considérés jusqu'alors comme des produits sains et bons pour la santé. Cette évolution de l'attente des consommateurs a conduit plusieurs pays à développer des programmes « zéro résidu » (Berrie and Cross, 2006). En parallèle, des plans européens (Ecophyto en France) encouragent la réduction de pesticides pour limiter l'impact environnemental de l'agriculture (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018).

En pomiculture, ces attentes ont conduit au développement de labels (agriculture biologique, vergers écoresponsables) et d'ateliers de conception et d'expérimentation comme le projet « verger cidricole de demain » porté par l'IFPC (Institut Français des Productions Cidricoles) en Normandie.

Les enjeux des vergers de demain sont donc multiples : produire des fruits de qualité (visuelle, sanitaire) tout en respectant l'environnement et la biodiversité, réduire la dépendance des producteurs aux intrants chimiques, maîtriser les bioagresseurs en deçà des seuils d'impact économique. Le besoin de trouver des alternatives aux pesticides, notamment pour la régulation des ravageurs a généré un intérêt grandissant pour le service de régulation biologique (Latham et Mills, 2010). En effet, la préservation et le développement de la biodiversité à l'intérieur des parcelles agricoles pourrait permettre de répondre à la fois aux enjeux agronomiques et environnementaux, et ainsi assurer une production agricole durable.

[Partie 2 : L'agrobiodiversité, une alternative pour répondre à ces enjeux](#)

A/ Agriculture et biodiversité

La biodiversité définit la diversité écologique. Ce concept fait à la fois référence à la diversité génétique, la diversité spécifique et la diversité des écosystèmes (Krishnamurthy, 2003).

L'intégration de la biodiversité et de l'écologie dans la conception et la gestion d'agroécosystèmes durables s'intègre dans le mouvement de l'agroécologie (Gliesmann, 1998). Le défi de l'agroécologie est de combiner production agricole et biodiversité à l'intérieur des systèmes agricoles (Altieri, 1995). L'agriculture entretient une relation de proximité avec la biodiversité puisqu'elle influence les services écologiques (ou « services écosystémiques ») de l'espace agricole dont elle bénéficie elle-même par la suite (Swinton et al., 2007 ; Zhang et al., 2007). L'entretien des espaces agricoles façonne le paysage, modifiant les conditions écologiques qui génèrent la biodiversité des agroécosystèmes (Le Roux et al. 2008). Cette biodiversité est à la base de nombreux processus naturels qui régissent le fonctionnement des agroécosystèmes, elle bénéficie donc au système agricole grâce aux services générés (Bertrand, 2001 ; Diaz et al., 2006).

D'après le Millenium Ecosystem Assessment (MAE, 2005), les services écosystémiques résultent des processus écologiques qui se produisent dans les écosystèmes et dont bénéficient directement ou indirectement les humains. On qualifie la partie de la biodiversité qui génère ces services de « biodiversité fonctionnelle ».

En aménageant les systèmes de culture pour favoriser la biodiversité fonctionnelle, il est possible d'augmenter la quantité et la qualité des services écologiques dont ils bénéficient. La promotion de la biodiversité fonctionnelle dans les agroécosystèmes représente donc une stratégie écologique clé pour concevoir des systèmes agricoles durables et productifs (Altieri, 1999).

Le développement des pratiques agroécologiques se présente comme une solution, du moins partielle, aux enjeux modernes de l'agriculture (*cf* partie 1). Pour les producteurs ces pratiques permettraient, à terme, de réduire leur dépendance aux intrants de synthèse en conservant une agriculture productive (Duru et al., 2015 ; Tschumi et al., 2015) ou a minima de maintenir voire d'accroître leurs revenus en diminuant les charges. Des pratiques plus respectueuses de l'environnement permettraient de limiter l'impact négatif de l'agriculture sur la biodiversité mais également de favoriser la biodiversité fonctionnelle.

Si cette vision « utilitariste » de la biodiversité est parfois critiquée, les indices de biodiversité de la faune d'arthropodes auxiliaires sont considérés comme de bons indicateurs d'une biodiversité élargie (Thierry et al., 2005). En effet le régime alimentaire mixte de cette faune combine la prédation et la flore sur laquelle les adultes se nourrissent de pollen et de nectar (en alimentation stricte ou mixte, *cf* partie 3). Les arthropodes auxiliaires permettent donc d'estimer partiellement la qualité d'une gestion écologique visant à favoriser la biodiversité d'un site (Villeneuve-Chasset & Leblond, 2019).

De plus, l'augmentation de la diversité au champ, qu'il s'agisse de diversité spontanée ou cultivée, est souvent reliée en écologie à une plus grande stabilité. Il existe de nombreuses manières de considérer la stabilité écologique (Kéfi et al., 2019), dans une approche fonctionnelle, il est pertinent de s'intéresser à la résilience. La résilience d'un système est caractérisée par sa résistance et son rétablissement (Côté & Darling, 2010 ; McClanahan et al., 2012). La résistance est la capacité du système à préserver son fonctionnement lors d'une perturbation extérieure (pollution, espèce invasive, conditions climatiques) (Jaloux, 2011). Le rétablissement (« recovery ») est la capacité du système à retourner à son fonctionnement initial après qu'une perturbation a impacté ses fonctions.

La stabilité des systèmes agricoles est aujourd'hui un enjeu crucial au regard du développement grandissant d'espèces invasives (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019) et de l'évolution climatique (Le Gouée et al., 2010), deux éléments étroitement corrélés.

B/ Service de régulation biologique et stratégies de lutte biologique

Les services écosystémiques sont multiples et sont généralement classés en 4 catégories : les services culturels, d'approvisionnement, de support et de régulation (figure 3). En dehors du service fondamental d'approvisionnement (dit de production), les principaux services écosystémiques bénéfiques (et indispensables) aux systèmes de culture sont les services de fertilité des sols, de pollinisation et de régulation biologique (Zhang et al., 2007).

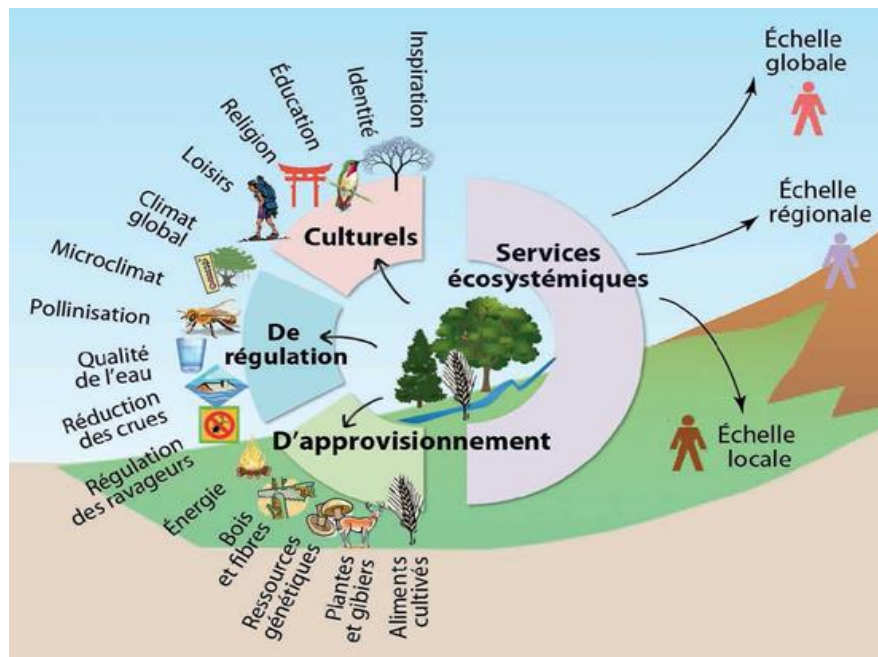


Figure 3 : Les principaux services écosystémiques dont bénéficient les activités humaines (Caron et al, 2007).

La régulation biologique représente l'ensemble des interactions et des transformations opérant au sein des systèmes biotechniques (peuplements, végétaux, troupeaux) de l'agroécosystème (Prévost, 2000). En agronomie, cette notion fait plus particulièrement référence au contrôle biologique des bioagresseurs (ravageurs, adventices et pathogènes) et elle est principalement mobilisée dans le cadre de la lutte biologique.

La lutte biologique se définit par l'utilisation d'organismes vivants (dits « organismes auxiliaires ») pour prévenir ou réduire les dégâts causés par des ravageurs. Elle consiste donc à utiliser des parasitoïdes, des prédateurs, des pathogènes, des antagonistes ou des compétiteurs afin de réduire la population d'organismes nuisibles et ainsi leurs dommages (Van Driesche et Bellows Jr, 1996). La lutte biologique peut être divisée en trois stratégies qui peuvent être complémentaires (Ferron, 2016) :

La lutte biologique par conservation des organismes auxiliaires indigènes consiste à augmenter et conserver le potentiel de régulation des organismes indigènes, notamment les arthropodes en : 1/ conservant leurs habitats en périphérie des parcelles agricoles ; 2/ aménageant la structure de la parcelle pour y réserver des zones refuges favorables aux auxiliaires ; 3/ limitant au maximum les pratiques agricoles défavorables (notamment l'utilisation d'insecticides qui, du fait de leur spectre d'action non-sélectif, affectent autant les populations de ravageurs que d'auxiliaires). Si les arthropodes sont les principaux responsables d'un certain équilibre biologique, on sait aujourd'hui que les populations d'oiseaux (Boyer et al., 2017) et de chiroptères (Jay et Ricard, 2018) jouent également un rôle prépondérant dans la régulation des ravageurs.

La lutte biologique par introduction-acclimatation d'organismes auxiliaires exotiques consiste à introduire volontairement des organismes exotiques en s'assurant, par des aménagements spécifiques, de la pérennité de l'espèce dans l'écosystème considéré. Cette technique est aujourd'hui très critiquée, notamment au regard du risque d'occupation de niches

écologiques d'espèces indigènes par de nouvelles espèces colonisatrices, et donc de la réduction de la diversité biologique originelle. Les exemples ne manquent pas où de tels organismes exotiques sont par la suite devenus problématiques (comme la Coccinelle asiatique *Harmonia axyridis*). Précisons que ces organismes exotiques sont souvent introduits pour occuper des niches écologiques vides, créées par l'introduction accidentelle d'organismes nuisibles (plantes et arthropodes) aux cultures, sans le cortège parasitaire qui contribue à réguler leur pullulation dans leur biotope d'origine. Cette stratégie de lutte est aujourd'hui réglementée à l'échelle européenne, elle n'est de ce fait pas adaptée à des actions individuelles.

La lutte biologique par lâchers inondatifs d'organismes auxiliaires repose sur la mise en œuvre d'organismes auxiliaires en quantité (bactéries, champignons, virus, nématodes, insectes), en un lieu et un temps donné, pour maîtriser des populations de ravageurs déjà développées. A l'inverse des deux stratégies précédentes, qui se veulent préventives, cette stratégie est donc curative. Elle est comparable à un traitement biologique qui se substitue à un traitement chimique traditionnel ; les organismes introduits ne sont pas voués à perdurer dans la parcelle. Si cette stratégie ne soulage pas les producteurs du coût des traitements, elle a cependant le mérite de garantir (de par l'engagement du fabricant) une efficacité de contrôle.

Précisons que d'autres méthodes de lutte respectueuses de l'environnement existent et ne se limitent pas à l'utilisation d'organismes vivants. C'est le cas du biocontrôle qui mobilise en plus des organismes vivants (macro et micro-organismes), des médiateurs chimiques (par exemple des phéromones pour la confusion sexuelle) ou des substances naturelles afin de limiter la nuisibilité des bioagresseurs (Turner 2014).

Le travail présenté dans ce rapport se concentre exclusivement sur la lutte biologique par conservation, méthode la plus favorable au maintien d'une biodiversité fonctionnelle et pérenne dans sa fonction de gestion des ravageurs (Waage, 1991). Il n'est cependant pas exclu de combiner cette stratégie avec d'autres méthodes de lutte pour réguler plus efficacement les bioagresseurs (Ephytia, 2016).

C/ Lutte biologique par conservation ; connaissances et perspectives

La lutte biologique par conservation consiste à modifier l'environnement et les pratiques agricoles afin de conserver et favoriser les populations d'auxiliaires de régulation (dits « ennemis naturels ») des organismes ravageurs afin de réduire leur impact sur les cultures (Lhoste Drouineau, 2010). Cela se réalise notamment par l'aménagement d'habitats qui offrent des zones refuge et des ressources alimentaires aux ennemis naturels.

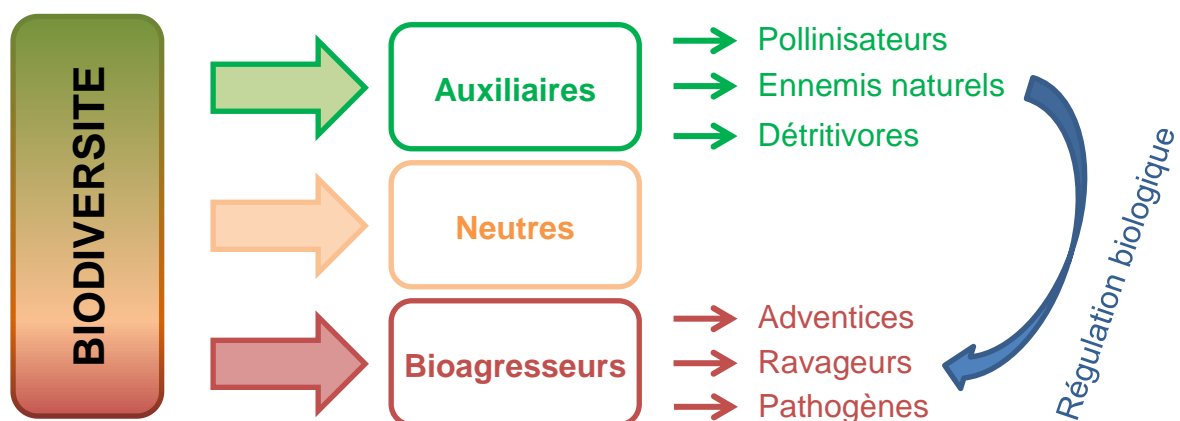


Figure 4 : Présentation simplifiée des principaux groupes attribués aux organismes en milieu agricole. *Si des organismes sont considérés « neutres », ils influencent toutefois directement et/ou indirectement les autres groupes, notamment au travers de la chaîne trophique.*

Il est globalement admis que la gestion parcellaire (et notamment l'aménagement d'infrastructures agroécologiques, IAE) permet d'influencer positivement les populations d'ennemis naturels (Sarhou et al., 2014 ; Nicholls et al. 2001). De manière générale, la présence d'infrastructures agroécologiques favorise la régulation biologique, ce qui permet de réduire la pression des ravageurs (Bischoff et al., 2016 ; Wyss 1995).

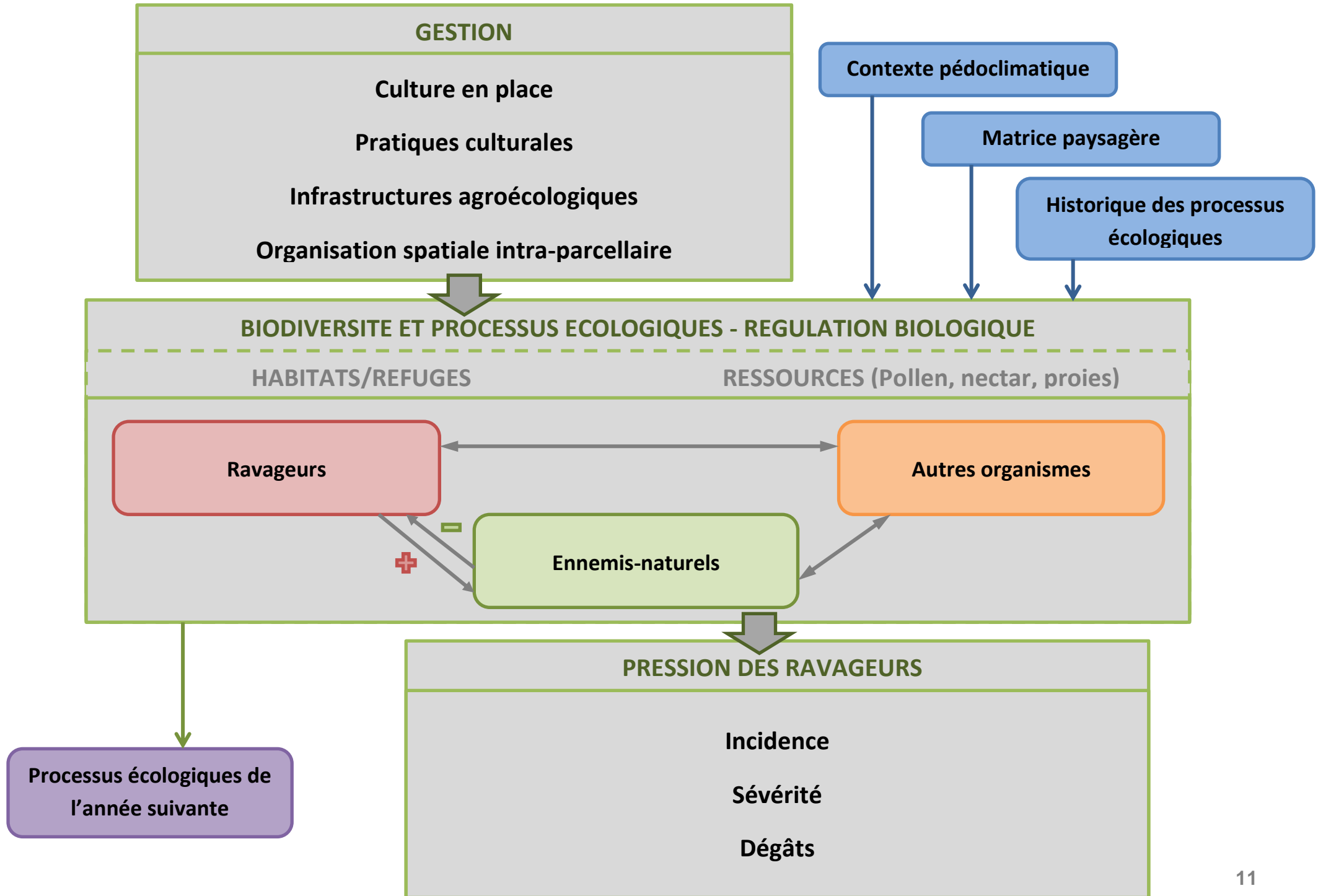
Une infrastructure agroécologique (IAE) correspond à un habitat semi-naturel d'un agroécosystème dans ou autour duquel se développe une végétation spontanée, offrant à la faune un lieu de vie permanent ou intermittent, permettant reproduction, alimentation, refuge, estivation ou hibernation (Sarhou, 2016). Les principales IAE sont les haies, les bandes herbacées ou fleuries, 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). Les IAE permettent de favoriser la biodiversité au sein des systèmes agricoles.

Cependant, il existe encore de nombreuses incertitudes concernant les relations entre pratiques agricoles, processus écologiques et services écologiques (Duru et al., 2015). Une influence positive des espaces semi-naturels sur les populations d'ennemis naturels ne résulte pas systématiquement en une meilleure régulation des ravageurs (Bischoff et al., 2016). En effet, la gestion et l'aménagement des parcelles peuvent favoriser l'ensemble de la biodiversité, dont les ennemis naturels mais aussi les ravageurs (Landis et al., 2000) (figure 4). Les effets positifs sur les ennemis naturels et les processus écologiques de régulation peuvent être atténués par des effets positifs (directs ou indirects) sur les populations de ravageurs (Thies et al., 2005 ; Bianchi et al., 2006 ; Rusch et al. 2010 ; Chaplin-Kramer et al., 2011).

Dans certains contextes les aménagements peuvent même aggraver les dégâts des ravageurs. C'est par exemple le cas des études de Josso et al. (2013) et d'Albert et al. (2017) qui démontrent que les haies en bordure influencent (de manière directe et indirecte) positivement les ennemis naturels et les ravageurs. Dans ces situations l'augmentation de la régulation biologique ne permet pas de compenser l'augmentation des ravageurs, ce qui se traduit par une augmentation des dégâts sur les cultures.

L'enjeu premier de la lutte biologique par conservation consiste donc à identifier les combinaisons de paramètres permettant de favoriser efficacement et durablement les populations d'ennemis naturels des ravageurs. Si la recherche scientifique apporte aujourd'hui des solutions visant à favoriser les ennemis naturels, elle doit maintenant mieux comprendre les interactions et les processus écologiques qui interviennent à l'échelle de la parcelle et du paysage. Ces interactions (« Biodiversité et processus écologiques » sur la figure 5) constituent encore une boîte noire qui complexifie l'interprétation des résultats de la régulation des ravageurs. De nombreuses inconnues persistent dans les mécanismes impliqués. Les mécanismes de la régulation biologique nécessitent encore beaucoup de recherche scientifique pour combler ces manques de connaissance.

Figure 5 : Schématisation des interactions biotiques et abiotiques susceptibles d'influencer le contrôle des ravageurs.



De plus, les processus écologiques (et notamment la régulation biologique) varient en fonction des caractéristiques de chaque site: la culture en place, les pratiques culturales, le contexte pédoclimatique, la structure et la composition du paysage (intra et extra-parcellaire) (Le Roux et al. 2008 ; Malézieux, 2011 ; Shennan, 2008) (figure 5). Il est donc logique que certaines études scientifiques se contredisent. C'est là la principale difficulté de la lutte biologique par conservation ; il n'y a pas, ou peu, de solution générique. Les pratiques et les aménagements agroécologiques doivent donc être adaptés spécifiquement à chaque contexte (Caporali, 2011).

Partie 3 : Lutte par conservation en verger de pommiers : acteurs et mécanismes

A/ Les principaux ravageurs du pommier

L'étude présentée dans ce rapport se concentre sur trois principaux ravageurs du pommier, tous présents sur le site GAFAM : le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*), le puceron vert (*Aphis pomi*) et le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*). Précisons cependant que le pommier est la cible d'autres ravageurs comme le puceron lanigère du pommier (*Eriosoma lanigerum*), le puceron vert migrant du pommier (*Rhopalosiphum insterum*), le puceron vert des citrus (*Aphis spiraecola*), le psylle du pommier (*Psylla mali*), la mouche méditerranéenne des fruits (*Ceratitis capitata*), la tordeuse de la pelure (*Pandemis heparana*), la tordeuse orientale du pêcher (*Grapholitha molesta*), ainsi que différentes espèces de cochenilles (Ricard, 2012).

Premier volet : Les pucerons

Les pucerons causent des dégâts considérables aux productions horticoles. Ce sont des espèces phytophages qui se nourrissent de sève (avec leur stylet, appareil buccal de type piqueur-suceur), affaiblissant les plantes et transmettant des maladies (Kennedy et al., 1962). Ils se développent principalement sur la face inférieure des feuilles pour accéder aux vaisseaux de sève. Ils font partie des insectes capables de se multiplier par parthénogénèse.

La parthénogénèse est une reproduction sans fécondation (sans mâle) au sein d'une espèce sexuée. Il s'agit donc d'une forme de reproduction asexuée. Les femelles pucerons parthénogénétiques donnent naissance à des clones miniatures d'elles-mêmes, qui vont croître en se nourrissant de sève.

➤ Le puceron cendré du pommier

Dysaphis plantaginea (Hémiptère : Aphididae) fait partie des ravageurs les plus néfastes en pomiculture (Blommers et al., 2004 ; Dapena et Miñarro, 2001). L'espèce est holocyclique (elle réalise un cycle biologique complet comprenant une reproduction sexuée et plusieurs reproductions asexuées par parthénogénèse) et dioécique (elle nécessite des plantes hôtes de deux familles botaniques différentes pour réaliser son cycle biologique) (Bonnemaison, 1959). L'hôte primaire de *D. plantaginea* est le pommier *Malus domestica* (Rosales : Rosaceae), les hôtes secondaires sont les espèces de plantain *Plantago spp.* particulièrement le plantain lancéolé *Plantago lanceolata* (Lamiales : Plantaginaceae) (Blommers, 1999).

D. plantaginea passe l'automne et l'hiver sous forme d'œufs sur son hôte primaire (Bonnemaison, 1959). Au début du printemps lors de l'ouverture des bourgeons de l'hôte primaire, les œufs éclosent donnant naissance à des fondatrices aptères (Hull and Starner, 1983). Ces fondatrices engendrent par parthénogénèse des individus aptères dits virginipares : femelles qui se reproduisent par parthénogénèse et dont la descendance est également parthénogénétique (Lathrop, 1928 ; Bonnemaison, 1959 ; Blommers et al., 2004). A la fin du printemps ou au début de l'été, l'évolution de la phénologie du pommier et l'augmentation de la densité des colonies entraînent l'apparition d'une génération de virginipares ailées qui migrent vers les hôtes secondaires (Bonnemaison, 1959). La parthénogénèse se poursuit sur les hôtes secondaires, via des individus aptères, jusqu'au début de l'automne où le changement de photopériode entraîne l'apparition d'une génération de femelles sexupares (qui donnent naissance à des individus sexués) (Bonnemaison, 1959). Cette génération engendre des individus sexués et ailés qui effectuent une migration vers l'hôte primaire avant de réaliser l'unique reproduction sexuée du cycle biologique et de pondre des œufs sur l'hôte primaire (Bonnemaison, 1959). L'alternance d'hôte au cours du cycle biologique est considérée comme une stratégie d'évitement des ennemis naturels (Bonnemaison, 1959).

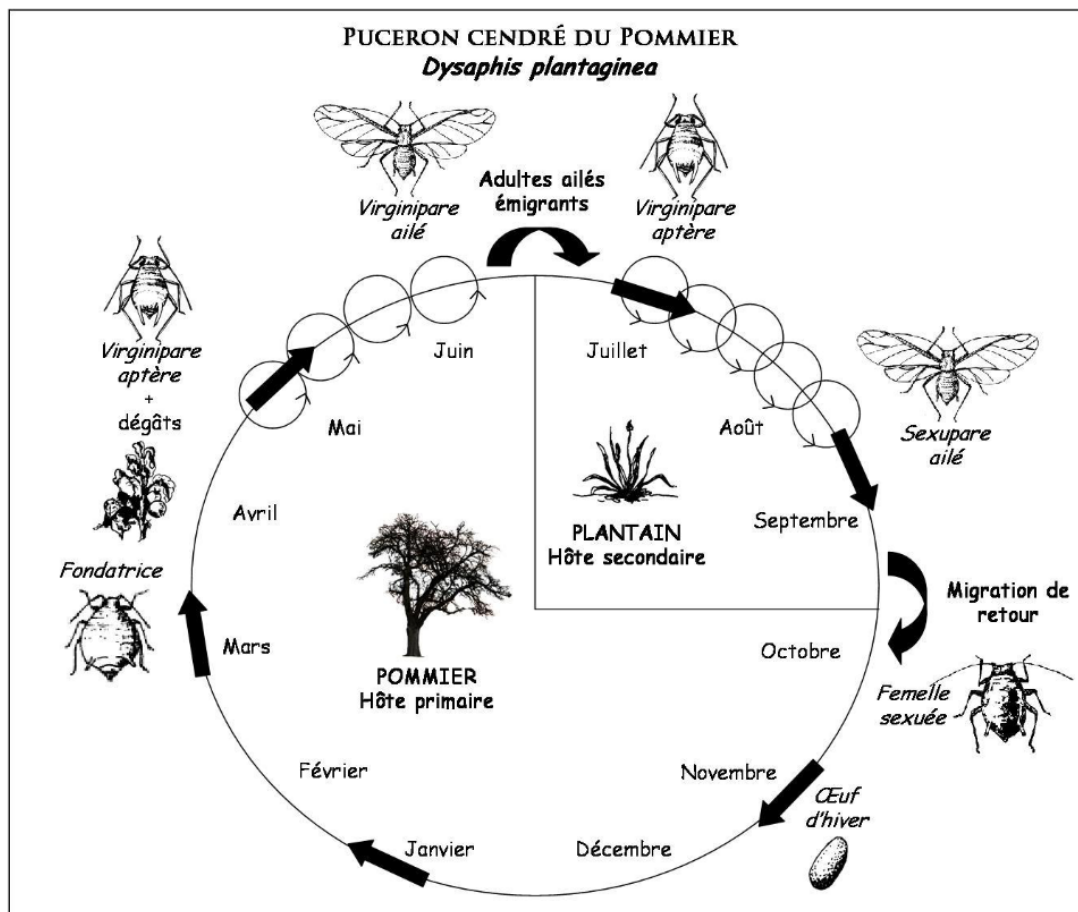


Figure 6 : Cycle de développement de *D. plantaginea* (© Delphine Bourdais, dans Nicolas et al., 2013).

D. plantaginea se développe à des températures faibles (4,5°C) par rapport aux autres pucerons (5,9°C pour *A. pomi* et 5,5°C pour *R. insterum*) (Graf et al., 1985). Il est donc particulièrement précoce.

➤ Le puceron vert

Aphis pomi (Hémiptère : Aphididae) est également une espèce holocyclique, mais elle est monoécique (elle nécessite des plantes hôtes d'une seule famille botanique pour réaliser son cycle biologique). Les hôtes de *A. pomi* sont les espèces de la famille des rosacées (Rosales : Rosaceae), particulièrement le pommier *Malus domestica*, le pêcher *Prunus persica*, le Cognassier *Cydonia oblonga* et les espèces d'aubépine *Crataegus spp* (INRA HYPPZ).



Figure 7 : Photographie d'un foyer de pucerons, GAFAM, 11/06/20.

Après avoir passé l'automne et l'hiver sous forme d'œufs sur l'hôte primaire, les fondatrices aptères émergent lors de l'ouverture des bourgeons de l'hôte au printemps (Carroll et Hoyt, 1984). Elles engendrent par parthénogénèse des virginipares aptères qui se succéderont jusqu'à l'apparition d'une génération de femelles sexupares à l'automne (Carroll et Hoyt, 1984). Cette génération engendre des individus sexués et ailés qui réalisent l'unique reproduction sexuée du cycle biologique et pondent des œufs sur l'hôte (INRA HYPPZ). En parallèle, des générations de virginipares ailées apparaissent dès la fin du printemps, lors de l'augmentation de la densité des colonies, pour se propager en colonisant de nouveaux hôtes (Baker et Turner, 1916).

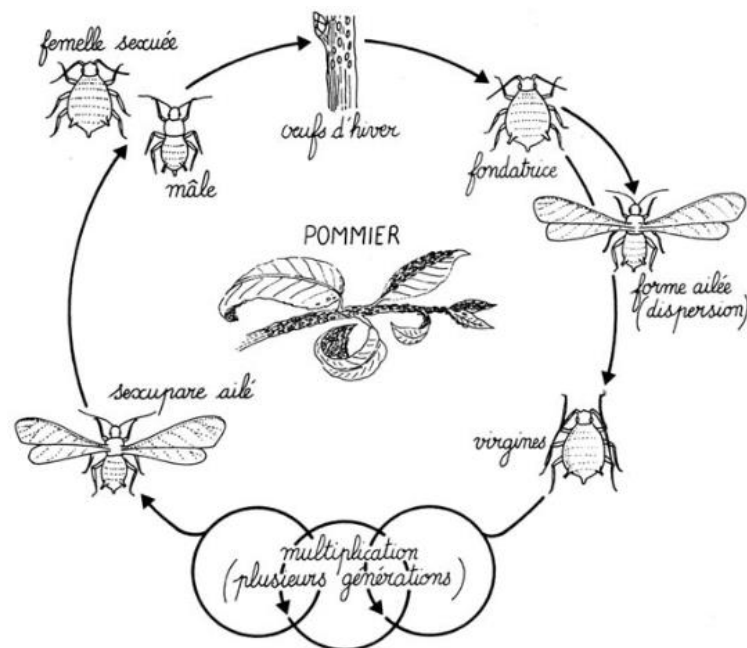


Figure 8 : Cycle de développement de *A. pomi* (Marc, 2004).

➤ Les dégâts des pucerons

Les pucerons provoquent l'enroulement (uniquement pour *D. plantaginea*) et la dépigmentation des feuilles, la déformation des bourgeons (et donc des fruits, qui ne sont alors plus commercialisables) et des rameaux de l'arbre ainsi qu'une diminution du bourgeonnement (Trillot et al., 2002 ; Lathrop, 1928 ; Oatman and Legner 1961). Ils diminuent ainsi la croissance de l'arbre, la production de l'année de l'infestation ainsi que la production des années suivantes (Bonnemaison, 1959 ; Blommers et al., 2004 ; De Berardinis et al.1994 ; Wilkaniec and Trzcinski 1997). De plus, les pucerons excrètent une partie de la sève sous forme d'un liquide sucré, le miellat, qui favorise le développement de maladies fongiques, notamment la fumagine (Angeli and Simoni, 2006 ; Lathrop, 1928 ; Carroll et Hoyt, 1984). En absence d'un contrôle efficace de *D. plantaginea*, entre 20 et 40% (Blommers et al., 2004), voire jusqu'à 80% dans les cas extrêmes (Qubbaj et al., 2005) des fruits récoltés ne sont pas commercialisables.

Les pucerons sont particulièrement problématiques à cause de leur mode de reproduction asexuée, la parthénogénèse, qui permet une croissance exponentielle des populations quand les conditions sont favorables (ressources en quantité, températures optimales). Les individus aptères possèdent le taux de fécondité le plus important (Zera et Denno, 1997, Ishakawa et al., 2008). Les individus ailés sont capables de parcourir de grandes distances (jusqu'à 12km pour *A. pomi*) (INRA HYPPZ), bien que leur dispersion soit un processus passif (transport par le vent) (Jaloux, 2011). Ils sont toutefois capables de contrôler leur sortie des colonnes d'air et leur atterrissage sur les plantes en réponse à des signaux visuels et olfactifs (Finch and Collier, 2000).

➤ Relation mutualiste entre pucerons et fourmis

D. plantaginea et *A. pomi* sont des espèces myrmécophiles en verger de pommiers ; elles entretiennent une relation mutualiste avec les fourmis, notamment avec la fourmi noire des jardins *Lasius niger* (Hyménoptère : Formicidae) (Stewart-Jones et al., 2007 ; Miñarro et al., 2010 ; Nagy et al., 2013 and Nagy et al., 2015). On trouve ces fourmis dans les colonies de certains pucerons, où elles se nourrissent du miellat excrété (Nagy et al., 2013). En contrepartie, les fourmis réduisent la compétition exercée par les espèces de pucerons non myrmécophiles et protègent les colonies de leurs ennemis naturels (Yao et al. 2000 ; Kaneko 2003). Elles impactent négativement la présence et l'abondance des ennemis naturels (Miñarro et al., 2010). Les fourmis ont donc un impact très positif sur l'abondance des pucerons, ce qui a pour conséquence une augmentation des dégâts sur les cultures (Miñarro et al., 2010). La présence et les interactions des fourmis sont donc des éléments importants à considérer dans le développement de la lutte biologique (Stewart-Jones et al., 2007).



Figure 9 : Photographie de fourmis dans un foyer de pucerons verts, GAFAM, 11/06/20.

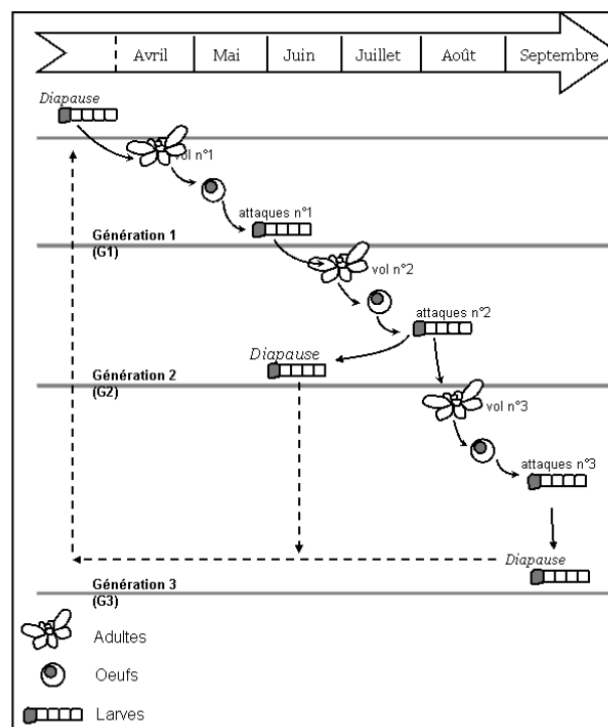
Second volet : Le carpocapse des pommes et des poires

Cydia pomonella (Lépidoptère : Tortricidae) est un ravageur dont la larve (dite chenille chez les lépidoptères) se nourrit des fruits (Kuhrt et al., 2006), entraînant la chute des fruits ou des défauts visuels empêchant la commercialisation (INRA HYPPZb). Les hôtes de ce papillon sont principalement de la famille des rosacées (Rosales : Rosaceae) : le pommier *Malus domestica*, le cognassier *Cydonia oblonga*, le poirier *Pyrus communis*, l'abricotier *Prunus armeniaca*, le pêcher *Prunus persica*, le prunier *Prunus domestica* ainsi que le noyer commun *Juglans regia* (Juglandales : Juglandaceae) (INRA HYPPZb). En Europe, *C. pomonella* s'attaque principalement aux vergers de pommiers, c'est le ravageur entraînant le plus de dégâts aux pomiculteurs dans le sud de la France (Sauphanor et al., 2006).

La chenille de *C. pomonella* passe l'hiver en diapause dans l'écorce de son hôte ou dans un abri de bois mort (Trillot et al., 2002). Elle émerge de sa diapause à la fin du printemps puis nymphose (on parle de chrysalide chez les lépidoptères) avant d'atteindre le stade adulte (dit imago ou stade imagal) (INRA HYPPZb). Les imagos s'accouplent et pondent sur les feuilles, les rameaux ou les jeunes fruits ; les œufs éclosent au bout de 6 à 18 jours en fonction de la température (INRA HYPPZb). La chenille explore son environnement pendant 2 à 5 jours avant de pénétrer dans un fruit où elle creuse jusqu'aux pépins pour s'en nourrir pendant 20 à 30 jours (INRA HYPPZb). Une fois son développement terminé, elle quitte le fruit et forme un cocon sous l'écorce ou au niveau du sol (Ricard et al., 2012). Elle se nymphose pendant 20 à 28 jours avant d'atteindre le stade imagal : c'est la deuxième génération de carpocapses (INRA HYPPZb). Les chenilles dont la croissance se termine d'août à octobre entrent en diapause jusqu'à l'année suivante.

En climat méditerranéen, *C. pomonella* peut réaliser jusqu'à trois générations par an (Trillot et al., 2002). Les chenilles et les adultes utilisent les composés volatiles pour localiser leurs hôtes et leurs fruits (Yan et al., 1999), ce qui permet l'utilisation de phéromones en biocontrôle (Light et al., 2001). En effet, la confusion sexuelle (qui consiste à entraver la phase d'accouplement de *C. pomonella*) est une stratégie de lutte de plus en plus mobilisée. La diversification des méthodes de lutte (confusion sexuelle, traitements microbiologiques, lutte biologique) est aujourd'hui indispensable, car les populations de carpocapses ont développé des résistances à la plupart des insecticides chimiques utilisés dans les vergers (Boivin & Sauphanor, 2017).

Figure 10 : Cycle de développement de *C. pomonella* dans le sud de la France (Boivin & Sauphanor, 2017).



B/ Les ennemis naturels de ces ravageurs (Ricard et al., 2012 et Boyer et al., 2017)

Les ennemis naturels des ravageurs présentés précédemment sont répertoriés dans le tableau 1 (présenté plus en détail en annexe n°1). Attention cependant, toutes les espèces appartenant aux familles présentées ne sont pas des ennemis naturels mais ces familles comprennent au moins une espèce d'ennemi naturel. Certains ennemis naturels sont des prédateurs : ils consomment les ravageurs et peuvent généralement se nourrir d'autres petits arthropodes. D'autres sont des parasitoïdes : l'imago pond dans le corps d'un hôte (œuf, larve ou imago) dans lequel se développe la larve, entraînant la mort de l'hôte. La larve quitte ensuite le corps de l'hôte lors du passage au stade imagal.

Les prédateurs n'exercent pas tous une régulation biologique pendant l'intégralité de leur cycle de développement. Pour certaines familles (syrphes, cécidomyies), seule la larve est prédatrice, tandis que pour d'autres (coccinelles, staphylins) la larve et l'imago sont tous deux prédateurs. Pour les familles dont seule la larve est prédatrice (syrphes, cécidomyies, chrysopes) ainsi que pour les parasitoïdes (tachinaires, guêpes parasitoïdes), la survie des imagos dépend d'autres ressources alimentaires.

La majorité des ennemis-naturels ont un développement holométabole ; leur stade imagal et leur stade larvaire exploitent différemment leur milieu en consommant des ressources différentes, ce qui permet de limiter la compétition intra-spécifique pour les ressources. Les différents stades ne possèdent donc pas les mêmes appareils buccaux. Les imagos de ces familles sont des pollinisateurs, leur survie dépend donc de la présence de nectar et de pollen. Ils peuvent également, dans une moindre mesure, consommer le miellat excrété par les pucerons (les tachinaires en revanche s'alimentent quasi-exclusivement du miellat des pucerons). Notons que pour certaines familles (coccinelles et carabes), les imagos ont un régime mixte comprenant des arthropodes et des ressources en nectar et pollen.

Tous les ennemis naturels n'ont pas le même degré de spécificité. Les prédateurs généralistes consomment une variété d'arthropodes tandis que les spécialistes ne consomment qu'un seul type de proie (par exemple que des pucerons). Il en va de même pour les parasitoïdes, les tachinaires peuvent parasiter de nombreux insectes tandis que les espèces de guêpe parasitoïde sont généralement inféodées à un type de proie, voire à un genre ou une espèce.

Il existe donc une grande diversité au sein des ennemis naturels, que ce soit pour le type de régulation, le stade de régulation, la spécificité mais également pour la qualité de la régulation biologique, la capacité de dispersion ou la période d'activité.



Figure 11 : Syrphe porte-plume ; Larve de chrysope ; Coccinelle à 7 points. GAFAM, 2020.

Tableau 1 : Les principaux arthropodes ennemis naturels des ravageurs présentés (adapté de Ricard et al., 2012 et Boyer et al., 2017).

Ordre	Famille(s) citée(s)	Nom commun	Type de régulation	Stade de régulation	Ravageur(s) cible(s) & stade de de prédation	
					Puceron	Carpocapse
Coléoptère	Coccinellidae	Coccinelle	Prédation	L + I	Oui	(L)
	Carabidae	Carabe	Prédation	L + I	Oui	L
	Staphylinidae	Staphylin	Prédation	L + I	Oui	L
Hémiptère	Anthocoridae	Punaises prédatrices	Prédation	L + I *	Oui	O
	Miridae		Prédation	L + I *	Oui	L
	Nabidae		Prédation	L + I *	Oui	L
Névroptère	Chrysopidae	Chrysope	Prédation	L + (I)	Oui	O + L
	Hemerobiidae		Prédation	L + I	Oui	O + L
	Coniopterygidae		Prédation	L + I	Oui	Non
Diptère	Syrphidae	Syrphe	Prédation	L	Oui	(L)
	Cecidomyiidae	Cécidomyie	Prédation	L	Oui	Non
	Tachinidae	Tachinaire	Parasitisme	L	Non	C
Dermaptère	Forficulidae	Forficule	Prédation	L + I *	Oui	C
Hyménoptère	Aphelinidae Braconidae Bethylinae Trichogrammatidae	Guêpes parasitoïdes	Parasitisme	L	Oui	O + L
Gamaside	Phytoseiidae	Acariens prédateurs	Prédation		Oui	Non
Araneae	Lycosidae Linyphiida Salticidae Miturgidae Araneidae	Araignées	Prédation	Juv + A **	Oui	L + I

O : Stade œuf ; L : Stade larvaire ; I : Stade imagal ; () : Impact minime ; Juv : Juvénile

* : Les hémiptères et les dermaptères ont un développement hétérométabole. En ce sens il n'y a pas ou peu de différence entre le stade larvaire et le stade imagal.

** : Chez les arachnides, il n'y a pas de différence fonctionnelle importante entre les adultes et les juvéniles. Les arachnides grandissent par mues successives.

C/ Mécanismes écologiques de la régulation biologique

En Europe, les ennemis naturels possédant un rôle prépondérant en verger de pommiers sont les syrphes, les coccinelles, les hyménoptères parasitoïdes, les forficules, les araignées et les cécidomyies (Wyss et al., 1999 ; Miñarro et al., 2005 ; Dib et al., 2010 ; Arnaudov et al., 2013). Cependant, l'importance de considérer toutes les familles présentées réside dans leurs complémentarités (Ricard et al., 2012) : elle peuvent avoir une action complémentaire dans la réalisation d'une fonction (la régulation biologique dans ce cas) puisqu'elles occupent des niches écologiques différentes. Au sein d'une même famille les différentes espèces peuvent être complémentaires d'une fonction donnée (par exemple les coccinelles pour la régulation biologique). Cette complémentarité peut être d'ordre fonctionnel, temporel ou encore spatial.

➤ Complémentarité temporelle

Il est particulièrement important d'avoir une synchronisation entre l'apparition des ravageurs sur la parcelle et la présence des ennemis naturels pour contrôler efficacement les ravageurs (Agrawal et al., 2006). C'est d'autant plus le cas pour les pucerons dont la multiplication est exponentielle via la parthénogénèse. Afin de limiter leurs dégâts sur les cultures, ils doivent être contrôlés le plus tôt possible dans la saison (Albert et al., 2016). Le puceron cendré du pommier *D. plantaginea* étant une espèce précoce (Trillot et al., 2002), la présence très précoce d'ennemis naturels est nécessaire. Les premiers ennemis naturels présents dans les parcelles sont les hyménoptères parasitoïdes et les syrphes, qui arrivent avant les coccinelles (Boyer et al., 2017 ; Miñarro et al., 2005 ; Dib et al., 2010 ; Albert et al., 2017), ainsi que les araignées qui sont présentes toute l'année mais dont l'action est particulièrement importante en début et en fin de saison.

La période d'activité diffère selon les ennemis naturels. La continuité de la présence des ennemis naturels est cruciale pour permettre une régulation biologique pendant l'ensemble du cycle biologique des ravageurs (Ricard et al., 2012). La présence de certains ennemis naturels, comme les syrphes et les carabes, est saisonnière (Collins et al., 2002 ; Raymond et al., 2014). La diversité temporelle des ennemis naturels permet donc d'avoir une continuité de la régulation biologique (Figure 12).

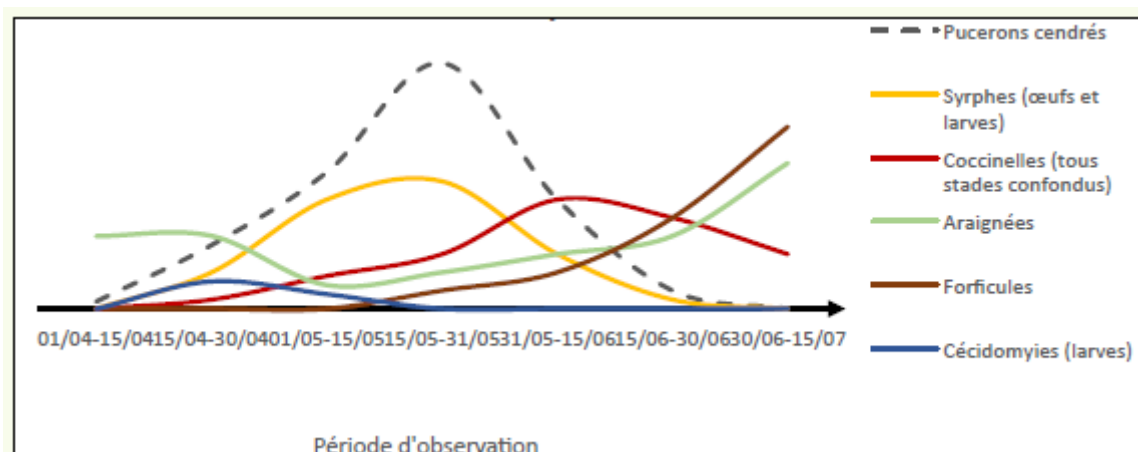


Figure 12 : Dynamique de la présence des ennemis naturels au sein de foyers de pucerons cendrés, d'après l'étude de Albert et al. (2016) en verger de pommiers.

➤ Complémentarité fonctionnelle

Tous les ennemis naturels n'ont pas le même effet de régulation biologique. On attribue à certains (comme les coccinelles et les syrphes) un « effet de nettoyage » (Boyer et al., 2017). C'est parce qu'ils sont extrêmement voraces : une larve de syrpe peut consommer jusqu'à 400 pucerons en 8 jours et une larve de coccinelle jusqu'à 3 000 pucerons en une dizaine de jours (Albert et al., 2016). On attribue à certains généralistes (comme les carabes et les punaises) un « effet de protection » (Boyer et al., 2017). Ces derniers peuvent être présents avant l'arrivée du ravageur car ils consomment une variété de proie. Ils peuvent alors réguler activement dès le début de l'infestation. De plus, tous les prédateurs n'ont pas la même technique de chasse. Par exemple les coccinelles recherchent activement leurs proies tandis que les punaises chassent à l'affût (Northfield et al., 2010).

➤ Complémentarité spatiale

Les ennemis naturels occupent des habitats différents (Ricard et al., 2012) et régulent les ravageurs sur différentes parties des plantes (Straub et Snyder, 2008). Ils sont donc complémentaires dans l'espace mais ils sont également inégaux dans leur capacité de dispersion : tous les ennemis naturels ne possèdent pas la même mobilité (Bianchi et al., 2006). La mobilité des organismes dépend à la fois de leur taille et de leur morphologie (aptitude au vol ou non, qualité du vol). Enfin, le déplacement des ennemis naturels nécessite beaucoup d'énergie (Heimpel et Jervis, 2005 ; Wanner et al., 2006). La dimension spatiale est donc un élément clef de l'aménagement parcellaire (Sarhou et al., 2014).

➤ Interactions des différents taxons

Les interactions entre les différentes familles ou espèces d'ennemis naturels sont complexes ; elles dépendent des espèces, de l'environnement et de la disponibilité en ressources, notamment en proies (Dib et al., 2016). Parmi les prédateurs généralistes, des phénomènes de prédation intra-taxons sont observés (Korenko et Pekar, 2010 ; Straub et Snyder, 2006 ; Snyder et al., 2006). Dans certains cas, cette prédation peut impacter négativement la régulation biologique exercée par une diversité de prédateurs (Snyder et Ives, 2001 ; Finke et Denno, 2004). Toutefois, dans la majorité des cas la diversité des ennemis naturels améliore significativement la qualité du service de régulation biologique (Northfield et al., 2010). Plusieurs études ont mis en évidence que la régulation exercée par une diversité d'ennemis naturels est supérieure à la somme des régulations exercées individuellement par chaque ennemi naturel (Cardinale et al., 2003 ; Cardinale et al., 2006 ; Northfield et al., 2010 ; Snyder et al. 2006 ; Straub & Snyder 2008). Dans certains contextes les ennemis naturels sont donc en synergie, ce qui permet d'améliorer le contrôle biologique des ravageurs (Cardinale et al., 2003). Un premier mécanisme explicatif est le partage des ressources (« resource partitioning ») : puisque chaque espèce consomme une part différente du réservoir total de proies (liée à ses spécificités), la diversité des ennemis naturels améliore la consommation des proies (donc de ravageurs) (Cardinale et al., 2003). Le second mécanisme explicatif est la compétition entre les différents ennemis naturels prédateurs. Lorsque les prédateurs sont soumis à une pression de compétition pour une ressource (proie), ils exercent un taux de prédation plus important que s'ils ne sont soumis à aucune pression de compétition (Losey & Denno, 1998 ; Cardinale et al., 2002).

Enfin, la diversité des ennemis naturels permet d'accroître la résilience du système grâce à la redondance écologique. Le fait d'avoir une forte redondance écologique (plusieurs espèces qui assurent la même fonction, comme la régulation naturelle des ravageurs) permet d'améliorer la probabilité de persistance du groupe (et donc du maintien de la fonction) lors d'une perturbation ou d'un stress sur le système (Ricard et al., 2012). C'est le principe de l'« insurance hypothesis » : la redondance fournit une « assurance » en permettant à certaines espèces de compenser la perte d'autres espèces (Biggs et al., 2012 ; Ricard et al., 2012). Sur le long terme, la diversité des ennemis naturels permet donc d'accroître la stabilité du service de régulation biologique et donc du système.

En prenant en compte l'ensemble de ces éléments, il semble raisonnable de considérer que la diversité des ennemis naturels assure à la fois l'efficacité et la stabilité du service de régulation biologique. Il semble donc important de s'interroger sur la manière dont on peut favoriser une diversité d'ennemis naturels au sein d'un agroécosystème.

La lutte biologique par conservation vise à modifier l'environnement et les pratiques agricoles. Les changements de pratiques consistent principalement en une réduction de l'utilisation des pesticides et du travail du sol, qui nuisent aux ennemis naturels (Albert et al., 2016 ; Haenke et al. 2009 ; Kassam et al. 2011 ; Kremen et al. 2012). La modification de l'environnement consiste principalement à développer des IAE, des fragments d'espaces semi-naturels bénéfiques aux différents auxiliaires de culture (Haenke et al. 2009, Miñarro and Prida 2013). En effet, dans les paysages agricoles, la biodiversité dépend majoritairement de la surface d'habitats semi-naturels (Billeter et al., 2008).

Partie 4 : La diversification des IAE : la clef d'une régulation biologique efficace

Dans les systèmes conventionnels, les ravageurs phytophages bénéficient des conditions optimales pour leur développement : forte concentration en ressource (Stephens et Myers, 2012 ; Root, 1973) et (quasi) absence d'ennemis naturels (Bianchi et al., 2006 ; Grabenweger et al., 2007). En effet, ces derniers ont besoin d'espaces semi-naturels pour accéder à des ressources et des habitats complémentaires. L'objectif de la lutte biologique par conservation est de rétablir l'équilibre biologique entre les ravageurs et leurs ennemis naturels. Il semble cependant très important de rappeler que les aménagements semi-naturels (e.g. les IAE) sont favorables à l'ensemble de la biodiversité : à la fois aux ennemis naturels et aux ravageurs. Dans certains cas, l'aménagement d'IAE peut aggraver la pression des ravageurs (*cf* partie 2). C'est n'est donc pas seulement la présence d'IAE, mais également la qualité de ces IAE ainsi que le contexte parcellaire qui déterminent l'équilibre biologique en place et donc le contrôle des ravageurs. L'enjeu des IAE est de répondre aux besoins des ennemis naturels: offrir une diversité d'habitats et de ressources (pollen, nectar, proies alternatives) tout en prenant en compte les dimensions spatiales (proximité des cultures, connectivité) et temporelles (précocité, continuité des habitats et des ressources dans le temps).

Les vergers sont composés d'espèces pérennes et ils possèdent généralement plusieurs strates (herbacée, arborée), ils sont donc particulièrement propices aux développement des ravageurs mais également à la promotion des ennemis naturels (Nicholls and Altieri, 2004 ; Demestihis et al., 2017). Les vergers sont donc des cultures intéressantes à combiner avec des IAE pour favoriser la présence d'ennemis naturels du fait de l'apport de zones refuges, de sites d'hivernation et de reproduction, de ressources en pollen et nectar et de proies alternatives en l'absence de ravageur (Albert et al., 2016). Les IAE entraînent également la formation d'un microclimat bénéfique aux arthropodes (Landis et al., 2000).

Il est aujourd'hui évident que les ennemis naturels sont favorisés par les IAE (Bianchi et al., 2006 ; Laubertie et al., 2016 ; Chaplin-Kramer et al., 2011). Dans le cas des vergers de pommiers, plusieurs études ont déjà mis en avant le potentiel des IAE pour favoriser les ennemis naturels et ainsi améliorer la régulation biologique du puceron cendré *D. plantaginea* (Albert et al., 2016 ; Miñarro and Prida, 2013 ; Pfiffner et al., 2013).

A/ Habitats et ressources

Les IAE peuvent fournir un site de protection aux arthropodes lors de certaines pratiques agricoles (travail du sol, traitement chimique) (Collins et al., 2002 ; Frank and Reichhart, 2004). Elles constituent aussi des sites d'hivernation pour les araignées, les syrphes ou les coléoptères (Sarhou et al., 2005 ; Pfiffner et al., 2013).

Ces infrastructures peuvent également fournir des ressources en nectar et en pollen qui sont favorables au développement et à la survie des syrphes, des chrysopes, des coccinelles, des chrysopes, des punaises prédatrices et des hyménoptères parasitoïdes (Villenave et al., 2005 ; Ricci et al., 2005 ; Villenave-Chasset et Leblond, 2019). La présence de telles ressources accroît la longévité des hyménoptères parasitoïdes (Géneau et al., 2012 ; Jamont et al., 2014) et la fécondité d'autres insectes (Laubertie et al., 2012). La présence de fleurs entomophiles influence donc positivement la régulation des ravageurs phytophages (Bischoff et al., 2016). Les insectes ont des préférences différentes en matière de plantes, en fonction de la morphologie de la fleur et de la qualité du nectar (Heimpel and Jervis, 2005; Stang et al., 2006). La diversité de ces traits morphologiques au sein des IAE est susceptible d'accroître la diversité d'ennemis naturels (Campbell et al., 2012). Toutefois, pour la majorité des ennemis naturels (chrysopes, syrphes, coccinelles et hyménoptères parasitoïdes), des plantes sources de pollen facilement accessible avec des fleurs peu profondes (Asteraceae, Apiaceae, Rosaceae) sont à privilégier (Villenave-Chasset et Leblond, 2019).

Les IAE peuvent également être des sources de proies alternatives, afin d'inciter les ennemis naturels à rester dans la parcelle même en l'absence des ravageurs (Denys and Tschardtke, 2002 ; Lavandero et al., 2005). Les ennemis naturels dépendent de la présence de ces proies alternatives qui peuvent être hébergées par des plantes relais (Bianchi et al., 2006 ; Griffiths et al., 2008). Il est toutefois important de choisir des plantes relais attractives pour des proies (notamment des pucerons) non inféodées à la culture en place.

B/ Dimension spatiale

Le déplacement des ennemis naturels est coûteux en énergie, et la mise à disposition de ressources abondantes dans les IAE peut limiter le déplacement et la recherche de proies à l'intérieur des cultures (Heimpel et Jervis, 2005 ; Wanner et al., 2006). L'impact des IAE sur la régulation biologique décroît en fonction de l'éloignement des IAE (Collins et al., 2002; Bianchi et al., 2006). En effet, la distance aux IAE influence l'abondance des araignées (Miliczky et Horton, 2005), des syrphes (Bowie 1999) et des hyménoptères parasitoïdes (Lavandero et al. 2005). De plus cette relation n'est pas systématiquement linéaire (Tylianakis et al., 2004). Il est donc important de maintenir une proximité entre les différentes IAE et la culture en place lors de la conception des aménagements parcellaires.

A une échelle plus large, la matrice paysagère (la structure et la composition du paysage) influence fortement les processus de régulation biologique (Power, 2010 ; Tschardtke et al., 2007). La matrice paysagère influence davantage les communautés d'ennemis naturels, qui sont sensibles à la fragmentation de leur habitat, que les populations de ravageurs phytophages (Brewer et Goodell, 2012 ; Kruess et Tschardtke, 2000 ; Bischoff et al., 2016). En effet, contrairement aux ennemis naturels les ravageurs phytophages peuvent trouver refuge et ressources à la fois dans les espaces semi-naturels et dans les cultures (Murdoch et al., 2003). Les processus de régulation biologique proviennent d'organismes mobiles et de leurs interactions avec les habitats et les ressources ; ils dépendent donc de l'hétérogénéité du paysage (Power 2010, Landis et al., 2000). Les pratiques, et notamment la réduction des traitements chimiques, sont également à réfléchir à l'échelle paysagère dans le cadre de la lutte biologique (Médiène et al. 2011 ; Jonsson et al. 2012).

A l'échelle paysagère, les IAE constituent des corridors écologiques : elles influencent les interactions biotiques et la capacité de dispersion des espèces (Tschardtke et al. 2005). Les

IAE participent donc à la connectivité des espaces semi-naturels, permettant la migration des ennemis naturels à l'intérieur des parcelles. La connectivité, tout comme la diversité des ennemis naturels, participe à la résilience du système (Biggs et al., 2012). En effet, elle assure une recolonisation du système après une perturbation du milieu. Cependant, en fonction de leur taille et de leur densité, les IAE (par exemple les grandes haies) peuvent également constituer des barrières qui limitent la dispersion et la propagation de certaines espèces (Josso et al., 2013).

Plusieurs études ont montré que, à petite échelle, la composition spécifique en plantes est un meilleur facteur explicatif de la présence des ennemis naturels que la matrice paysagère (Bischoff et al., 2016 ; Schaffers et al., 2008). Cela suggère que, malgré l'importance de la mosaïque paysagère, il reste pertinent de raisonner la lutte biologique par conservation à l'échelle parcellaire. La combinaison d'aménagement à l'échelle de la parcelle (IAE) et du paysage (augmentation des habitats semi-naturels) représente toutefois la stratégie la plus prometteuse pour améliorer les processus de régulation biologique (Bischoff et al., 2016).

C/ Dimension temporelle

Afin d'assurer la continuité de la présence des ennemis-naturels, il est important de leur fournir des habitats et des ressources de manière continue. Il est alors pertinent d'aménager une diversité d'IAE dont les floraisons vont se succéder. Cette réflexion peut également être menée lors de la conception des bandes fleuries. C'est également pour assurer la continuité des ressources qu'il est pertinent d'intégrer des plantes relais, sources de proies alternatives, particulièrement pour le début de saison (Griffiths et al., 2008).

En effet, le début de saison est une période clef dans la régulation des bioagresseurs. La régulation précoce des ravageurs permet de limiter le développement de leurs populations et ainsi de réduire leurs impacts sur les cultures. Comme expliqué précédemment c'est d'autant plus le cas avec les pucerons qui se multiplient de manière exponentielle via la parthénogénèse. Il est donc important de prévoir des espèces à floraison précoce qui conditionnent la présence des ennemis naturels lors du début de l'infestation (Welch and Harwood, 2014).

La figure 13 schématise les leviers de diversification en fonction de la dimension spatiale (en ordonnée) et de la dimension temporelle (en abscisse).

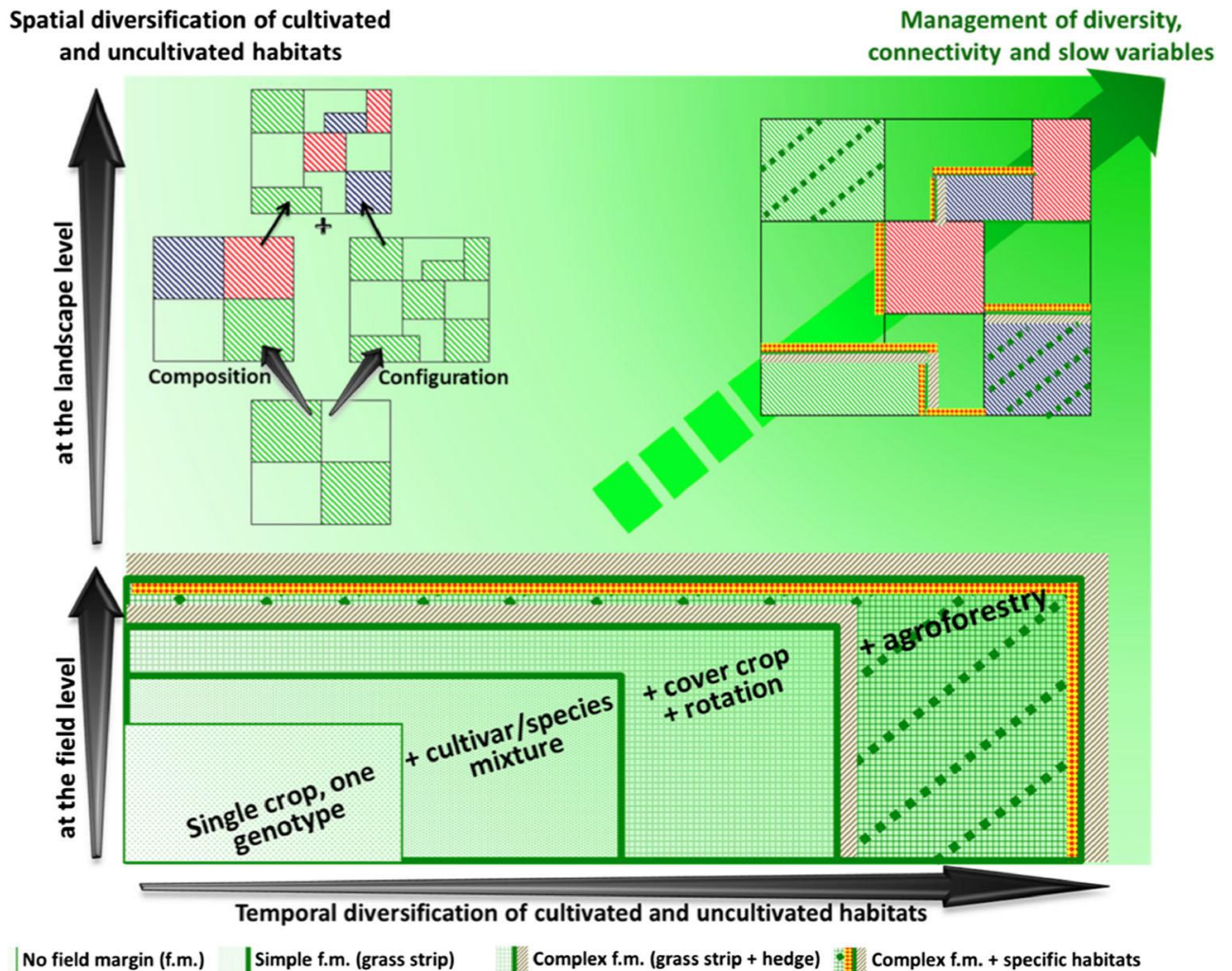


Figure 13 : Schématisation des possibilités de diversification spatiale et temporelle des agroécosystèmes en culture annuelle (Duru et al., 2015).

Partie 5 : Une IAE des vergers innovante en climat méditerranéen : l'agroforesterie

L'agroforesterie est un mode de production agricole associant sur une même parcelle des plantations d'arbres à d'autres cultures, dans la perspective d'effets bénéfiques réciproques (JORF, 2015). Il existe une large diversité de systèmes agroforestiers, et cette pratique s'applique également à l'élevage et aux bordures de parcelle. Les bénéfices engendrés par ces systèmes sont multiples et bien renseignés : support de la biodiversité, protection des sols et de la qualité de l'eau, création d'un microclimat pour la culture, augmentation des rendements combinés, valeur esthétique, etc. (FAO).

Les travaux de thèse de B. PITCHER et al. (2020) sur le même site d'étude ont permis de mettre en évidence les impacts de l'agroforesterie sur l'architecture, le fonctionnement et l'agronomie des pommiers. Dans ces conditions (*cf* méthodologie) la proximité des noyers permet de limiter les variations journalières de température et de réduire de 50% le rayonnement solaire sur les pommiers sans impacter leur taux de croissance, ce qui est susceptible de réduire le stress thermique (important en climat méditerranéen) des pommiers et d'éviter les « coups de soleil », qui sont des brûlures des fruits.

Les noyers exercent toutefois une compétition pour la lumière (très importante une fois leur feuillage développé), ce qui entraîne un changement de l'architecture des pommiers en association. Depuis 2019 des suivis sont réalisés sur ce site pour évaluer l'effet des noyers sur les principaux ravageurs du pommier.

En effet l'agroforesterie contribue à la diversification spatiale et temporelle des systèmes agricoles. En ce sens, cette pratique est susceptible d'accroître la biodiversité, les processus de régulation biologique et la stabilité des agroécosystèmes (Altieri, 1999 ; Stamps et Linit, 1998 ; Hatt et al., 2018). La combinaison de l'agroforesterie et de la production fruitière permet d'obtenir un système multi-strates (Lauri et Simon, 2019), a priori favorable aux ennemis naturels et donc au contrôle biologique des ravageurs (Pumariño et al., 2015).

L'impact de la pratique sur le développement des bioagresseurs (ravageurs et pathogènes) en arboriculture fruitière est principalement étudié en climat tropical, notamment pour la production de cacao et de café (Andres et al., 2016 ; Tschardt et al., 2011 ; Nair 1991), d'où la présence du CIRAD au sein de l'UMR SYSTEM. Dans ces études, les effets de l'agroforesterie sur la régulation biologique sont variables à cause de la diversité des contextes, des conceptions et des pratiques (Andres et al., 2016). En régions tempérées, les systèmes agroforestiers intégrés en arboriculture fruitière font l'objet de peu d'études. Dans ces régions, il n'existe à ce jour pas d'informations sur l'effet de l'agroforesterie sur le développement des ravageurs et de leurs ennemis naturels en verger de pommiers.

L'agroforesterie peut impacter les mécanismes de régulation biologique, et donc le contrôle des ravageurs, de nombreuses manières. D'une part, l'agroforesterie représente un refuge et un habitat pour différents arthropodes. Elle entraîne également la formation d'un microclimat plus ou moins bénéfique aux différents arthropodes. En raison de leur taille et leur volume, les noyers sont susceptibles de constituer une barrière physique pour certaines espèces et un corridor écologique pour d'autres. L'agroforesterie peut donc impacter la composition des communautés d'arthropodes vivant à proximité des noyers.

D'autre part l'agroforesterie influence la culture en place (les pommiers) via la compétition pour la lumière et la formation d'un microclimat plus doux pour les pommiers et leurs fruits, entraînant un changement d'architecture et de croissance des fruitiers qui est susceptible d'influencer le développement des bioagresseurs. L'agroforesterie peut donc influencer les ravageurs et leurs ennemis naturels, et ainsi le contrôle biologique des ravageurs.

Précisions que dans le cas de cette étude, l'IAE agroforestière est constituée de noyers hybrides *Juglans regia* x *Juglans nigra* qui ne sont pas une source de pollen et de nectar. Certaines essences forestières peuvent toutefois apporter des ressources aux pollinisateurs, comme celles présentes autour du site d'étude. Il est également important de préciser que ces noyers hybrides ne produisent pas de noix ; ils ne peuvent donc pas être infestés par le carpocapse.

D – Question de recherche

Les enjeux (sociaux, économiques, sanitaires et environnementaux) de l'agriculture moderne nécessitent de trouver des alternatives à l'utilisation intensive de produits phytosanitaires pour maîtriser les populations de ravageurs. C'est particulièrement le cas en arboriculture fruitière compte-tenu de la très forte utilisation d'insecticides pour la protection des plantes et des attentes de qualité visuelle des fruits. Il est donc nécessaire d'apporter des solutions alternatives aux producteurs pour limiter les dégâts des ravageurs.

Les mécanismes écologiques de régulation biologique peuvent permettre, grâce aux ennemis naturels, un contrôle des populations de phytophages. La communauté scientifique s'accorde sur l'importance de la diversité des ennemis naturels et de leur complémentarité (fonctionnelle, spatiale, temporelle) pour maximiser la régulation des ravageurs, et ainsi assurer un contrôle biologique efficace.

Il est toutefois nécessaire que l'environnement offre les conditions nécessaires à la vie et la reproduction des auxiliaires de régulation impliqués, ce qui n'est pas le cas dans les systèmes intensifs traditionnels. Pour pouvoir bénéficier de ce service dans les espaces agricoles, il est donc nécessaire d'adapter les pratiques et les aménagements parcellaires.

Dans ce contexte, l'utilisation d'IAE pour favoriser la présence d'ennemis naturels, et ainsi les mécanismes de régulation biologique, semble être une solution potentielle pour assurer une production fruitière durable. Cette stratégie, la lutte biologique par conservation, consiste à attirer et à pérenniser une diversité d'ennemis naturels en leur offrant une variété de ressources et d'habitats nécessaire à l'ensemble de leurs cycles de vie.

Si les IAE permettent de favoriser la présence d'ennemis naturels, l'efficacité de la régulation biologique est variable et les résultats sont parfois contradictoires. D'une part, les mécanismes impliqués sont complexes et encore peu documentés. D'autre part, les pratiques agroécologiques doivent être adaptées spécifiquement à chaque situation (culture en place, contexte pédoclimatique, ravageurs problématiques et ennemis naturels disponibles) : il n'existe pas de solution générique.

De plus, les IAE existantes sont multiples et leurs effets ne sont pas tous bien renseignés. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet GAFAM, qui propose d'étudier plusieurs IAE dont une innovante en verger de pommiers sous climat méditerranéen : l'agroforesterie. Ainsi la présente étude a pour objectif d'évaluer :

L'effet des aménagements agroécologiques du site GAFAM sur les mécanismes de régulation biologique des principaux ravageurs du pommier *D. plantaginea*, *A. pomi* et *C. pomonella*.

Hypothèse n°1 : La proximité des noyers influence les communautés d'arthropodes (ravageurs et ennemis-naturels) présentes dans les pommiers, réduisant directement et/ou indirectement la pression des ravageurs.

Hypothèse n°2 : Les différentes infrastructures agroécologiques du site (agroforesterie, bandes fleuries, haies semi-naturelles en bordure, flore spontanée, BRF) hébergent des communautés d'arthropodes spécifiques, dont la complémentarité doit permettre d'optimiser la régulation biologique sur le site.

Chapitre 2 - Méthodologie

A – Présentation du site d'étude

Le site d'étude, la parcelle GAFAM (Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean), se situe dans le Domaine de Restinclières, à 16 km au nord de Montpellier, dans la commune de Prades-le-Lez (département de l'Hérault). La parcelle (d'une taille de 0,2 hectare) est à une altitude de 70 mètres au-dessus du niveau de la mer. La texture du sol est argileuse. La parcelle se situe dans un environnement semi-naturel, elle avoisine d'autres parcelles agroforestières.

➤ Dispositif agroforestier

En février 1995, des noyers hybrides (*Juglans nigra* × *Juglans regia* NG23) sont plantés en rangs sur le site pour réaliser des essais d'agroforesterie. Les rangs de noyers sont espacés de 13 mètres et les noyers de 4 mètres sur un même rang. En 2020 les rangs de noyers ne sont plus complets suite à la destruction de certains arbres (figure 14).

En mars 2016, des pommiers (*Malus domestica*, variété Dalinette, sur porte-greffe G202) sont plantés dans la parcelle de noyers. La variété Dalinette est vigoureuse, résistante à la gale du pommier et au feu bactérien (Schöneberg et al., 2015). Le porte-greffe G202 est également vigoureux, il se développe bien dans les sols pauvres et il est résistant à différentes maladies telluriques (Lauri et al., 2019). Au total 148 pommiers ont été plantés : 141 de la variété Dalinette et 7 de la variété Story. Cette dernière constituant la variété pollinisatrice.

Les pommiers sont disposés par rapport aux noyers selon 3 modalités : ceux plantés dans les rangs de noyers (agroforesterie intra-rangs ; AFR), ceux plantés entre les rangs de noyers (agroforesterie inter-rangs ; AFIR) et ceux plantés à plus de 15 mètres des noyers (pour former le groupe témoin ; AC). Les pommiers sont espacés de 1,3 mètre sur un même rang, les rangs d'agroforesterie inter-rangs sont situés à 6,5 mètres des rangs de noyers. Tous les rangs de la parcelle sont orientés est-ouest.

Tableau 2 : Présentation des différentes modalités des pommiers en fonction de leur position par rapport aux noyers. Codification d'après Pitcher et al., 2020.

Modalité	Agroforesterie intra-rangs	Agroforesterie inter-rangs	Témoin
Code	AFR	AFIR	AC
Signification	AgroForestry Row	AgroForesterY Inter-Row	Agricultural Control

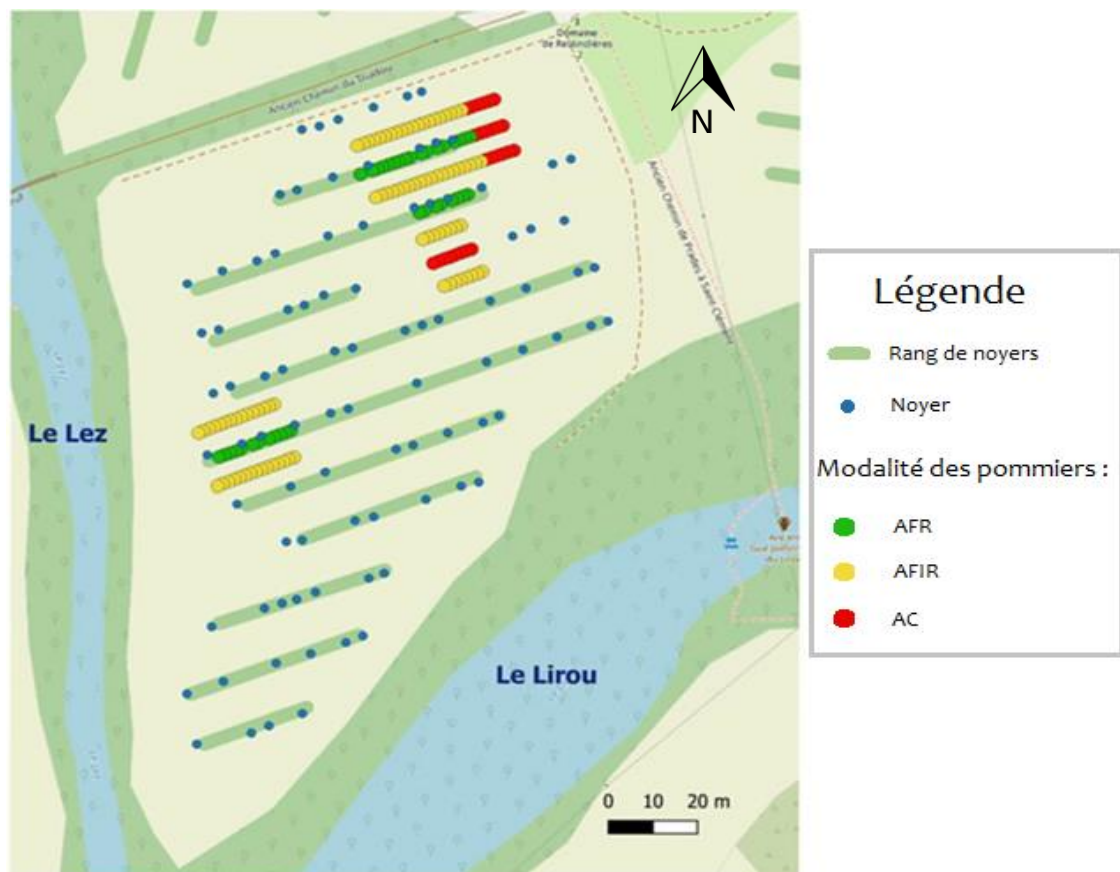


Figure 14 : Schéma des modalités agroforestières sur le site d'étude.

➤ Conduite technique de la culture

En plus de respecter le cahier des charges de l'agriculture biologique, l'expérimentation est conduite en bas-intrant. En 2019, l'IFT de la culture était de deux. Pour 2020, suite à l'arrêt des activités pendant la période de confinement, l'IFT est seulement de un. Les pommiers sont irrigués (goutte à goutte) en fonction des conditions météorologiques. Les rangs de pommiers sont recouverts de BRF pour limiter le développement des adventices au pied des arbres. Depuis leur plantation, dans le cadre de la thèse de B. Pitcher, aucune intervention (élagage) n'a été réalisée sur le développement des pommiers. Les branches sont toutefois fixées sur des fils pour supporter le poids des fruits. Une opération d'éclaircissage est réalisée début juin afin de maîtriser la charge en fruits. Contrairement aux vergers de pommiers des producteurs, il n'y a pas de filets anti-carpocapse ni de lutte par confusion sexuelle sur le site d'étude.

➤ Environnement du site d'étude

La parcelle est située à l'extrémité sud du domaine (figure 2), à la confluence du Lez et du Lirou (figure 14). Les faces ouest et sud-est du site sont bordées de cours d'eau qui permettent le développement d'arbres rivulaires. Les faces nord et nord-est sont bordées de différentes haies. Cette diversité de haies (composition, hauteur) constitue une grande IAE. Ces haies forment un réseau avec l'environnement semi-naturel présent sur le domaine. La végétation à l'intérieur de la parcelle est diversifiée et constitue plusieurs IAE :

- Des peupliers sont présents sur la parcelle en taillis courte rotation (ou TCR). Ils sont recépés tous les 4/5 ans et transformés en BRF.

- Au niveau des pommiers, la strate herbacée était composée de sainfoin jusqu'à sa destruction fin 2019. C'est maintenant une flore spontanée, fauchée deux fois dans la saison. Deux îlots (au nord-est et à l'ouest) sont constitués d'une flore spontanée plus diversifiée et ne nécessitent pas d'entretien. Le reste de la strate herbacée du site est constitué de fétuque (graminée), plantée en 2010 dans le cadre d'un essai d'enherbement de l'inter-rang des noyers.

- Pour la première fois depuis le lancement de GAFAM, une bande fleurie est établie, début mars, entre les rangs de pommier. Elle mesure de 1,15 mètre de large et est constituée de 4 espèces, toutes mellifères. La bande fleurie a été semée à la volée le 11/03/2020, après un travail superficiel du sol. Elle est implantée de chaque côté des tous les rangs de pommiers (figure 15).

Tableau 3 : Composition de la bande fleurie.

Nom commun	Phacélie	Souci officinal	Céillet d'Inde	Achillée millefeuille
Nom scientifique	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	<i>Calendula officinalis</i>	<i>Tagetes patula</i>	<i>Achillea millefolium</i>
Famille	Boraginaceae	Asteraceae	Asteraceae	Asteraceae



Figure 15 : Schéma des milieux semi-naturels du site d'étude. D'après Perseval (2019), la composition des bordures est présentée en annexe n°2.

B – Définition des groupes taxonomiques d'arthropodes évalués

Avant de déterminer les protocoles d'échantillonnage des données, il convient de définir une échelle d'étude du degré d'identification des taxons d'arthropodes. En effet pour certains arthropodes, la détermination de l'espèce est une tâche très complexe, nécessitant du temps, du matériel adapté et de très bonnes connaissances entomologiques. Dans cette étude, l'ensemble des identifications sont réalisées visuellement et directement sur le terrain, les arthropodes ne sont pas prélevés.

Face aux contraintes techniques, temporelles et humaines de l'étude, nous mobilisons ici une approche fonctionnelle. Nous nous intéressons donc davantage aux fonctions des arthropodes qu'à leur identification. Si au sein d'un même genre, toutes les espèces réalisent une fonction similaire, il n'est pas nécessaire de déterminer l'espèce puisque nous connaissons déjà sa fonction. C'est le même raisonnement qui s'applique si au sein d'une famille, tous les genres réalisent une fonction similaire, etc. On mobilise cette approche pour identifier les ennemis naturels du site. Pour les ravageurs en revanche, l'identification se doit d'être la plus précise possible.

Cette approche permet de simplifier le volet « identifications entomologiques » et de le rendre accessible à des agronomes. On retrouve cette approche fonctionnelle dans de nombreuses études sur la régulation biologique, notamment en verger de pommiers (Albert et al., 2016). Elle permet également d'accorder plus de confiance aux données, en limitant le risque d'erreur lors de l'identification. Toutefois, cette approche entraîne une perte d'informations ; en effet on évalue le taxon dans sa globalité, on ne connaît donc pas les différentes espèces qui le constituent, ni leurs proportions. Afin de limiter cette perte d'information, et pour avoir un ordre d'idée de la redondance écologique sur le site d'étude, nous réaliserons en parallèle un inventaire des arthropodes observés (cf partie E).

Les approximations établies par l'approche fonctionnelle varient selon les études. Ici elles sont réalisées arbitrairement pour satisfaire les besoins et les contraintes de l'étude. Les taxons étudiés dans cette étude sont présentés dans le tableau 4 ci-dessous. La définition du degrés de précision se base sur le tableau 1, adapté de Ricard et al., 2012 et Boyer et al., 2017. Précisons que les identifications de l'étude sont grandement facilitées par un support photographique (objectif macro), permettant de conserver des images des différents spécimens rencontrés.

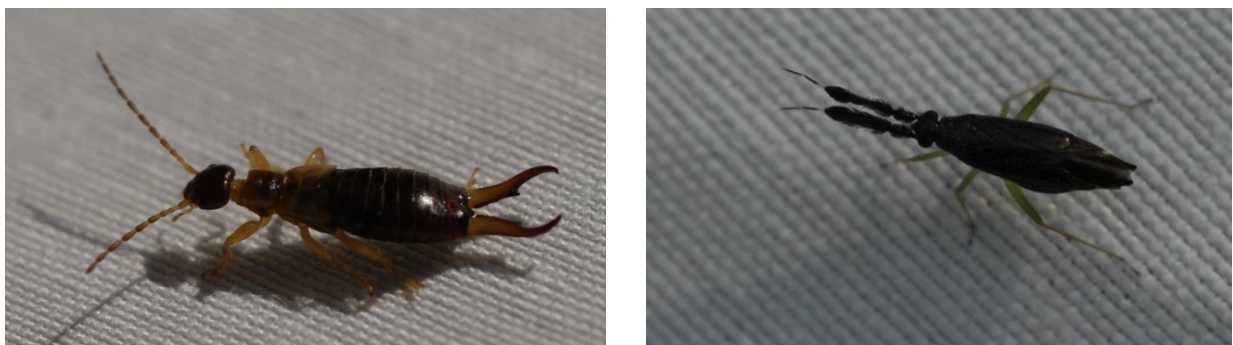


Figure 16 : Forficule ; Punaise prédatrice (*Heterotoma planicornis*). GAFAM, 2020.

Tableau 4 : Présentation des différents taxons d'ennemis naturels considérés pour l'étude.

Taxon considéré		Taxons regroupés	Fonction(s)	Faiblesse(s)	
Ordre	Nom				
Coléoptère	Coccinelles	Espèces de la famille des Coccinellidae	Prédation totale au stade larvaire et partielle au stade imagal		Perte d'information (diversité & prépondérance). Certaines espèces sont plus ou moins spécialisées. *
	Carabes	Espèces de la famille des Carabidae	Prédation totale ou partielle ; Autres (floricole, phytophage)	Toutes les espèces ne sont pas des ennemis naturels.	
	Staphylins	Espèces de la famille des Staphylinidae	Prédation		
Hémiptère	Punaises prédatrices	Espèces des familles Anthocoridae, Miridae et Nabidae	Prédation ; Autres (phytophage)	Toutes les espèces ne sont pas des ennemis naturels.	
Névroptère	Névroptères	Espèces des familles Chrysopidae, Hemerobiidae et Coniopterygidae	Prédation totale au stade larvaire. Pollinisateurs au stade imagal.	Certaines espèces sont prédatrices au stade imagal.	
Diptère	Syrphes	Espèces de la famille des Syrphidae	Prédation totale au stade larvaire ; Pollinisateurs au stade imagal	Certaines espèces sont plus ou moins spécialistes (en proie ou en fleurs).	
	Cécidomyies	Espèces de la famille des Cecidomyiidae	Prédation totale au stade larvaire		
	Tachinaires	Espèces de la famille des Tachinidae	Parasitisme		
Dermatophtère	Forficules	Espèces de la famille des Forficulidae	Prédation totale		
Hyménoptère	Sous ordre des Apocrites	Espèces des familles Aphelinidae, Braconidae, Bethylinae et Trichogrammatidae	Parasitisme	Délicat de distinguer les apocrites des autres hyménoptères.	
Classe des Arachnides	Acariens prédateurs	Espèces des ordres Gamaside et Actinédide	Prédation ; Autres (phytophage)	Toutes les espèces ne sont pas des ennemis naturels.	
	Araignées	Espèces de l'ordre des Araneae	Prédation		

* Certaines espèces sont des prédateurs spécialistes (par exemple prédation exclusive de pucerons) tandis que d'autres sont plus généralistes (plus grande variété de proies). Notre approche ne tient pas compte de la spécificité des ennemis-naturels.

Dans l'absolu il est envisageable que l'on comptabilise des espèces spécialisées sur une autre proie que les ravageurs de l'étude (notamment pour le sous ordre des apocrites). Toutefois, la présence d'un ennemi naturel sur la parcelle d'étude est liée aux ressources disponibles. On considère donc que ce risque d'erreur est négligeable.

C – Suivis des ennemis naturels

Les groupes taxonomiques étant définis, il est nécessaire de déterminer un ensemble de méthodes d'échantillonnage. En effet, il existe une diversité de méthodes d'observation et/ou de capture (annexe n°3). Certaines sont spécifiques à l'observation des auxiliaires volants tandis que d'autres sont spécifiques à la faune épigée. Il est important de combiner les méthodes d'observation car elles ne permettent pas toutes d'observer les mêmes taxons. Comme la parcelle est de petite taille, on limite l'utilisation de méthodes destructives.

Tableau 5 : Méthodes d'échantillonnage utilisées dans l'étude (Boyer et al., 2017).

Taxon	Auxiliaires volants			Faune épigée	
	Obs. foyer	Piège coloré *	Frappage	Pot Barber *	Bande carton
Coccinelles	Larves, imagos	Imagos	Larves, imagos		
Carabes				Imagos	
Staphylins				Imagos	Imagos
Punaises prédatrices	Larves, imagos		Larves, imagos		
Névroptères	Larves	Imagos	Larves		
Syrphes	Larves	Imagos	Larves		
Cécidomyies	Larves	Imagos	Larves		
Tachinaires	Momies				
Forficules			Imagos		Imagos
Apocrites	Momies	Imagos	Imagos		
Arachnides			Juv, adultes	Juv, adultes	Juv, adultes
Fourmis	Imagos		Imagos	Imagos	Imagos

* méthode destructive

Observation des foyers : réalisée en même temps que l'évaluation de la sévérité des pucerons (cf partie D) sur les pommiers. Comptage des ennemis naturels présents au sein des foyers de puceron. Inconvénient : les fourmis présentes dans certains foyers repoussent les ennemis naturels.

Pièges colorés : des coupelles jaunes (diamètre 12 cm) sont placées sur le site, elles sont remplies d'un mélange d'alcool et d'eau. Les insectes piégés sont relevés chaque semaine ou plus régulièrement, et le liquide renouvelé. Méthode attractive. Les pièges colorés ont été changés le 15/07 suite au mauvais fonctionnement des premiers pièges.

Frappage : réalisé à l'aide d'une toile blanche (parapluie japonais, dimension 50 x 50 cm) et d'un bâton. Le feuillage est frappé (3 à 4 petits coups) au-dessus du parapluie japonais où tombent les insectes. Inconvénient : il est compliqué d'observer les ennemis naturels volants. Sur les pommiers, le frappage est systématiquement réalisé sur une même branche (grâce à un marquage visuel) afin de mesurer un volume constant.

Pot Barber : des pots en plastique (diamètre 7 cm, hauteur 6,5 cm) sont enterrés et affleurent la surface du sol. Ils sont remplis d'alcool et d'eau pour qu'il n'y ait pas de prédation à l'intérieur du pot. Les insectes piégés sont relevés chaque semaine ou plus régulièrement, et le liquide renouvelé.

Bande carton : des cartons ondulés (dimension 15 x 10 cm) sont enroulés sur les branches de pommiers, fixés par un collier de serrage en plastique. Chaque semaine, ils sont ouverts et on observe les arthropodes présents. Méthode attractive.

D – Suivis des ravageurs

Pour évaluer le développement du puceron vert (*A. pomi*), on s'intéresse à deux paramètres : l'incidence et la sévérité. L'incidence caractérise le nombre de foyers de pucerons à une échelle spatiale donnée (rameau, arbre, parcelle), tandis que la sévérité caractérise la taille de la population de pucerons (la taille du foyer).

Pour l'incidence, un contrôle visuel est réalisé sur les pommiers. On note le nombre de foyers (minimum 10 pucerons) par arbre. Pour évaluer la sévérité, on suit le protocole harmonisé ALTO : QuantiPest « Rosy apple aphid dynamics on apple in spring » de Simon & Capowiez (2017). Au début de l'infestation, on marque visuellement les jeunes foyers de pucerons (3 par arbre). Chaque semaine, on observe des foyers afin de compter le nombre de pucerons aptères, le nombre de pucerons ailés et le nombre de momies. On compte également le nombre de fourmis et les ennemis naturels présents dans le foyer. On peut ainsi suivre la dynamique des différents foyers.

Particularité de l'étude : Le nombre de foyers étant particulièrement faible en 2020, il n'est pas systématiquement possible de suivre 3 foyers par arbre. Dans ce cas, si de nouveaux foyers apparaissent ils sont également marqués.

Pour évaluer le développement du puceron cendré (*D. plantaginea*), on souhaite mettre en place exactement le même protocole que pour le puceron vert. L'arrêt des activités sur le terrain de l'année 2020 (du 16 mars au 18 mai) a limité le suivi du puceron cendré. Lors du retour sur site, les populations avaient déjà fortement chuté et la migration vers l'hôte secondaire avait commencé. Au début du mois de juin il n'y avait plus de pucerons cendrés sur la parcelle.

Contrairement au puceron vert, le puceron cendré provoque des symptômes particuliers : l'enroulement des feuilles (Trillot et al., 2002). Ces symptômes ont été observés mi-juin en suivant le protocole de harmonisé ALTO QuantiPest « Evaluation of the severity of rosy apple aphid infestation in spring » de Simon (2010). Pour chaque arbre, on évalue visuellement le pourcentage de rameaux présentant des symptômes et on attribue une note à l'arbre. On considère « rameau » la partie de l'arbre formée dans la saison 2020.

Pour évaluer le développement du carpocapse (*C. pomonella*), on mesure le nombre de fruits infestés par des chenilles, lors des différentes générations (en 2020 on suit la première et la seconde génération). On réalise une analyse visuelle de l'ensemble des fruits de chaque arbre et on retire tous les fruits qui présentent des symptômes d'infestation (trou, déjections de la chenille). Ces fruits sont ouverts et on compte le nombre de fruits infestés par au moins une larve. Cette opération est réalisée deux fois par génération (une fois au début et une fois à la fin). En effet, l'envol et la reproduction d'une génération s'étale sur plusieurs semaines. Les chenilles sont détruites.

E – Autres suivis

➤ Ressources en pollen et nectar

Afin d'estimer l'évolution de la disponibilité en ressources, des notations des espèces végétales en fleurs sont réalisées pendant la saison. Les notations sont qualitatives : on relève uniquement les espèces en fleurs et on évalue l'abondance de ces fleurs sur une échelle de 1 à 3. On note également dans quelle(s) IAE sont situées ces fleurs (bande fleurie, flore spontanée, haies, TCR). Les fleurs sont photographiées, une première identification est réalisée sur l'application PlantNet, puis est ensuite vérifiée. On comparera ces mesures avec des données de floraisons prévisionnelles, établies à partir des identifications d'espèces végétales sur la parcelle de Camille Perseval sur GAFAM en 2019.

➤ Evaluation de la prédation

Le suivi dynamique des populations d'ennemis naturels et de ravageurs permet de supposer de leurs interactions, mais pas de les observer ou de les quantifier. Pour ce faire, on utilise des cartes de prédation, protocole harmonisé ALTO 'Evaluation du potentiel de régulation biologique en vergers à l'aide de « cartes de prédation »' de Thomas et al. Ce sont des cartes en papier de verre sur lesquelles on colle des « proies sentinelles ». Ces proies sont élevées sur le site INRAE (domaine Saint-Paul, Avignon), collées puis congelées jusqu'à l'installation des cartes. Dans cette étude nous utilisons trois proies sentinelles : des œufs de carpocapse (*Cydia pomonella*), des œufs de la pyrale de la farine (*Ephestia kuehniella*) et des pucerons verts du pois (*Acyrtosiphon pisum*). Sur le terrain, on agrafe ces cartes sur la face inférieure des feuilles. On laisse les cartes un temps donné sur le site avant de les collecter et d'effectuer la lecture à la loupe binoculaire. On peut ensuite calculer le taux de prédation.

➤ Inventaire des arthropodes du site

La réalisation d'un inventaire permet d'essayer de caractériser la diversité des arthropodes sur le site d'étude en 2020. Lors des collectes de données sur la parcelle, les différents insectes observés sont photographiés puis identifiés. On cherche à identifier le plus précisément possible, mais sans risquer d'erreur. S'il n'est pas possible de déterminer l'espèce on limite l'identification au genre ou à la famille. Le support photographique permet une bonne précision d'identification. Ces identifications sont réalisées grâce à différentes sources Internet, notamment *galerie-insecte.org*. Tous les arthropodes sont identifiés ; il est alors possible de s'intéresser aux autres fonctions (pollinisation, décomposition) des arthropodes du site. Cela permet également d'identifier les autres ravageurs des pommiers. Enfin, cet inventaire et ces photographies serviront pour la suite du projet GAFAM en facilitant, je l'espère, la prise en main du sujet par les futurs stagiaires/chercheurs.

F – Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé en 2019 est identique à celui utilisé dans la thèse de B. Pitcher pour étudier l'impact des noyers sur l'architecture des pommiers. Il est constitué de deux blocs contenant plusieurs répétitions des trois modalités de pommiers (figure 17). Le bloc 1 est composé de 75 pommiers (18 AC ; 40 AFIR ; 17 AFR). Le bloc 2 est composé de 72 pommiers (8 AC ; 45 AFIR ; 19 AFR).

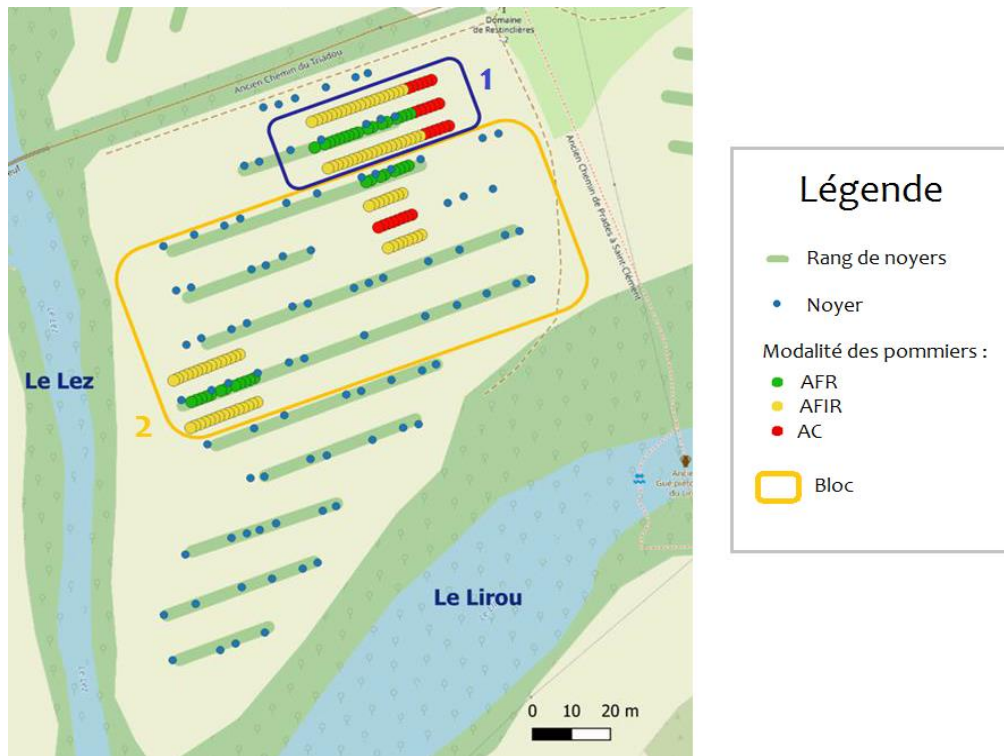


Figure 17 : Dispositif expérimental de l'étude de 2019 (Perseval, 2019).

Parmi les 147 pommiers, 45 sont sélectionnés pour réaliser les suivis les plus précis. Les relevés simples et rapides sont réalisés sur l'ensemble des pommiers, tandis que les relevés plus conséquents sont réalisés uniquement sur les 45 arbres sélectionnés. Le bloc 1 compte 22 arbres sélectionnés (10 AC ; 6 AFIR ; 6 AFR) et le bloc 2, 23 (5 AC ; 9 AFIR ; 9 AFR). La directive de l'étude est de réaliser les suivis d'arthropodes sur ces 45 arbres, comme en 2019, afin de pouvoir faire, à terme, une analyse pluriannuelle. Ce dispositif possède toutefois plusieurs faiblesses pour l'étude des mécanismes de régulation biologique.

La principale faiblesse est l'échelle de l'expérimentation. En effet le dispositif correspond bien aux études agronomiques d'agroforesterie, mais les arthropodes sont mobiles. Bien que la mobilité dépende des espèces, ils sont globalement capables de se déplacer entre les rangs d'arbres et le long des rangs (surtout les ennemis naturels). L'impact des noyers sur les communautés d'arthropodes ne se limite pas aux pommiers de modalité AFR. Cet impact est plus vaste, bien que difficile à quantifier, puisque les arthropodes qu'il favorise explorent leur environnement. Il est donc délicat de différencier en deux modalités distinctes les pommiers AFR du bloc 1 aux pommiers AC du même bloc, alors qu'elles sont toutes deux connectées.

En effet, les témoins (AC) sont intra-parcellaires et sont donc influencés par l'activité de leur environnement. Un témoin optimal serait situé sur une parcelle proche, isolé de l'agroforesterie, ce qui n'est pas possible sur le domaine. Il sera donc important de considérer que la modalité AC n'est pas un réel témoin pour cette problématique ravageurs-auxiliaires. De plus, les modalités AC sont disposées différemment dans les deux blocs.

Tous les aménagements intra-parcellaires ne sont pas homogènes, comme le TCR ou la flore spontanée permanente (figure 15). Enfin, il existe potentiellement de très nombreux gradients dans la parcelle. Les haies sont susceptibles d'influencer le déplacement des arthropodes (corridor écologique ou effet barrière). Elles sont différentes (en espèces,

hauteurs, largeurs) sur chaque face de la parcelle. L'environnement extra-parcellaire influence également l'expérimentation (beaucoup d'habitats semi-naturels) et il est difficile de savoir si cette influence est homogène sur le site. Les deux faces sud de la parcelle, bordées de rivières, hébergent probablement des communautés d'arthropodes différentes des deux faces nord.

Les pommiers sont également un facteur d'hétérogénéité. Ces derniers constituent une forme d'IAE, puisqu'ils hébergent les ravageurs qui sont une source de nourriture pour les ennemis naturels.

L'objectif de l'étude (hypothèse de travail n°1) est de mettre en avant l'effet de l'agroforesterie sur les mécanismes de régulation biologique. Le dispositif expérimental propose de mesurer différentes variables et d'expliquer les éventuelles différences par le facteur agroforestier (modalités AC, AFIR et AFR). Cependant ces variables sont susceptibles d'être influencées par de nombreux autres facteurs (effet parcelle, hétérogénéité de certaines IAE, densité de pommiers). De plus, la distance entre les modalités est faible, et les noyers influencent l'ensemble de la parcelle. Le dispositif ne permet pas d'attribuer les différences entre modalités au facteur agroforestier.

Pour l'étude de 2020, le dispositif expérimental est modifié afin d'essayer de mieux répondre à l'hypothèse de travail n°1. Celui-ci est composé de trois blocs (figure 18). La composition de chaque bloc est présentée dans le tableau 6.

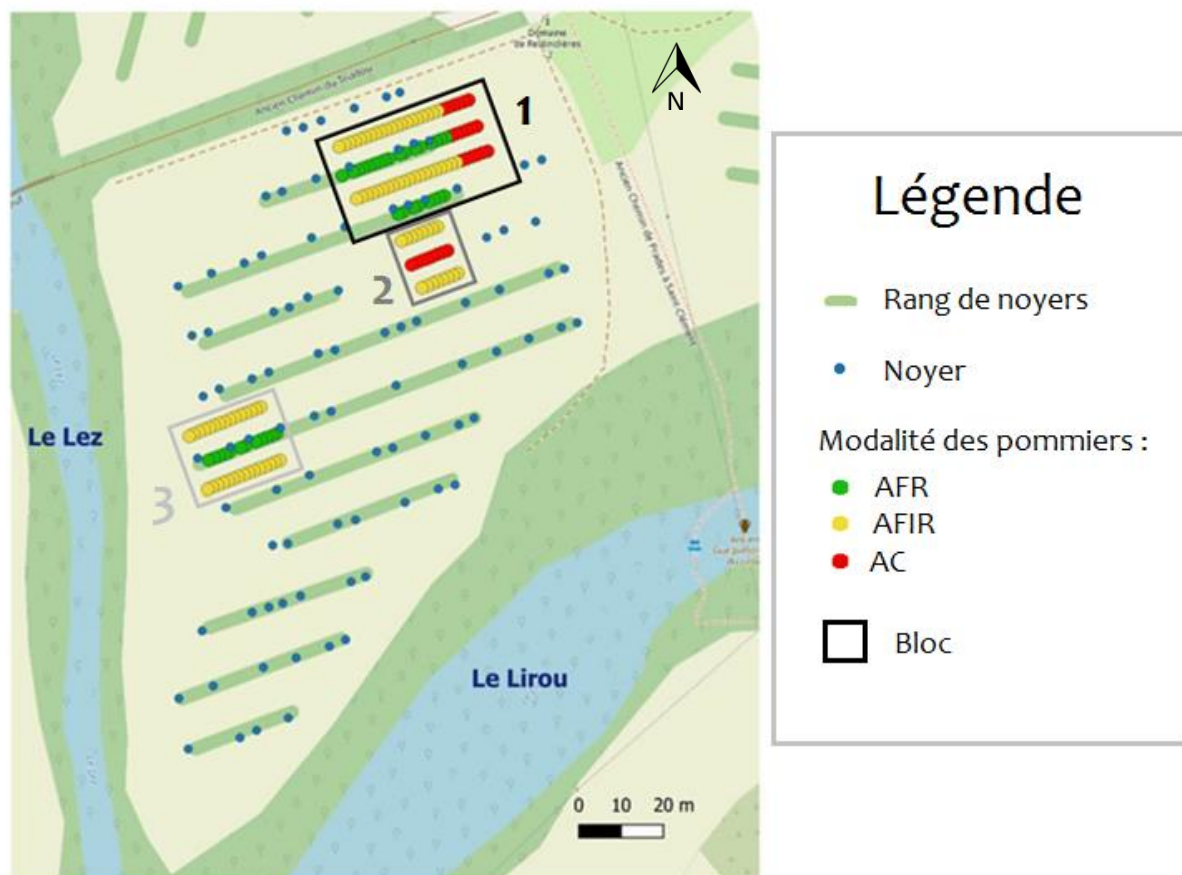


Figure 18 : Dispositif expérimental de l'étude de 2020.

➤ Avantages

L'objectif de ce dispositif est d'isoler les différents agencements de pommiers pour interpréter les variables à l'échelle du bloc. Ce dispositif consiste donc à analyser les effets de deux facteurs : agroforestier (modalités AC, AFIR, AFR) et bloc (modalités 1, 2, 3). Le facteur bloc est influencé par sa localisation (effet parcelle) et sa composition (nombre de pommiers et modalités de ces derniers) (tableau 6).

Tableau 6 : Composition des blocs du dispositif expérimental de 2020.

Bloc	1	2	3
Composition (sur les 147 pommiers)	Total 82 18 AC 40 AFIR 24 AFR	Total 24 8 AC 16 AFIR 0 AFR	Total 41 0 AC 29 AFIR 12 AFR
Composition (sur les 45 pommiers)	Total 26 10 AC 6 AFIR 10 AFR	Total 5 5 AC 0 AFIR 0 AFR	Total 14 0 AC 9 AFIR 5 AFR
Localisation	Nord-Est <-----> Sud-Ouest		

L'étude des blocs permet d'utiliser une plus grande échelle de travail. On pourra expliquer, en partie, les mécanismes d'un bloc par sa composition en pommiers. Le bloc n°2 constitue le « témoin » bien qu'encore une fois il ne s'agisse pas d'un réel témoin. Les modalités AC de ce bloc sont à une distance de 13 mètres des rangs de noyers (6,5 mètres pour AFIR), et il n'y a pas de modalité AFR.

Pour l'étude du facteur agroforestier, ce dispositif permet également de distinguer les modalités des blocs n°2 qui ne sont pas homogènes par rapport au reste de la parcelle. Premièrement les modalités AFIR du bloc n°2 ne sont pas entourées de deux rangs de noyers, contrairement à toutes les autres modalités AFIR du site. Deuxièmement, les modalités AC du bloc n°1 sont connectées aux autres modalités, contrairement au bloc n°2.

L'étude de ces deux facteurs devrait permettre de mieux comprendre l'origine des variations d'infestation et de régulation du site. Ainsi on espère mettre en évidence l'effet de l'agroforesterie d'une manière moins évidente, mais plus certaine.

➤ Inconvénients

Le nombre de répétitions n'est pas régulier dans les différents blocs (Tableau 7). Cela pose un premier problème sur la représentativité, notamment pour le bloc n°2. Deuxièmement, les blocs n°2 et n°3 ne possèdent pas toutes les modalités d'agroforesterie. D'autant plus si on travaille sur les 45 pommiers ; le bloc n°2 n'est représenté que par 5 pommiers AC. Ces nouvelles contraintes vont compliquer les analyses statistiques.

G – Calendrier de travail

Tableau 7 : Synthèse des suivis réalisés dans l'étude.

Suivi des ravageurs		
➤ Puceron cendré		
Evaluation des symptômes	1 fois : 18/05	147 répétitions
➤ Puceron vert		
Evaluation de l'incidence	2 fois : 24/06 et 17/07	45 répétitions
Evaluation de la sévérité	1 par semaine [10/06 – 27/07]	Jusqu'à 3x45 répétitions
➤ Carpacapse		
Evaluation de l'infestation G1	2 fois : 8/06, 22/06	147 répétitions
Evaluation de l'infestation G2/G3	2 fois : 20/07, 6/08	147 répétitions
Suivi des ennemis naturels		
➤ Sur les pommiers		
Observation des foyers pucerons	1 par semaine [10/06 – 27/07]	Jusqu'à 3x45 répétitions
Frappage	1 par semaine [19/06 – 23/07]	45 répétitions
Piège carton	1 par semaine [19/06 – 23/07]	45 répétitions
➤ Dans les blocs		
Pièges colorés	1 par semaine [19/06 – 23/07]	3 répétitions (1 par bloc)
Pots Barber		12 répétitions (4 par bloc)
Frappage (sur haie)		3 répétitions (1 par bloc)
Suivi de la prédation		
Cartes de prédation : puceron, pyrale	1 fois : 28/04	40 répétitions
Cartes de prédation : carpocapse	2 fois : 28/04, 27/07	40 répétitions
Autre		
Notation des ressources en fleurs	2 fois : 19/06 et 17/07	

Le suivi des ennemis naturels à l'échelle du bloc a pour objectif de répondre à l'hypothèse de travail n°2. Des échantillonnages sont réalisés dans les différentes IAE (haie, flore spontanée, bande fleurie, BRF) afin de comparer les communautés d'arthropodes.

H – Traitements statistiques

L'analyse statistique est adaptée au dispositif expérimental présenté précédemment. Ce dispositif permet de réaliser des tests d'analyse de la variance en fonction de deux facteurs : le facteur agroforestier et le facteur bloc. Si ces tests permettent de montrer un effet d'un des facteurs, on réalisera alors un test de comparaison multiple des moyennes pour voir quelles modalités sont significativement différentes. Le risque d'erreur α considéré dans cette étude est de 5%.

Si les données le permettent, on privilégie des tests paramétriques. Dans ce cas on réalise un test paramétrique d'analyse de la variance (ANOVA), suivi d'un test paramétrique de comparaison multiple des moyennes (test de Tukey). Il est toutefois nécessaire de s'assurer que les données respectent les conditions initiales d'utilisation de test paramétrique (Sheskin, 2007). On vérifie donc que 1/ L'hypothèse d'indépendance des résidus (test de Durbin-Watson). 2/ L'hypothèse de normalité des résidus (test de Shapiro-Wilk). 3/ L'hypothèse d'homogénéité des variances, dite homoscedasticité (test de Levene).

Si les données ne respectent pas ces conditions initiales, il est décidé de ne pas transformer les données ou de supprimer des données « anormales ». On réalise à la place un test non-paramétrique de comparaison des variances à un facteur (test de Kruskal-Wallis) puis on compare les différents groupes à l'aide d'un test non-paramétrique de comparaison multiple des moyennes (test de Dunnett). Au vu de la modification du dispositif expérimental et du nombre de répétitions variables des différentes modalités, il est probable que les données ne respectent pas les conditions initiales des tests paramétriques.

On ne réalise pas de test d'analyse de la variance à deux facteurs. En effet, on sait déjà (via la conception du dispositif expérimental) qu'il y a une interaction entre le facteur agroforestier et le facteur bloc. L'intérêt de l'étude des données avec ces deux facteurs est de comparer différentes échelles d'étude et de déceler des résultats incohérents entre les deux facteurs qui pourraient être expliqués par un effet de l'environnement parcellaire.

Les lettres de significativité sont présentées visuellement dans les résultats. On peut considérer deux modalités significativement différentes si elles ne possèdent aucune lettre de significativité en commun.

Chapitre 3 - Résultats

A – Suivi des ravageurs

Partie 1 : Puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*)

L'évaluation des symptômes du puceron cendré est réalisée le 18/05 sur l'ensemble des pommiers de la parcelle. A cette date il ne reste que très peu de foyers de pucerons cendrés actifs sur la parcelle, mais les symptômes (enroulement des feuilles) sont visibles jusqu'à la fin de la saison. Conformément au protocole de Simon (2010), on attribue à chaque pommier une classe, en fonction de la proportion des rameaux présentant des dégâts (tableau 8).

Le pourcentage de chaque classe sur l'ensemble des pommiers est présenté dans le tableau 8 ci-dessous. Toutes modalités confondues, on constate qu'une large majorité des pommiers ne présente aucun symptôme (71,4%). Parmi les 28,6 % des pommiers qui présentent des symptômes du puceron cendré ; 21,1 % sont dans la classe B, donc très peu touchés.

Tableau 8 : Proportion des symptômes du puceron cendré sur le site d'étude.

Classe	Pourcentage de rameaux présentant des symptômes (Simon, 2010)	Pourcentage de la classe à l'échelle de la parcelle en 2020
A	0 %	71,4 %
B	Entre 1 et 10 %	21,1 %
C	Entre 11 et 25 %	3,4 %
D	Entre 26 et 50 %	4,1 %
E	Plus de 50 %	0 %

Il est possible de comparer la répartition des classes en fonction des différentes modalités du facteur agroforestier (figure 19) ou du facteur bloc (figure 20).

Proportion de pommiers dans la modalité agroforestière

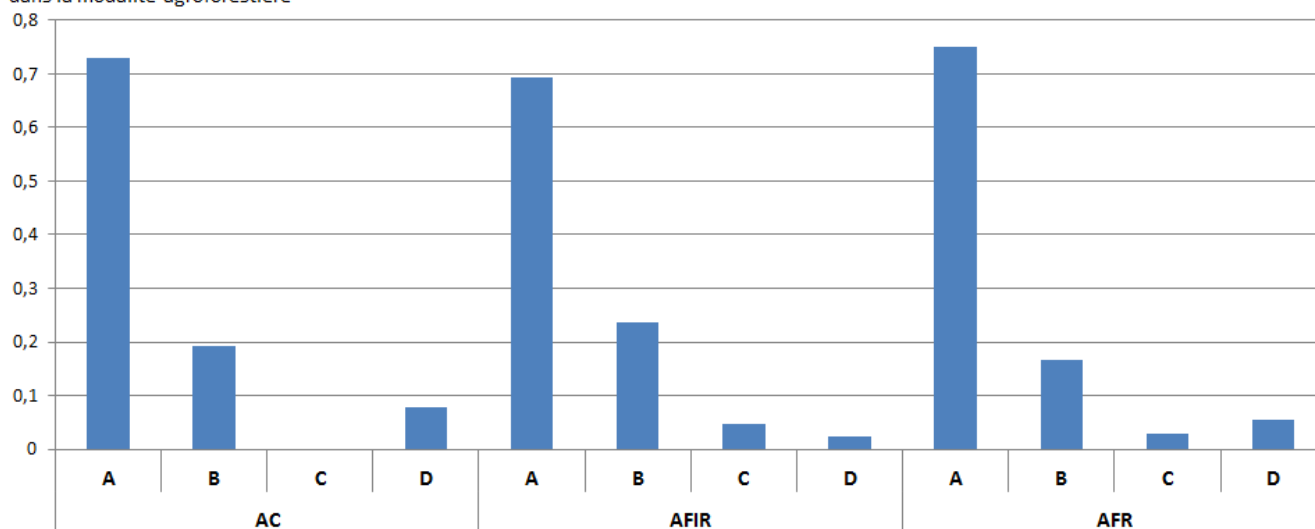


Figure 19 : Répartition des symptômes du puceron cendré en fonction du facteur agroforestier. Les classes d'incidence sont établies à partir du protocole de Simon (2010), présentées dans le tableau n°8.

Proportion de pommiers dans le bloc

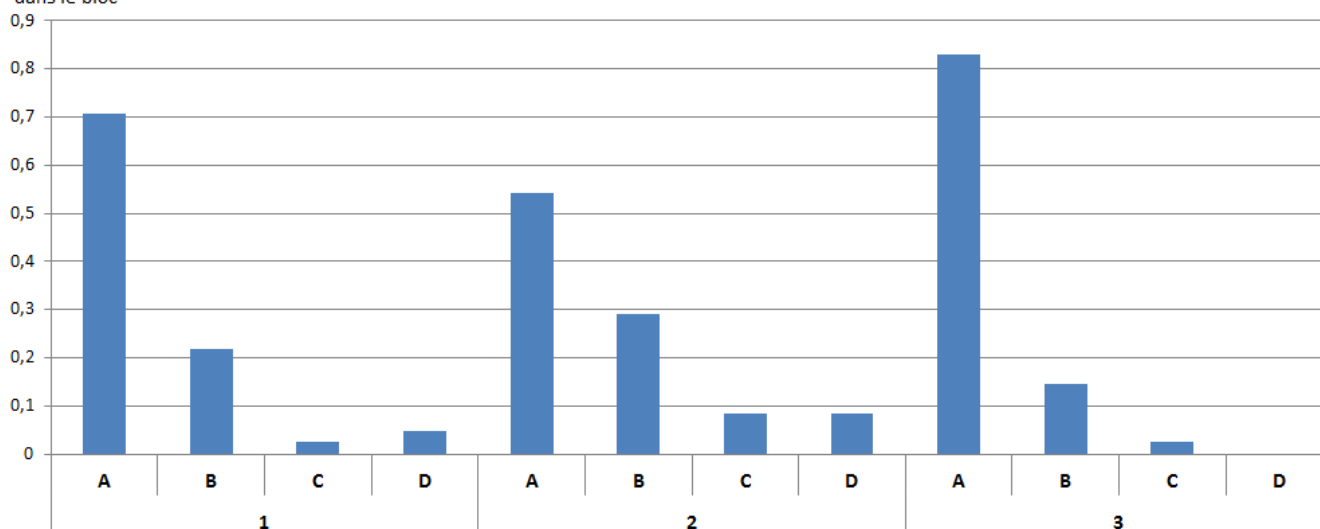


Figure 20 : Répartition des symptômes du puceron cendré en fonction du facteur bloc. Les classes d'incidence sont établies à partir du protocole de Simon (2010), présentées dans le tableau n°8.

On constate que pour chaque modalité du facteur agroforestier, la proportion de pommiers classés A est similaire. Il y a quelques différences pour les autres classes (notamment pour la classe C, qui est nulle dans la modalité AC). Globalement, on observe peu de différence entre les différentes modalités du facteur agroforestier.

On constate que le bloc n°2, constitué de pommiers AC et AFIR, est le plus touché. Le bloc n°3, constitué de pommiers AFIR et AFR, est le moins touché. Le bloc n°1, constitué de toutes les modalités, est intermédiaire aux autres blocs.

Partie 2 : Puceron vert (*Aphis pomi*)

A/ Evaluations de l'incidence

➤ Incidence au 24/06

Lors de la première évaluation de l'incidence du puceron vert, la moyenne parcellaire est de 1,13 foyer par pommier. Le facteur agroforestier influence significativement l'incidence du puceron vert (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,01949$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives de l'incidence du puceron vert (24/06) entre la modalité AFIR et la modalité AFR sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 21).

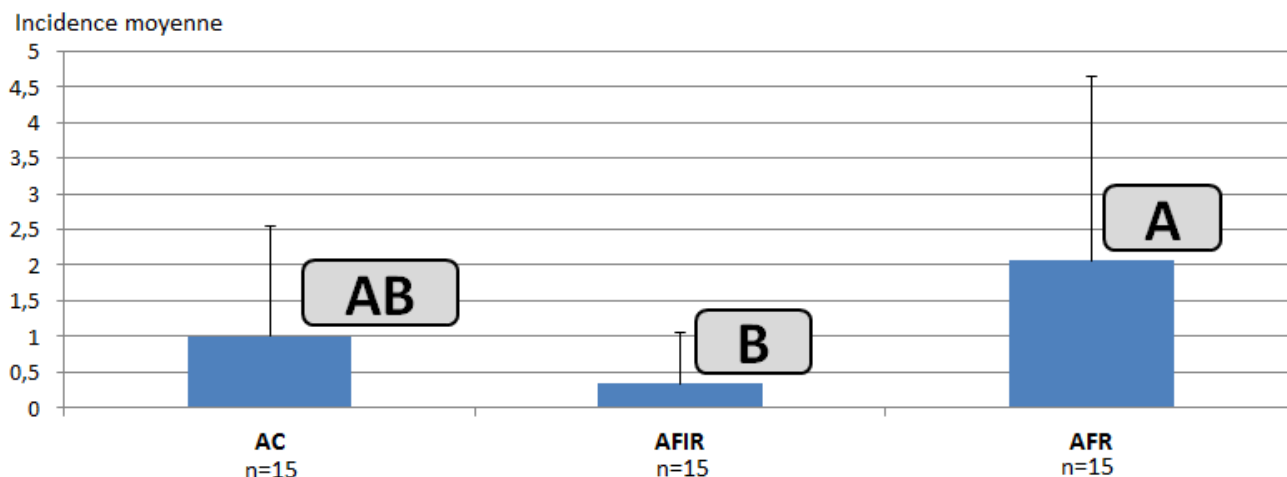


Figure 21 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur agroforestier lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 24/06. *Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.*

L'incidence de la modalité AFR est significativement plus élevée que l'incidence de la modalité AFIR. Il y a davantage de foyers de pucerons verts dans les pommiers en agroforesterie intra-rangs que dans les pommiers en agroforesterie inter-rangs. L'incidence de la modalité AC est intermédiaire.

Le facteur bloc n'influence pas significativement l'incidence du puceron vert (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,4146$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative de l'incidence du puceron vert (24/06) n'a été mise en évidence entre les différents blocs au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 22).

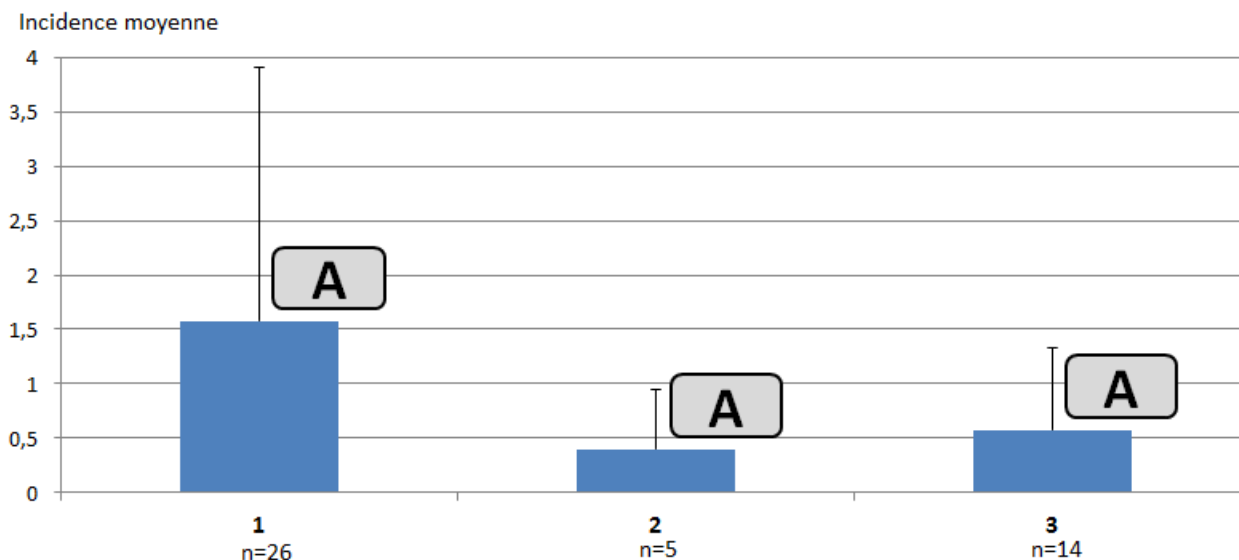


Figure 22 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 24/06. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

On constate visuellement que l'incidence puceron vert du bloc n°1 semble supérieure à celle des blocs n°2 et n°3.

➤ Incidence au 17/07

Lors de la seconde évaluation de l'incidence du puceron vert, la moyenne parcelle est de 0,3 foyer par pommier. C'est nettement plus faible que lors de la première évaluation. Le facteur agroforestier n'influence pas significativement l'incidence du puceron vert (test non-paramétrique, p-value=0,17). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative de l'incidence du puceron vert (17/07) n'a été mise en évidence entre les modalités du facteur agroforestier au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 23).

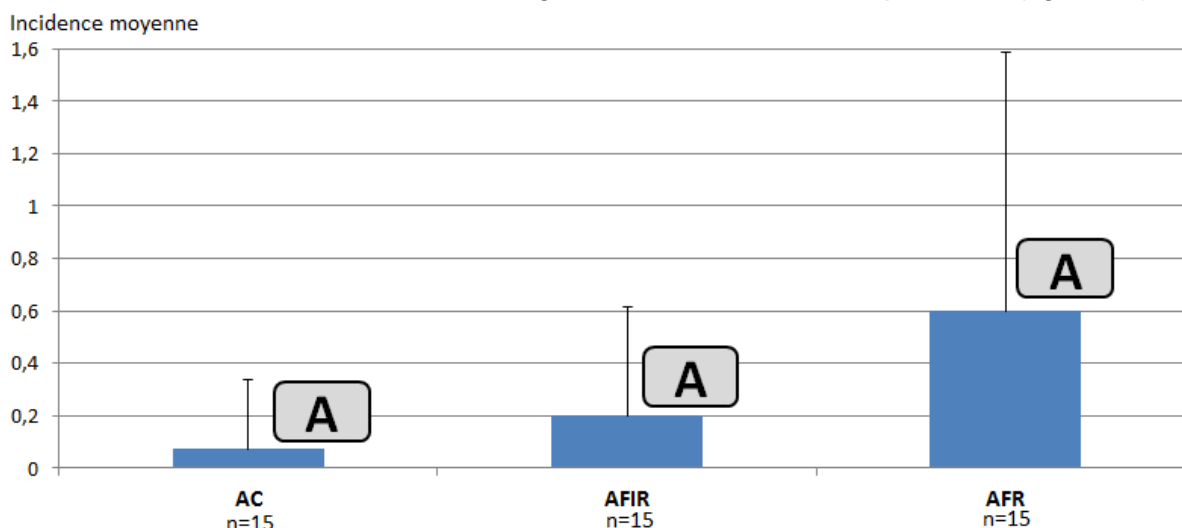


Figure 23 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur agroforestier lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 17/07. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Visuellement, on constate toutefois que l'incidence de la modalité AFR semble plus importante que les autres modalités (comme pour la première évaluation de l'incidence). Contrairement au 24/06, c'est la modalité AC dont l'incidence est la plus faible.

Le facteur bloc n'influence pas significativement l'incidence du puceron vert (test non-paramétrique, p-value=0.09). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative de l'incidence du puceron vert (17/07) n'a été mise en évidence entre les différents blocs au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 24).

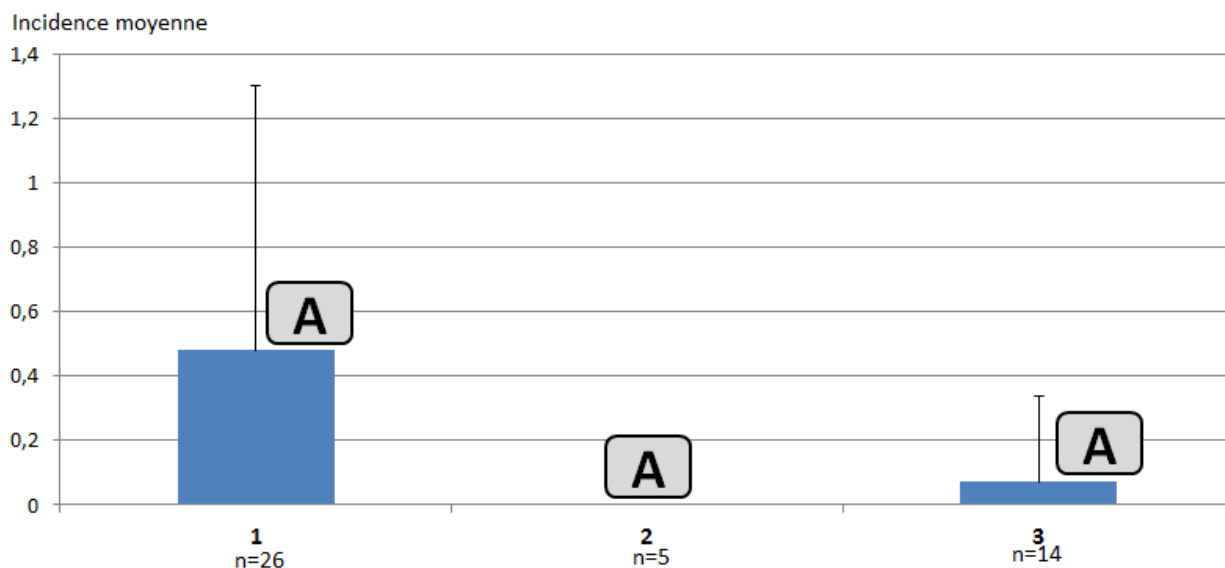


Figure 24 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 17/07. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Visuellement, le bloc n°1 possède l'incidence la plus forte (comme pour le 24/06). Au 17/07, l'incidence est nulle dans le bloc n°2 ; ce bloc est dépourvu de foyers de pucerons verts.

B/ Suivi des foyers de pucerons verts

➤ Evolution du nombre de foyers actifs

Il est également possible d'évaluer l'incidence du puceron vert à partir des suivis dynamiques réalisés du 28/05 au 23/07 (figure 25). La qualité de l'information est toutefois moins bonne que celle présentée précédemment, car on suit un maximum de trois foyers par arbre. On a cependant vu précédemment que l'incidence est globalement faible ; au 24/06 la majorité des pommiers présentent moins de trois foyers.

On constate que les résultats sont très similaires à ceux obtenus précédemment. A l'échelle parcellaire, l'incidence du puceron vert est décroissante à partir du 10/06 ; elle chute fortement (- 44,6%) le 17/06.

Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives de l'incidence du puceron vert entre les différentes modalités agroforestières ne sont mises en évidence qu'à partir du 24/06, au seuil de risque $\alpha=5\%$. L'incidence de la modalité AFR devient significativement plus élevée que celle des autres modalités. L'incidence de la modalité AFIR chute plus rapidement que l'incidence de la modalité AC, mais elle persiste plus longtemps dans la saison que la modalité AC.

Nombre de foyers actifs

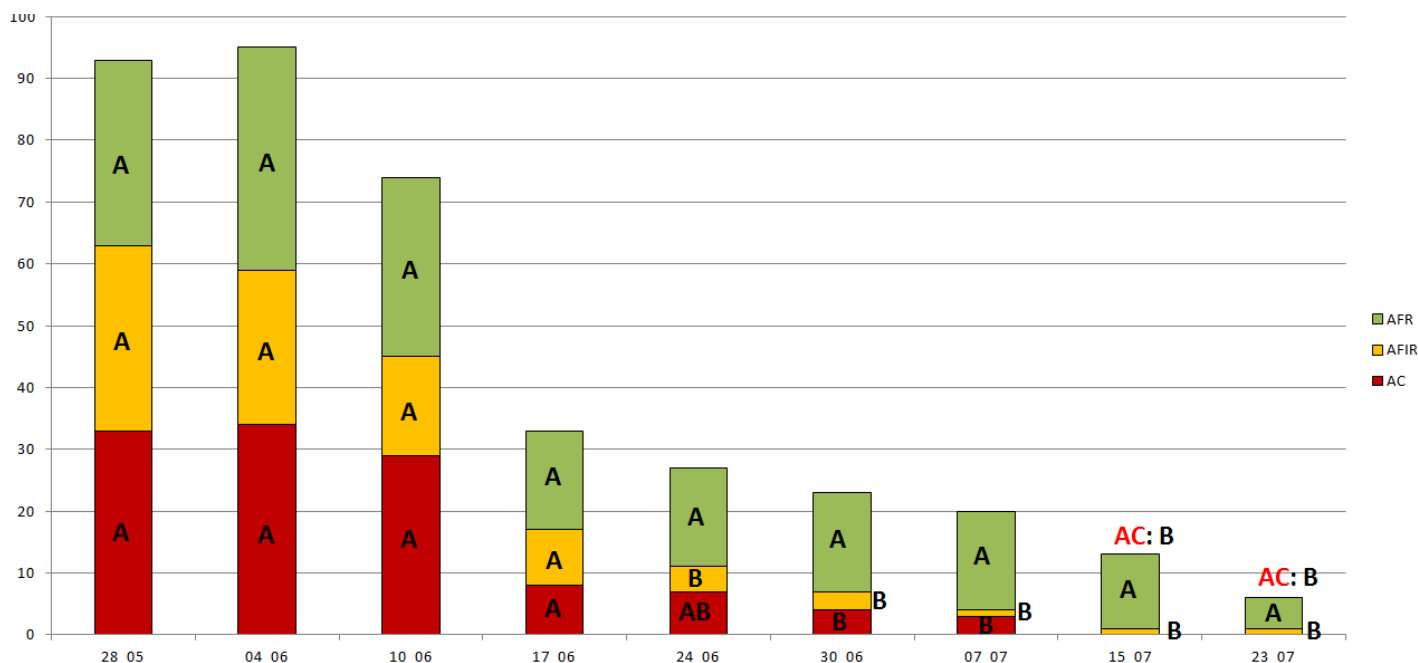


Figure 25 : Dynamique du nombre de foyers actifs de pucerons verts dans les 45 pommiers suivis. 15 arbres par modalité agroforestière. L'étude permet de suivre un maximum de 135 foyers sur la parcelle. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$. Ces lettres ne peuvent être comparées qu'au sein d'une même colonne.

Les données de la figure 25 résultent des apparitions et des disparitions de foyers de puceron vert. Il est possible d'évaluer uniquement les disparitions de foyers dans la saison.

➤ Evolution des disparitions de foyers

Nombre de disparition de foyers

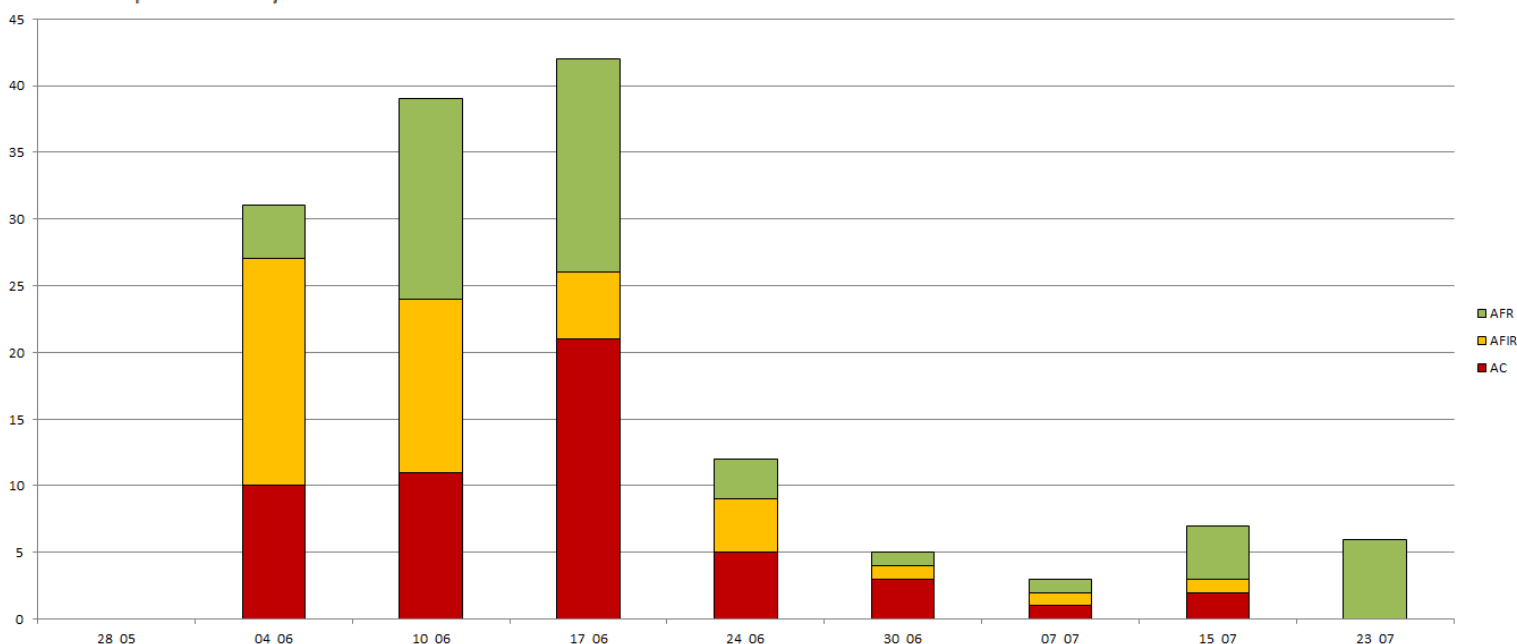


Figure 26 : Dynamique du nombre de disparition de foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis. 15 arbres par modalité agroforestière.

On constate sur la figure 26 que le nombre de disparitions de foyers est important entre le 04/06 et le 17/06. On peut en déduire que, si le nombre total de foyers reste important jusqu'au 10/06 (figure 25), c'est qu'il y a pendant cette période un nombre important d'apparitions de nouveaux foyers. La chute observée au 17/06 sur la figure 25 s'explique donc, en partie, par une diminution de l'apparition de nouveaux foyers.

➤ Evolution de la sévérité au sein des foyers

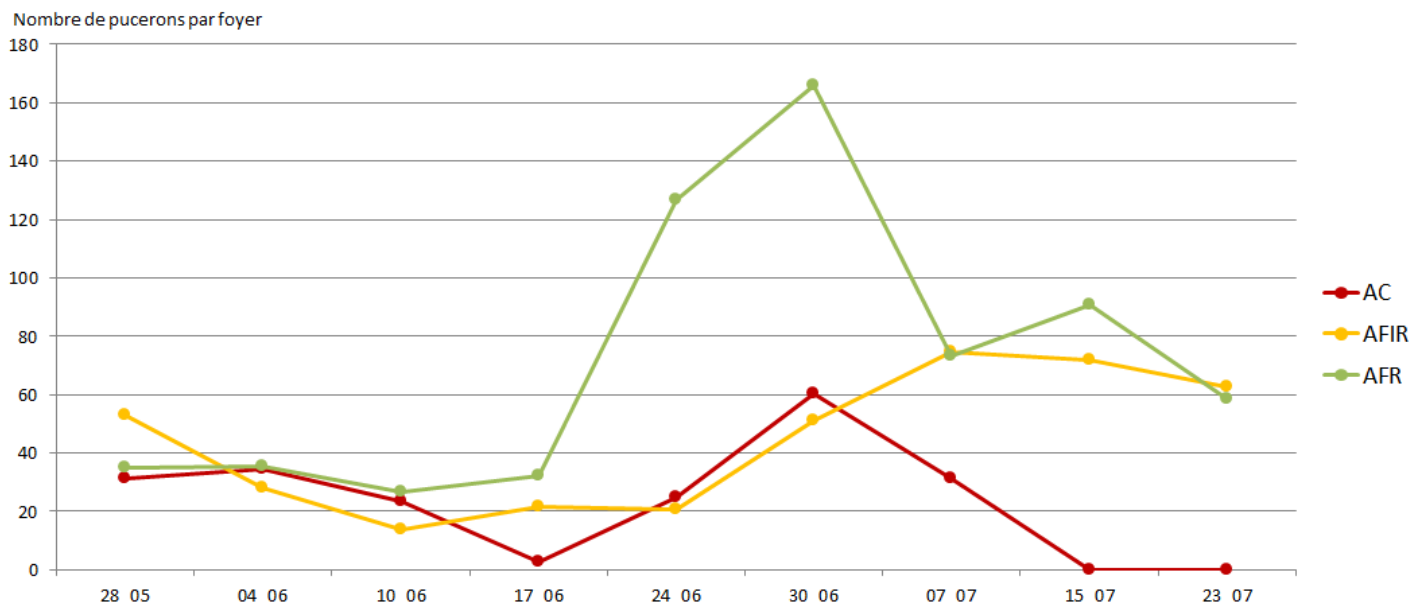


Figure 27 : Dynamique de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis en fonction du facteur agroforestier. 15 arbres par modalité agroforestière.

On constate visuellement que la sévérité dans les différentes modalités est similaire jusqu'au 10/06. A partir du 17/06, la sévérité moyenne de la modalité AFR devient supérieure aux modalités AFIR et AC jusqu'au 07/07, data à laquelle la sévérité moyenne de la modalité AFIR rattrape la modalité AFR.

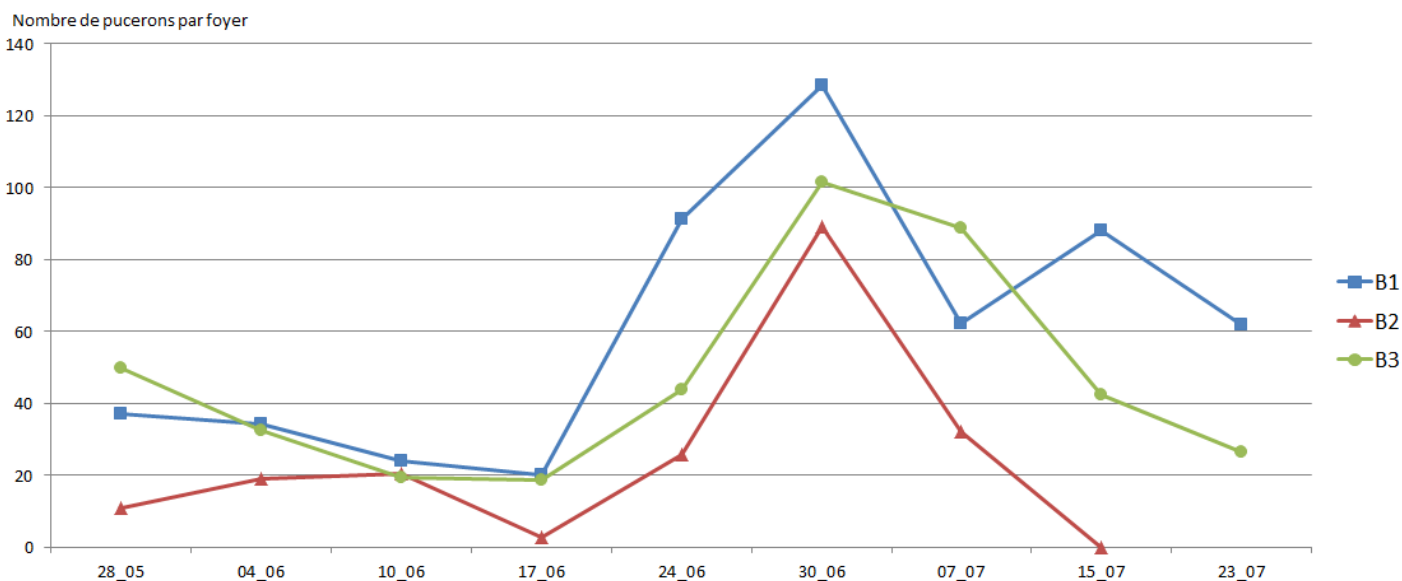


Figure 28 : Dynamique de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis en fonction du facteur bloc. Pas le même nombre de répétitions pour chaque bloc.

La figure 28 coïncide partiellement avec les résultats de la figure 27. La sévérité moyenne du bloc n°2 (AC et AFIR) est inférieure à celle du bloc n°3 (AFR et AFIR). On peut toutefois soupçonner un effet parcellaire ; en effet la sévérité moyenne du bloc n°1 (AFR, AFIR et AC) est supérieure aux autres blocs. Si la sévérité moyenne ne dépendait que de la composition en modalités agroforestières du bloc, elle devrait être intermédiaire aux autres blocs. Les différences entre les blocs ne peuvent pas être expliquées que par leur composition en modalités agroforestières.

Il est possible de s'intéresser uniquement aux pucerons qui sont sous forme ailée ce qui nous donne des indications sur la capacité de colonisation d'un foyer et/ou sur la reproduction sexuée du puceron.

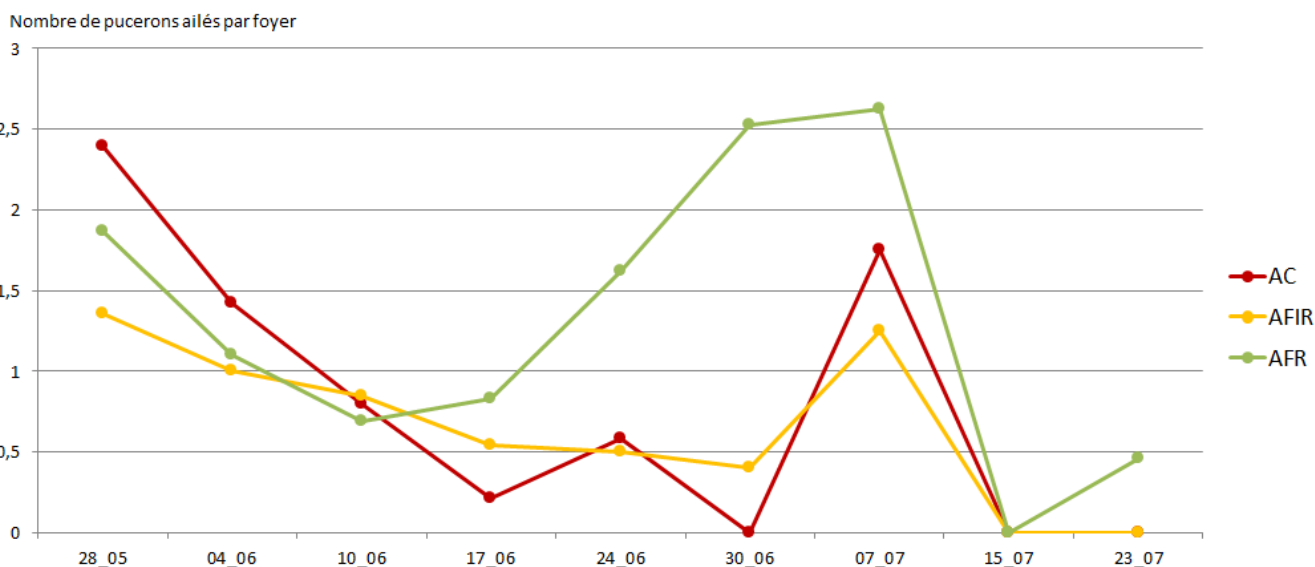


Figure 29 : Dynamique de la sévérité moyenne en formes ailées des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur agroforestier. 15 arbres par modalité agroforestière.

On observe que le nombre moyen de pucerons verts ailés par foyer chute entre le 28/05 et le 10/06, avant d'augmenter jusqu'au 07/07. Au 15/07, les foyers ne présentent plus aucun puceron ailé. Le nombre moyen de pucerons ailés est plus important dans la modalité AFR, ce qui est logique puisque la sévérité moyenne de cette modalité est la plus importante.

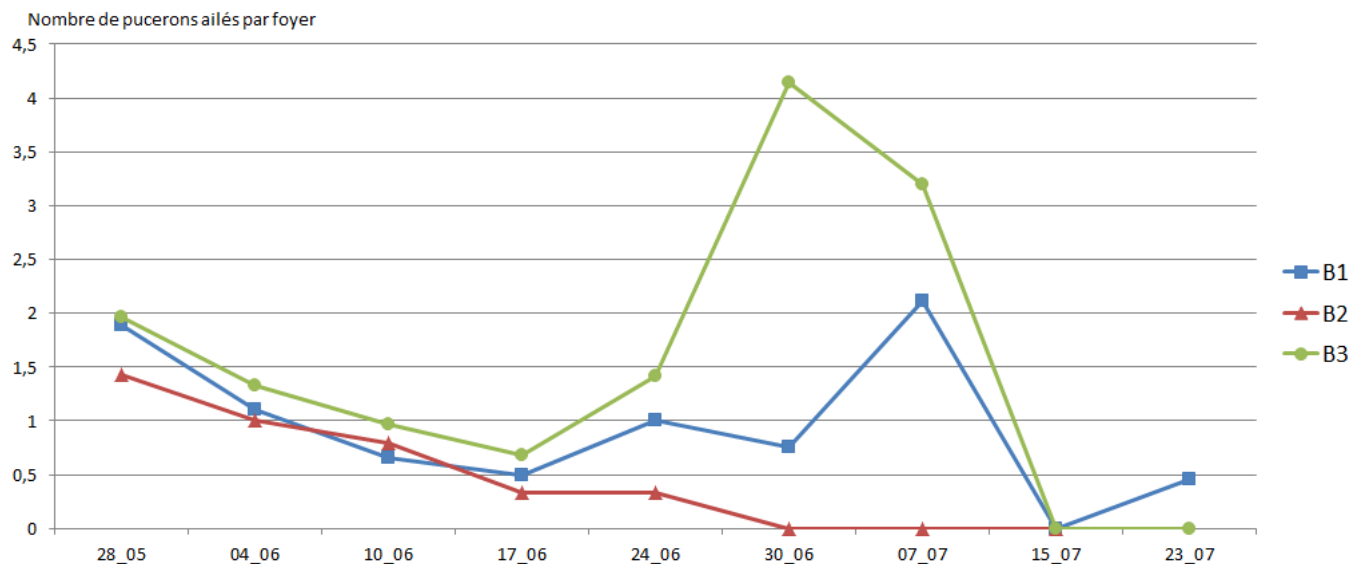


Figure 30 : Dynamique de la sévérité moyenne en formes ailées des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur bloc. *Pas le même nombre de répétitions pour chaque bloc.*

On observe des différences importantes entre les blocs à partir du 24/06. Le nombre moyen de pucerons verts ailés est le plus élevé dans le bloc n°3, intermédiaire dans le bloc n°1, et très faible dans le bloc n°2. Ces résultats coïncident partiellement avec ceux de la figure 29. On remarque toutefois qu'à partir du 30/06, il n'y a plus aucun puceron ailé dans le bloc n°2.

➤ Evolution du nombre moyen de fourmis par foyer

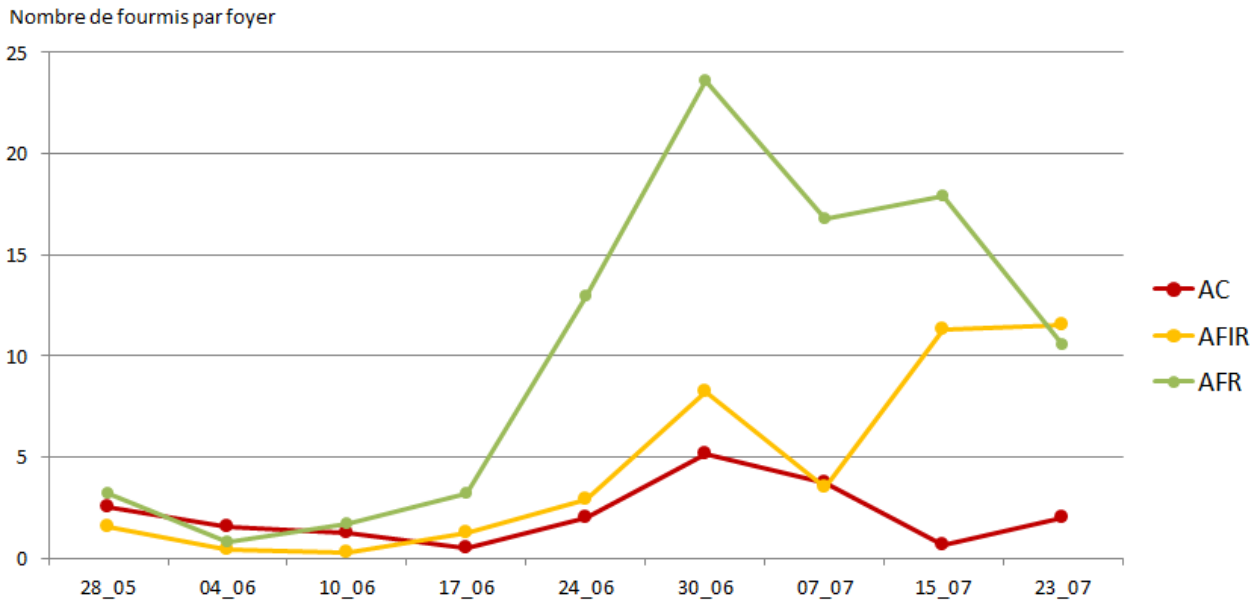


Figure 31 : Dynamique du nombre moyen de fourmis par foyer de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur agroforestier. *15 arbres par modalité agroforestière.*

On observe que le nombre moyen de fourmis par foyer augmente à partir du 17/06. Cette valeur moyenne est alors plus importante dans la modalité AFR que dans les autres modalités jusqu'au 23/07. Elle est la plus faible dans la modalité AC et intermédiaire dans la modalité AFIR.

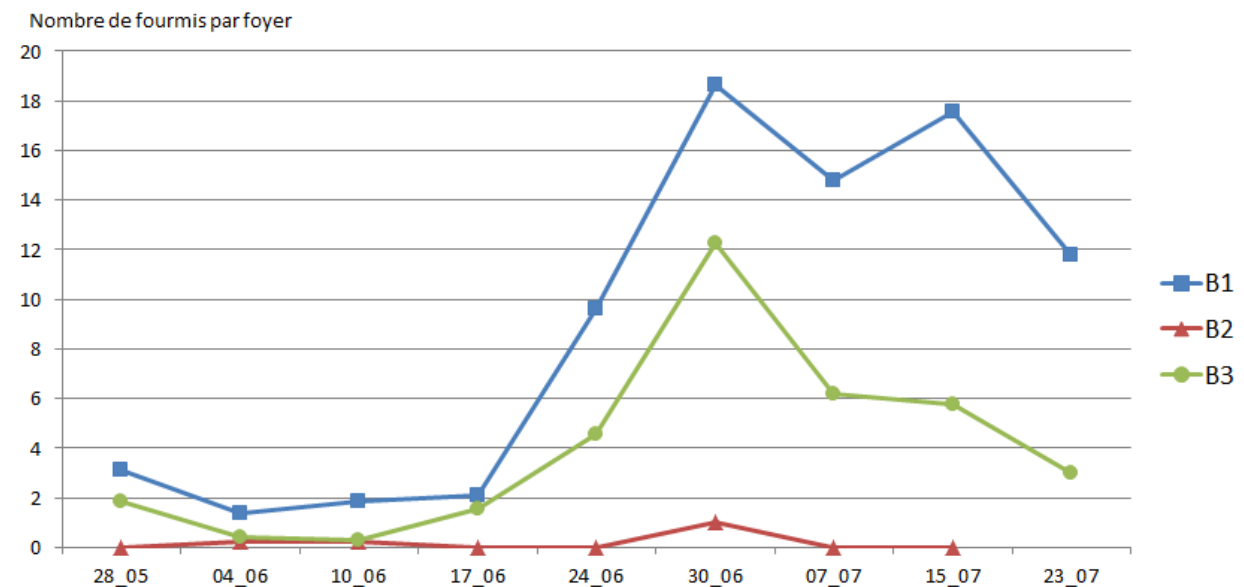


Figure 32 : Dynamique du nombre moyen de fourmis par foyer de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur bloc. *Pas le même nombre de répétitions pour chaque bloc.*

Le nombre moyen de fourmis par foyer est très faible dans le bloc n°2 pendant toute la saison. Il est plus important dans le bloc n°1 que dans le bloc n°3, ce qui laisse supposer un effet parcellaire.

Figure 33 : Attaque d'une larve de coccinelle par une fourmi, sur pommier, site GAFAM, 2020.



Il est important de rappeler que l'ensemble des données présentées dans cette partie sont des valeurs qui moyennent l'ensemble des foyers. De par la méthodologie, certains foyers sont jeunes (donc peu densément peuplés) et d'autres plus anciens (donc plus densément peuplés). Les valeurs d'écart-types illustrent bien la forte variabilité (figure 34).

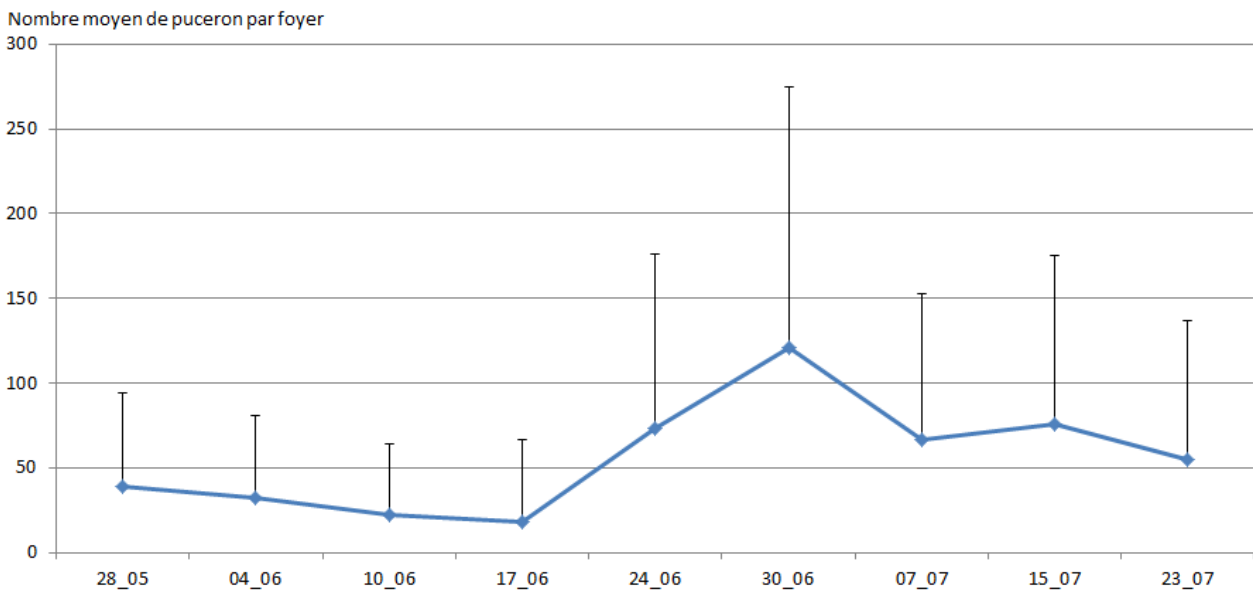


Figure 34 : Représentation des écarts-types de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis.

➤ Evolution de l'infestation du puceron vert

Comme expliqué dans la méthodologie, l'infestation est caractérisée à la fois par l'incidence et la sévérité. Dans les conditions expérimentales du site de 2020, l'incidence est assez faible pour être évaluée par le suivi dynamique du puceron vert. Il est ainsi possible de représenter une dynamique de l'infestation du puceron vert (figure 35).

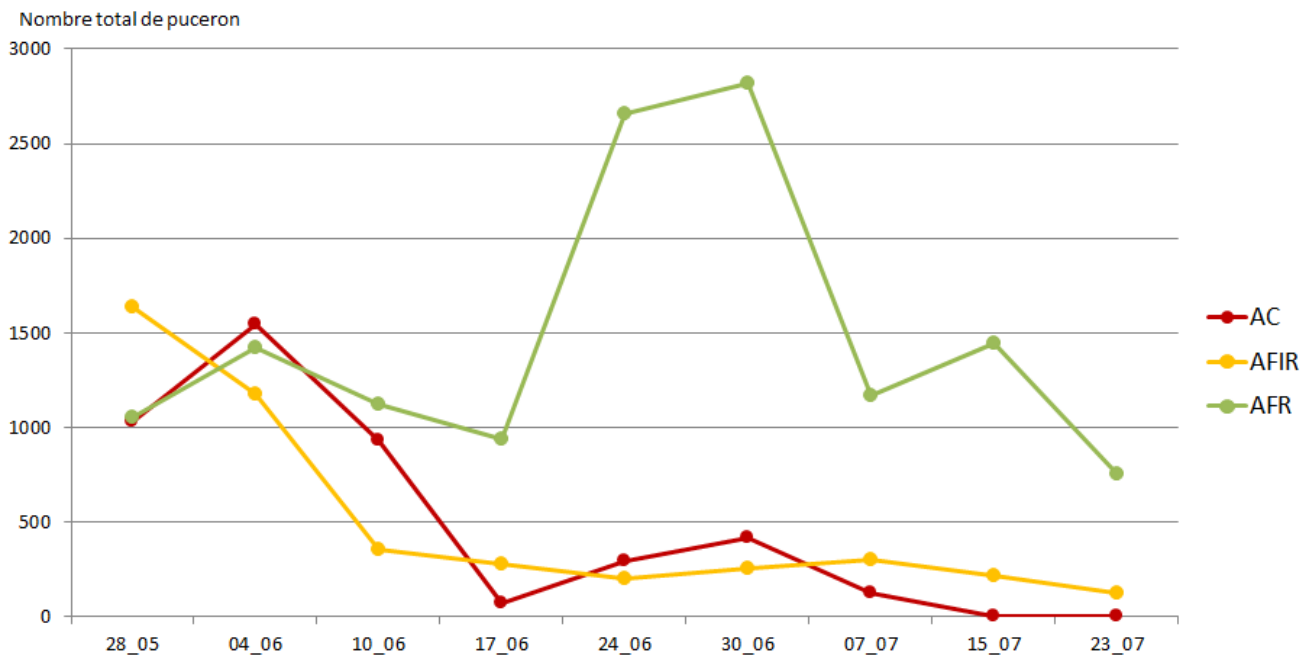


Figure 35 : Dynamique du nombre total de pucerons verts dans chaque modalité agroforestière parmi les 45 pommiers suivis. 15 arbres par modalité agroforestière.

On constate qu'à partir du 17/06 le nombre total de pucerons devient plus important dans la modalité AFR que dans les modalités AFIR et AC. Ce nombre est particulièrement élevé entre le 24/06 et le 30/06. On remarque une fois encore que l'abondance des pucerons verts est étroitement liée à celle des fourmis (figure 36).

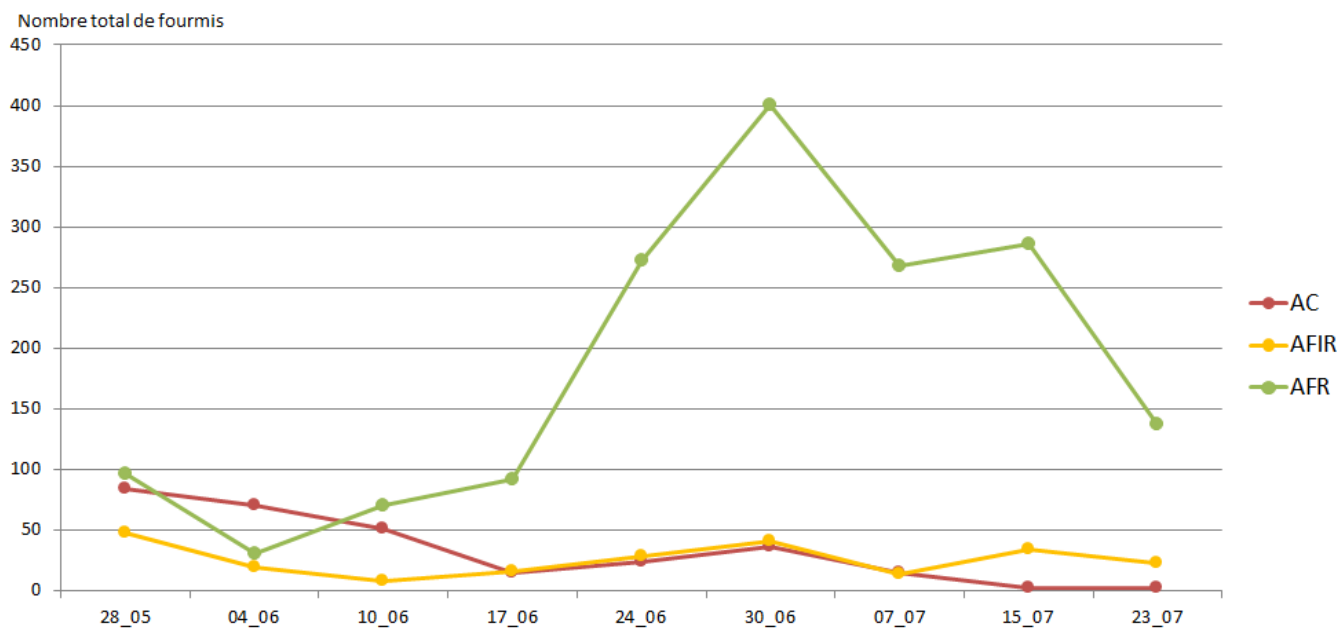


Figure 36 : Dynamique du nombre total de fourmis dans les foyers suivis de chaque modalité agroforestière parmi les 45 pommiers suivis. 15 arbres par modalité agroforestière.

C/ Evaluation de la prédation du puceron vert

Les cartes de prédation « puceron » sont posées sur le site le 28/04. Les ennemis-naturels à l'origine de cette prédation se sont développés au dépend des populations de pucerons cendrés, et sont quasiment tous capables de consommer le puceron vert. Le taux de prédation à l'échelle de la parcelle est de 48,3 %.

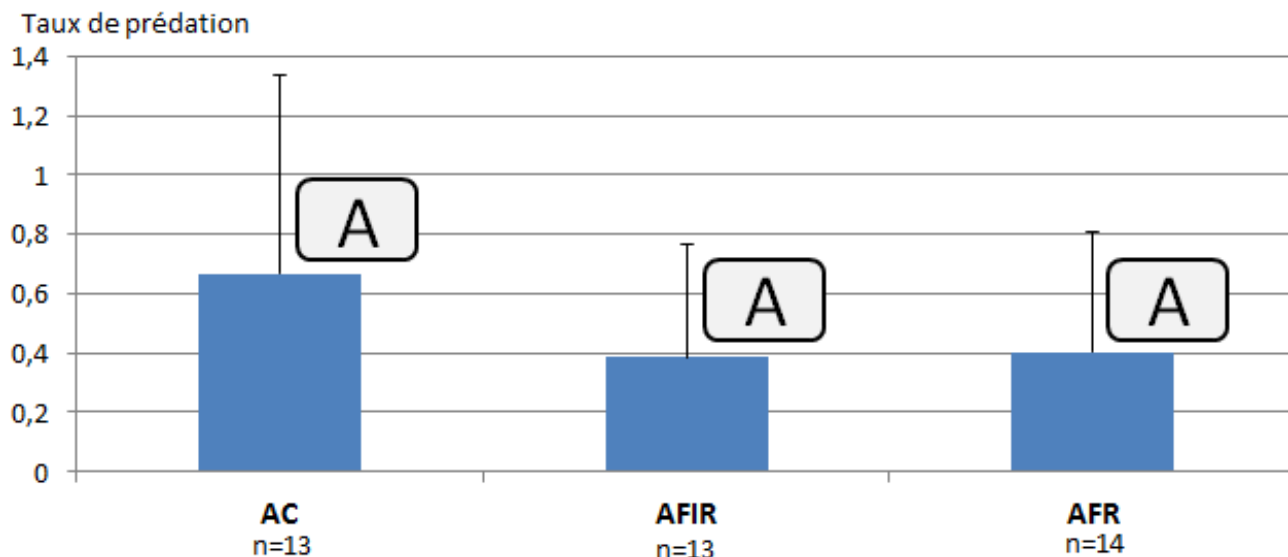


Figure 37 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « puceron » en fonction du facteur agroforestier entre le 28/04 et le 30/04. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement le taux de prédation des cartes « puceron » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,2585$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux de prédation des pucerons n'a été mise en évidence entre les modalités du facteur agroforestier au seuil de risque $\alpha=5\%$. On remarque (figure 37) que le taux de prédation semble supérieur dans la modalité AC.

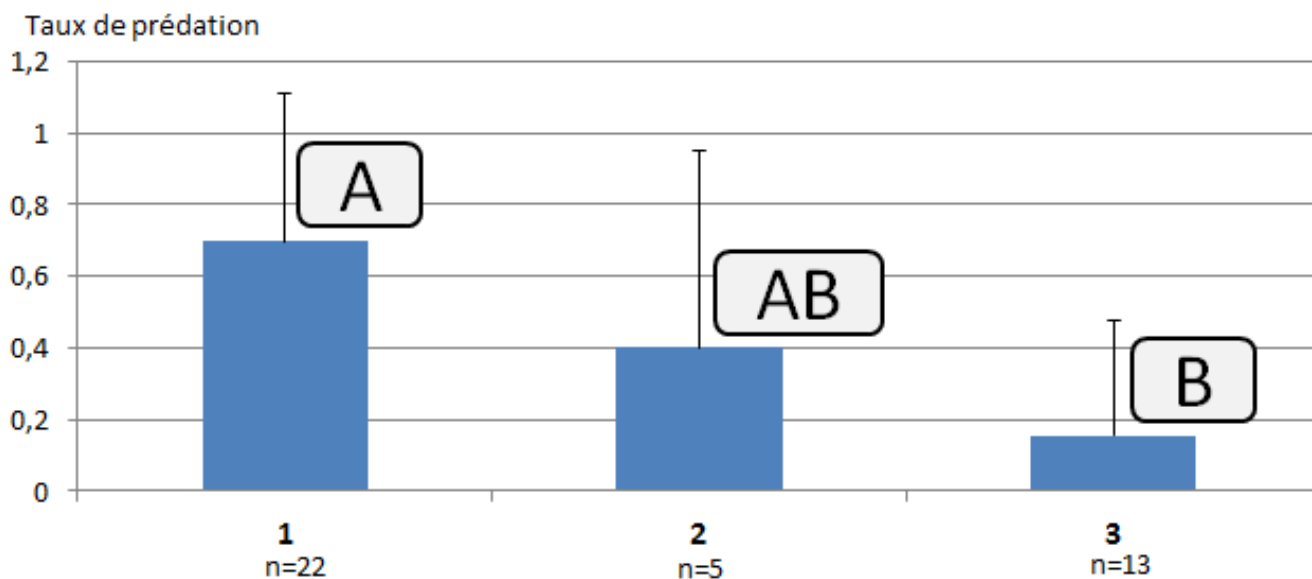


Figure 38 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « puceron » en fonction du facteur bloc entre le 28/04 et le 30/04. Pas le même nombre de répétitions pour chaque bloc. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur bloc influence significativement le taux de prédation des cartes « puceron » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,002734$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du taux de prédation entre le bloc n°1 et le bloc n°3 sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 38). Le taux de prédation du puceron est plus important dans le bloc n°1, il est intermédiaire dans le bloc n°2, et faible dans le bloc n°3.

Partie 3 : Le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*)

A/ Ajustement de la variable d'étude

La variable étudiée pour l'infestation du carpocapse est le nombre de fruits infestés par au moins une larve. Cependant, il a été rapidement évident que l'étude de cette variable connaît un biais. En effet tous les pommiers ne possèdent pas le même nombre de fruits. Le nombre total de fruits d'un arbre est influencé par le facteur agroforestier (figures 39, 40).

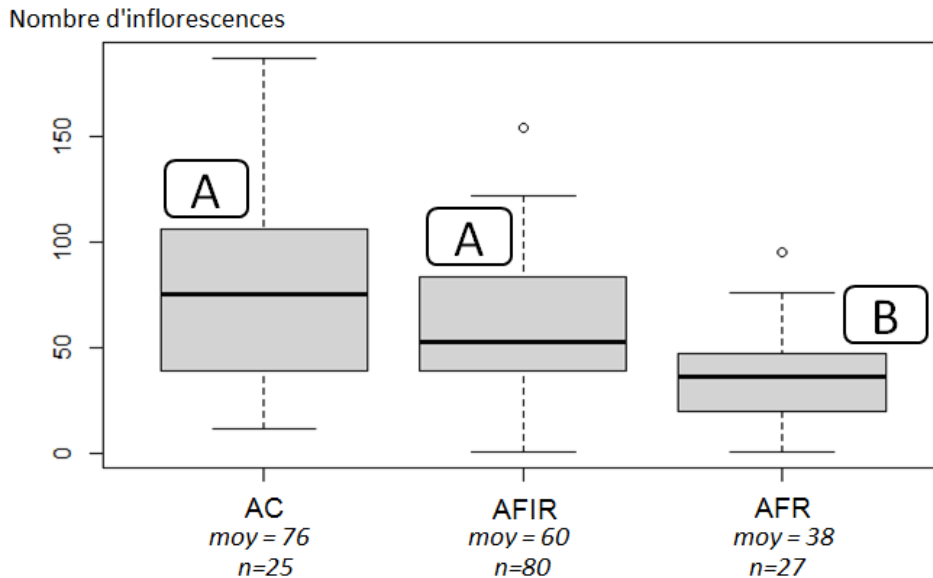


Figure 39 : Nombre d'inflorescences en fonction du facteur agroforestier. 147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Représentation en boîte de Tukey. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Il en va de même pour le nombre de fruits après l'éclaircissage, lors de la deuxième génération de carpocapse (figure 40)

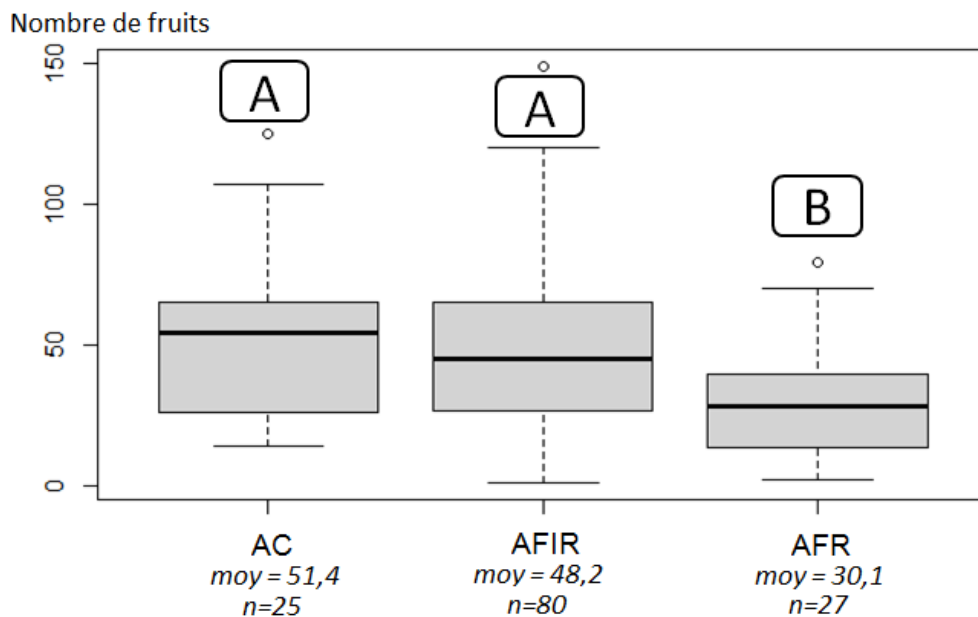


Figure 40 : Nombre de fruits en fonction du facteur agroforestier lors d'évaluation de la G2. 147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Représentation en boîte de Tukey. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur agroforestier influence significativement le nombre d'inflorescences (test non-paramétrique, p-value=0,0004544) et de fruits (test non-paramétrique, p-value=0.04635) des pommiers. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du nombre d'inflorescences/de fruits entre les modalités AC et AFIR et la modalité AFR sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figures 39, 40).

Les pommiers en modalité AC et AFIR possèdent davantage d'inflorescences et de fruits que les pommiers en modalité AFR. Ce paramètre est susceptible d'influencer l'infestation du carpocapse (figure 41).

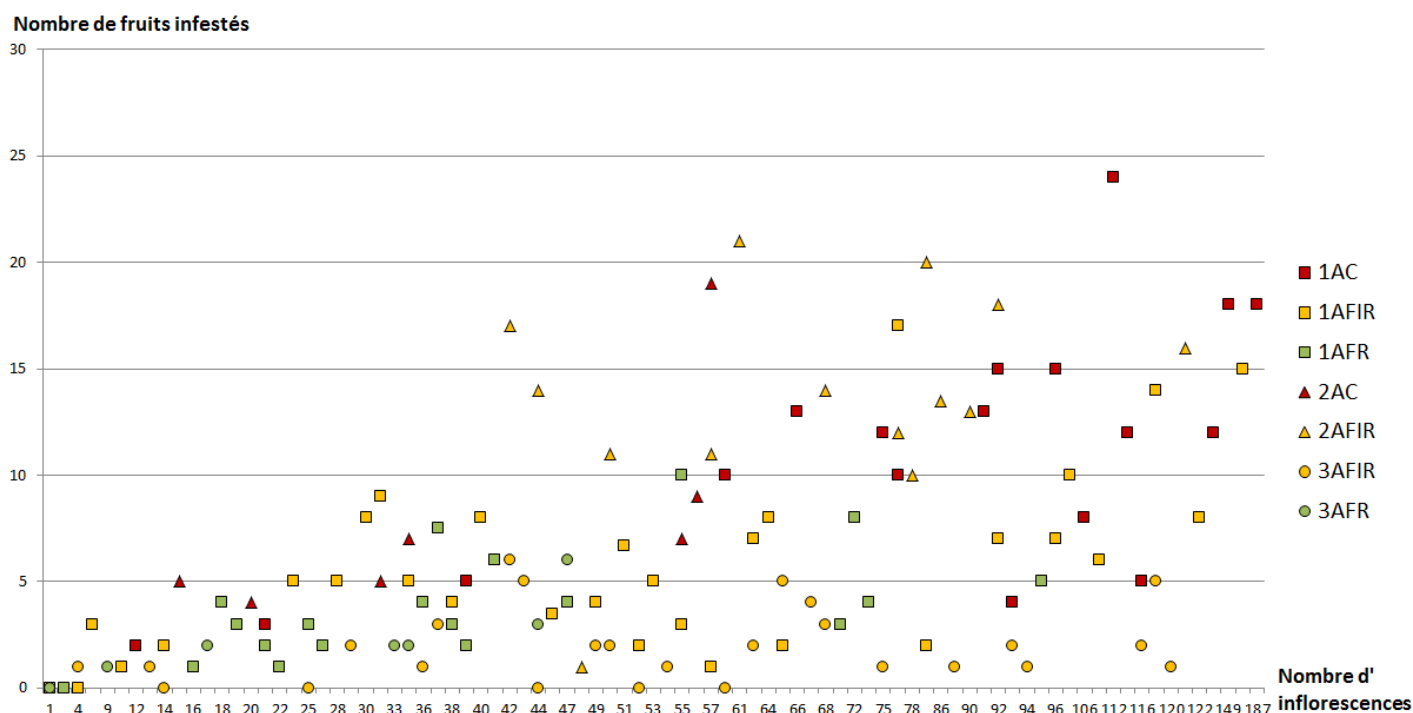


Figure 41 : Nombre de fruits infestés (G1+G2) en fonction du nombre d'inflorescences avec au moins un fruit.

La légende du graphique correspond au facteur « groupe » qui combine les facteurs « agroforestier » et « bloc ». On constate que la majorité des pommiers AFR (en vert) sont situés en bas à gauche, et la majorité des pommiers AC (en rouge) sont situés en haut à droite de la figure. Les pommiers AFIR (en jaune) sont répartis le long de l'abscisse. La forme du nuage du point est globalement logique : plus un pommier possède de fruits, plus le nombre de fruits touchés est susceptible d'être important. La corrélation entre le nombre d'inflorescences et le nombre de fruits infestés (G1+G2) est présentée sur la figure 42.

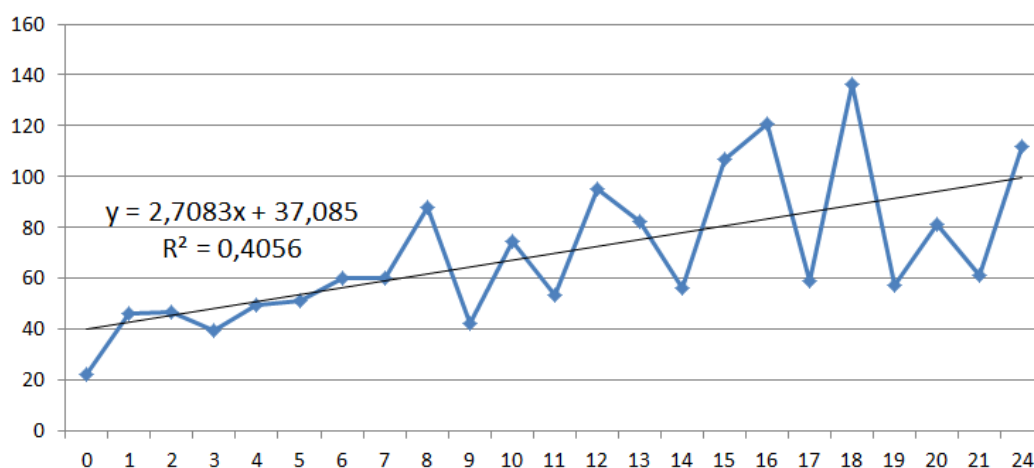


Figure 42 : Corrélation linéaire entre le nombre d'inflorescences (avec au moins un fruit) et le nombre de fruits infestés.

Afin de limiter l'interférence du nombre d'inflorescences (ou du nombre de fruits) sur le nombre de fruits infestés, il est possible d'étudier le taux de fruits infestés (= nombre de fruits infestés / nombre total de fruits). Cette nouvelle variable ne dépend pas, ou peu, du nombre total d'inflorescences de l'arbre (figure 43).

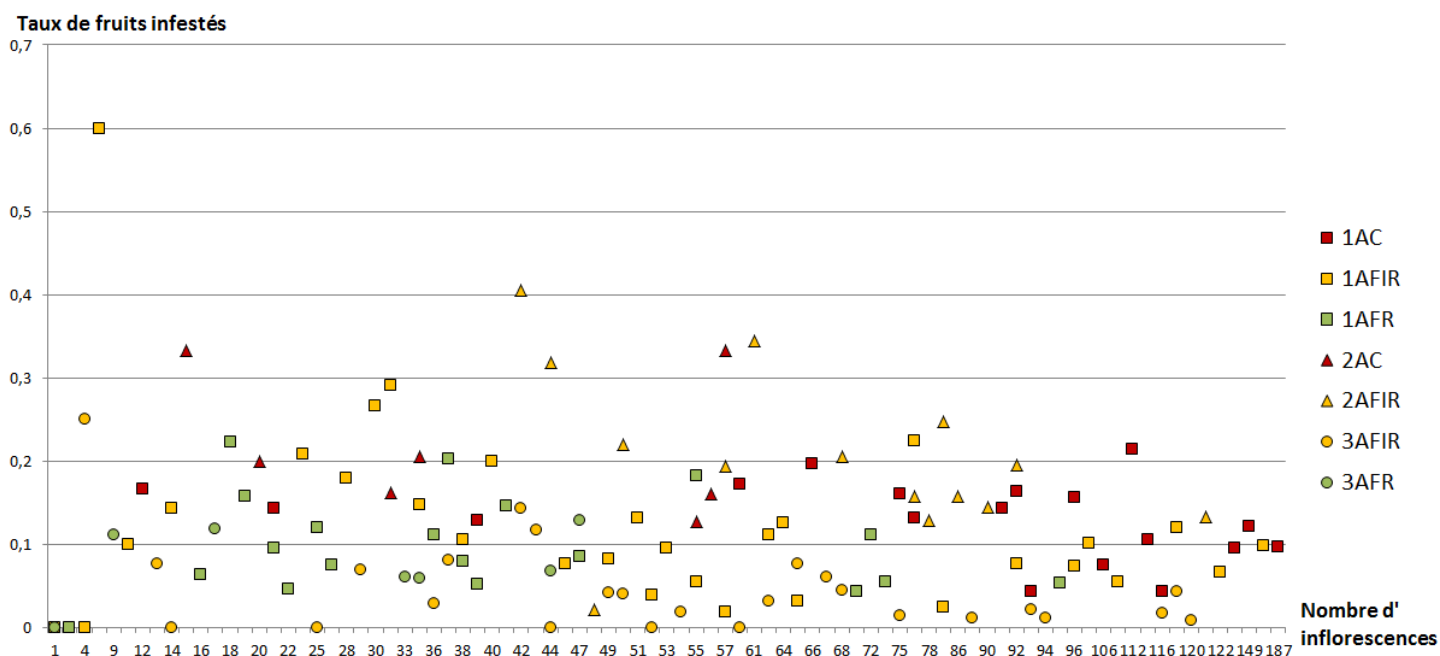


Figure 43 : Taux de fruits infestés (G1+G2) en fonction du nombre d'inflorescences avec au moins un fruit.

Pour la première génération (dite G1), le taux d'infestation est calculé en divisant le nombre de fruit infestés en G1 par le nombre d'inflorescences, qui est une sous-estimation du nombre total de fruits. Le taux d'infestation de la G1 est donc surestimé. Pour la deuxième génération (dite G2), le taux d'infestation est calculé en divisant le nombre de fruits infestés en G2 par le nombre de fruits comptés sur chaque arbre après l'éclaircissage des pommiers. L'opération d'éclaircissage (réalisée le 08/06) visait à retirer en priorité les fruits infestés par le carpocapse de G1. Enfin, le taux d'infestation total (G1+G2) est calculé en divisant le nombre de fruits infestés en G1 + G2 par le nombre d'inflorescences.

B/ Evaluation du taux d'infestation du carpocapse

Tableau 9 : Dégâts et infestation des différentes générations de carpocapse à l'échelle de la parcelle.

Génération	Pourcentage de fruits présentant des symptômes du carpocapse	Pourcentage de fruits infestés par au moins une larve de carpocapse
G1	21,05 %	11,84 %
G2	29,37 %	11,33 %
G1 + G2	43,63 %	20,28 %

L'infestation du carpocapse est importante sur la parcelle. Le taux d'infestation est similaire pour les deux générations.

Taux de fruits infestés

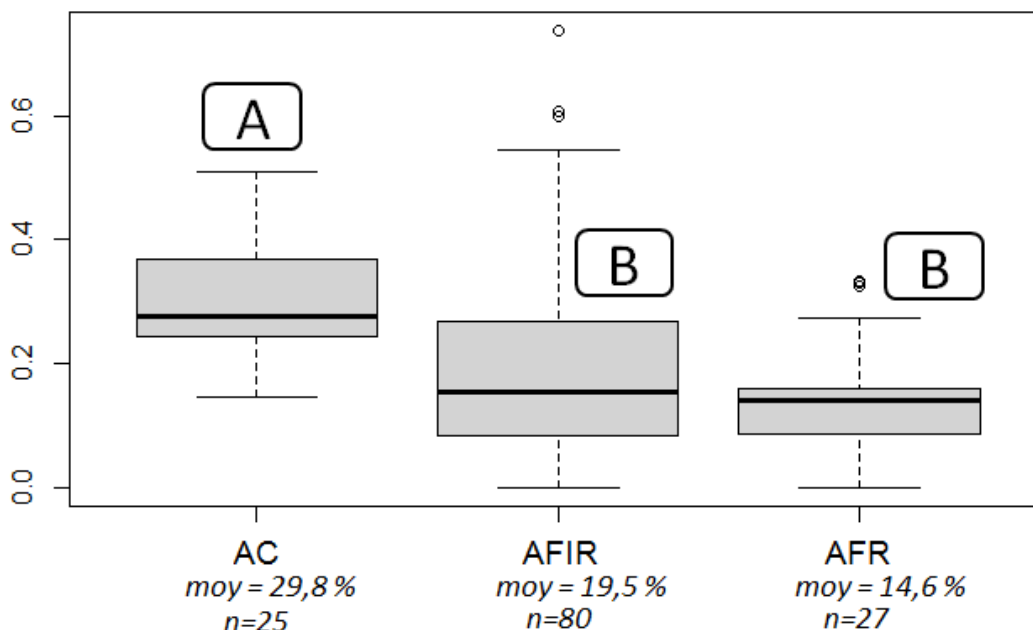


Figure 44 : Dégâts et infestation des différentes générations de carpocapse à l'échelle de la parcelle.

147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Représentation en boîte de Tukey. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur agroforestier influence significativement le taux d'infestation total du carpocapse (test non-paramétrique, $p\text{-value}=3,523e^{-05}$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du taux d'infestation total entre la modalité AC et les modalités AFIR et AFR sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 434). Les pommiers de la modalité AC sont proportionnellement plus infestés par le carpocapse que les pommiers des modalités AFIR et AFR.

Tableau 10 : Lettres de significativité et p-values la comparaison multiple des moyennes des différentes générations, en fonction du facteur agroforestier.

Génération	Lettres de significativité			p-value (non-paramétrique)
	AC	AFIR	AFR	
G1	A	B	B	0,008109
G2	A	B	C	$2,959e^{-06}$
G1 + G2	A	B	B	$3,523e^{-05}$

Taux de fruits infestés

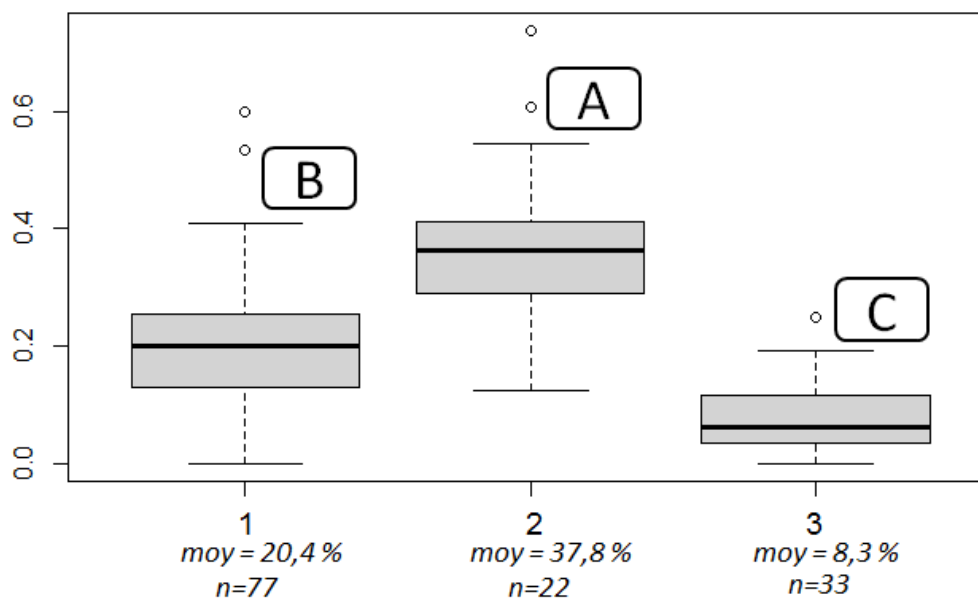


Figure 45 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur bloc. 147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Représentation en boîte de Tukey. Lettres de significativités associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur bloc influence significativement le taux d'infestation total du carpocapse (test non-paramétrique, $p\text{-value}=7,883e^{-14}$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du taux d'infestation total entre le bloc n°1, le bloc n°2 et le bloc n°3 sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 45). Les pommiers du bloc n°2 sont proportionnellement plus infestés par le carpocapse que ceux du bloc n°1, qui sont proportionnellement plus infestés que ceux du bloc n°3.

Tableau 11 : Lettres de significative et p-values de la comparaison multiple des moyennes des différentes générations, en fonction du facteur bloc.

Génération	Lettre de significativité			p-value (non-paramétrique)
	Bloc n°1	Bloc n°2	Bloc n°3	
G1	B	A	C	$2,82e^{-10}$
G2	B	A	C	$1,645e^{-10}$
G1 + G2	B	A	C	$7,883e^{-14}$

Il est possible de pousser plus loin l'analyse en s'intéressant à la variabilité au sein d'une modalité agroforestière donnée ou d'un bloc donné.

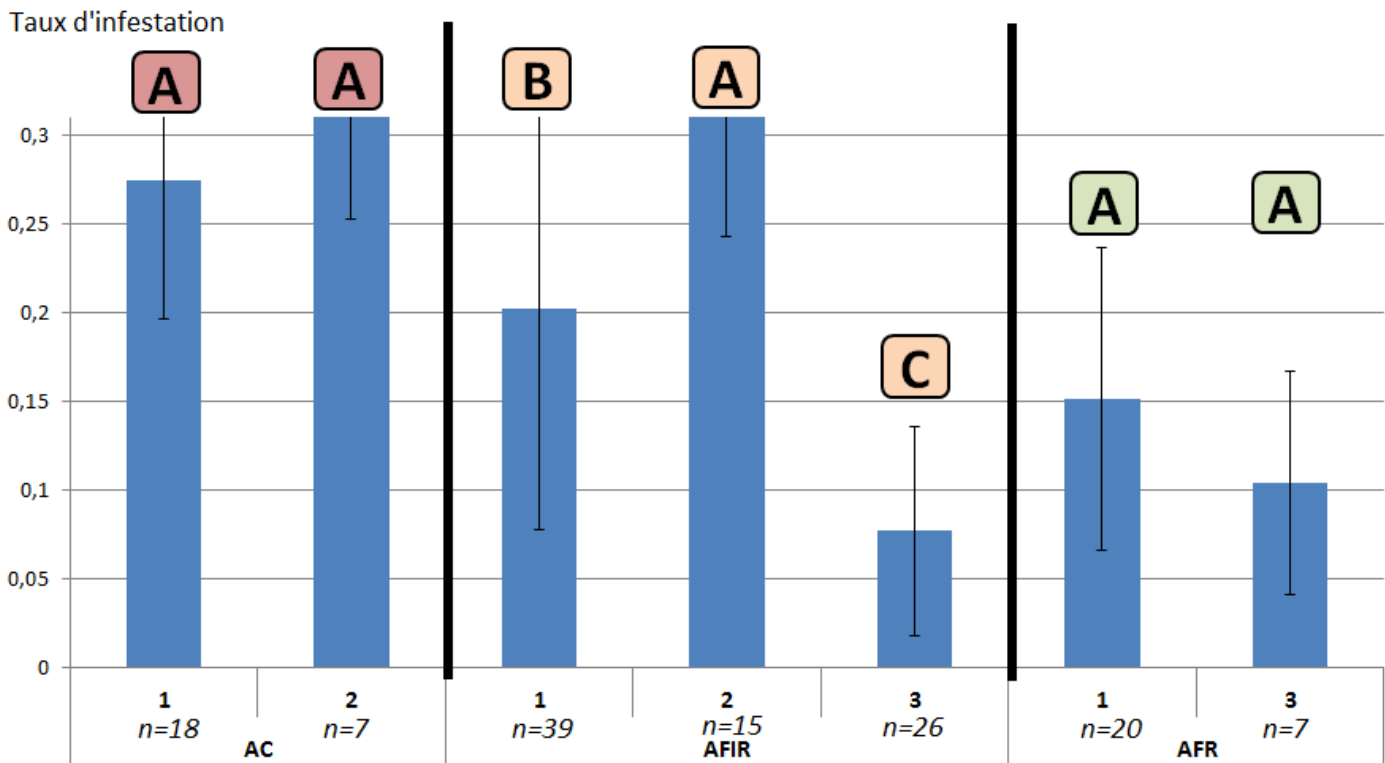


Figure 46 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur agroforestier, décomposé dans les différents blocs. 147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$. Les lettres de significativité ne peuvent être comparées que si elles sont de la même couleur.

Le facteur bloc n'influence pas significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein de la modalité AC (test non-paramétrique, p-value=0,1163). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux d'infestation total entre les modalités AC du bloc n°1 et les modalités AC du bloc n°2 n'est mise en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 46).

Le facteur bloc influence significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein de la modalité AFIR (test non-paramétrique, p-value=1,116e⁻⁰⁹). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du taux d'infestation total entre les modalités AFIR du bloc n°1, du bloc n°2 et du bloc n°3 sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 46). Les modalités AFIR du bloc n°2 sont proportionnellement plus infestées que les modalités AFIR du bloc n°1, qui sont elles-mêmes plus infestées que celles du bloc n°3.

Le facteur bloc n'influence pas significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein de la modalité AFR (test non-paramétrique, p-value=0,2028). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux d'infestation total entre les modalités AFR du bloc n°1 et les modalités AFR du bloc n°3 n'est mise en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 46).

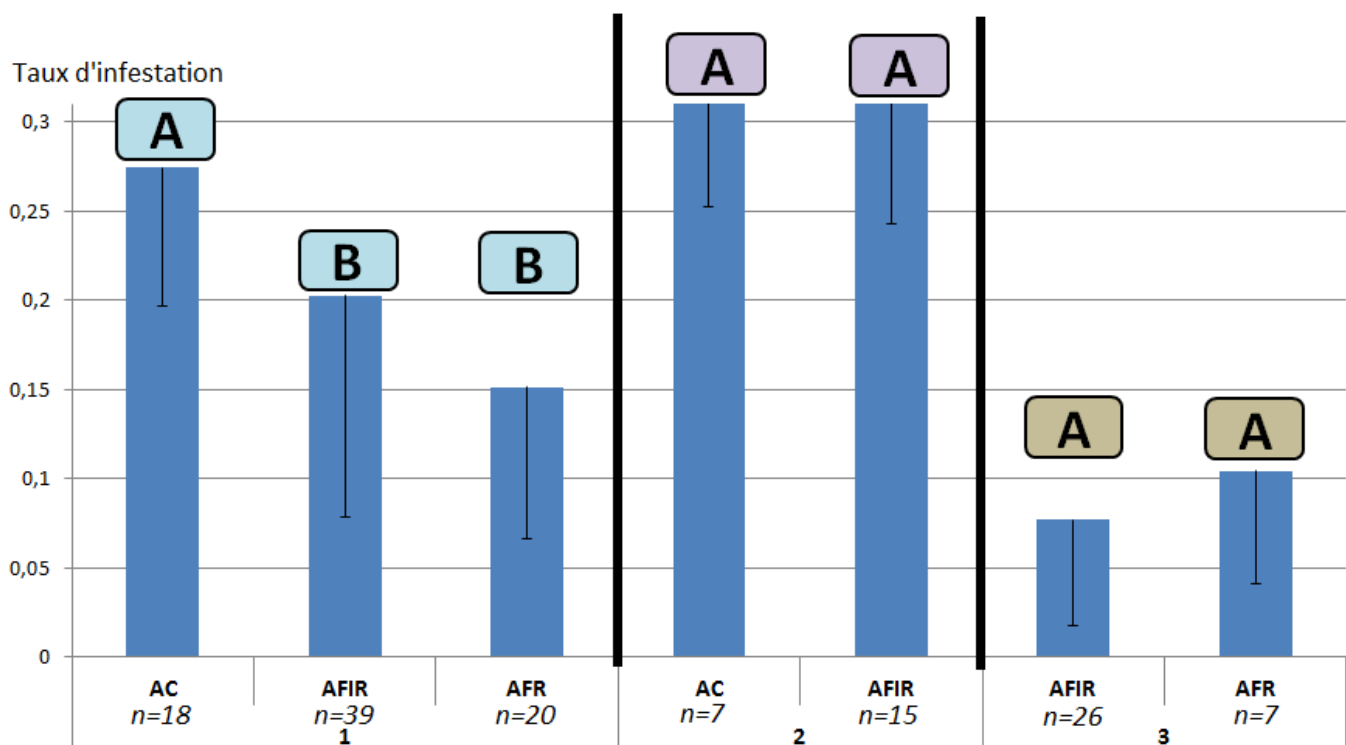


Figure 47 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur bloc, décomposé dans les différentes modalités agroforestières. 147 répétitions, pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$. Les lettres de significativité ne peuvent être comparées que si elles sont de la même couleur.

Le facteur agroforestier influence significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein du bloc n°1 (test non-paramétrique, p-value=0,001189). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives du taux d'infestation

total entre la modalité AC et les modalités AFIR et AFR du bloc n°1 sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 47). Les modalités AFIR du bloc n°2 sont proportionnellement plus infestées que les modalités AFIR du bloc n°1, qui sont plus infestées que celles du bloc n°3.

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein du bloc n°2 (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,5727$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux d'infestation total entre la modalité AC et la modalité AFIR du bloc n°2 n'est mise en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 47).

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement le taux d'infestation total du carpocapse au sein du bloc n°3 (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,1864$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux d'infestation total entre la modalité AFIR et la modalité AFR du bloc n°3 n'est mise en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 47).

C/ Evaluation de la prédation des œufs de carpocapse

➤ Cartes de prédation du 02/05

Ces cartes sont posées le 28/04 et analysées le 02/05 ; ces dates correspondent à la première génération du carpocapse. Le taux de prédation des œufs G1 de carpocapse à l'échelle de la parcelle est de 62,15 %.

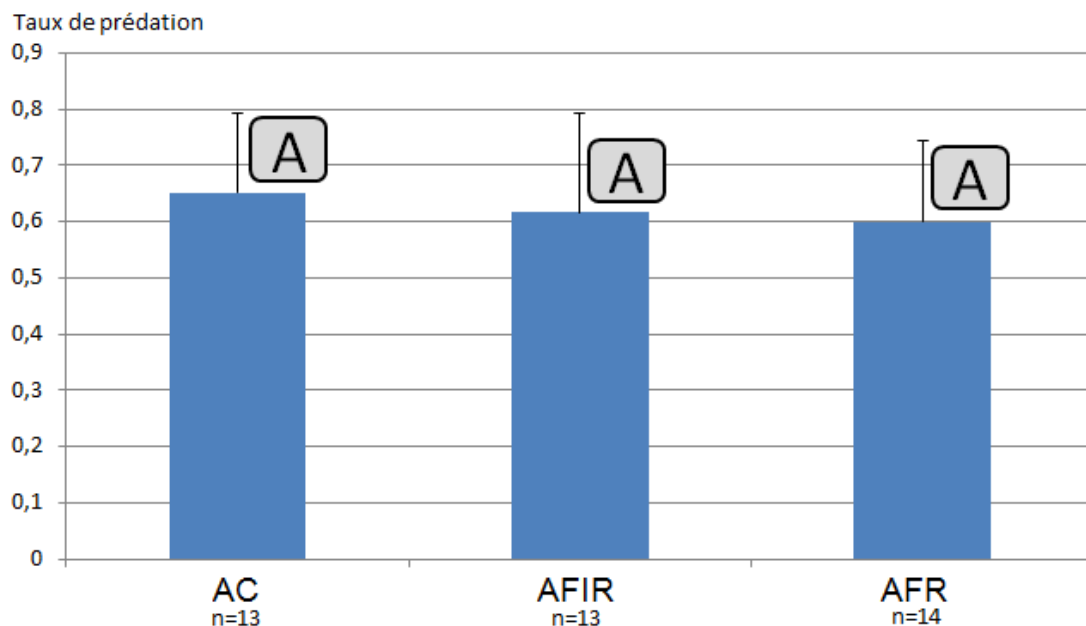


Figure 48 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur agroforestier, entre le 28/04 et le 02/05. *Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.*

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement le taux de prédation des cartes « carpocapse » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,6849$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux de prédation des œufs de carpocapse n'a été mise en évidence entre les modalités du facteur agroforestier au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 48).

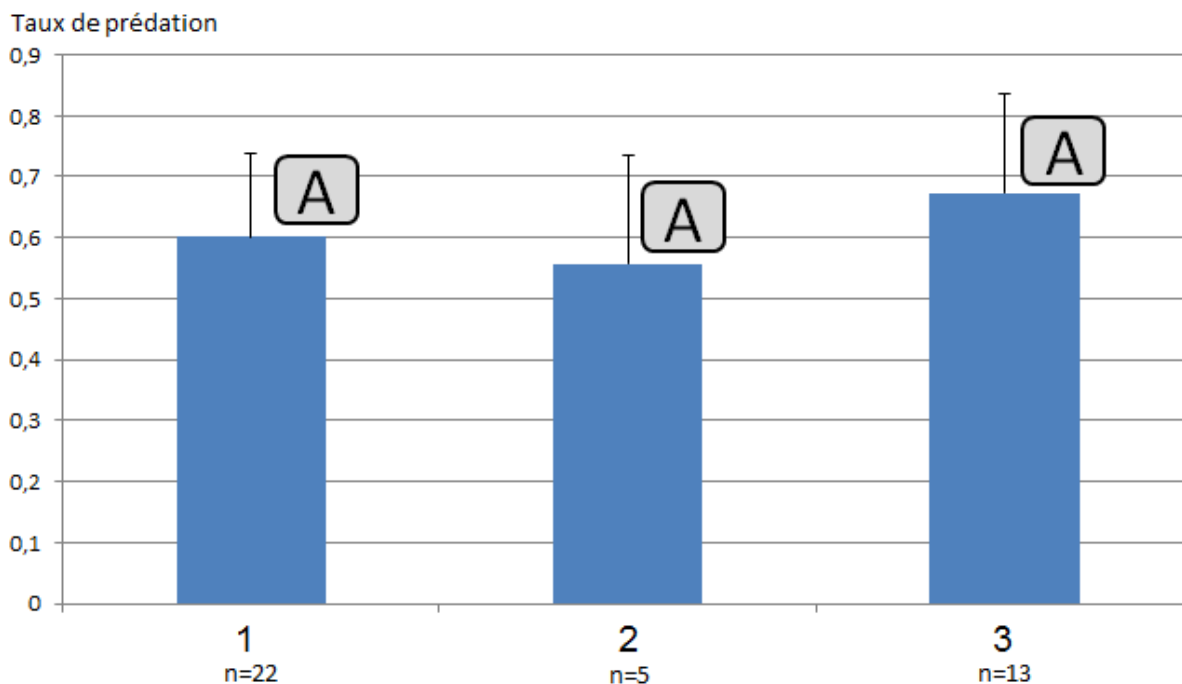


Figure 49 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur bloc, entre le 28/04 et le 02/05. Pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur bloc n'influence pas significativement le taux de prédation des cartes « carpocapse » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,2655$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux de prédation des œufs de carpocapse n'a été mise en évidence entre les blocs au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 49).

➤ Cartes de prédation du 27/07

Ces cartes sont posées le 27/07 et analysées le 31/07 ; ces dates correspondent à la seconde génération du carpocapse. Le taux de prédation des œufs de carpocapse à l'échelle de la parcelle est de 61,75 %.

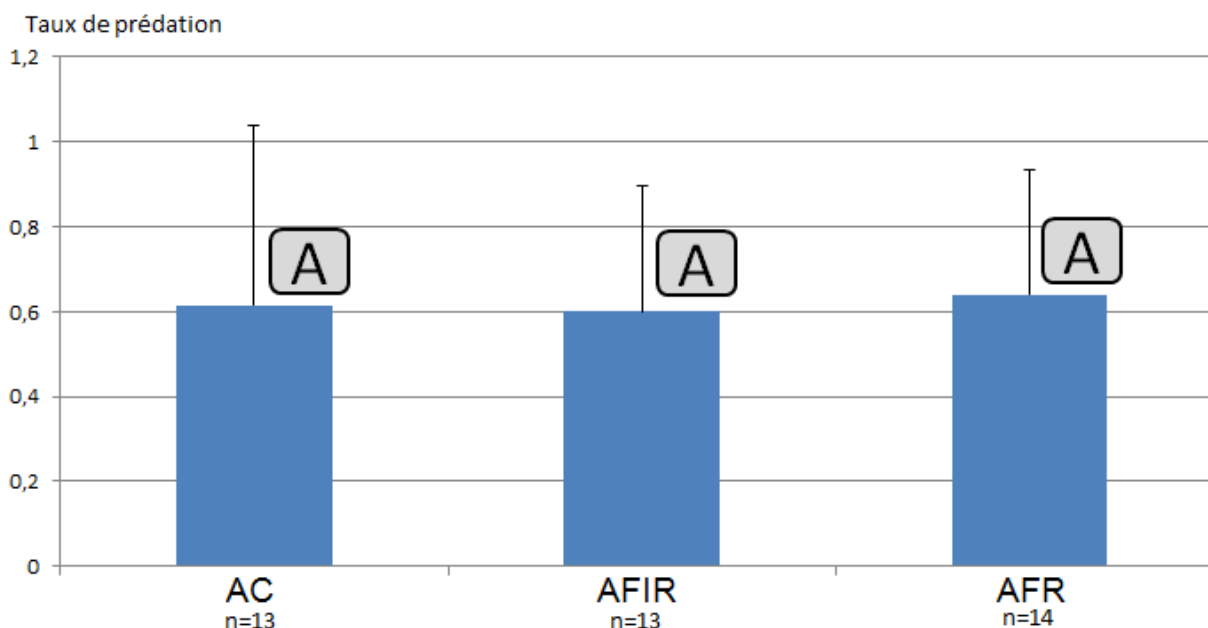


Figure 50 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur agroforestier, entre le 27/07 et le 31/07. *Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.*

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement le taux de prédation des cartes « carpocapse » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,9198$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux de prédation des œufs de carpocapse n'a été mise en évidence entre les modalités du facteur agroforestier au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 50).

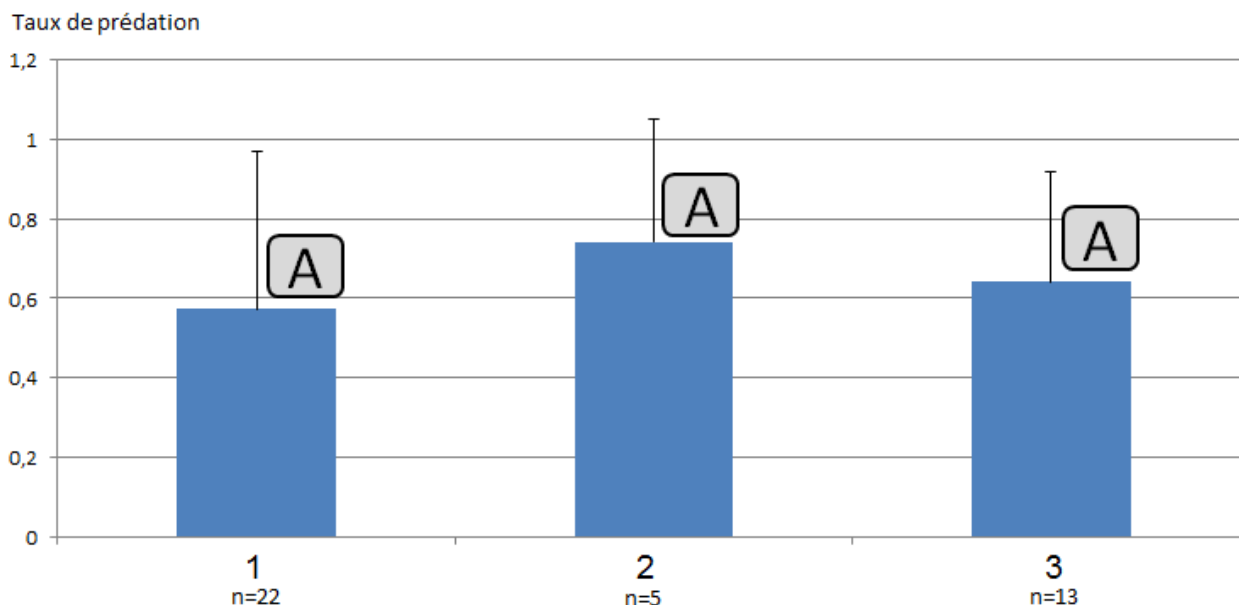


Figure 51 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur bloc, entre le 27/07 et le 31/07. *Pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.*

Le facteur bloc n'influence pas significativement le taux de prédation des cartes « carpocapse » (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0,9123$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative du taux de prédation des œufs de carpocapse n'a été mise en évidence entre les blocs au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 51).

Partie 4 : Le tigre du poirier (*Stephanitis pyri*)

Stephanitis pyri (Hémiptère : Tingidae) (figure 52) est un potentiel ravageur du pommier. Comme le puceron, il se place sur la face inférieure des feuilles pour se nourrir de la sève des arbres. Il provoque une dégradation des feuilles et une perte de pigmentation (figure 52). Lors de la saison 2020, il a été observé à de nombreuses reprises sur les pommiers. Il était relativement abondant lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert, le 24/06. L'incidence du tigre du poirier a été évaluée en parallèle de celle du puceron vert. Le 24/06, la moyenne parcellaire est de 0,82 foyer de tigres du poirier par pommier.



Figure 52 : Tigres du poirier (adultes et juvéniles) observés sur le site GAFAM en 2020.

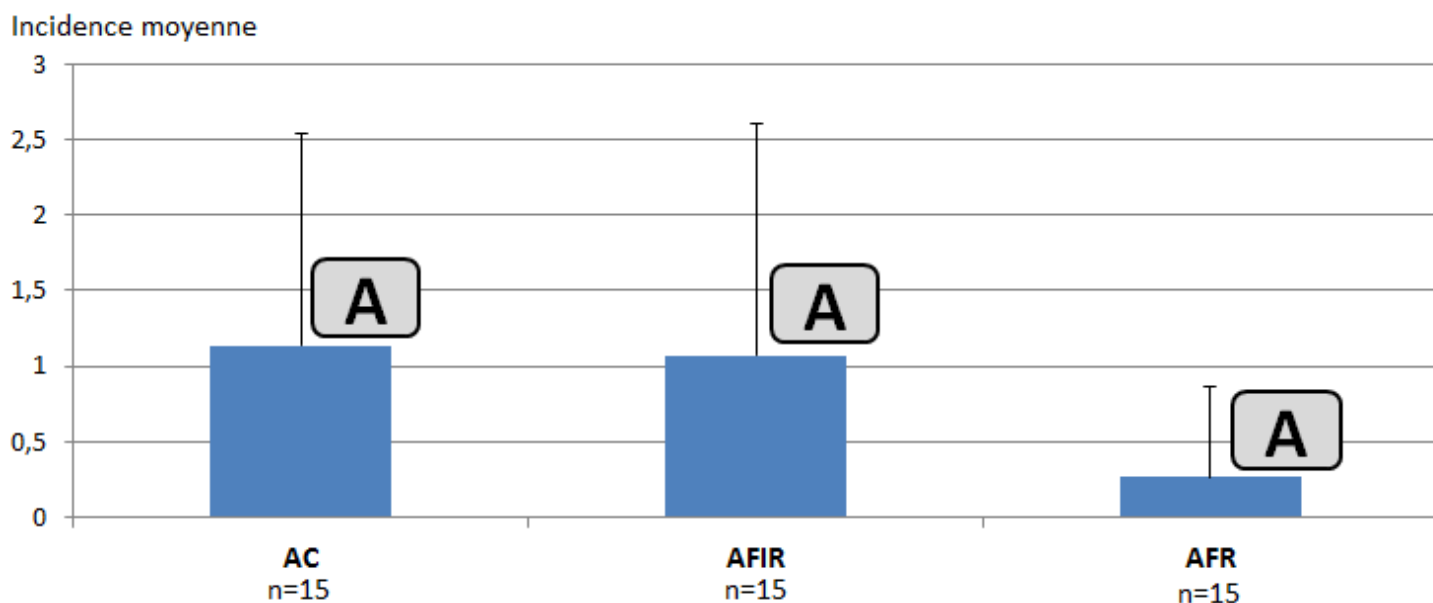


Figure 53 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur agroforestier lors de l'évaluation de l'incidence du tigre du poirier le 24/06/20. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.

Le facteur agroforestier n'influence pas significativement l'incidence du tigre du poirier (test non-paramétrique, p -value=0,06642). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, aucune différence significative de l'incidence du tigre du poirier n'a été mise en évidence entre les différents blocs au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 53). On remarque visuellement que la modalité AFR semble moins touchée que les autres modalités.

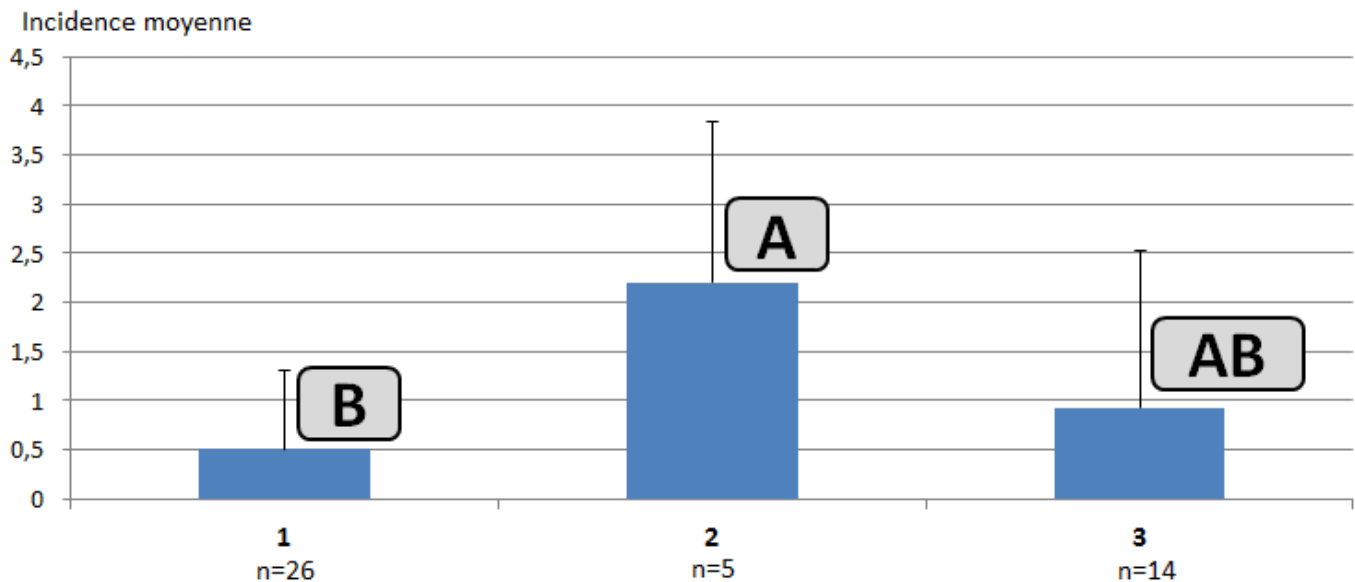


Figure 54 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du tigre du poirier le 24/06/20. *Pas le même nombre de répétitions pour chaque modalité. Lettres de significativité associées à un test de Dunnett, risque $\alpha=5\%$.*

Le facteur bloc influence significativement l'incidence du tigre du poirier (test non-paramétrique, $p\text{-value}=0.04816$). Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020, des différences significatives de l'incidence du tigre du poirier (24/06) entre le bloc n°1 et le bloc n°2 sont mises en évidence au seuil de risque $\alpha=5\%$ (figure 54). L'incidence du bloc n°2 est significativement plus élevée que celle du bloc n°1. L'incidence du bloc n°3 est intermédiaire.

B - Suivi des arthropodes sur le site

Le suivi des arthropodes est permis par l'ensemble des méthodes de pièges/observation. Toutes les méthodes d'échantillonnage n'ont pas fourni des résultats satisfaisants. C'est notamment le cas des pièges colorés qui, durant la majorité du suivi (du 19/06 au 15/07), étaient posés directement sur le sol. Ces pièges ne capturaient pas, ou très peu, d'arthropodes volants ; ils capturaient la faune épigée (annexe n°4). De plus, à cause des fortes températures de l'été, le liquide des coupelles s'évaporait trop rapidement. Ce problème méthodologique est regrettable car les pièges colorés sont la principale méthode pour observer les individus volants imagos. Le suivi des arthropodes est ainsi limité.

L'inventaire des arthropodes identifiés sur le site GAFAM en 2020 est présenté dans l'annexe n°5 (pas d'identifications réalisées au sein des arenae). On observe pour certains taxons d'auxiliaires (coccinellidae, punaises prédatrices) une bonne diversité d'espèces. A l'inverse d'autres taxons d'auxiliaires (carabidae, staphylinidae, névroptère, syrphidae, cecidomyiidae, tachinidae, guêpes parasitoïdes) ont été très peu, voire pas du tout, observés. Cet inventaire permet également de mettre en avant de potentiels ravageurs présents sur le site (tigre du poirier, cicadelle pruineuse, zeuzère du pommier). Enfin, les arthropodes identifiés sont à l'origine d'autres services écosystémiques en plus de la régulation biologique, notamment le service de pollinisation et de recyclage des nutriments.

Les méthodes d'échantillonnage réalisées à l'échelle des pommiers (frappage, pièges carton, observation des foyers) permettent de distinguer les observations faites dans les différentes modalités agroforestières. Ces observations sont présentées dans l'annexe n°6. On remarque que les principaux arthropodes observés sont les diplopodes, les psocoptères, les araignées, les fourmis, les punaises prédatrices et les ravageurs hémiptères. Parmi les arthropodes observés, on observe peu de différence entre les modalités. La seule différence marquante concerne l'ordre polyxenida, de petits myriapodes détritvovores (figure 55). Ces derniers sont largement plus nombreux dans la modalité AFR que dans les autres modalités.



Figure 55 : Photographie de polyxenida sur le site GAFAM, 2020.

Il est également possible de distinguer les observations faites dans les différents blocs (annexe n°7). On constate la même différence importante pour l'ordre polyxenida, dont le nombre est beaucoup plus important dans les blocs n°1 et n°3 que dans le bloc n°2.

Les observations moyennes réalisées dans les pièges Barber, en fonction des différentes IAE du site, sont présentées dans l'annexe n°8. On remarque que les taxons les plus observés dans les pièges Barber sont les fourmis, les blattes et les araignées. On trouve la majorité des fourmis dans les flores spontanées, elles sont également présentes dans les haies mais peu présentes au niveau des pommiers et des bandes fleuries. Les blattes sont davantage présentes dans les haies et les bandes fleuries qu'au niveau des pommiers et des flores spontanées. Enfin, les araignées sont davantage présentes au niveau des pommiers qu'au niveau des autres IAE ; elles sont peu présentes dans la flore spontanée.

Les observations réalisées lors du frappage dans les haies de bordure sont présentées dans l'annexe n°9. On constate que les taxons représentés en abondance sont les diplopodes, les fourmis et les cicadelles.

Enfin, la dynamique du total des observations des différents taxons d'ennemis-naturels est présentée dans l'annexe n°10. Le suivi des arthropodes sur le site d'étude est réalisé sur une échelle temporelle trop courte pour observer une évolution des populations.

C – Suivi des ressources en fleurs

Le graphique prévisionnel des floraisons sur le site d'étude est présenté sur la figure 56. Il est établi à partir du travail d'identification des essences de bordure (Perseval, 2019), et des essences implantées en 2020 (annexe n°2). Attention cependant, chacune des modalités de la figure est pondérée sur un total de 1, ce qui n'est évidemment pas le cas sur le terrain. Toutes les IAE ne présentent pas un intérêt écologique équivalent.

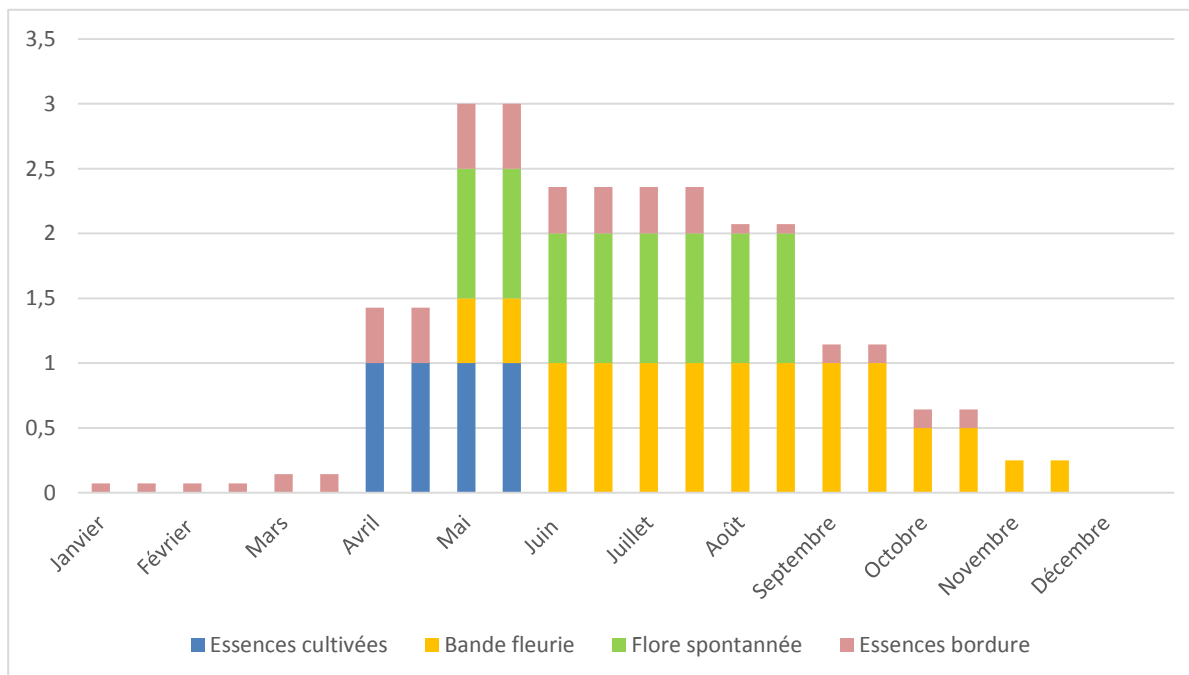


Figure 56 : Floraisons prévisionnelles dans et autour de la parcelle GAFAM, 2020.

L'intérêt de la figure 56 est de pouvoir être comparée aux notations d'espèces végétales en fleurs, présentées dans l'annexe n°11. Si le graphique prévisionnel ne prévoit pas de différences de floraison entre le 19/06 et le 10/07, les notations mettent en avant des différences importantes entre ces deux dates. Il y a nettement plus de ressources en fleurs au 19/06 qu'au 10/07. Précisons qu'une opération de fauche entre les rangs de pommiers a eu lieu entre ces deux dates.

On remarque également une forte disparité des essences implantées dans la bande fleurie. Parmi elles, la phacélie est l'espèce majoritairement présente. L'œillet d'Inde et le souci officinal sont peu présents. L'achillée millefeuille n'a pas été observée en fleurs dans la bande fleurie.

D – Données météorologiques de la saison 2020

La station météorologique la plus proche du site d'étude est celle de Montpellier – Fréjorgues, située à une vingtaine de km de la parcelle GAFAM. Les températures moyennes journalières sont présentées sur la figure 57. On constate que ces températures sont supérieures à la moyenne pendant le mois de mai. On constate également qu'à partir de la fin du mois de juin et jusqu'à la fin du mois d'août les températures moyennes estivales sont élevées (entre 22°C et 29°C). On remarque sur la figure 58 qu'à partir de la deuxième moitié du mois de mai et jusqu'à la fin du mois d'août, les précipitations sont faibles voire nulles. Le climat du site GAFAM est chaud et particulièrement sec pendant l'été 2020.

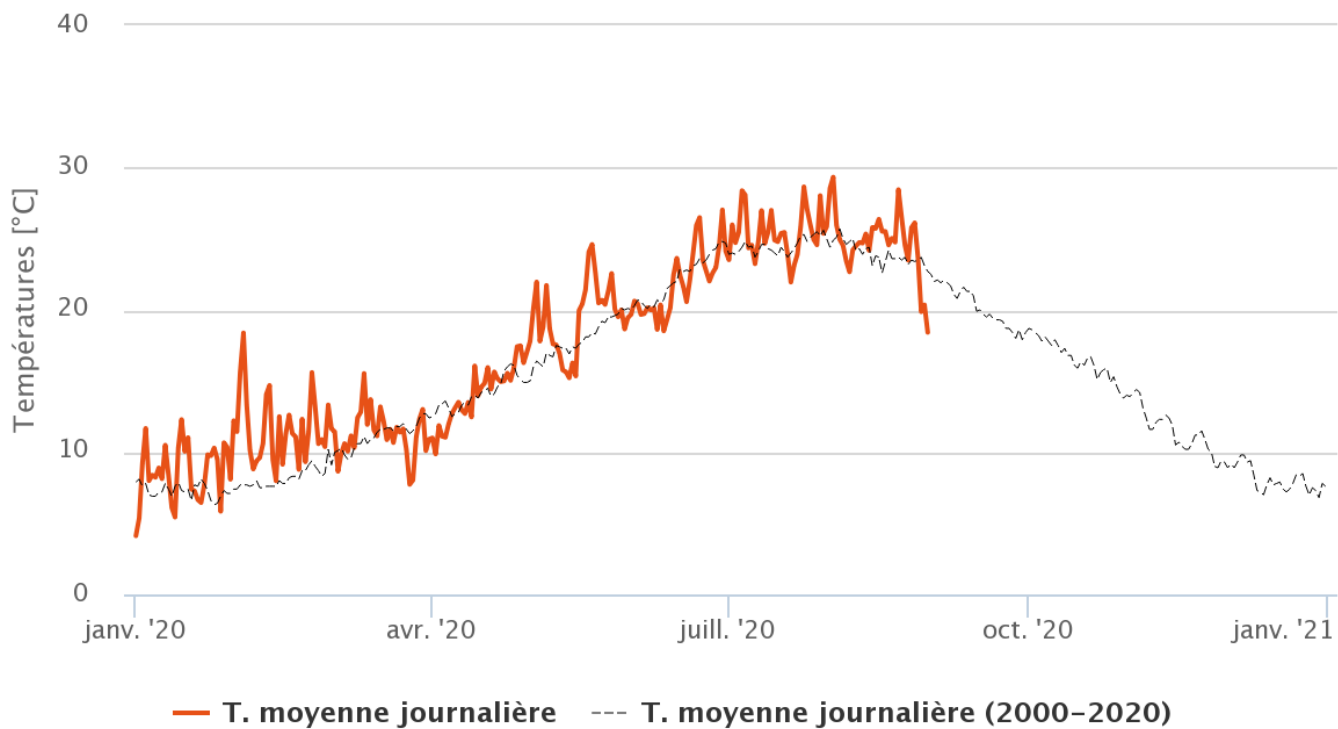


Figure 57 : Températures moyennes journalières (Montpellier – Fréjorgues) en 2020. *Données consultées sur prevision-meteo.ch le 31/08/20.*

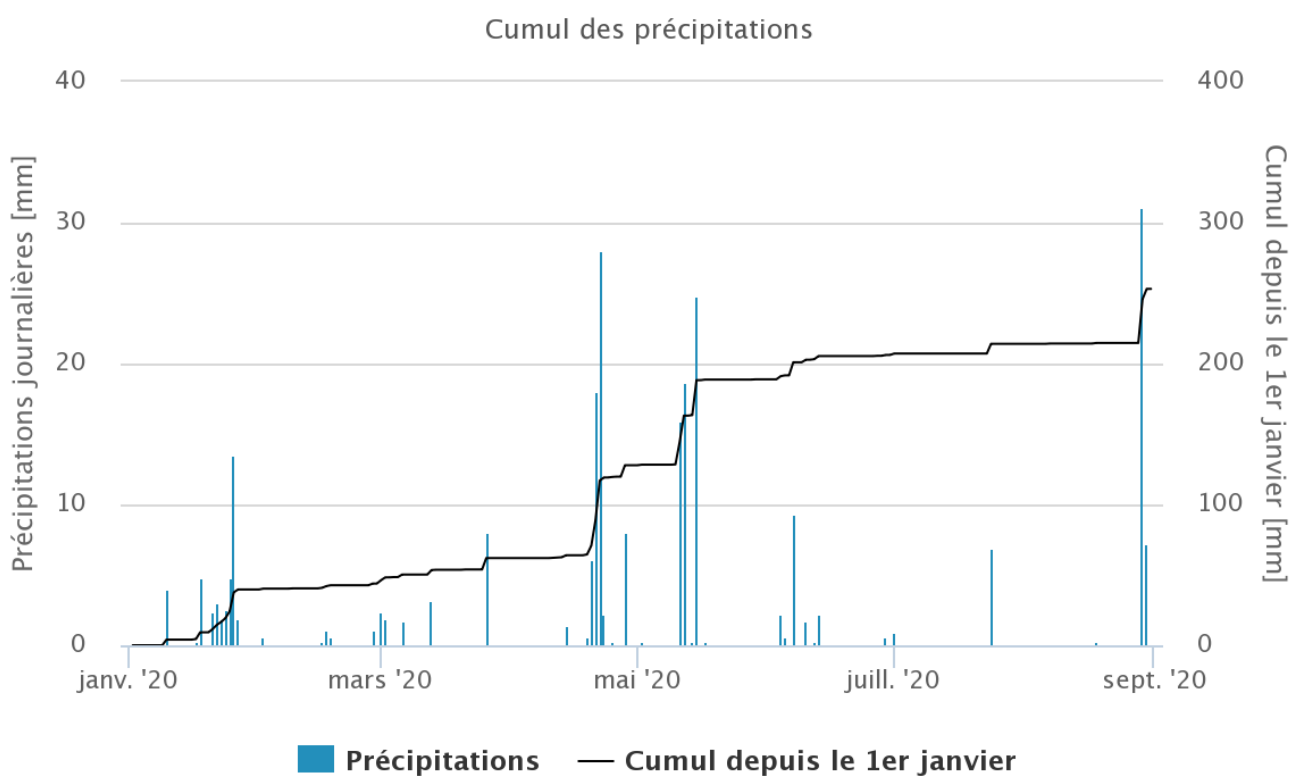


Figure 58 : Précipitations (Montpellier – Fréjorgues) en 2020. *Données consultées sur prevision-meteo.ch le 31/08/20.*

Chapitre 4 - Discussion

A – Les ravageurs

➤ Le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*)

Globalement, le puceron cendré a provoqué peu de symptômes pendant la saison 2020. C'est d'habitude un ravageur très problématique sur le site d'étude. L'évaluation des symptômes n'a pas été réalisée en 2019 et il n'est donc pas possible de comparer les résultats. Cependant, en 2019 un suivi de l'incidence et de la sévérité du puceron cendré avait été conduit. Cette année-là les populations des foyers de pucerons cendrés avaient commencé à décroître après le 23/05 (Perseval, 2019). A la même date en 2020, quasiment tous les foyers de pucerons cendrés étaient déjà éteints.

Nous proposons plusieurs hypothèses pour expliquer les faibles dégâts du puceron cendré sur le site d'étude en 2020. La principale différence sur la parcelle par rapport aux années précédentes est l'implantation de bandes fleuries. Si ces bandes fleuries ont mal supporté la sécheresse estivale, elles étaient cependant riches en fleurs en début de saison, notamment en phacélie (figure 59). La seconde différence est l'arrêt des activités sur le domaine public de Restinclières lors du confinement (du 16 mars au 18 mai 2020). Cet arrêt a limité les perturbations anthropiques sur le site pendant cette période, et notamment empêché une opération de fauche. Lors de la reprise des opérations, la couverture du sol était dense et riche en fleurs (figure 59). Ces conditions ont probablement été favorables aux ennemis-naturels précoces du puceron cendré, comme les syrphes (Albert et al., 2016). L'étude de Perseval (2019) sur le site rapporte que les syrphes représentaient entre 70 et 90 % des ennemis-naturels observés sur ce dernier entre le 15/04 et le 14/05.

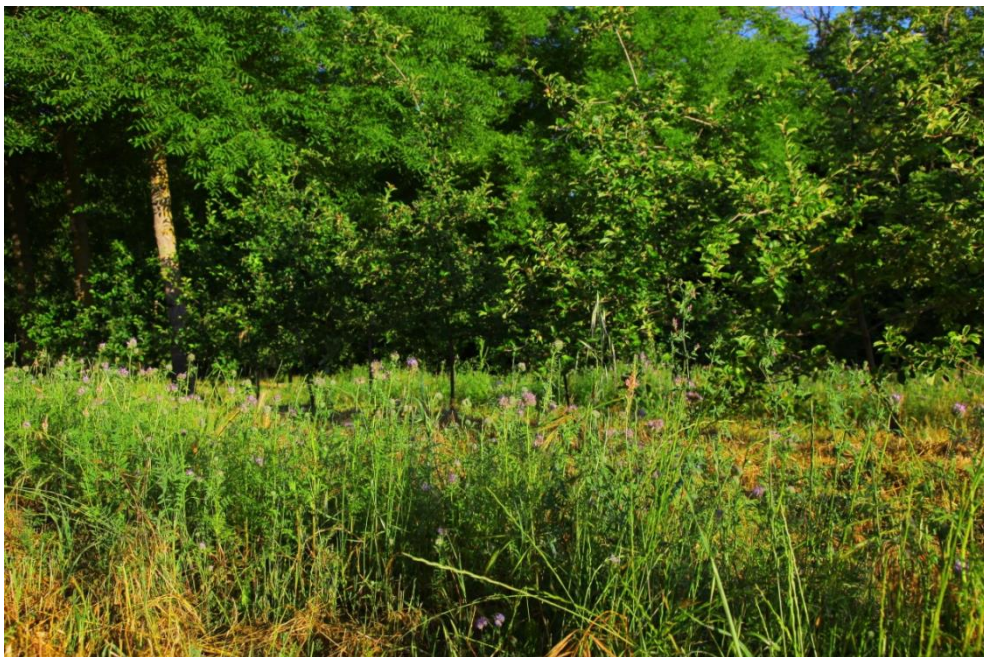


Figure 59 : Photographie de l'inter-rang de pommiers le 26/05 (© Pierre-Eric Lauri).

On observe peu de différence entre les différentes modalités du facteur agroforestier. On constate cependant que le bloc n°2, constitué de pommiers AC et AFIR, est le plus touché, alors que le bloc n°3, constitué de pommiers AFIR et AFR, est le moins touché.

Au-delà d'un éventuel effet parcellaire, on peut supposer que, directement ou indirectement, l'agroforesterie influence de façon négative le puceron cendré. Les hypothèses explicatives sont les suivantes : 1/ Lors de l'apparition du puceron cendré en début de saison, la température est l'un des facteurs limitants pour son développement ; l'agroforesterie limite donc son développement précoce en diminuant la température ambiante (effet direct de l'agroforesterie). 2/ Les ennemis-naturels du puceron cendré sont influencés positivement par l'agroforesterie, et régulent donc davantage sous les noyers (effet indirect de l'agroforesterie). Les mécanismes de ces deux hypothèses agissent sur une échelle spatiale importante, ce qui permettrait d'expliquer que l'on observe principalement des différences à l'échelle des blocs. Toutefois, les données ne sont pas traitées statistiquement et des mécanismes inconnus (comme les interactions avec les fourmis) ont pu se produire sur le site durant l'arrêt des activités. Ainsi nous ne sommes pas en mesure de conclure quant à l'effet de la proximité des noyers sur le développement du puceron cendré (hypothèse n°1).

➤ Le puceron vert (*Aphis pomi*)

D'après les données de l'étude, l'incidence du puceron vert est à son maximum entre le 28/05 et le 10/06. Elle chute fortement (-44,6%) le 17/06, puis décroît progressivement. A partir du 19/07, moins de 10% des rameaux suivis sont infestés. Lors de l'étude de Perseval (2019), l'incidence du puceron vert est à son maximum entre le 16/05 et le 25/05. L'incidence est déjà sous le seuil des 10 % de rameaux suivis infestés le 20/06. Le cycle de développement du puceron vert semble donc plus tardif en 2020 qu'en 2019. Cependant, l'étude de 2020 ne permet pas de connaître l'évolution du puceron vert avant le 28/05.

Des différences significatives de l'incidence du puceron vert sont mises en évidence entre les modalités agroforestières à partir du 24/06. On n'observe pas de différences significatives avant cette date. L'incidence du puceron vert est plus importante dans la modalité AFR que dans les autres modalités. L'étude de Arbab et al. (2006) rapporte que la température optimale pour le développement du puceron vert est de 28°C, et que la mortalité du puceron vert est maximale à partir de 34°C. On remarque (figure 55) qu'à partir de la fin du mois de juin les températures moyennes du site atteignent le maximum de la saison. Le microclimat généré par les noyers est donc susceptible de protéger les pucerons.

On observe une augmentation de la sévérité moyenne à partir du 17/06 jusqu'au 30/06, où elle est à son maximum. La sévérité moyenne du puceron vert est plus importante dans la modalité AFR que dans les autres modalités jusqu'au 07/07, où la sévérité moyenne de la modalité AFIR augmente et rattrape celle de la modalité AFR. On remarque également un effet parcelle ; la sévérité moyenne du bloc n°1 est supérieure à celle des autres blocs. Cet effet peut-être lié à l'environnement, le bloc n°1 étant le plus directement connecté (par la haie face nord-ouest) à l'environnement extra-parcellaire.

La dynamique du nombre total de pucerons verts dans chaque modalité agroforestière nous informe qu'à partir du 17/06 et jusqu'à la fin du suivi (23/07), la population de pucerons verts est beaucoup plus importante dans la modalité AFR que dans les autres modalités.

On observe une diminution progressive de la sévérité moyenne des formes ailées du 28/05 au 10/06 puis une forte augmentation du 17/06 au 07/07. Ces individus ailés peuvent nous renseigner sur le cycle de développement du puceron vert. Jusqu'au 10/06, les individus ailés correspondent à des virginipares ailées qui colonisent de nouveaux foyers (Baker et Turner, 1916). En effet, entre le 10/06 et le 17/06, et suite à la diminution de la sévérité moyenne des formes ailées, on relève une diminution de l'apparition de nouveaux foyers. A partir du 17/06, les individus ailés correspondent aux individus sexués et ailés qui réalisent l'unique reproduction sexuée du cycle biologique et pondent des œufs sur l'hôte (INRA HYPPZ). En effet, ce pic de formes ailées n'entraîne pas d'augmentation du nombre de foyers sur la parcelle ; ces individus ne colonisent pas de nouveaux foyers.

La sévérité moyenne des individus sexués et ailés est beaucoup plus importante dans la modalité AFR que dans les autres modalités. Pour les blocs, cette moyenne est la plus élevée dans le bloc n°3 (AFR et AFIR), intermédiaire dans le bloc n°1 (AFR, AFIR et AC), faible voire nulle dans le bloc n°2 (AFIR et AC). L'agroforesterie semble favoriser l'apparition des formes sexués du puceron vert, ce qui impactera l'infestation de l'année prochaine. En effet, les œufs pondus à la fin de l'été engendreront des fondatrices aptères lors de l'ouverture des bourgeons au printemps (Carroll et Hoyt, 1984). Le même phénomène a eu lieu en 2019 mais il n'a pas été mesuré. Bien que la répartition des formes sexuées ailées devait, a priori, être similaire il n'est pas possible de l'affirmer, d'autant plus que l'étude de 2020 comprend un changement par rapport à 2019 : les bandes fleuries.

L'évolution du nombre moyen de fourmis par foyer est étroitement liée à l'évolution de la disparition des foyers de pucerons verts (figure 60). Ce nombre moyen augmente de manière importante à partir du 17/06. L'augmentation du nombre moyen de fourmis par foyer entraîne une diminution du nombre de disparition de foyers. En effet, on sait que les fourmis protègent les colonies de pucerons de leurs ennemis-naturels (Yao et al. 2000 ; Kaneko 2003). Il est toutefois délicat de distinguer cause et effet ; on peut penser que la disparition des foyers de pucerons concentre les fourmis sur les foyers restants.

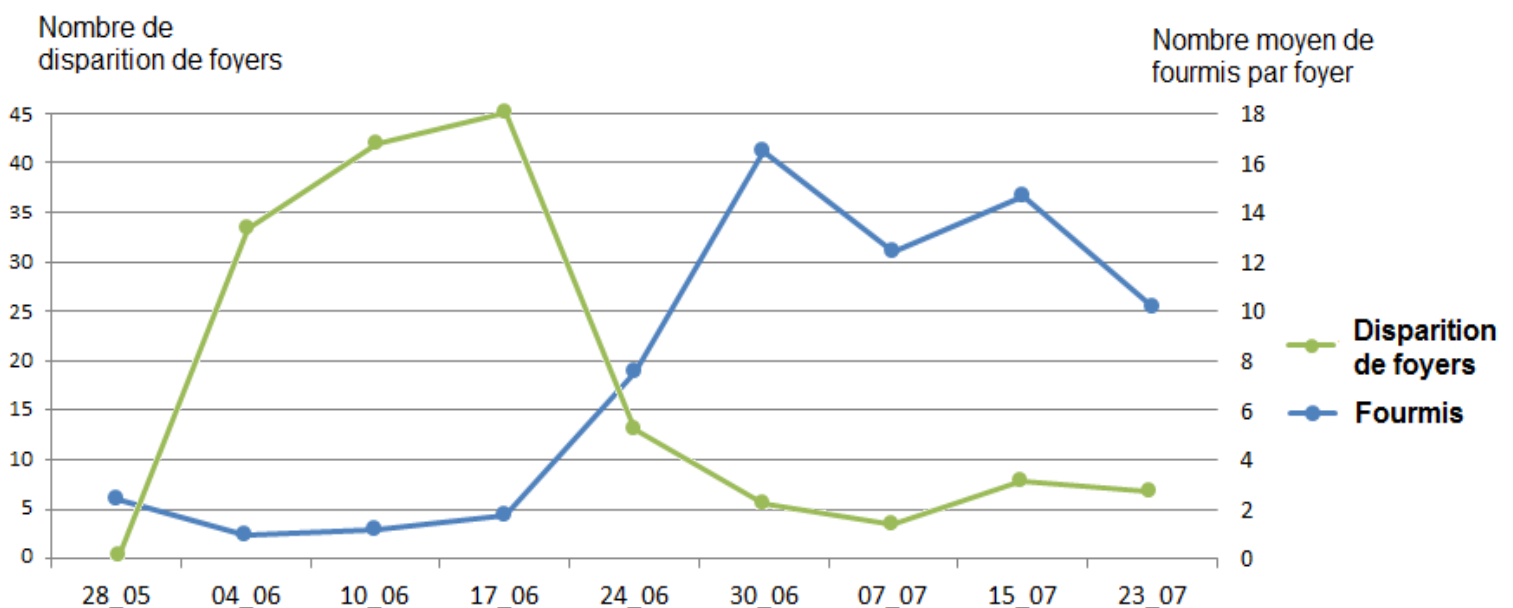


Figure 60 : Représentation graphique du lien entre disparition de foyers et nombre moyen de fourmis par foyer.

Le nombre moyen de fourmis par foyer est beaucoup plus important dans la modalité AFR que dans les autres modalités, jusqu'au 23/07 où le nombre moyen de fourmis par foyer augmente dans la modalité AFIR et rattrape la modalité AFR (même phénomène que pour la sévérité moyenne du puceron vert). Le nombre moyen de fourmis est le plus important dans le bloc n°1, il est faible voire nul dans le bloc n°2 et intermédiaire dans le bloc n°3. On remarque donc un effet parcelle. Cet effet pourrait être lié, comme dans l'étude d'Albert et al. (2016), à la proximité du bloc n°1 avec la haie face nord-ouest de la parcelle.

Il est ainsi possible de préciser notre hypothèse de travail n°1 pour les fourmis. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020 ; la proximité des noyers favorise, directement et/ou indirectement, la présence de fourmis dans les pommiers. Les mécanismes directs peuvent être le microclimat ou la zone refuge induits par les noyers. Les mécanismes indirects peuvent concerner les autres arthropodes en interaction avec les fourmis et notamment les pucerons qui constituent l'une de leurs sources de nourriture. L'effet des fourmis augmente directement la pression du puceron vert sur le site d'étude.

Les fourmis semblent être un facteur important pour comprendre l'évolution du puceron vert dans les différentes modalités des facteurs bloc et agroforestier. Cela pourrait également permettre de comprendre l'augmentation tardive de la sévérité moyenne dans la modalité AFIR. Les résultats indiquent que les fourmis sont influencées positivement par l'agroforesterie, mais principalement dans la modalité AFR. La diminution du nombre de foyers de pucerons (y compris en modalité AFR) pourrait pousser les fourmis à explorer davantage leur environnement, et ainsi à coloniser les foyers de la modalité AFIR quand les ressources se font rares dans la modalité AFR.

La prédation des pucerons est évaluée le 28/04, période de forte présence des fourmis dans les foyers. Le taux de prédation à l'échelle de la parcelle est de 48,3 %, ce qui souligne la présence d'ennemis-naturels du puceron. Il n'y a pas de différences significatives de la prédation du puceron entre les différentes modalités agroforestières. On constate toutefois visuellement que le taux de prédation est un peu supérieur dans la modalité AC ; ce qui pourrait être lié à une densité de fourmis plus faible dans cette modalité. La prédation du puceron est significativement plus élevée dans le bloc n°1 que dans le bloc n°3. Cela ne correspond pas aux densités de fourmis ou à la sévérité moyenne (élevées dans le bloc n°1), mais ce constat pourrait encore une fois être expliqué par la proximité du bloc n°1 de la haie face nord-ouest. On a vu que cette haie pouvait être un corridor pour les fourmis, permettant leur diffusion dans la parcelle. Il pourrait en être de même avec les ennemis-naturels du puceron. On constate également que la prédation des pucerons ne dépend pas, ou peu, de la densité en pucerons d'un bloc. On constate que le taux de prédation du bloc n°2 n'est pas significativement plus faible que celui du bloc n°3, alors que la sévérité moyenne de pucerons verts du bloc n°2 est quasiment nulle. On peut penser que les ennemis-naturels régulent à une échelle spatiale plus large que celle du dispositif.

Tous ces éléments permettent de préciser l'hypothèse de travail n°1 pour le puceron vert. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020 ; la proximité des noyers favorise, directement et/ou indirectement, la présence de pucerons verts dans les pommiers à partir du 24/06. Dans les pommiers les plus proches des noyers, on constate que l'incidence, la sévérité moyenne et la sévérité moyenne des formes ailées du puceron vert sont plus importantes. Les hypothèses explicatives sont les suivantes : 1/ En milieu de saison, les conditions climatiques extrêmes (chaleur et sécheresse) néfastes au

développement du puceron vert sont atténuées par le microclimat induit par les noyers (effet direct). 2/ Les fourmis, qui protègent les foyers de pucerons de leurs ennemis-naturels, sont favorisées (directement et/ou indirectement) par l'agroforesterie (effet indirect). Il est cependant difficile d'observer des symptômes liés au puceron vert, et il n'est donc pas possible de conclure quant aux dégâts de ce dernier. Précisons également que nous ne prenons pas en compte dans cette étude le nombre de rameaux de l'année 2020, susceptible d'influencer l'infestation du puceron vert (car c'est le nombre de foyers potentiels) et qui est lui-même susceptible d'être influencé par la modalité agroforestière (via la compétition exercée par les noyers).

Les résultats concordent, au moins partiellement, avec les études de Josso et al. (2013) et d'Albert et al. (2017). En effet la haie connectée au bloc n°1 influence positivement les ennemis naturels (prédation plus importante) et les ravageurs (plus grande densité de fourmis, densité moyenne de pucerons verts plus importante). Toutefois, l'augmentation de la prédation ne permet pas de maîtriser l'augmentation des ravageurs. Au final, cette haie influence positivement le développement du puceron vert.

➤ Le carpocapse des pommes et des poires (*Cydia pomonella*)

Le nombre de fruits infestés par au moins une larve est influencé par le nombre total de fruits du pommier. La majorité des pommiers AFR possèdent peu de fruits, et sont peu touchés, tandis que la majorité des pommiers AC possèdent beaucoup de fruits, et sont davantage touchés. Le nombre de fruits infestés des pommiers AFIR est beaucoup plus hétérogène. Ces résultats coïncident avec ceux de l'étude de Perseval (2019). Les pommiers AFR possèdent significativement moins d'inflorescences et de fruits que les pommiers AFIR et AC. Cette différence peut s'expliquer par la compétition, aérienne et racinaire, exercée par les noyers.

Figure 61 : Coupe transversale d'un fruit infesté par une larve de carpocapse. GAFAM, 26/06/20.



Le carpocapse a provoqué des dégâts importants à l'échelle de la parcelle. Sur les deux premières générations du carpocapse, 43,63 % des fruits initiaux présentent des dégâts visuels et 20,28 % sont infestés. Il est important de relativiser ces chiffres, puisqu'en 2020, les pommiers ont produit naturellement « trop » de fruits. Cette charge en fruits est réduite naturellement par le pommier (chutes physiologiques) et par l'opération d'éclaircissage (visant à maîtriser la charge en fruits et à réduire les populations de carpocapse pour les prochaines générations). Toutefois, le taux d'infestation de la deuxième génération de carpocapse est similaire à celui de la première génération. Cette deuxième génération est techniquement plus problématique car, se développant après l'opération d'éclaircissage, elle limite le nombre de fruits qui pourront être récoltés à la fin de la saison. Le site d'étude, comme la majorité des vergers en climat méditerranéen, est sujet à une

troisième génération de carpocapse (Trillot et al., 2002), qui a pu être observée dans la première quinzaine d'août mais qui n'a pas pu être évaluée. Enfin, toutes les larves observées (en G1 et G2) ont été retirées de l'expérimentation et détruites, ce qui a évidemment influencé le développement des générations suivantes. Sans ces interventions, le taux d'infestation de la G2 et de la G3 aurait été plus élevé.

Il faut également considérer que, contrairement aux vergers de producteurs, l'expérimentation ne mobilise pas les méthodes « classiques » de lutte respectueuse de l'environnement, comme les filets « anti-carpo » ou la confusion sexuelle par phéromone.

Le taux d'infestation des pommiers AC est significativement plus élevé que le taux d'infestation des pommiers AFIR et AFR pour la G1 comme pour la G2. L'étude de la G2 permet également de mettre en avant des différences significatives entre les pommiers AFIR et les pommiers AFR. Le taux d'infestation des pommiers du bloc n°2 est significativement plus élevé que celui des pommiers du bloc n°1, lui-même significativement plus élevé que celui des pommiers du bloc n°3. Les résultats de l'étude des deux facteurs concordent ; on peut toutefois noter que les p-values de l'analyse en fonction du facteur bloc sont plus significatives que celles en fonction du facteur agroforestier. Cela laisse supposer que le facteur bloc est plus explicatif des différences que le facteur agroforestier.

Cela correspond bien à l'étude de la variabilité du taux d'infestation à l'intérieur de chaque bloc. En effet on n'observe pas de différences significatives du taux d'infestation des différentes modalités agroforestières à l'intérieur du bloc n°2 et du bloc n°3. A l'intérieur du bloc n°1 (le plus grand des blocs), les pommiers AC sont significativement plus touchés que les pommiers AFIR et AFR. L'infestation des pommiers est plutôt homogène au sein de chaque bloc.

L'étude de la variabilité du taux d'infestation à l'intérieur de chaque modalité ne révèle pas de différences significatives entre les différents blocs pour les modalités AC et AFR. A l'intérieur de la modalité AFIR, les pommiers du bloc n°2 sont significativement plus touchés que les pommiers du bloc n°1, eux même significativement plus touchés que les pommiers du bloc n°3. La modalité AFIR est la modalité la plus influencée par la composition du bloc et par les modalités des pommiers voisins.

Ces résultats sont cohérents entre eux, et on ne décèle pas d'effet parcelle. L'absence d'effet parcelle peut être liée directement au carpocapse, qui possède une capacité de dispersion très importante.

Le taux de prédation des œufs de carpocapse est mesuré pour la première et la deuxième génération grâce aux « cartes de prédation ». Il est important et constant pour les deux générations (environ 62%) et homogène sur l'ensemble de la parcelle : on ne note pas de différence de prédation des œufs en fonction des facteurs agroforestier ou bloc. On pourrait s'attendre à ce que ce taux de prédation soit plus important dans les blocs ou les modalités les plus touchés mais ce n'est pas le cas. De plus, contrairement à la prédation du puceron vert, la prédation des œufs de carpocapse n'est pas plus importante dans le bloc n°1, connecté à l'environnement extra-parcellaire. Cela laisse sous-entendre que, soit les prédateurs naturels possèdent une capacité de dispersion importante, soit ils sont présents sur l'ensemble de la parcelle et se nourrissent d'une diversité de proies. Les prédateurs naturels des œufs de carpocapses sont mal connus et il y a très peu de littérature à ce sujet. Il est probable que ce soit des prédateurs des œufs de nombreuses espèces.

Tous ces éléments permettent de préciser l'hypothèse de travail n°1 pour le carpocapse des pommes et des poires. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020 ; la proximité des noyers défavorise, directement et/ou indirectement, la présence du carpocapse (stade larvaire) dans les pommiers, réduisant ses dégâts. Les hypothèses explicatives sont les suivantes : 1/ Les noyers limitent la mobilité des carpocapses et leur capacité à explorer l'environnement par l'intermédiaire d'un effet barrière (effet direct). 2/ La proximité des noyers entraîne une compétition qui limite le nombre de fruits du pommier, réduisant son attractivité pour le carpocapse (effet indirect). 3/ L'agroforesterie influence positivement les auxiliaires qui régulent le carpocapse (au stade larvaire et/ou imagal), résultant en une meilleure régulation biologique du carpocapse à proximité des noyers (effet indirect).

Pour cette dernière hypothèse, il est important de considérer que tous les auxiliaires de régulation ne sont pas des arthropodes. D'autres animaux participent à la régulation des insectes comme les hérissons, les musaraignes, divers reptiles ou les oiseaux (Boyer et al., 2017). Les chiroptères sont également des prédateurs importants des papillons nocturnes comme le carpocapse. Cet ordre est particulièrement abondant et diversifié en climat méditerranéen (Jay et Ricard, 2018). Une étude menée par Michel Jay (2020) sur le site d'étude a mis en évidence la présence d'au moins 11 espèces de chiroptères pendant la saison 2019. Cette même étude a également montré une activité plus importante des chiroptères dans la partie sud que dans la partie nord de la parcelle. Cette différence serait liée à la disponibilité en ressources (plus d'insectes au niveau des rivières) et à l'agencement spatial du complexe « ripisylves + agroforesterie », particulièrement favorable aux espèces typiques des lisières comme les pipistrelles qui apprécient les couloirs de chasse (Jay, 2020). L'abondance et la forte activité des chiroptères dans la partie sud de la parcelle est l'un des facteurs permettant d'expliquer que le bloc n°3 soit moins infesté que les blocs n°1 et 2 situés au nord de la parcelle. On peut également supposer que la faible prédation du puceron vert observé dans le bloc n°3 soit liée à la prédation des ennemis-naturels volants du puceron par les chiroptères dans ce bloc.

➤ Le tigre du poirier (*Stephanitis pyri*)

Ce n'est pas la première année que le tigre du poirier est observé sur le site d'étude. Ce n'est cependant pas un ravageur important par rapport aux pucerons. On n'observe pas de différence significative d'incidence entre les différentes modalités agroforestières, bien que les pommiers AFR semblent moins touchés. On constate toutefois que l'incidence du tigre du poirier est significativement plus élevée dans le bloc n°2 que dans le bloc n°1.

Il est ainsi possible de préciser l'hypothèse de travail n°1 pour le tigre du poirier. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020 ; la proximité des noyers défavorise, directement et/ou indirectement, la présence de tigres du poirier dans les pommiers. Les hypothèses explicatives sont les suivantes : 1/ Le puceron vert, favorisé directement et/ou indirectement par l'agroforesterie, exerce une pression de compétition sur le tigre du poirier (effet indirect). En effet, on remarque que l'incidence du tigre du poirier est inversement proportionnelle à celle du puceron vert (figure 62). De plus, le tigre du poirier n'est pas connu pour être une espèce myrmécophile. Il est même possible qu'il soit prédaté par les fourmis. 2/ Pendant au moins une partie de la saison, le développement du tigre du poirier est favorisé par des températures élevées, alors que l'agroforesterie diminue la température ambiante (effet direct).

En effet, une étude de Aysal et Kivan (2008) a montré que la température optimale de développement du tigre du poirier est de 26°C. Même si aucune évaluation du tigre du poirier n'a été réalisée après le 24/06, il est probable qu'il soit impacté négativement par les températures extrêmes de l'été (de la même manière que le puceron vert) et donc qu'il soit impacté positivement par l'agroforesterie à partir de l'été.

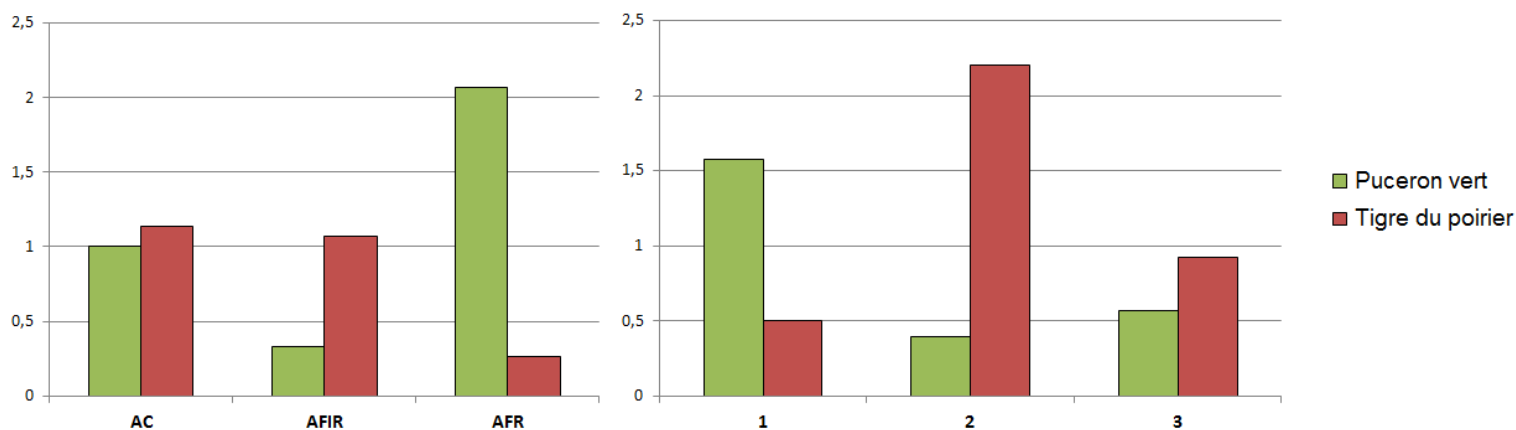


Figure 62 : Incidence du puceron vert et du tigre du poirier en fonction du facteur agroforestier (à gauche) et du facteur bloc (à droite) le 24/06/20.

B – Suivi des autres arthropodes

Le suivi des arthropodes non-ravageurs présente plusieurs faiblesses qui compliquent l'interprétation des résultats. Les résultats obtenus sont largement influencés par les méthodes d'échantillonnage. La méthodologie mobilisée pour les pièges colorés ne permet pas d'interpréter les résultats. De plus, l'arrêt des activités de l'année 2020 a restreint la durée du suivi. Ainsi, plusieurs taxons d'auxiliaires n'ont pas, ou peu, été observés en 2020 comme les syrphes ou les cécidomyies, alors que ces taxons avaient été observés en 2019 sur le site (Perseval, 2019). La dynamique des taxons est réalisée sur une durée trop courte pour observer une réelle évolution des populations. Les facteurs bloc et agroforestier ne semblent pas influencer les arthropodes non-ravageurs présents dans les pommiers, à l'exception de l'ordre polyxenida.

Il est ainsi possible préciser l'hypothèse de travail n°1 pour l'ordre polyxenida. Dans les conditions expérimentales du site GAFAM en 2020 ; la proximité des noyers influence, directement et/ou indirectement, positivement la présence de polyxenida dans les pommiers. Ces arthropodes de très petite taille (maximum 7mm) se nourriraient des champignons présents sur la surface des feuilles, cependant aucune littérature scientifique n'a été trouvée sur ce sujet. Leur capacité de dispersion est extrêmement faible ; notre hypothèse est que le polyxenida colonise les pommiers en tombant des branches des noyers.

Il est intéressant de noter que le seul arthropode non-ravageur dont la présence sur les pommiers est influencée par la modalité agroforestière est le plus petit, avec la plus faible capacité de dispersion. Cela laisse penser que l'échelle d'étude (et notamment la distance entre les différents blocs et/ou les différentes modalités) est trop faible sur le site pour observer des différences liées aux modalités agroforestières.

La seule méthode d'échantillonnage réalisée dans toutes les IAE du site est le piège Barber, qui ne permet pas d'observer les arthropodes volants. De plus, compte tenu de la proximité des pièges sur le site et de la capacité de dispersion des arthropodes évalués, il est délicat d'établir un lien de causalité entre une IAE et l'abondance d'un taxon. Le dispositif expérimental ne permet pas de répondre à l'hypothèse de travail n°2 (page n°26).

C – Ressources en fleurs

Le suivi des espèces en fleurs sur le site n'a pas pu être réalisé sur l'ensemble de la saison comme il était initialement prévu. Les notations réalisées pendant l'été révèlent que les ressources en fleurs chutent drastiquement à partir du mois de juillet. Cela peut s'expliquer par les températures importantes et surtout par les très faibles précipitations de l'été 2020.

La bande fleurie, semée au printemps, a apporté beaucoup de ressources aux pollinisateurs jusqu'à la mi-juillet, période à laquelle elle a été détruite par la sécheresse. Toutes les essences semées dans la bande fleurie ne se sont pas développées de la même manière ; la phacélie étant l'essence prédominante. Ces disparités peuvent s'expliquer par les densités de semis et par les conditions météorologiques du printemps, relativement sèches jusqu'à la fin du mois d'avril. Il serait judicieux d'implanter la bande fleurie à l'automne pour limiter le stress hydrique et pour faire en sorte qu'elle puisse bien se développer.

D – Limites de l'étude

➤ Arrêt des activités

Suite à la crise sanitaire du printemps 2020, l'accès au domaine de Restinclières (et donc au site d'étude) a été interdit pendant la période de confinement. Le travail présentiel a ainsi été interrompu du 16 mars au 18 mai, et aucun relevé n'a pu être réalisé sur le terrain. Comme nous l'avons vu précédemment, cela a impacté la qualité de l'étude puisque des stades clefs du développement de certains arthropodes (notamment le puceron cendré et ses ennemis-naturels) n'ont pas pu être évalués. Cela a également restreint le suivi dynamique des populations d'arthropodes, le rendant peu exploitable. Ce manque de données concerne uniquement le début de la saison, mais comme nous l'avons noté précédemment c'est une période très importante (Latham et Mills, 2010). En effet le développement précoce des ravageurs et de leurs ennemis-naturels va fortement influencer les mécanismes de régulation du reste de la saison.

➤ Dispositif expérimental

L'analyse à deux facteurs (agroforestier et bloc) proposée dans cette étude semble pertinente, car elle permet d'évaluer l'impact de l'agroforesterie à différentes échelles d'étude. Elle permet également de mettre en avant des effets de l'environnement parcellaire. Globalement, la vérification des résultats à ces deux échelles d'étude permet d'être davantage certain de nos conclusions.

Comme nous l'avons vu dans les résultats, le facteur bloc semble être plus explicatif de certaines mesures que le facteur agroforestier. Cela laisse penser que l'échelle d'étude du facteur agroforestier est effectivement trop petite par rapport aux mécanismes de régulation.

Le dispositif possède toutefois plusieurs faiblesses. Il n'est pas possible de travailler à une échelle d'étude supérieure à celle du facteur bloc, ce qui serait intéressant pour nuancer nos résultats. Tous les blocs ne font pas la même taille, le plan expérimental est donc déséquilibré, ce qui est susceptible d'influencer les résultats. Pour les suivis sur 45 pommiers, le bloc n°2 n'est représenté que par 5 pommiers. Ainsi nous recommandons de réaliser un maximum des suivis (notamment l'incidence des pucerons) sur les 147 pommiers du site. Si cela pose des problèmes de représentativité des pommiers suivis, c'est également un biais qui influence les mécanismes du bloc. En effet les mécanismes écologiques des blocs sont influencés par le nombre de pommiers du bloc. Par exemple, le bloc n°1, composé de plus de la moitié des pommiers du site, est davantage attractif pour les ravageurs puisqu'il offre davantage de ressources. Cela impacte ensuite les ennemis-naturels qui trouvent davantage de ressources (de proies) dans ce bloc. Cet effet (auto-influence du dispositif) n'est pas évalué dans cette étude.

D'une manière générale, de très nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer, directement et/ou surtout indirectement, les mécanismes évalués dans l'étude. Tous ces facteurs (pratiques culturales, environnement extra-parcellaire, structure et composition du paysage) ne sont pas évalués, certains ne sont probablement pas encore connus, et ils n'agissent pas sur la même échelle spatio-temporelle. En effet, nous avons constaté dans cette discussion que la majorité des hypothèses explicatives résultent d'effets indirects des facteurs bloc et agroforestier ; cela traduit la complexité de comprendre et d'évaluer l'ensemble des mécanismes écologiques réalisés sur le site d'étude. Comme le souligne Jaloux (2011), les mécanismes impliqués dans la régulation biologique sont multiples et il est souvent difficile de déterminer la part de chacun dans la réduction des populations de ravageurs. De plus, le service écosystémique de régulation biologique dépend directement d'organismes mobiles dont la gestion doit être raisonnée à l'échelle du paysage (Power, 2010). La matrice paysagère est ainsi susceptible d'influencer les mécanismes évalués à l'échelle parcellaire et de brouiller l'interprétation des résultats (Pelosi et al., 2010).

Enfin, Duru et al. (2015) mentionnent une période de transition entre la mise en place de pratiques et/ou d'aménagements et l'atteinte d'un nouvel équilibre écologique, donc d'une stabilité des services écosystémiques (figure 63). Certaines IAE du site sont très récentes (bande fleurie, flore spontanée) et même les pommiers sont relativement jeunes. Ainsi il est probable que les résultats de l'étude ne correspondent pas encore à un équilibre écologique.

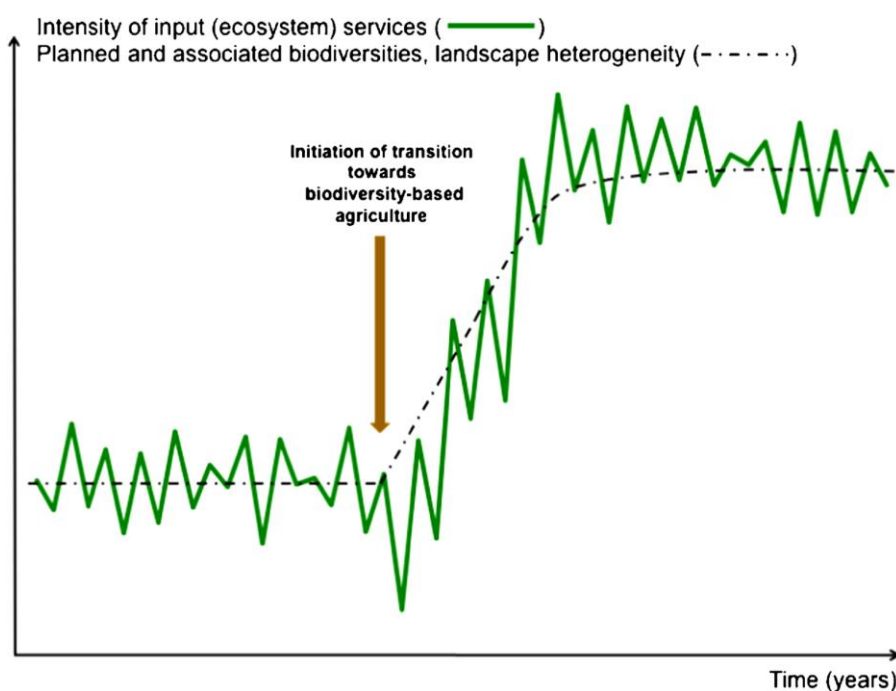


Figure 63 : Evolution des services écosystémiques suite à la mise en place de pratiques agroécologiques (Duru et al., 2015).

➤ Identifications entomologiques

L'identification des arthropodes est réalisée directement sur la parcelle, sans prélèvements. Elle est réalisée en autonomie, le risque d'erreur n'est pas nul. En fonction de la difficulté, l'identification est plus ou moins précise afin de limiter ce risque d'erreur. Pour certains taxons (comme les carabes, les acariens, les araignées ou les apocrites), on ne cherche pas à préciser l'identification au-delà du taxon.

Il est envisageable que l'identification du puceron vert *Aphis pomi* soit confondue avec une espèce de la même famille *Aphis spiraecola*. Les deux espèces sont semblables morphologiquement et des outils moléculaires sont nécessaires pour les distinguer (Naaum et al., 2012). Ces espèces provoquent les mêmes dégâts et s'attaquent aux pommiers, en revanche *A.spiraecola* peut s'attaquer à différentes espèces contrairement à *A.pomi*. Les deux espèces sont myrmécophiles (Miñarro et al., 2010).

E – Perspectives

Afin d'améliorer le contrôle des ravageurs sur le site GAFAM, de nouveaux leviers de lutte vont être mis en œuvre afin de combiner leurs effets pour tenter de maîtriser efficacement les ravageurs (Ephytia, 2016).

La première nouveauté est l'implantation de romarin sur la parcelle. Le romarin présente un effet répulsif et anti-appétant pour certaines espèces de puceron comme le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) (Castillo et al., 2009 ; Ben Issa, 2014). Des jeunes plants de romarin ont été plantés le 16/06/20 au pied des pommiers. Il faudra toutefois attendre plusieurs années avant que leur effet soit perceptible.

La seconde nouveauté concerne une stratégie de lutte biologique par introduction-acclimation mise en œuvre à l'échelle nationale pour lutter contre le carpocapse : le projet *Mastrus ridens* (Hyménoptère : Ichneumonidae). *M. ridens* est un parasitoïde spécialiste des larves du carpocapse (*C. pomonella*) utilisé notamment pour la lutte biologique en verger de pommiers (Mills, 2005 ; Tortosa et al., 2014). Cette introduction est réalisée grâce à l'aide du CTIFL à l'automne 2020. Cela va certainement modifier les interactions écologiques du site. Pour l'étude de 2021, il serait intéressant d'évaluer la colonisation du milieu par *M. ridens* et son impact sur le carpocapse.

Il serait également intéressant de reconsidérer la composition de la bande fleurie. On pourrait envisager l'introduction d'espèce à floraison très précoce comme des Apiacées (aneth) et des Astéracées (matricaire, marguerite) (Villenave-Chasset et Leblond, 2019) pour favoriser les ennemis-naturels en début de saison. On peut également imaginer l'introduction de plantes réservoirs (de pucerons), mais cela semble peu pertinent sur le site. En effet, le puceron cendré est déjà particulièrement précoce et il n'y a pas de période creuse (en proies, i.e. pucerons) entre le puceron cendré et le puceron vert.

Conclusion

L'étude des facteurs « bloc » et « agroforestier » a permis de mettre en évidence des différences significatives de l'abondance de certains arthropodes entre les différentes modalités. Il a ainsi été possible d'évaluer l'effet d'une des IAE du site GAFAM (l'agroforesterie) sur les mécanismes de régulation biologique du puceron vert (*A.pomi*) et du carpocapse (*C. pomonella*). Il n'est cependant pas possible d'évaluer l'effet des autres IAE avec ce dispositif expérimental. L'effet de l'agroforesterie sur le puceron cendré (*D. plantaginea*) n'a pas pu être évalué dans l'étude.

Hypothèse n°1 : La proximité de noyers influence, directement et/ou indirectement, positivement les fourmis, le puceron vert et l'ordre polyxenida dans les pommiers. Cette même proximité influence, directement et/ou indirectement, négativement le carpocapse.

Hypothèse n°2 : Il n'est pas possible de savoir si les différentes IAE du site hébergent des communautés d'arthropodes spécifiques, notamment à cause de l'homogénéité de ces IAE et de l'échelle spatiale du site d'étude.

Globalement, l'étude est limitée par sa dimension spatiale. Les mécanismes et les interactions écologiques s'opèrent à une échelle spatiale trop grande par rapport au site d'étude. Ainsi de nombreux mécanismes susceptibles d'influencer les résultats de l'étude n'ont pas pu être considérés, d'autant plus que ces mécanismes sont encore peu renseignés.

L'environnement intra-parcellaire (organisation et composition des IAE) et la matrice paysagère permettent la présence d'une diversité d'arthropodes au sein du verger étudié. Ces arthropodes assurent le service de régulation biologique mais également les services de pollinisation et de recyclage des nutriments. L'environnement est également favorable à des ennemis-naturels non-arthropodes comme les oiseaux, les reptiles et surtout les chiroptères.

Comme dans de nombreuses études, il est toutefois délicat de quantifier l'impact des différents ennemis-naturels sur les ravageurs. C'est d'autant plus le cas dans cette étude qui ne possède pas de réel témoin. Il est encore plus délicat de quantifier l'impact des IAE sur les ennemis-naturels, compte tenu de la diversité d'IAE sur le site d'étude. Ces IAE sont susceptibles d'influencer les résultats, comme les haies qui semblent favoriser la dispersion des fourmis sur la parcelle.

Globalement, l'ensemble des IAE du site améliore le contrôle du carpocapse (ravageur majeur sur le site), mais altère le contrôle du puceron vert (ravageur mineur sur le site). Il est toutefois nécessaire d'évaluer l'impact des IAE sur le puceron cendré pour généraliser sur l'ensemble des ravageurs du site.

Les résultats de l'étude doivent être nuancés au regard du dispositif expérimental de l'étude. Les conclusions de l'étude ne peuvent être généralisées qu'avec une grande précaution. Les mécanismes écologiques évalués ici sont spécifiques au contexte de l'étude (culture en place, variété, IAE, itinéraire technique, contexte-pédoclimatique, matrice paysagère, arrangement parcellaire, etc).

Bibliographie

- Agrawal A.A., Lau J.A., Hamback P.A. (2006) Community heterogeneity and the evolution of interactions between plants and insect herbivores. *Quarterly Review of Biology*. 2006; 81(4):349-76.
- Albert L., Gilles Y., Plantegenest M., Franck P. (2016) Régulation naturelle du puceron cendré en verger cidricole: rôle des aménagements fleuris. *Cahier technique de l'IFPC - Pomme à cidre - Juin 2016 - n°41*.
- 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), 2017, 528–537.
- Altieri M.A. (1999) The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74 (1999) 19–31.
- Andres C., Comoé H., Beerli A., Schneider M., Rist S., Jacobi J. (2016) Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry. In : *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer, S.I. : s.n. p. 121-153. ISBN 978-94-007-5448-5.
- Angeli G., Simoni S. (2006) Apple cultivars acceptance by *Dysaphis plantaginea* Passerini (Homoptera: Aphididae). In : *Journal of Pest Science*. août 2006. Vol. 79, n° 3, p. 175-179. doi: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.
- Arnaudov V., Raikov S., Davidova R., Hristov H. (2013) Predators of rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*) Pass., (Homoptera, Aphididae) in bulgarian apple orchards. In: *Fourth International Scientific Symposium "Agrosym 2013"*, 268–274.
- Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (2005) Pesticides, agriculture et environnement, Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. *Expertise scientifique collective, synthèse du rapport*, INRA & Cemagref, France, 64 p.
- Aysal T., Kivan M. (2008) Development and population growth of *Stephanitis pyri* (F.) (Heteroptera: Tingidae) at five temperatures. *Journal of Pest Science* volume 81, Article number: 135 (2008).
- Baldi I., Mohammed-Brahim B., Brochard P., Dartigues J.-F., Salamon R. (1998) Long-term effects of pesticides on health: review of current epidemiologic knowledge. *Rev. Epidemiol. Sante* 46, 134–142.
- Ben Issa R. (2014) Etude de l'effet de plantes de service (PdS) sur l'installation d'une population du puceron *Myzus persicae* (Hemiptera Aphididae): mise en évidence du rôle des composés organiques volatils (COV). 185pp.
- Benton T. G., Vickery J.A., Wilson J.D. (2003) Farmland biodiversity: Is habitat heterogeneity the key? *Trends Ecol. Evol.* 18: 182–188.
- Berrie A., Cross J. (2006) Development of an integrated pest and disease management system for apples to produce fruit free from pesticide residues - aspects of disease control, *Bull. IOBC/wprs* 29, 129–138.
- Bertrand J. (2001) Agriculture et biodiversité : un partenariat à valoriser. *Educagri*.
- Bianchi F.J.J.A., Booij C.J.H., Tscharntke 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*. 2006;273(1595).
- Biggs R., Schlüter M., Biggs D., Bohensky E.L., BurnSilver S., Cundill G., Dakos V., Daw T.M., Evans L.S., Kotschy K., Leitch A.M., Meek C., Quinlan A., Raudsepp-Hearne A., Robards M.D., Schoon M.L., Schultz L., West P.C. (2012) Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. *Annu Rev Environ Resour* 37:421–448.
- Billeter R., Liira J., Bailey D., Bugter R., Arens P., Augenstein I., Aviron S., Baudry J., Bukacek R., Burel F., Cerny M., DeBlust G., DeCock R., Diekötter T., Dietz H., Dirksen J., Durka W., Frenzel M., Hamersky R., Hendrickx F., Herzog F., Klotz S., Koolstra B., Lausch A., LeCoeur D., Maelfait J.P., Opdam P., Roubalova M., Schermann A., Schermann N., Schmitt T., Schweiger O., Smulders M.J.M., Speelmans M., Simova P., Verboom J., Van Wingerden W., Zobel M., Edwards P.J. (2008) Indicators for biodiversity in agricultural landscapes: a pan-European study. *J. Appl. Ecol.* 45, 141–150.
- Bischoff A., Pollier A., Lamarre E., Salvadoria 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 and Environment* 223 (2016) 135–143. doi:10.1016/j.agee.2016.02.029

- Blommers L.H.M. (1999) Probing the natural control of rosy aphid *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae). *IOBC-WPRS Bull.* 22: 53–56.
- Blommers L.H.M., Helsen H.H.M., Vaal F.W.N.M. (2004) Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt.,Aphididae) on plantain and as migrant to apple. *J. Pest Sci.* 77: 155–163.
- Boivin T., Sauphanor B. (2017) Phénologie et optimisation de la protection contre le carpocapse des pommes. *Innovations Agronomiques* (2007) 1, 23-31.
- Bommarco R., Kleijn D., Potts S.G. (2013) Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol Evol* 28:230–238. 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. 1959. p. 257-322.
- Bowie M.H. (1999) Effects of distance from field edge on aphidophagous insects in a wheat crop and observations on trap design and placement. *Int. J. Pest Manage.* 45: 69–73.
- Boyer F., Ulrych R., Sellam M., Lejeune V. Coordinateurs (2017) *Les auxiliaires de cultures. Biologie, écologie, méthodes d'observation et intérêt agronomique.* Paris. 4ème édition ACTA.
- Brennan E.B. (2013) Agronomic aspects of strip intercropping lettuce with alyssum for biological control of aphids. *Biological Control* 65 (2013)302–311.
- Brewer M.J., Goodell P.B. (2012) Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. *Annu Rev Entomol* 57:41–59. doi: 10.1146/annurev-ento-120709-144748
- Campbell A.J., Biesmeijer J.C., Varma V., Wäckers F.L. (2012) Realising multiple ecosystem services based on the response of three beneficial insect groups to floral traits and trait diversity. *Basic Appl. Ecol.* 13,363–370. doi:10.1016/j.baae.2012.04.003
- Caporali F. (2011) Biodiversity, biofuels, agroforestry and conservation agriculture. *Agric.* doi:10.1007/978-90-481-9513-8
- Cardinale B.J., Palmer M.A., Collins S.J. (2002) Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation. *Nature*, 415, 426–429.
- Cardinale B.J., Harvey C.T., Gross K., Ives A.R. (2003) Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi-enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem. *Ecology Letters*, (2003) 6: 857–865. doi: 10.1046/j.1461-0248.2003.00508.x
- Cardinale B.J., Srivastava D., Duffy J.E., Wright J.P., Downing A.L., Sankaran M. (2006) Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature*, 443, 989– 992.
- Caron P., Valette E., Wassenaar T., Coppens d'Eeckenbrugge G., Papazian V. (2007) *Des territoires vivants pour transformer le monde.* Editions QUAE.
- 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. *Environ. Entomol.* 13: 469-481 (1984).
- Castillo L., González-Coloma A., González A., Diaz M., Santos E., Alonso-Paz E., Bassagoda M.J., Rossini C. (2009) Screening of Uruguayan plants for deterrent activity against insects. *Industrial Crops and Products* 29, 235-240.
- Chaplin-Kramer R., O'Rourke M.E., Blitzer E.J., Kremen C. (2011) A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecol. Lett.* 14, 922–932. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x
- Cloutier C., Cloutier C. (1992) Chapitre 2 - Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures. In : Vincent C. & Coderre D., eds. *La lutte biologique.* Boucherville : Gaëtan Morin Ed, 19-88.
- Codron J.M., Jacquet F., Habib R., Sauphanor B. (2003) Plan et perspectives environnementales de la filière arboriculture fruitière. In: Quae (Ed.), *Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA 23: Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes*, pp. 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 337–350. doi:10.1016/S0167-8809(01)00340-1
- Correlli-Grappadelli L. (2003) Light relations. In: *In Apples - Botany, Production and Uses* (D. C. Ferree and I. J. Warrington, eds). CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 195–216.
- Costanza R., D'arge R., De Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., Van Den Belt M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260.
- Côté I.M., Darling E.S. (2010) Rethinking ecosystem resilience in the face of climate change. *PLoS Biol.* 8, e1000438.

Dapena E., Miñarro M. (2001) Evaluation of the tolerance to the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Pass.) in descendants of the crossing 'Raxao'x'Florina'. IOBC/WPRS Bull. 24(5): 247–252.

De Berardinis E., Baronio P., Baumgärtner G. (1994) The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* Pass., Hom., Aphididae) feeding on apple fruit growth. Ecol. Modell. 72: 115–127.

Demestihis C., Plénet D., Génard M., Raynal C., Lescourret F. (2017) Ecosystem services in orchards : a review. In : Agronomy for Sustainable Development. Avril 2017. Vol. 37, n° 2. doi:10.1007/s13593-017-0422-1

Denys C., Tschardt T. (2002) Plant-insect communities and predator-prey ratios in field margin strips, adjacent crop fields, and fallows. Oecologia 130: 315–324.

Díaz S., Fargione J., Chapin F.S. III, Tilman D. (2006) Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being. PLoS Biol 4(8): e277.

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: 97–109.

Dib H., Sauphanor B., Capowiez Y. (2016) Effect of management strategies on arthropod communities in the colonies of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in south-eastern France. Agric. Ecosyst. Environ. 216: 203–206.

Duru M., Therond O., Martin G., Martin-Clouaire R., Magne M.A., Justes E., Journet E.P., Aubertot J.N., Savary S., Bergez J.E., Sarthou J.P. (2015) How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. INRA and Springer-Verlag France 2015. doi:10.1007/s13593-015-0306-1

Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture (sans date) La pratique et la gestion durable des terres. Technologie GDT : Système des parcs agroforestiers – Burkina Faso [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/3/i1861f/i1861f08.pdf> [Consulté le 10/05/20].

Ferron P. (2016) La lutte biologique : définition, concept et stratégie [en ligne]. Les dossiers de l'environnement, 19. Disponible à l'adresse : <http://www7.inra.fr/dpenv/feribd19.htm#14>. Consulté le 14/04/20.

Finch S., Collier R.H. (2000) Host-plant selection by insects – a theory based on appropriate / inappropriate landings' by pest insects of cruciferous plants. Ent. Exp. Appl., n°96, 91-102.

Finke D.L., Denno R.F. (2004) Predator diversity dampens trophic cascades. Nature, 429, 407–410.

Fisher B., Turner R.K., Morling P. (2009) Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecol Econ 68:643–653. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.09.014

Foley J.A., Defries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. (2005) Global consequences of land use. Science NY 309:570–574. doi:10.1126/science.1111772

Frank T., Reichhart B. (2004) Staphylinidae and Carabidae overwintering in wheat and sown wildflower areas of different age. Bull. Entomol. Res. 94, 209–217. doi:10.1079/BER2004301

Géneau C.E., Wäckers F.L., Luka H., Daniel C., Balmer O. (2012) Selective flowers to enhance biological control of cabbage pests by parasitoids. Basic Appl. Ecol. 13,85–93. doi: 10.1016/j.baae.2011.10.005

Gliesmann S. (1998) Agroecology : ecological Processes in Sustainable. Agriculture, MI : Ann Arbor Presse.

Grabenweger G., Hopp H., Jackel B., Balder H., Koch T., Schmolling S. (2007) Impact of poor host-parasitoid synchronisation on the parasitism of *Cameraria ohridella* (Lepidoptera : Gracillariidae). European Journal of Entomology. 2007;104(1):153-8.

Graf B., Baumgärtner J., Delucchi V. (1985) Life table statistics of three apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, *Rhopalosiphum insertum*, and *Aphis pomi* (Homoptera, Aphididae), at constant temperatures. In : Zeitschrift für angewandte Entomologie. 1985. Vol. 99, p. 285-294.

Griffiths J.G.K., Holland J.M., Bailey A., Thomas M.B. (2008) Efficacy and economics of shelter habitats for conservation biological control. Biol. Control 45, 200–209.

Haenke S., Scheid B., Schaefer M., Tschardt T., Thies C. (2009) Increasing syrphid fly diversity and density in sown flower strips within simple vs. complex landscapes. J. Appl. Ecol. 46: 1106–1114.

Hainzelin E. (2013) Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture. Editions QUAE.

Hatt S., Boeraeve F., Artru S., Dufrière M., Francis F. (2018) Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: An agroecological perspective. In : Science of the Total Environment. 2018. Vol. 621, n° April, p. 600-611. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.296.

Heimpel G.E., Jervis M.A. (2005) Does floral nectar improve biological control by parasitoids ? In: Wäckers F.L., Van Rijn P.C.J., Bruin J.(Eds.), Plant-provided Food for Carnivorous Insects: A Protective Mutualism and Its Applications. Cambridge University Press, Cambridge, pp.267–304.

Hocking H. (1967) The influence of food on longevity and oviposition in *Rhyssa persuasoria* (L.) (Hymenoptera : Ichneumonidae). *Journal of the Australian Entomological Society* 6 : 83-88.

Hoogendoorn M., Heimpel G.E. (2004) Competitive interactions between an exotic and a native ladybeetle : a field cage study. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 111 (1): 1-85.

Hull L.A., Starnes V.R. (1983) Effectiveness of insecticide applications timed to correspond with the development of rosy apple aphid (Homoptera: Aphididae) on apple. *J. Econ. Entomol.* 76 : 594 – 598.

INRA HYPPZ[a] (sans date) Encyclopédie des ravageurs européens [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www7.inrae.fr/hyppz/RAVAGEUR/3aphpom.htm>.

INRA HYPPZ[b] (sans date) Encyclopédie des ravageurs européens [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www7.inrae.fr/hyppz/RAVAGEUR/3cydpom.htm>

Ishikawa A., Hongo S., Miura T. (2008) Morphological and histological examination of polyphonic wing formation in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera, Hexapoda). *Zoomorphology* 127:121–133.

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

Jamont M., Dubois-Pot C., Jaloux B. (2014) Nectar provisioning close to host patches increases parasitoid recruitment, retention and host parasitism. *Basic Appl. Ecol.* 15, 151–160. doi:10.1016/j.baee.2014.01.001

Jay M., Ricard J.M. (2008) Les chauves-souris en vergers de pommier. Synthèse des travaux d'écologie acoustique (2014-2017). Infos CTIFL. Novembre 2018. n°346.

Jay M. (2020) Analyse acoustique du peuplement chiroptérologique d'un verger de noyer du domaine de Restinclières (Prades le Lez – Hérault) en 2019. Rapport CTIFL.

Jonsson M., Buckley H.L., Case B.S., Wratten S.D., Hale R.J., Didham R.K. (2012) Agricultural intensification drives landscape–context effects on host-parasitoid interactions in agroecosystems. *Appl Ecol* 49(3):706–714.

Journal Officiel de la République Française (2015) Définition d'Agroforesterie. JORF n°0190 du 19 août 2015 page 14508 texte n° 75.

Josso C., LeRalec A., Raymond L., Saulais J., Baudry J., Poinot D., Cortesero A.M. (2013) Effects of field and landscape variables on crop colonization and biological control of the cabbage root fly *Delia radicum*. *Landsc. Ecol.* 28, 1697–1715.

Kaneko S. (2003) Impacts of two ants, *Lasius niger* and *Pristomyrmex pungens* (Hymenoptera: Formicidae), attending the brown citrus aphid, *Toxoptera citricidus* (Homoptera: Aphididae), on the parasitism of the aphid by primary parasitoid, *Lysiphlebus japonicus* (Hymenoptera). *Appl. Entomol. Zool.* 38: 347–357.

Kassam A., Friedrich T., Reeves T., Pretty J. (2011) Integrating Productivity with Ecosystem Services. Proceedings of the conference “Technologie Assessment – Theorie und Praxis 20”. Jg., Heft 2, Juli 2011, 38–45.

Kéfi S., Domínguez-García V., Donohue I., Fontaine C., Thébault E., Dakos V. (2019) Advancing our understanding of ecological stability. *Ecology letters*, Volume 22, Issue 9, September 2019 Pages 1349-1356.

Kennedy J.S., Day M.F., Eastop V.F. (1962) A Conspectus of Aphids as vectors of plant viruses. *London Comm. Inst. Entomology*, 1: 114.

Koohafkan P., Altieri M., Gimenez E.H. (2011) Green agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *Int J Agric Sustain* 10:61–75. doi: 10.1080/14735903.2011.610206

Korenko S., Pekar S. (2010) Is there intraguild predation between winteractive spiders (Araneae) on apple tree bark? *Biol. Control* 54: 206–212.

Krebs J.R., Wilson J.D., Bradbury R.B., Siriwardena G.M. (1999) The second Silent Spring? *Nature* 400: 611–612.

Kremen C., Miles A. (2012) Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecological and society* 17:40.

Kremen C., Miles A., Bacon C. (2012) Diversified farmings: an agroecological, systems-based. *Ecol Soc* 17(4):44.

Krishnamurthy K.V. (2003) *Textbook of Biodiversity*. Science Publishers, Inc. Enfield, USA.

- Kruess A., Tschardt T. (2000) Species richness and parasitism in a fragmented landscape: experiments and field studies with insects on vicia sepium. *Oecologia* 122:129–137.
- Kuhrt U., Samietz H., Dorn S. (2006) Effect of plant architecture and hail nets on temperature of codling moth habitats in apple orchards. In : *Entomologia Experimentalis et Applicata*. mars 2006. Vol. 118, n° 3, p. 245-259. doi:10.1111/j.1570-7458.2006.00385.x.
- Labeyrie B., Sagnes J.L., Caste L., Dubreuil N., Kreiter P., Millan M., Plénet P., Simon S., Zavagli F., Rougier M., Ermonet E., Longis S., Brun V. (2018) Réseau DEPHY EXPE : Synthèse des résultats à l'échelle nationale – filière arboriculture. S.I. Cellule d'Animation Nationale DEPHY Ecophyto.
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.M. (2000) Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests. *Annu. Rev. Entomol.* 45: 175–201.
- Latham D.R., Mills N.J. (2010) Quantifying aphid predation: the mealy plum aphid *Hyalopterus pruni* in California as a case study. *Journal of Applied Ecology* 2010, 47, 200–208. doi:10.1111/j.1365-2664.2009.01749.x
- Lathrop F. H. (1928) The biology of apple aphids. *Ohio J. Sci.* 28: 177–204.
- Laubertie E. A., Wratten D., Hemptinne G.L.. (2012) The contribution of potential beneficial insectary plant species to adult hoverfly (Diptera: Syrphidae) fitness. *Biol. Control* 61: 1–6.
- Laubertie E.A., Wratten S.D., Magro A., Hemptinne J.L. (2016) The behaviour of hoverfly larvae (Diptera, Syrphidae) lessens the effects of floral subsidy in agricultural landscapes. doi:10.1101/045286
- Lauri P.E. (2018) Apple tree architecture and cultivation - A tree in a system. First International Apple Symposium. Yangling, Shaanxi, China, 10–16 October 2016. *Acta Horticulturae* (in press).
- Lauri P.E., Barkaoui K., Ater M., Rosati A. (2019) Agroforestry for fruit trees in the temperate Europe and dry Mediterranean. In: Lang, G. A. (ed.), *Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries Volume 2: Case studies*, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK.
- Lauri P.E., Simon S. (2019) Advances and challenges in sustainable apple cultivation. In: Lang, G. A. (ed.), *Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries Volume 2: Case studies*, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK.
- 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. *Biol. Control* 34: 152–158.
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaïd A. et Savouret E. (2010) La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique (2000-2100). 23ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes.
- 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. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA.
- Lee W., Hoppin A., Blair A., Lubin J.H., Dosemeci M., Dale S., Alavanja M.C.R. (2004) Cancer incidence among pesticide applicators exposed to alachlor in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 159: 373–380.
- Lhoste Drouineau A. (2010) Valorisation de la faune indigène utile dans le cadre de la protection intégrée de l'horticulture méditerranéenne.
- Light D.M., Knight A.L., Henrick C.A., Rajapaska D., Lingren B., Dickens J.C., Reynolds K.M., Buttery R.G., Merrill G., Roitman J., Campbell B.C. (2001) A pear-derived kairomone with pheromonal potency that attracts male and female codling moth, *Cydia pomonella* (L.). *Naturwissenschaften* 88, 333–338 (2001). doi:10.1007/s001140100243
- Losey J.E., Denno, R.F. (1998) Positive predator-predator interactions: enhanced predation rates and synergistic suppression of aphid populations. *Ecology*, 79, 2143–2152.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine G., Rapidel B., De Tournonnet S., Valantin-Morison M. (2009) Mixing plants species in cropping systems : concepts, tools and models : a review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 43–62 (2009). doi:10.1051/agro:2007057
- Malézieux E. (2011) Designing cropping systems from nature. *Agr Sustain Dev.* doi:10.1007/s13593-011-0027-z
- Marc P. (2004) ADALIA : Dossier technique n°2 - Juin 2004.
- McClanahan T.R., Donner S.D., Maynard J.A., MacNeil M.A., Graham N.A.J., Maina J., Baker A.C., Alumu I.J.B., Beger M., Campbell S.J., Darling A.S., Eakin C.M., Heron S.F., Jupiter S.D., Lundquist C.J., McLeod E., Mumby P.J., Paddock M.J., Selig E.R., Van Woesik R. (2012) Prioritizing key resilience indicators to support coralreef management in a changing climate. *PLoS One* 7 (8), e42884.

- Millennium ecosystem assessment (2005) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. World Resources Institute [en ligne] www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.html
- Médiène S., Valantin-morison M., Sarthou J., De Tourdonnet S., Gosme M., Bertrand M., Roger-Estrade J., Aubertot J.N., Rusch A., Motisi N., Pelosi C., Doré T. (2011) Agroecosystem management and biotic interactions : a review. *Agr Sustain Dev* 31:491–514. doi:10.1007/s13593-011-0009-1
- 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. *Biol. Control* 33: 249–259.
- Mills N.J. (2005) Selecting effective parasitoids for biological control introductions:codling moth as a case study. *Biol. Control* 34, 274–282.
- Miñarro M. Hemptinne J.L., Dapena E. (2005) Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea*: sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl* 50: 403–414.
- Miñarro M., Fernandez-Mata G., Medina P. (2010) Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological Entomology* 35, 206-215. doi:10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x
- Miñarro M., Prida E. (2013) Hedgerows surrounding organic apple orchards in north-west Spain: potential to conserve beneficial insects. *Agric. For. Entomol.* 15: 382–390.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2018) Plan écophyto : qu'est-ce que c'est ? [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest>.
- Moss B. (2008) Water pollution by agriculture. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 363: 659–666.
- Murdoch W.W., Briggs C.J., Nisbet R.M. (2003) Consumer-Resource Dynamics. Levin S.A., Horn H.S. editors. Princeton and Oxford: Princeton University Press; 2003. 462 p.
- Naaum A.M., Foottit R.G., Maw H.E.L. Hanner R. (2012) Differentiation between *Aphis pomi* and *Aphis spiraecola* using multiplex real-time PCR based on DNA barcode sequences: Differentiation between *Aphis pomi* and *Aphis spiraecola*. In : *Journal of Applied Entomology*. novembre 2012. Vol. 136, n° 9, p. 704-710. doi:10.1111/j.1439-0418.2012.01706.x.
- Nagy C., Cross J.V., Marko 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(1), 24-36.
- Nagy C., Cross J.V., Marko V. (2015) Can artificial nectaries outcompete aphids in ant-aphid mutualism? Applying artificial sugar sources for ants to support better biological control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini in apple orchards. *Crop Protection* 77, 127-138.
- Nair P.K.R. (1991) State-of-the-art of agroforestry systems. *For Ecol and Manag* 45: 5-29.
- Nicholls C.I., Parella M., Altieri M.A. (2001) The effects of a vegetational corridor on the abundance and dispersal of insect biodiversity within a northern California organic vineyard. *Landscape Ecol.* 16: 133–146.
- Nicholls C.I., Altieri M.A. (2004) Designing species-rich, pest-suppressive agroecosystems through habitat management. In : *Agronomy. S.I. : s.n.* p. 49-62.
- Nicolas A., Dagbert T., Le Goff G., Hance T. (2013) La lutte biologique contre le puceron cendré du pommier par des lâchers d'auxiliaires en verger. UCL – Earth and Life Institute – Biodiversity Research Centre.
- Northfield T.D., Snyder G.B., Ives A.R., Snyder W.E. (2010) Niche saturation reveals resource partitioning among consumers. *Ecology Letters*, (2010) 13: 338–348. doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01428.x
- Oatman E. R., Legner E.F. (1961) Bionomics of the apple aphid, *Aphis pomi*, on young non-bearing apple trees. *J. Econ. Entomol.* 54(5): 1034-1037.
- Pelosi G., Goulard M., Balent G. (2010) The spatial scale mismatch between ecological processes and agricultural management: do difficulties come from underlying theoretical frameworks? *Agric Ecosyst Environ* 139:455–462.
- Perseval C. (2019) Pest incidence and biological regulations in an apple tree-based agroforestry system.
- Pfiffner L., Schärer G.J., Luka H. (2013) Functional biodiversity to improve pest control in organic cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 78: 215–222.
- Pitchers B., Dufour L., Lauri P.E. (2020) Growing agroforestry systems with apple in Montpellier-Mediterranean – preliminary results on the influence of adult walnut trees on growth and branching of two-year-old apple trees. *Acta Hort.* 1281. ISHS 2020. DOI 10.17660/ActaHortic.2020.1281.43XXX IHC – Proc. Int. Symp. on Evaluation of Cultivars, Rootstocks and Management Systems for Sustainable Production of Deciduous Fruit Crops.

- Power A.G. (2010) Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Phil. Trans R Soc B* 365:2959–2971.
- Prévost P. (2000) La régulation biologique un concept intégrateur de la connaissance agronomique. *Courrier de l'environnement de l'INRA*(39), p.27-38.
- Pumariño L., Sileshi G.W., Gripenberg S., Kaartinen R., Barrios E., Muchane M.N., Midega C., Honsson M. (2015) Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. In : *Basic and Applied Ecology*. 2015. Vol. 16, n° 7, p. 573-582. doi:10.1016/j.baae.2015.08.006.
- Qubbaj T., Reineke A., Zebitz C.P.W. (2005) Molecular interactions between rosy apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, and resistant and susceptible cultivars of its primary host *Malus domestica*. In : *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2005. Vol. 115, n° 1, p. 145-152. doi:10.1111/j.1570-7458.2005.00255.x
- Raymond R., Sarthou J.P., Plantegenest M., Gauffre B., Ladeta S., Vialatte A. (2014) Immature hoverflies overwinter in cultivated fields and may significantly control aphid populations in autumn. *Agric. Ecosyst. Environ.* 185,99–105.
- Ricard J.M., Garcin A., Jay M., Mandrin J.F. (2012) Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière. Paris : CTIFL. ISBN 978-2-87911-325-8.
- Ricci C., Ponti L., Pires A. (2005) Migratory flight and pre-diapause feeding of *Coccinella septempunctata* (Coleoptera) adults in agricultural and mountain ecosystems of Central Italy. *J. Entomol.* 102,531–538. doi:10.14411/eje.2005.076
- Robinson R.A., Sutherland W.J. (2002) Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *J. Appl. Ecol.* 39: 157–176.
- Root R.B. (1973) Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats - Fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*. 1973;43(1):95-120.
- Rusch A., Valantin-Morison M., Sarthou J.P., Roger-Estrade J. (2010) Multiscale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Land Ecol* 26:473–486.
- Sánchez-Bayo F., Wyckhuys K. A. (2019) Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological conservation*, 232, 8-27.
- Sarthou J. P., Ouin A., Arrignon F., Barreau G., Bouyjou B. (2005) Landscape parameters explain the distribution and abundance of *Episyrphus balteatus* (Diptera: Syrphidae). *Eur. J. Entomol.* 102: 539–545.
- 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. *Agr Ecosyst Environ* 194:17–28.
- Sarthou J.P. (2016) Infrastructure agroécologique [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/infrastructure-agroecologique-2/>. Consulté le 08/05/20.
- Sauphanor B., Simon S., Boisneau C., Capoview Y., Rieux R., Bouvier J.C., Defrance H., Picard C., Toubon J.F. (2009) Protection phytosanitaire et biodiversité en agriculture biologique. *Le Cas Des Vergers De Pommiers*. *Innovations Agronomiques* 4: 217–228.
- Sauphanor B., Berling M., Toubon J.F., Reyes M., Delnatte J., Allemoz P. (2006) Carpcapsc des pommes : cas de résistance au virus de la granulose en verger biologique. *Phytoma*, 590, 24- 27.
- Schaffers A.P., Raemakers I.P., Sykora K.V., TerBraak C.J.F. (2008) Arthropod assemblages are best predicted by plant species composition. *Ecology* 89,782–794. doi:10.1890/07-0361.1
- Schöneberg A., Perren S., Naef A. (2015) En quête de variétés tolérantes – pour une gestion durable du feu bactérien. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (1): 4–11, 2015.
- Shennan C. (2008) Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Philos T R Soc Lond B* 363:717–739. doi:10.1098/rstb.2007.2180
- Sheskin D.J. (2007) *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Chapman et Hall.
- Simon S., Defrance H., Sauphanor B. (2007) Effect of codling moth management on orchard arthropods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122: 340–348.
- Simon S., Bouvier J.C., Debras J.F., Sauphanor B. (2009) Biodiversity and pest management in orchard systems : a review. *Agron. Sustain. Dev.* 30 (2010) 139–152.
- Simon S. (2010) Evaluation of the severity of rosy apple aphid infestation in spring. INRA – UE Gotheron.
- Snyder W.E., Ives A.R. (2001) Generalist predators disrupt biological control by a specialist parasitoid. *Ecology* 82: 705.
- Snyder W.E., Snyder G.B., Finke D.L., Straub C.S. (2006) Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecol. Lett.*, 9, 789–796.
- Stamps W. T., Linit M. J. (1998) Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* 39, 73-89.

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, 111–121. doi:10.1111/j.0030-1299.2006.14199.x

Stephens A.E.A., Myers J.H. (2012) Resource concentration by insects and implications for plant populations. *Journal of Ecology*. 2012;100(4):923-31.

Stewart-Jones A., Pope T.W., Fitzgerald J.D., Poppy G.M. (2007) The effect of ant attendance on the success of rosy apple aphid populations, natural enemy abundance and apple damage in orchards. *Agricultural and Forest Entomology* 10(1), 37-43.

Straub C.S., Snyder W.E. (2006) Species identity dominates the relationship between predator biodiversity and herbivore suppression. *Ecology*, 87, 277–282.

Straub C.S., Snyder W.E. (2008) Increasing enemy biodiversity strengthens herbivore suppression on two plant species. *Ecology*, 89, 1605–1615.

Swinton S.M., Lupi F., Robertson G.P., Hamilton S.K. (2007) Ecosystem services and agriculture: cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecol Econ* 64:245–252.

Thierry D., Deutsch B., Paulian M., Villenave J., Canard M. (2005) Quantifying biodiversity in ecosystems by green lacewing assemblages. I.A valuable method to do (Insecta: Neuroptera: Chrysopidae). *Agronomy for Sustainable Development* 25: 473-479.

Thies C., Steffan-Dewenter I., Tschamntke T. (2005) Effect of landscape context on herbivory parasitism at different spatial scales. *Oikos* 101, 18–25. doi:10.1098/rspb.2004.2902

Cécile T., Jérémy C., Claire L. (sans date) Evaluation du potentiel de régulation biologique en vergers à l'aide de « cartes de prédation ». PSH INRA Avignon.

Tilman D., Fargione J., Wolff B., D'Antonio C., Dobson A., Howarth R., Schindler D., Schlesinger W.H., Simberloff D., Swackhamer D. (2001) Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292:281–284.

Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671–677.

Tortosa O.E., Carmona A., Martínez 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. *Rev. Soc. Entomol. Argentina* .

Trillot M., Masseron A., Mathieu V., Bergougoux F., Hutin C., Lespinasse Y. (2002) *Le Pommier*. Monographie. CTIFL. Paris, France.

Tschamntke T., Klein A.M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C. (2005) Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecol Lett* 8(8):857–874.

Tschamntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T.O., Kleijn D., Rand T.A., Tylianakis J.M., Van Nouhuys S., Vidal S. (2007) Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *BiolControl* 43(3):294–309.

Tschamntke T., Clough Y., Bhagwat S. A., Buchori D., Faust H., Hertel D., Hölscher D., Jührbandt J., Kessler M., Perfect I., Scherber C., Schroth G., Veldkamp E., Wanger T. C. (2011) Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes: a review. *Journal of Applied Ecology* 48, 619–29.

Tschumi M., Albrecht M., Entling M.H., Jacot K. (2015) High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 282: 20151369.

Turner M. (2014) Le biocontrôle au cœur de l'actualité : définitions et réglementation [en ligne]. Blog Vegenov, disponible à l'adresse : <https://blog.vegenov.com/2014/05/biocontrôle-coeur-actualite-definition-reglementation/>. Consulté le 01/05/20.

Tylianakis J.M., Didham R.K., Wratten S.D. (2004) Improved fitness of aphid parasitoids receiving resource subsidies. *Ecology* 85: 658–666.

Van Driesche R.G., Bellows Jr T.S. (1996) *Biological Control*. Kluwer, Academic Publ., 560 pp.

Vandermeer J., Perfecto I. (1995) *Breakfast of biodiversity: the truth about rainforest destruction*. Food First Books, Oakland, 185 pp.

Villenave J., Thierry D., Al Mamun A., Lodé T., Rat-Morris E. (2005) The pollens consumed by *Chrysoperla lucasina* and *Ch. affinis* (Neuroptera: Chrysopidae) in cabbage crop environment in western France. *Aphidophaga* 9 Proceedings. *European Journal of Entomology* 102 (3): 547-562.

Villenave-Chasset J., Leblond S. (2019) Des bandes fleuries pour les auxiliaires dans les grandes cultures ? Oui mais lesquelles? *Innovations Agronomiques*, INRA, 75, pp.137-151.

Waage J.K. (1991) *Biodiversity as a Resource for Biological Control*. L. Hawksworth : *The Biodiversity of Microorganisms and Invertebrates : Its Role in Sustainable Agriculture*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, 149-163.

- Wanner H., Gu H., Hattendorf B., Günther D., Dorn S. (2006) Using the stable isotope marker ^{44}Ca to study dispersal and host-foraging activity in parasitoids. *J. Appl. Ecol.* 43, 1031–1039. doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01212.x
- Welch K.D., Harwood J.D. (2014) Temporal dynamics of natural enemy–pest interactions in a changing environment. *Biol. Control* 75, 18–27. doi: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. *Prog. Plant Prot.* 37: 36–39.
- Wratten S.D., Bowie M.H., Hickman J.M., Evans A.M., Sedcole J.R., Tylanakis J.M. (2003) Field boundaries as barriers to movement of hover flies (Diptera: Syrphidae) in cultivated land. *Oecologia* 134: 605–611.
- Wyss E. (1995) The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in a apple orchard. *Entomol. Exp. Appl.* 75: 43–49.
- Wyss E., Villiger M., Hemptinne J.L., Müller-Schärer H. (1999) Effects of augmentative releases of eggs and larvae of the ladybird beetle, *Adalia bipunctata*, on the abundance of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, in organic apple orchards. *Entomol. Exp. Appl.* 90: 167–173.
- Yan F., Bengtsson M., Witzgall P. (1999) Behavioral Response of Female Codling Moths, *Cydia pomonella*, to Apple Volatiles. In : *Journal of Chemical Ecology*. 1999. Vol. 25, n° 6, p. 1343–1351. doi: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: 3–10.
- Zera A.J., Denno R.F. (1997) Physiology and ecology of dispersal polymorphism in insects. *Annu Rev Entomol* 42:207–230.
- Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M. (2007) Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecol Econ* 64: 253–260.

Table des figures

➤ **Figures**

- Chapitre 1 – Contexte et bibliographie

Figure 1 : Photographie du site d'étude, 20/05/20.

Figure 2 : Représentation des parcelles d'expérimentation en agroforesterie sur le domaine de Restinclières.

Figure 3 : Les principaux services écosystémiques dont bénéficient les activités humaines.

Figure 4 : Présentation simplifiée des principaux groupes attribués aux organismes en milieu agricole.

Figure 5 : Schématisation des interactions biotiques et abiotiques susceptibles d'influencer le contrôle des ravageurs.

Figure 6 : Cycle de développement de *D.plantaginea*.

Figure 7 : Photographie d'un foyer de puceron, GAFAM, 11/06/20.

Figure 8 : Cycle de développement de *A. pomi*.

Figure 9 : Photographie de fourmis dans un foyer de puceron vert, GAFAM, 11/06/20.

Figure 10 : Cycle de développement de *C. pomonella* dans le sud de la France.

Figure 11 : Syrphe porte-plume ; Larve de chrysope ; Coccinelle à 7 points. GAFAM, 2020.

Figure 12 : Dynamique de la présence des ennemis naturels au sein de foyers de pucerons cendrés.

Figure 13 : Schématisation des possibilités de diversification spatiale et temporelle des agroécosystèmes en culture annuelle.

- Chapitre 2 – Méthodologie

Figure 14 : Schéma des modalités agroforestières sur le site d'étude.

Figure 15 : Schéma des milieux semi-naturels du site d'étude.

Figure 16 : Forficule ; Punaise prédatrice (*Heterotoma planicornis*). GAFAM, 2020.

Figure 17 : Dispositif expérimental de l'étude de 2019.

Figure 18 : Dispositif expérimental de l'étude de 2020.

- Chapitre 3 – Résultats

Figure 19 : Répartition des symptômes du puceron cendré en fonction du facteur agroforestier.

Figure 20 : Répartition des symptômes du puceron cendré en fonction du facteur bloc.

Figure 21 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur agroforestier lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 24/06.

Figure 22 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 24/06.

Figure 23 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 24/06.

Figure 24 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du puceron vert le 17/07.

Figure 25 : Dynamique du nombre de foyers actifs de pucerons verts dans les 45 pommiers suivis.

Figure 26 : Dynamique du nombre de disparition de foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis.

Figure 27 : Dynamique de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis en fonction du facteur agroforestier.

Figure 28 : Dynamique de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis en fonction du facteur bloc.

Figure 29 : Dynamique de la sévérité moyenne en formes ailées des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur agroforestier.

Figure 30 : Dynamique de la sévérité moyenne en formes ailées des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur bloc.

Figure 31 : Dynamique du nombre moyen de fourmis par foyer de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur agroforestier.

Figure 32 : Dynamique du nombre moyen de fourmis par foyer de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis, en fonction du facteur bloc.

Figure 33 : Attaque d'une larve de coccinelle par une fourmi, sur pommier, site GAFAM, 2020.

Figure 34 : Représentation des écarts-types de la sévérité moyenne des foyers de pucerons verts parmi les 45 pommiers suivis.

Figure 35 : Dynamique du nombre total de pucerons verts dans chaque modalité agroforestière parmi les 45 pommiers suivis.

Figure 36 : Dynamique du nombre total de fourmis dans les foyers suivis de chaque modalité agroforestière parmi les 45 pommiers suivis.

Figure 37 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « puceron » en fonction du facteur agroforestier entre le 28/04 et le 30/04.

Figure 38 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « puceron » en fonction du facteur bloc entre le 28/04 et le 30/04.

Figure 39 : Nombre d'inflorescences en fonction du facteur agroforestier.

Figure 40 : Nombre de fruits en fonction du facteur agroforestier lors d'évaluation de la G2.

Figure 41 : Nombre de fruits infestés (G1+G2) en fonction du nombre d'inflorescence avec au moins un fruit.

Figure 42 : Corrélation linéaire entre le nombre d'inflorescences (avec au moins un fruit) et le nombre de fruits infestés.

Figure 43 : Taux de fruits infestés (G1+G2) en fonction du nombre d'inflorescence avec au moins un fruit.

Figure 44 : Dégâts et infestation des différentes générations de carpocapse à l'échelle de la parcelle.

Figure 45 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur bloc.

Figure 46 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur agroforestier, décomposé dans les différents blocs

Figure 47 : Taux d'infestation total (G1+G2) du carpocapse en fonction du facteur bloc, décomposé dans les différentes modalités agroforestières.

Figure 48 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur agroforestier, entre le 28/04 et le 02/05.

Figure 49 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur bloc, entre le 28/04 et le 02/05.

Figure 50 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur agroforestier, entre le 27/07 et le 31/07.

Figure 51 : Taux de prédation moyen des cartes de prédation « carpocapse » en fonction du facteur bloc, entre le 27/07 et le 31/07.

Figure 52 : Tigres du poirier (adultes et juvéniles) observés sur le site GAFAM en 2020.

Figure 53 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur agroforestier lors de l'évaluation de l'incidence du tigre du poirier le 24/06/20.

Figure 54 : Nombre moyen de foyers par pommier en fonction du facteur bloc lors de l'évaluation de l'incidence du tigre du poirier le 24/06/20.

Figure 55 : Photographie de polyxenida sur le site GAFAM, 2020.

Figure 56 : Floraisons prévisionnelles dans et autour de la parcelle GAFAM, 2020.

Figure 57 : Températures moyennes journalières (Montpellier – Fréjorgues) en 2020.

Figure 58 : Précipitations (Montpellier – Fréjorgues) en 2020.

- Chapitre 4 – Discussion

Figure 59 : Photographie de l'inter-rang de pommiers le 26/05.

Figure 60 : Représentation graphique du lien entre disparition de foyers et nombre moyen de fourmis par foyer.

Figure 61 : Coupe transversale d'un fruit infesté par une larve de carpocapse. GAFAM, 26/06/20.

Figure 62 : Incidence du puceron vert et du tigre du poirier en fonction du facteur agroforestier et du facteur bloc le 24/06/20.

Figure 63 : Evolution des services écosystémiques suite à la mise en place de pratiques agroécologiques

➤ Tableaux

Tableau 1 : Les principaux arthropodes ennemis naturels des ravageurs présentés.

Tableau 2 : Présentation des différentes modalités des pommiers en fonction de leur position par rapport aux noyers.

Tableau 3 : Composition de la bande fleurie.

Tableau 4 : Présentation des différents taxons d'ennemis naturels considérés pour l'étude.

Tableau 5 : Méthodes d'échantillonnage utilisées dans l'étude.

Tableau 6 : Composition des blocs du dispositif expérimental de 2020.

Tableau 7 : Synthèse des suivis réalisés dans l'étude.

Tableau 8 : Proportion des symptômes du puceron cendré sur le site d'étude.

Tableau 9 : Dégâts et infestation des différentes générations de carpocapse à l'échelle de la parcelle.

Tableau 10 : Lettres de significative et p-values la comparaison multiple des moyennes des différentes générations, en fonction du facteur agroforestier.

Tableau 11 : Lettres de significative et p-values de la comparaison multiple des moyennes des différentes générations, en fonction du facteur bloc.

➤ Annexes

Annexe n°1 : Description de l'ensemble des ennemis-naturels susceptible de maîtriser les ravageurs de l'étude.

Annexe n°2 : Essences végétales identifiées sur le site au début de la saison 2020.

Annexe n°3 : Présentation des principales méthodes d'échantillonnages des arthropodes.

Annexe n°4 : Observation moyenne des pièges colorés du site.

Annexe n°5 : Inventaire des arthropodes observés sur le site GAFAM pendant la saison 2020.

Annexe n°6 : Observations moyennes d'arthropodes (frappage, pièges cartons, observation des foyers) en fonction du facteur agroforestier.

Annexe n°7 : Observations moyennes d'arthropodes (frappage, pièges cartons, observation des foyers) en fonction du facteur bloc.

Annexe n°8 : Observations moyennes d'arthropodes dans les pots Barber, en fonction des différentes IAE.

Annexe n°9 : Moyenne (par semaine) du nombre total d'arthropodes lors du frappage des haies de bordure.

Annexe n°10 : Dynamique du total des observations des ennemis-naturels du site GAFAM, 2020.

Annexe n°11: Notations des espèces végétales en fleurs sur GAFAM.

Annexe n°1 : Description de l'ensemble des ennemis-naturels susceptible de maîtriser les ravageurs de l'étude.
D'après Ricard et al., 2012 et Boyer et al., 2017.

Règne	Classe	Ordre	Famille	Genre	Espèce	Nom commun	Développement	Régulation	Type de régime alimentaire			Appareil bucal	
									Général	Stade larvaire	Stade imago	Larve	Imago
ANIMALIA	Embranchement des Arthropodes	Coléoptère	Coccinellidae	ALL	-	Coccinelles	Holométabole	Prédation	Polyphage	Zoophage	Polyphage	Broyeur	Broyeur
				<i>Coccinella septempunctata</i>	Coccinelle à 7 points								
				<i>Adalia bipunctata</i>	Coccinelle à 2 points								
				<i>Adalia decempunctata</i>	Coccinelle à 10 points								
				<i>Propylaea quatuordecimpunctata</i>	Coccinelle à damier								
				<i>Harmonia axyridis</i>	Coccinelle asiatique								
				<i>Scymnus sp.</i>	-								
				<i>Chilocorus sp.</i>	-								
				<i>Exochomus sp.</i>	-								
				<i>Stethorus sp.</i>	-								
		Carabidae	ALL	-	Carabes	Holométabole	Prédation	Polyphage	Zoophage	Polyphage	Broyeur	Broyeur	
		Staphylinidae	ALL	-	Staphylins	Holométabole	Prédation	Zoophage	Zoophage	Zoophage	Broyeur	Broyeur	
		Hemiptère	Anthracoridae	<i>Anthracoris & Orius</i>	Punaises	Hétérométabole	Prédation		Polyphage			Piqueur-suceur	
			Miridae		Punaises	Hétérométabole	Prédation		Polyphage			Piqueur-suceur	
		Névroptère	Nabidae		Punaises	Hétérométabole	Prédation		Polyphage (?)			Piqueur-suceur	
			Chrysopidae		Chrysopes	Holométabole	Prédation					Broyeur	Broyeur
		Diptère	Hemerobiidae				Holométabole	Prédation				Broyeur	Broyeur
			Coniopterygidae				Holométabole	Prédation				Broyeur	Broyeur
			Syrphidae		Syrphes	Holométabole	Prédation	Polyphage	Zoophage (mai)	Floriphage	Crochets buccaux	(Piqueur)-suceur	
		Diptère	Cecidomyiidae		Cecidomies	Holométabole	Prédation				Crochets buccaux	(Piqueur)-suceur	
			Tachinidae		Tachinaires	Holométabole	Parasitisme	Polyphage	Zoophage	Floriphage	Crochets buccaux	(Piqueur)-suceur	
		Thysan.	Aeolothripidae		Thrips	?	Prédation	Polyphage					
			Thripidae										
		Dermaptère	Forficulidae	<i>Forficula auricularia & pubescens</i>	Forficules	Hétérométabole	Prédation		Omnivore			Broyeur	
		Hyménoptère	ALL	-	Guêpes	Holométabole	Parasitisme	Polyphage	Zoophage	Floriphage	Broyeur	Lécheur	
			Aphelinidae	<i>Aphelinus abdominalis, asychis, varipes</i>									
			Braconidae	<i>Aphidiinae, Praon, Aphidius, Ephedrus</i>									
			Braconidae	<i>Apanteles</i>									
			Bethylinae	<i>Goniozus</i>									
			Encyrtidae	<i>Metaphycus, Blastothrix</i>									
			Aphelinidae	<i>Cocciophagus</i>									
			Aphelinidae	<i>Encarsia, Eretmocerus</i>									
			Trichogrammatidae	<i>Trichogramma</i>	Trichogrammes								
Fourmis				Holométabole									
ARACHNIDES	Acaréens	Gamasidae	Phytoseiidae	<i>Amblyseis andersoni</i> <i>Kampimodromus aberrans</i> <i>Neoseiulus californicus</i> <i>Phytoseiulus persimilis</i> <i>Typhlodromus pyri</i>	Acaréens prédateurs	Mues	Prédation		Zoophage		Broyeur		
			Actinédia	Stigmaeidae		Acaréens prédateurs	Mues	Prédation		Zoophage		Broyeur	
				Anystidae									
	Araignées	Araneidae	Lycosidae		Araignées	Mues	Prédation		Zoophage		Broyeur		
			Linyphiidae										
			Salticidae										
			Miturgidae										
Araneidae													
Nei Chordés	AVES	-	-	Oiseaux insectivores	-	Prédation		Omnivore		-			
	MAMMALLIA	Chiroptère	-	Rapaces	-	Prédation		Carnivore		-			
		Insectivore	Erinacidae		Chauves-souris	-	Prédation		Insectivore		-		
		Carnivore	Soricidae		Hérissons	-	Prédation		Insectivore		-		
	AMPHIBIA	Anoure, Urodèle	-	-	Musaraignes	-	Prédation		Omnivore		-		
			Canidae	<i>Vulpes Vulpes</i>	Renards roux	-	Prédation		Omnivore		-		
	REPTILIA	Squamate	-	-	Mustelidae	<i>Mustela, Martes, etc</i>	Fouines, hermines, etc	-	Prédation		Carnivore	-	
SECFE	Rhabditidae	-	-	Amphibiens	-	Prédation		Carnivore		-			
		Serpents & lézards	-	Prédation		Carnivore		-					
BACTE	Micro-organismes entomopathogènes	-	-	Rhabditidae	<i>Steinernema</i> <i>Heterorhabditis</i> <i>Phasmarhabditis hermaphrodita</i>	Nématodes	Après ingestion	Parasitisme		Zoophage	-		
		-	-	Maladies diverses	Après ingestion	Pathogène		Zoophage	-				
FUNGI	Entomo	?	Moniliales	<i>Beauveria</i> <i>Lecanicillium</i> <i>Metarhizium</i>	Champignons	Pénétration du mycélium à travers le tégument de l'insecte	Pathogène		Zoophage	-			
		Entomophthorale	Entomophthorales	<i>Entomophthora</i>									

Annexe n°2 : Essences végétales identifiées sur le site au début de la saison 2020.
Basé sur le travail de Perseval (2019).

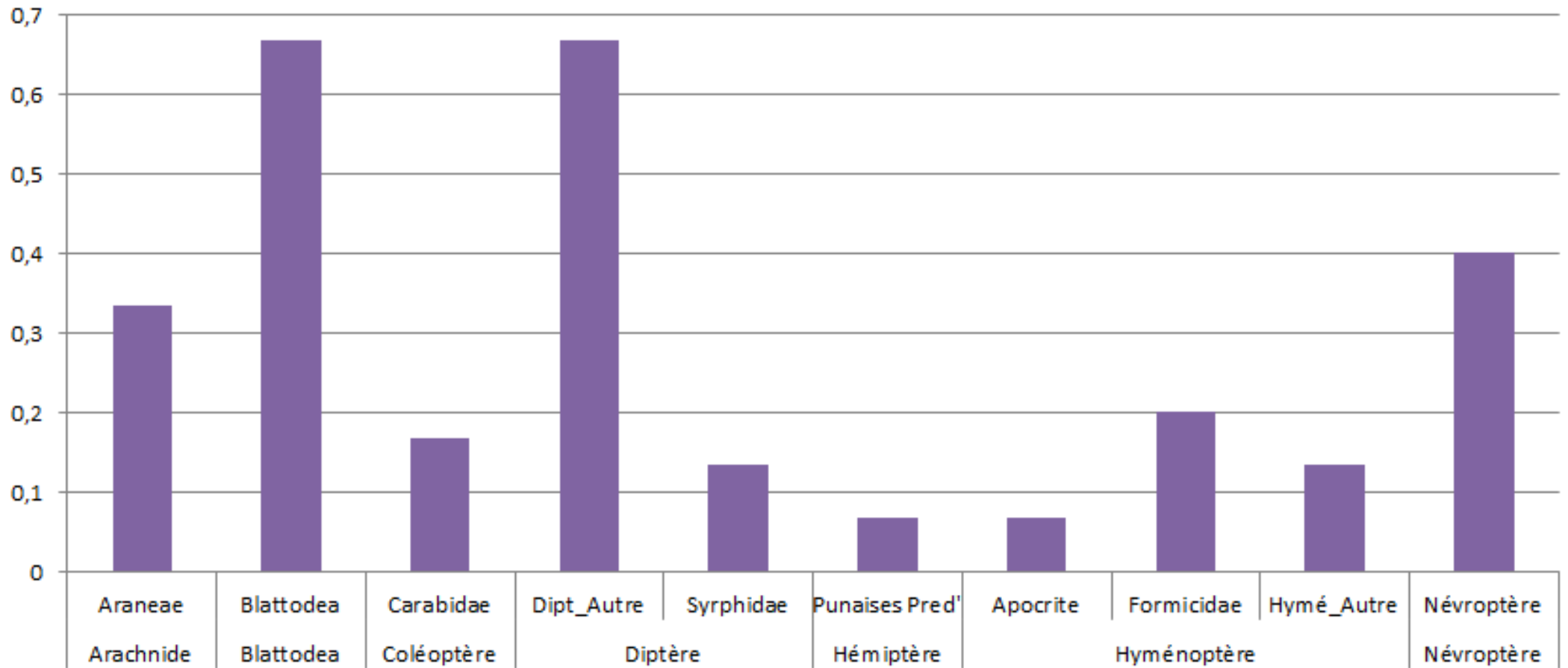
ESSENCES PRESENTES DANS ET AUTOURS DE LA PARCELLE GAFAM					
Nom commun	Nom scientifique	Strate	Pollinisation	Début floraison	Fin floraison
1 - [INTRA] Essences cultivées					
Pommier domestique	<i>Malus domestica</i>	Arborée	Entomogame	Avril	Mai
Noyer	<i>Juglans regia</i>	Arborée	Anemogame	-	-
2 - [INTRA] Essences de la bande fleurie					
Achillée millefeuille	<i>Achillea millefolium</i>	Herbacée	Entomogame	Juin	Septembre
Phacélie à feuilles de Tanaisie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	Herbacée	Entomogame	Mai	Septembre
Souci officinal	<i>Calendula officinalis</i>	Herbacée	Entomogame	Mai	Novembre
Œillet d'Inde	<i>Tagetes patula</i>	Herbacée	Entomogame	Juin	Octobre
3 - [INTRA] Flore spontanée					
Sainfoin	<i>Onobrychis viciifolia</i>	Herbacée	Entomogame	Mai	Aout
4 - [EXTRA] Essences en bordure (Perseval 2019)					
Fétuque	<i>Festuca sp.</i>	Herbacée	Anemogame	-	-
Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>	Arborée	Anemogame	Avril	Mai
Fusain d'Europe	<i>Euonymus europaeus</i>	Arbustive	Entomogame	Mai	Juin
Poirier commun	<i>Pyrus communis</i>	Arborée	Entomogame	Avril	Mai
Orme champêtre	<i>Ulmus minor</i>	Arborée	Anemogame	Mars	Avril
Clématite blanche	<i>Clematis vitalba</i>	Liane	Entomogame	Juillet	Octobre
Filaire à larges feuilles	<i>Phillyrea latifolia</i>	Arbustive	Entomogame	Avril	Mai
Chêne pubescent	<i>Quercus pubescens</i>	Arbustive	Anemogame	Avril	Mai
Cornouiller	<i>Cornus sp</i>				
Ronce	<i>Rubus sp</i>				
Aubépine blanche	<i>Crataegus monogyna</i>	Arbustive	Entomogame	Mai	Juin
Mûrier blanc	<i>Morus alba</i>	Arborée	Anemogame	Avril	Mai
Platane commun	<i>Platanus xhispanica</i>	Arborée	Anemogame	Avril	Mai
Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>	Arborée	Anemogame	Avril	Mai
Lierre grimpant	<i>Hedera helix</i>	Liane	Entomogame	Septembre	Octobre
Erable champêtre	<i>Acer campestre</i>	Arborée	Entomogame	Mai	Mai
Erable plane	<i>Acer platanoides</i>	Arborée	Entomogame	Avril	Avril
Frêne	<i>Fraxinus sp</i>				
Prunier	<i>Prunus sp</i>				
Laurier-tin	<i>Viburnum tinus</i>	Arbustive	Entomogame	Janvier	Avril
Prunier cultivé	<i>Prunus domestica</i>	Arborée	Entomogame	Mars	Avril
Corroyère à feuilles de myrthe	<i>Coriaria myrtifolia</i>	Arbustive	Entomogame	Avril	Juillet
Troène commun	<i>Ligustrum vulgare</i>	Arbustive	Entomogame	Juin	Juillet
Vigne cultivée	<i>Vitis vinifera</i>	Liane	Entomogame	Mai	Juillet
Canne de Provence	<i>Arundo donax</i>	Herbacée	Anemogame	Aout	Septembre
Ailante glanduleux	<i>Ailanthus altissima</i>	Arborée	Entomogame	Juillet	Juillet

Annexe n°3 : Présentation des principales méthodes d'échantillonnages des arthropodes.
D'après Ricard et al., 2012 et Boyer et al., 2017.

Méthode d'observation	Matériel nécessaire	Culture(s) ciblée(s)	Nombre de répétitions	Fréquence des observations	Données récoltées	Impact sur la faune auxiliaire
I - Auxiliaires volants						
Observation directe	Loupe de poche	Annuelles ou pérennes	[25-100] organes	Variable (à adapter pour compléter les autres obs.)	Qualitative + Quantitative (pour un organe donné)	Aucun
Piège à fils englués	Cadre du piège, fils de polyamide, glue	Annuelles ou pérennes	2 à 3	1 fois par semaine	Nombre d'insectes volants sur ou dans la culture	Destructif
Battage	Batte, plateau (ou toile)	Vergers ; haies et IAE	[25-100] organes	1 fois par semaine (ou plus?)	Nombre d'insectes présents	Destructif (si prélèvement)
Piège cornet / Tente Malaise	Piège avec tente, alcool	Annuelles ou pérennes	1 à 5 (respecter les distances)	1 fois par semaine	Nombre d'insectes dans le paysage	Destructif
Filet fauchoir	Filet fauchoir	Strate herbacée	[10-25] coups	Variable (généralement avant période d'infestation)	Nombre d'insectes volants strate herbacée	Destructif (si prélèvement)
Aspirateur thermique	Aspirateur, alcool	Annuelles ou pérennes	[25-100] ponctions de 10 secs	Variable (généralement avant période d'infestation)	Arthropodes dans la végétation	Destructif
Piège colorés	Pièges colorés, alcool	Annuelles ou pérennes	[1-5]	Entre 1 fois/jour et 1 fois/semaine	Présence ou absence de certains groupes	Destructif
II - Auxiliaires épigés						
Pot Barber	Pots, PVC, alcool, attractifs	Annuelles ou pérennes	[3-7]	[1-2] fois par semaine	Nombre d'arthropodes à la surface du sol	Destructif
Pièges à émergence	Tente, plexiglass, pots	Annuelles ou pérennes	[2-3]	1 fois par semaine	Dates d'émergence	Destructif
Planche à invertébré	Planche en bois	Annuelles ou pérennes	[2-3]	1 fois par semaine	Qualitative + Quantitative	Aucun
III - Autres						
Carte de prédation	Cartes cf Simon (2010)	Annuelles ou pérennes	cf Simon (2010)	cf Simon (2010)	Prédation (quantitatif)	Aucun
Tests bêche	Bêche, loupe de poche	Annuelles ou pérennes	-	-		Aucun

Annexe n°4 : Observation moyenne des pièges colorés du site.

Nombre moyen d'arthropode échantillonnés.



Annexe n°5 : Inventaire des arthropodes observés sur le site GAFAM pendant la saison 2020.

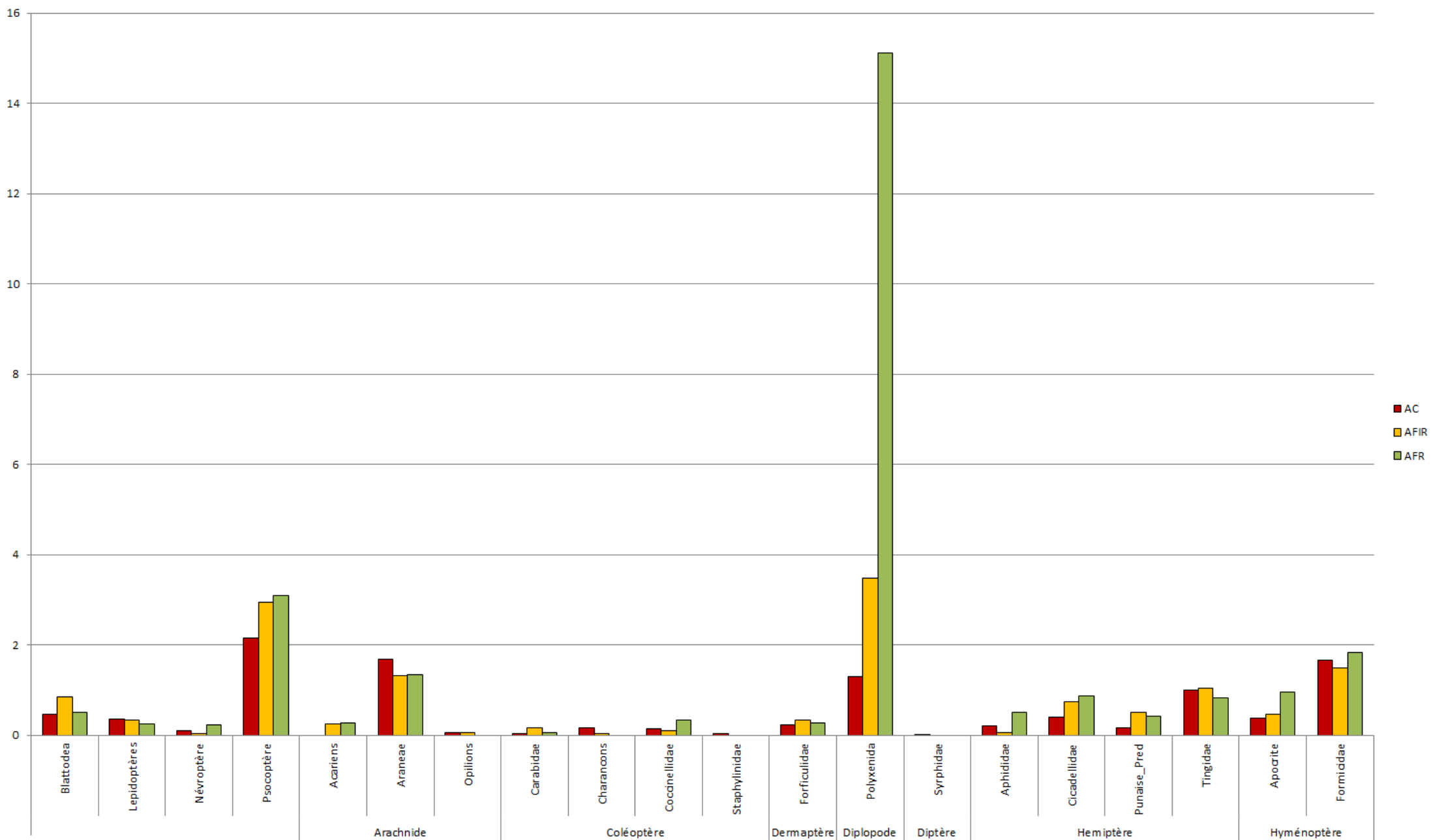
CLASSE	ORDRE	FAMILLE	GENRE	ESPECE	FONCTION	NOM COMMUN
Insecte	Coléoptère	Coccinellidae	Harmonia	axyridis	A/P	Coccinelle asiatique
			Coccinella	septempunctata		Coccinelle à 7 points
			Platynaspis	sp.		
			Propylea	quatuordecimpunctata		Coccinelle à damier
			Adalia	decempunctata		Coccinelle à 10 points
		Carabidae			A/P	
		Staphylinidae			A	
		Cantharidae	Cantharis	cryptica	A/P	
		Oedemeridae	Anogcodes	seladonius	P	
			Oedemera	nobilis	P	Oedemère noble
		Buprestidae	Anthaxia	sp.	P	
		Tenebrionidae	Omophlus	lepturoides	D	Ténébrion rouge et noir
		Cleridae	Trichodes	sp.	P/A	Trichodes
		Scarabaeidae	Tropinota	sp.	P/R/D	Cétoine
		Curculionidae	Lixus	acicularis	R	"Charancons"
	Hemiptère	Anthocoridae			A	"Punaises prédatrices"
		Miridae	Heterotoma	planicornis		
			Deraeocoris	flavilinea		
				lutescens		
			Adelphocoris	lineolatus?		
Nabidae						
Reduviidae	Empicoris	sp.				

Légende : P : Pollinisateurs - D : Détritviores - R : Ravageurs - A : Auxiliaires [de régulation biologique] - F : Fourmis - N : Neutre

Insecte	Hemiptère	Pentatomidae	Eurydema	ornata	N	Punaise rouge du chou
		Tingidae	Stephanitis	pyri	R	Tigre du poirier
		Aphididae	Aphis	pomi		Puceron vert du pommier
			Dysaphis	plantaginea		Puceron cendré du pommier
		Cicadellidae				
	Flatidae	Metcalfa	pruinosa			Cicadelle pruineuse
	Névroptère	Chrysopidae	Chrysoperla	carnea	A/P	Chrysope verte
	Diptère	Syrphidae	Sphaerophoria	scripta	A/P	Syrphe porte-plume
		Bombyliidae	Lomatia	sp.	P	
	Dermaptère	Forficulidae			A/D/R	
	Hyménoptère	Guêpes			A/P	
		Apidae	Apis	mellifera	P	Abeille européenne
		Tenthredinidae	Pristiphora	maesta	R	Tenthrede
		Formicidae			F	
	Psocoptère	Ectopsocidae			D	
		Stenopsocidae	Graphopsocus	cruciatus		
	Blattodea	Blattellidae	Ectobius	vinzi	D	
	Lepidoptera	Tortricidae	Cydia	pomonella	R	Carpocapse des pommes et des poires
		Yponomeutidae	Yponomeuta	malinella		Hyponomeute du pommier
		Cossidae	Zeuzera	pyrina		Zeuzère du poirier
Erebidae		Lymantria	dispar	Bombyx disparate		
Orthoptère	Acrididae	Omocestus	rufipes	N	Criquet noir ébène	
	Tettigoniidae	Tettigonia	viridissima	A	Grande sauterelle verte	
Arachnide	Acariens (Gamaside + Actinédide)			A		
	Opilions			A	"Faucheux"	
	Araneae			A		
Diplopode	Polyxenida			D		

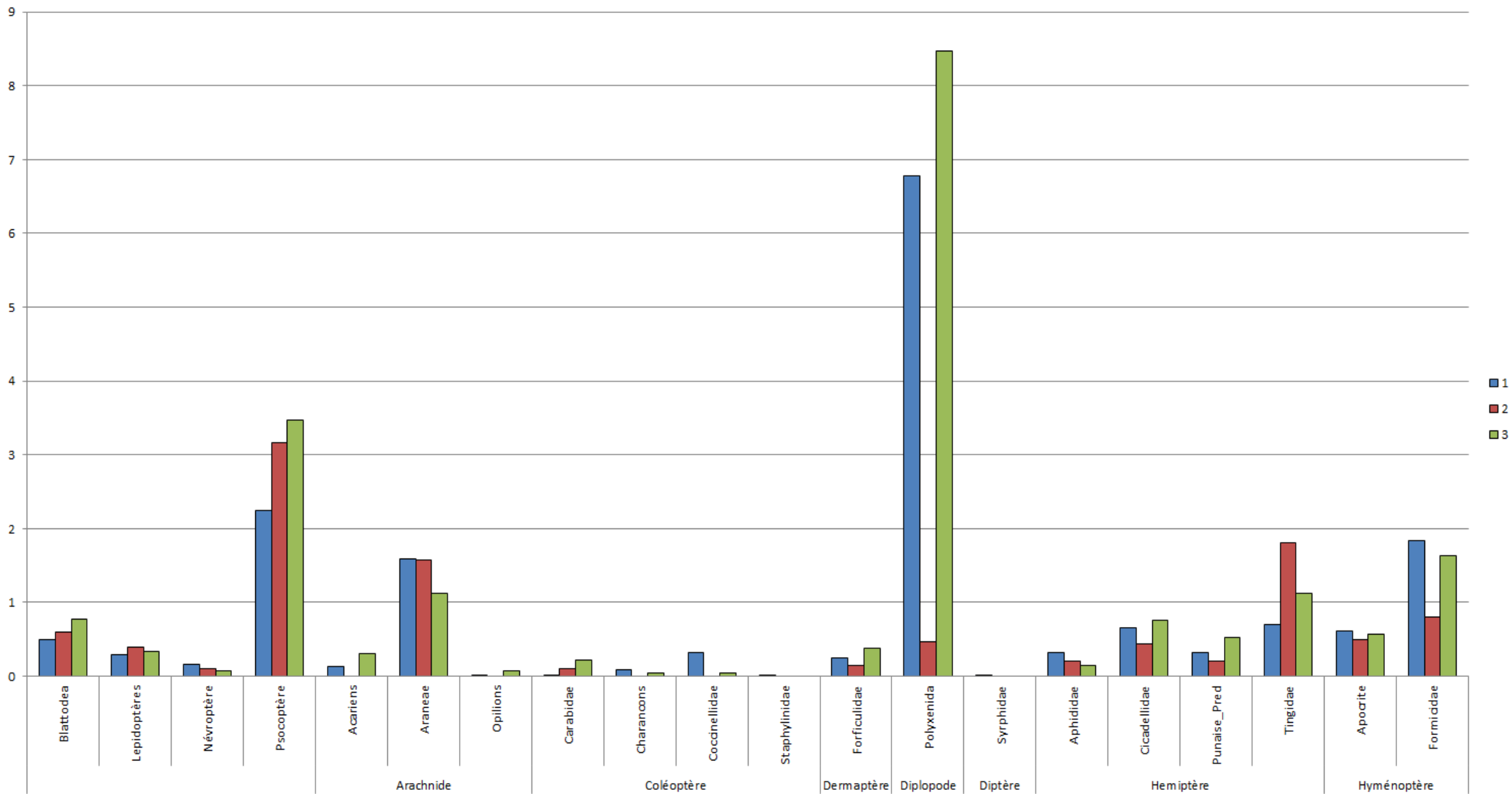
Annexe n°6 : Observations moyennes d'arthropodes (frappage, pièges cartons, observation des foyers) en fonction du facteur agroforestier.

Nombre moyen d'arthropodes échantillonnés



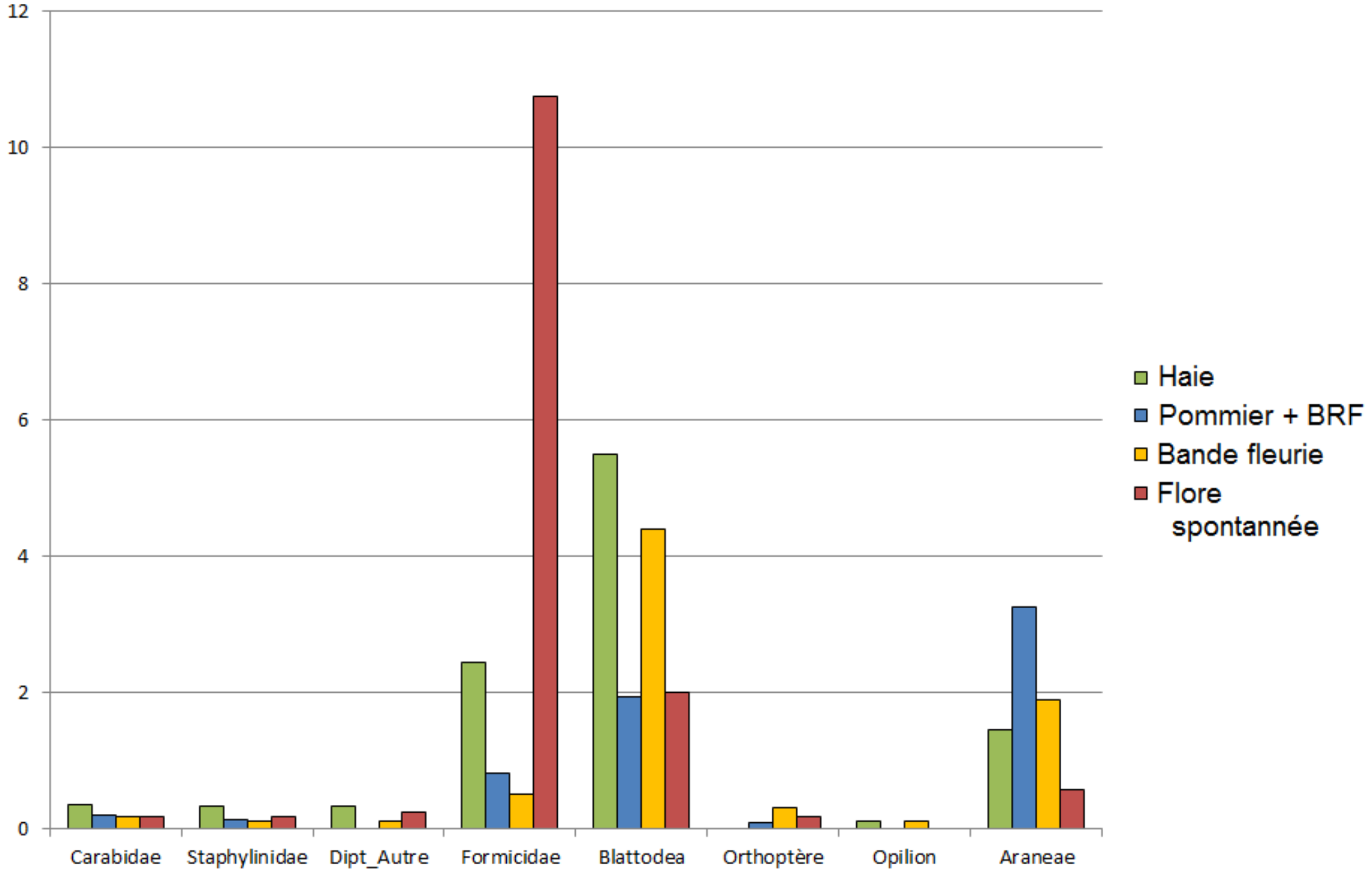
Annexe n°7 : Observations moyennes d'arthropodes (frappage, pièges cartons, observation des foyers) en fonction du facteur bloc.

Nombre moyen d'arthropodes échantillonnés



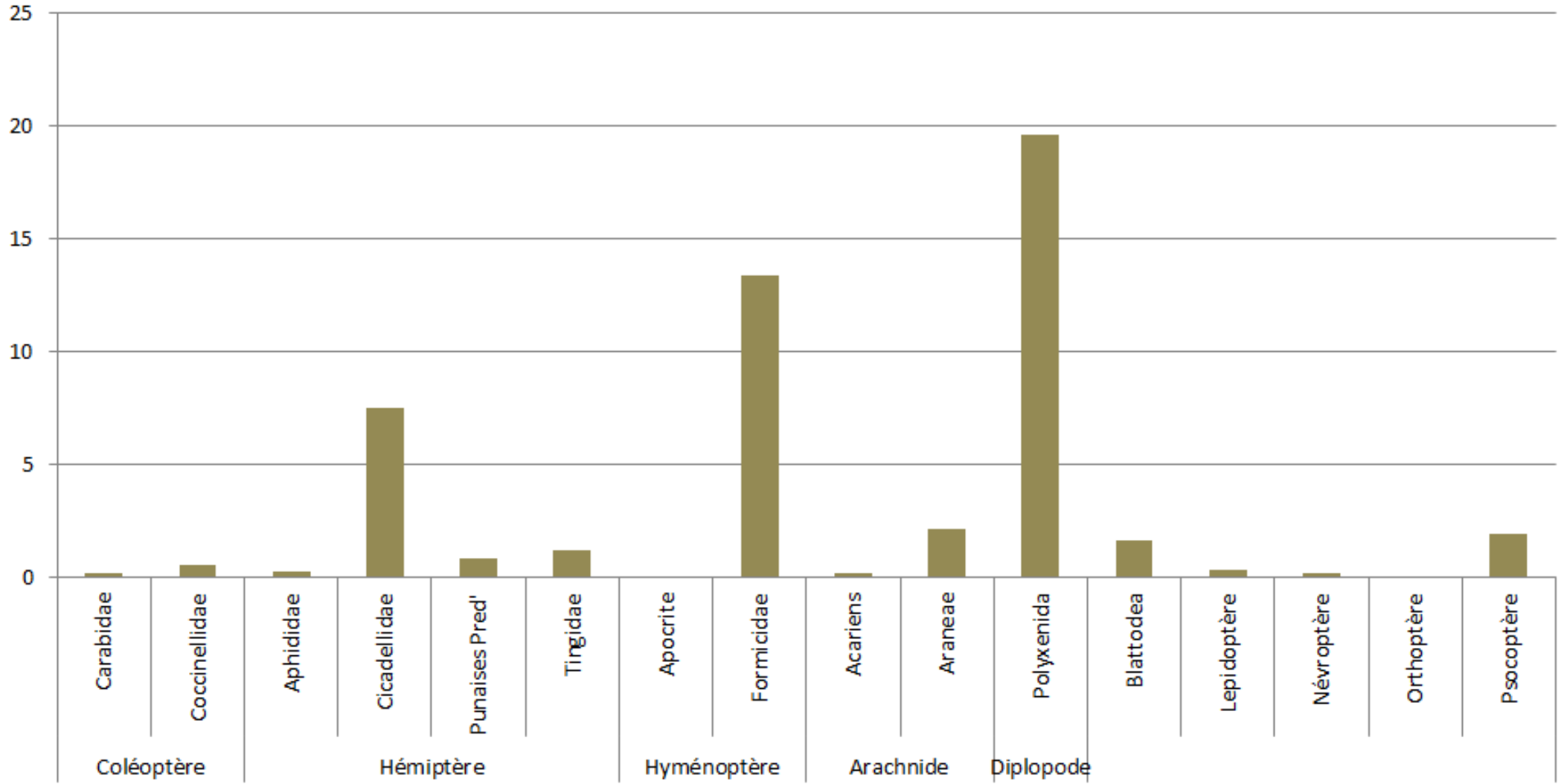
Annexe n°8 : Observations moyennes d'arthropodes dans les pots Barber, en fonction des différentes IAE.

Nombre moyen d'arthropodes échantillonnés



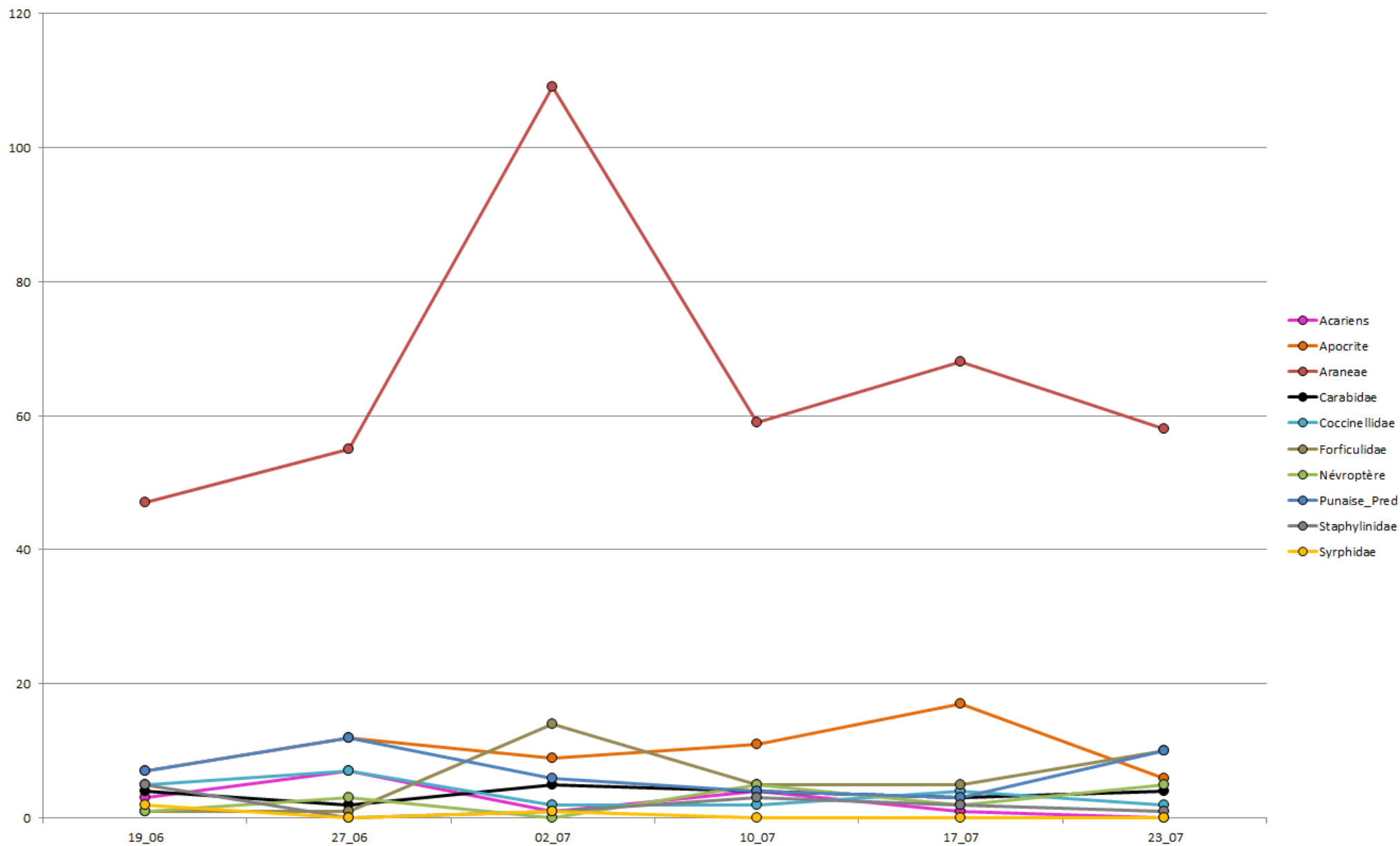
Annexe n°9 : Moyenne (par semaine) du nombre total d'arthropodes lors du frappage des haies de bordure.

Nombre total d'arthropodes échantillonnés par semaine



Annexe n°10 : Dynamique du total des observations des ennemis-naturels du site GAFAM, 2020.

Nombre total d'arthropodes échantillonnés par semaine



Annexe n°11 : Notations des espèces végétales en fleurs sur GAFAM.

Nom commun	Nom scientifique	Quantité (/3)
Bande-Fleurie		Total = 18
Phacélie	Phacelia tanacetifolia	5
Sainfoin	Onobrychis sp.	2
Coquelicot	Papaver rhoeas	2
Veronique	Veronica sp.	3
Rapistre	Rapistrum sp.	1
Liseron des champs	Convolvulus arvensis	1
Œillet d'Inde	Tagetes patula	1
Camomille allemande	Matricaria recutita	2
Souci officinal	Calendula officinalis	1
Flore spontanée		Total = 14
Millepertuis officinal	Hypericum perforatum	1
Alfalfa	Medicago sativa	2
Scrabieuse	Scabiosa sp.	3
Trépane en ombelle	Tolpis umbellata	1
Torilis des champs	Torilis arvensis	1
Liseron des champs	Convolvulus arvensis	2
Mourons des champs	Lysimachia arvensis	1
Blackstonie perfoliée	Blackstonia perfoliata	1
Laiteron délicat	Sonchus tenerrimus	1
Mauve des bois	Malva sylvestris	1
Haie		Total = 5
Potentielle rampante	Potentilla reptans	2
Torilis des champs	Torilis arvensis	1
Ronce sp.	Rubus sp.	1
Millepertuis perforé	Hypericum perforatum	1
TCR		Total = 2
Vergerette annuelle	Erigeron annuus	1
Torilis des champs	Torilis arvensis	1
Total au 19/06 = 39		

Nom commun	Nom scientifique	Quantité (/3)
Bande-Fleurie		Total = 4
Phacélie	Phacelia tanacetifolia	1
Alfalfa	Medicago sativa	1
Œillet d'Inde	Tagetes patula	1
Liseron des champs	Convolvulus arvensis	1
Flore spontanée		Total = 4
Scabieuse	Scabiosa sp.	2
Millepertuis officinal	Hypericum perforatum	1
Centauree du solstice	Centaurea solstitialis	1
Haie		Total = 3
Phacélie	Phacelia tanacetifolia	1
Torilis des champs	Torilis arvensis	1
Non-identifié	?	1
TCR		Total = 3
Paquerette vivace	Bellis perennis	1
Torilis des champs	Torilis arvensis	2
Total au 10/07 = 14		