ISARA

23 rue Jean Baldassini

69364 LYON CEDEX 07

INRAE UNITE ECODEVELOPPEMENT

Domaine Saint Paul Site Agroparc

84911 AVIGNON CEDEX 9

Etude du potentiel de régulation du carpocapse de la pomme par des poules pondeuses en verger-pâturé de pommiers

Mémoire de Fin D'Etudes

Promotion N° 50 (2017-2022)

Date de soutenance : 09/10/2022

Noémie Séon

Elève Ingénieur ISARA-Lyon

Directeurs de mémoire :

Madame Sara Bosshardt (Doctorante)

Monsieur Arnaud Dufils (Assistant Ingénieur)

Tuteur Pédagogique :

Monsieur Anthony Roume

Ce document ayant été réalisé par des Élèves-Ingénieurs de l'ISARA dans le cadre d'une convention avec : INRAE UNITE ECODEVELOPPEMENT, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine Isara.

Sommaire du Mémoire

TABLE DES ILLUSTRATIONS 5

TABLE DES ABREVIATIONS 7

REMERCIEMENTS 8

1. INTRODUCTION 1

1.1. CONTEXTE GENERAL DE LA PRODUCTION DE POMMES DANS LE VAUCLUSE 1
1.2. CONTEXTE AGRICOLE ET SCIENTIFIQUE 1
1.3. STRUCTURE D'ACCUEIL DU STAGE ET PARTENAIRES SCIENTIFIQUES 1
1.4. PROBLEMATISATION 2

2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 3

2.1. INTRODUCTION : RECONNECTER LES CULTURES PERENNES ET L'ELEVAGE 3
2.2. LE PATURAGE DE POULES DANS LES VERGERS : DES INTERACTIONS MULTIPLES ENTRE LES COMPOSANTES DE L'AGROECOSYSTEME 4
2.2.1. A l'échelle de l'exploitation : les conséquences de cette diversification 4
2.2.2. A l'échelle du verger-pâturé : de nombreuses interactions animal-sol-production fruitière 6
2.2.3. Une multitude d'autres interactions ajoutant de la complexité de gestion 8
2.3. LA GESTION DU CARPOCAPSE DES POMMES (*CYDIA POMONELLA*) PAR LES POULES EN VERGER 8
2.3.1. Le carpocapse des pommes (Cydia pomonella) un ravageur problématique 8
2.3.2. Cycle de vie du carpocapse 10
2.3.3. La quantification de la régulation du Carpocapse par les poules : une thématique peu explorée 11

3. MATERIELS ET METHODES 13

3.1. PRESENTATION GENERALE DES EXPERIMENTATIONS 13
3.1.1. Démarche générale 13
3.1.2. Synthèse des différentes expérimentations 13
3.1.3. Les lieux d'expérimentation 14
3.1.4. Objectifs et hypothèses des expérimentations 14
3.2. LES EXPERIMENTATIONS 15
3.2.1. SaniCarpo et PataFix : Etude du potentiel de régulation du carpocapse en conditions naturelles 15
3.2.2. PrédaCarpo : Etude des mécanismes de régulation du carpocapse en conditions contrôlées 18
3.2.3. Arthropodes : Exploration d'un contre-effet éventuel sur la biodiversité épigée du verger 23
3.3. METHODES D'ANALYSE STATISTIQUE 26

4. RESULTATS 28

4.1. SANICARPO ET PATAFIX : ETUDE DU POTENTIEL DE REGULATION DU CARPOCAPSE EN CONDITIONS NATURELLES 28
4.1.1. Des résultats de piégeages de carpocapses mitigés 28
4.1.2. Premières tendances de fruits piqués suites aux comptages de première génération 29
4.2. PREDACARPO : ETUDE DES MECANISMES DE REGULATION DU CARPOCAPSE EN CONDITIONS CONTROLEES 29
4.2.1. Observations qualitatives sur la dégradation de la strate herbacée par les poules 30
4.2.2. Pas de prédation des carpocapses en diapause par les poules 30
4.2.3. Les poules déterrent les proies cachées 31
4.2.4. Les caractéristiques de ce phénomène de déterrage en lien avec les comportements des poules 33
4.3. EFFET DE LA PRESENCE DE POULES SUR LES ARTHROPODES EPIGES DU VERGER 38
4.3.1. Inventaire général 38
4.3.2. Pas de différence significative de l'activité-densité des différents groupes entre les modalités « avec poules » et « sans poules » 39
4.3.3. Une variabilité dans les résultats de piégeage entre les deux parcelles de variété différente de pommes 39
4.3.4. Pas d'effet des poules sur la diversité des carabes 40

5. DISCUSSION 41

5.1. DISCUSSION DES RESULTATS 41

5.1.1. En fin de G1, impossible de conclure sur un éventuel effet de la présence des poules sur les émergences de carpocapse et sur les fruits piqués *41*
5.1.2. Pas d'observation de la consommation directe des carpocapses dans l'expérimentation PrédaCarpo *42*
5.1.3. Mais certains mécanismes ont été mis en avant concernant un éventuel impact indirect des poules sur les populations de carpocapses en diapause *43*
5.1.4. Difficile de conclure sur un potentiel impact des poules sur les arthropodes *44*
5.2. PRISE DE RECUL 45
5.2.1. Imprévus liés aux aléas climatiques *45*
5.2.2. L'expérimentation dans une ferme qui impose un cadre de contraintes *46*
5.2.3. Des dispositifs expérimentaux soumis à une complexité importante *46*
5.3. DISCUSSION GENERALE 48
5.3.1. Critiques et propositions pour de nouveaux protocoles *48*
5.3.2. Des protocoles innovants conçus et mis en place *50*
5.3.3. Perspectives pour la recherche *51*
5.3.4. Perspectives pour les agriculteurs *52*
5.3.5. Perspectives pour la gestion du carpocapse *52*
6. REFLEXION AUTOUR DE LA QVT 54
7. CONCLUSION 55
7.1. CONCLUSION GENERALE DU STAGE 55
7.2. BILAN PERSONNEL ET CONFRONTATION A LA CHARTE D'ETHIQUE DE L'INGENIEUR 55
8. LISTE BIBLIOGRAPHIQUE 57
ANNEXES 66

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma synthétique de quelques interactions en jeu dans un contexte d'intégration de poules pondeuses en verger de pommiers. Focus sur le carpocapse de la pomme (Cydia pomonella) 4
Figure 2 : Cycle de vie du carpocapse des pommes (Cydia pomonella). Figure réalisée à partir de photos issues de (Balachowsky 1966), (Ecophytopic 2018), (FMC France 2019), Noémie Séon 10
Figure 3 : A gauche, schéma du plan d'expérience avec disposition spatiale des parcelles (échelle non respectée). A droite, vue satellite des parcelles (en orange) au sein de la ferme de la Durette (Géoportail 2022) 16
Figure 4 : Photo d'une parcelle de l'expérimentation PataFix, après baisse des filets Alt'Carpo jusqu'au sol 16
Figure 5 : Schéma synthétique du dispositif expérimental (échelle non respectée) 17
Figure 6 : Photo aérienne de la parcelle expérimentale. Au fond : le poulailler relié à la modalité "avec poule", au premier plan de la photo la modalité « sans poules ». Au milieu, la parcelle est partagée par un grillage à poule non franchissable. 18
Figure 7 : Schéma de la parcelle et du dispositif expérimental 19
Figure 8 : Photo d'une proie : un cocon de carpocapse sur support cartonné découpé 20
Figure 9 : système 1 : sardine + fil de pêche + proie 20
Figure 10 : Fente par laquelle une larve en diapause est visible, disposée sur chaque tronc 21
Figure 11 : à droite un système de tronc de chêne évidé. A gauche une caméra à détection de mouvement/piège photo 21
Figure 12 : En bleu le positionnement des suivis dans la journée . En noir la période où les poules ne pâturent pas : elles sont enfermées dans le poulailler 22
Figure 13 : Photos des pièges BARBER en place, à droite : un piège recouvert du grillage anti-poules 24
Figure 14 : Graphique du nombre de carpocapses adultes piégés en cumulé 28
Figure 15 : Histogramme présentant le pourcentage de fruits piqués selon des modalités « poules » et « sans poules » et les dispositifs expérimentaux. A gauche, les pourcentages pour l'expérimentation Patafix (deux variétés). A droite, les pourcentages pour l'expérimentation SaniCarpo (les deux variétés). En haut des barres, la somme des fruits comptés pour tous les arbres de chaque parcelle (Source : Sara Bosshardt) 29
Figure 16 : Photos de l'évolution de la parcelle sur un mois, modalité avec poules. Les dates des photos sont, de gauche à droite : 1/03/22, 8/03/22, 15/03/22, 23/03/22, 29/03/22 30
Figure 17 : Boxplot du pourcentage de proies (proies avec carpocapse et proies sans carpocapse confondues, soit 48 par modalité) déterrées à chaque relevé. Entre chaque relevé d'une répétition, chaque proie déterrée était ré-enterrée. p = « avec poules » et sp= »sans poules » 31
Figure 18 : Dynamique de déterrage des proies en fonction du temps de pâturage par répétition dans la modalité avec poules. En abscisse : le temps de pâturage net des poules en heures. En ordonnée, le pourcentage de proies (sur les 48 proies pour chaque répétition) ayant été au moins une fois remises à la surface durant la répétition, c'est-à-dire une proie déterrée une fois est comptée comme déterrée jusqu'à la fin de la répétition. 32
Figure 19 : Graphique de Kaplan-Meier représentant l'évolution au cours du temps des probabilités de non-déterrage des proies. La courbe représente la probabilité qu'une proie soit encore enterrée au-delà d'un temps donné. Ligne pointillée : temps de survie médian. Zone grisée : intervalle de confiance. 32
Figure 20 : Graphique de Kaplan-Meier représentant l'évolution au cours du temps des probabilités de non-déterrage des proies. Les courbes de différentes couleurs représentent les courbes de probabilité pour les différentes répétitions. P-value : test de log-Rank, comparaison des répétitions entre elles. Lignes pointillées : temps de survie médian pour chaque répétition. 33
Figure 21 : A gauche, Heatmap des observations de déterrage des proies dans la parcelle avec poules. Cette carte présente, par un gradient de couleur pour chaque zone, le nombre de fois où les proies ont été remises à la surface (en cumulé) au cours des quatre répétitions (la valeur représentée est la moyenne des fréquences de déterrage pour les deux proies cachées dans chacune des zones). Le quadrillage représente le zonage avec un numéro dans chaque zone. Les croix représentent les zones non étudiées. P= le poulailler. A droite, représentation schématique de la parcelle 33
Figure 22 : Boxplot du pourcentage de proies déterrées en fonction du type de zone (sous un rang ou dans l'inter-rang). Chaque point représente le pourcentage de proies déterrées pour un relevé sur toutes les proies cachées dans les zones de rang et sur toutes les proies cachées dans les zones d'inter-rang. Losange rouge=moyenne. 34
Figure 23 : Barplot des comportements avec le détail des différentes actions. La fréquence d'observation du comportement en pourcentage représente la part de chaque comportement parmi toutes les observations faites durant les répétitions 1, 2 3 et 4. 35

Figure 24 : Graphique en mosaïque présentant la part de chaque comportement en fonction des heures de la journée. Chaque colonne correspond à une plage horaire d'observation des comportements. Les quatre répétitions ont été regroupées. *35*
Figure 25 : AFC des variables comportement et heure de la journée. Le point 9 indique les observations de comportement qui ont eu lieu entre 9h et 10h, le point 10 entre 10h et 11h, etc... ..... *36*
Figure 26 : AFC des variables comportements et poule (chaque poule étant signifiée par la couleur de sa bague). *37*
Figure 27 : Ces deux cartes sont des représentations spatiales des données. Le quadrillage représente le zonage de la parcelle avec un numéro dans chaque zone. Les croix représentent les zones non étudiées. P= le poulailler. *38*
Figure 28 : Histogramme du nombre moyen d'individus piégés sur les 2 parcelles par groupe et par modalité (« sans poules » et « avec poules »). *39*
*Figure 29 : Boxplot du nombre total d'individus piégés (tous groupes confondus) par modalité et par parcelle. Chaque point représente la somme des individus piégés dans les 3 pots à une date de relevé (7 dates en tout). Codes de significativité : comparaison du nombre d'individu piégé entre les 2 parcelles de chaque modalité, ** p-value (0.001, 0.01], ns : non significatif.* *39*
Figure 30 : Source des données : Terrain d'expériences du CEFE, CNRS, 1968-2022 ..... *46*
Figure 31 : Evolution des hauteurs d'herbe dans les deux parcelles accueillant l'expérimentation PataFix et Arthropodes. Source : Sara Bosshardt. *47*
Figure 32 : A gauche, exemple de proie utilisée répétitions 1, 2, 3 (attachée en haut par un fil de pêche passant par un petit trou). A droite, exemple de proie utilisée répétition 4 (attachée par un fil de pêche entourant le cocon). *49*
Figure 33 : Evolution temporelle des piégeages par groupe sur les 7 semaines d'expérimentation *50*
Figure 34 : A gauche, le tableau utilisé lors du test de sélectivité. A droite, le plateau avec les proies disposées dans l'ordre du tableau (de gauche à droite) *70*
Figure 35 : tableau de résultats du test de Sélectivité *71*
Figure 36 : Poule prenant un "bain de poussière" dans un trou type « nid de poule » *73*
Figure 37 : Photos de l'évolution de la parcelle en 1 mois, modalité avec poules. Les dates des photos sont, de gauche à droite : 2/03/2022, 8/03/2022, 15/03/2022, 23/03/2022, 30/03/2022 ..... *73*
Figure 38 : Oiseaux sauvages pris par les pièges photos de l'expérimentation PrédaCarpo *74*
Figure 39 : En haut, Heatmaps des fréquences d'observation du comportement de recherche de nourriture dans l'environnement (RNP). Cette carte présente par un gradient de couleur pour chaque zone le nombre de fois où le comportement RNP a été observé durant chacune des 4 répétitions. En bas : Heatmaps des observations de déterrage des proies dans la parcelle avec poules. Cette carte présente par un gradient de couleur pour chaque zone le nombre de fois où les proies ont été remise à la surface (en cumulé) au cours d'une répétition (la valeur représentée est la moyenne des fréquences de déterrage des 2 proies cachées dans chacune des zones). *75*
Figure 40 : Boxplot du pourcentage de proies remis à la surface en fonction du moment de la journée (après-midi ou matin). Chaque point représente le pourcentage de proies déterrées pour un relevé. Losange rouge=moyenne. *76*
Figure 41 : Graphique en mosaïque représentant la part de chaque comportement dans le budget-temps de chaque poule. *77*
Figure 42 : Tableau des moyennes de pourcentages de fruits piqués selon la prcelle (différentes variétés) et la modalité *78*

Tableau 1 : Tableau synthétique de présentation des expérimentations _____ *14*
Tableau 2 : Grille d'observation de l'état des dispositifs _____ *21*
Tableau 3 : Ethogramme de l'expérimentation « PrédaCarpo » _____ *22*
Tableau 4 : Tableau synthétique du nombre cumulé de carpocapses adultes piégés entre le 14/04 et le 28/07/2022 _____ *28*
*Tableau 5 : Tableau comparatif des fréquences des différents états observés des proies pouvant témoigner de la prédation par les poules. Significativité des tests : ANOVA sur les moyennes des fréquences de l'état observé entre les modalités avec poules et sans poules. Codes de significativité : *** p-value [0, 0.001].* _____ *30*
Tableau 6 : Tableau de contingence en pourcentage, pour chaque type de zone : dans le rang et zone d'inter-rang, part de chaque comportement sur le total de toutes les observations de comportement. Sommes sur les 4 répétitions. _____ *36*
Tableau 7 : tableau de contingence en pourcentage, proportion de chaque comportement observé par poule __ *37*
Tableau 8 : Nombre d'individus piégés par espèce dans les deux modalités _____ *40*

Tableau 9 : Comparaison des différents indicateurs de biodiversité des Carabidae pour les deux modalités « avec poules » et « sans poules » en prenant en compte tous les individus piégés au cours de la période d'expérimentation _____ *40*
Tableau 10 : Résultats des cages à émergence _____ *72*

Table des abréviations

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

Isara : Institut Supérieur d'Agriculture et d'Agroalimentaire Rhône-Alpes

PEI : Partenariat Européen pour l'Innovation

PEI DEPASSE : PEI pour le DEveloppement des cultures Pérennes ASSociées à l'Elevage

IFPC : Institut Français des Productions Cidricoles

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

ITK : Itinéraire technique

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

GIS « Fruits » : Groupement d'Intérêt Scientifique « Fruits »

Bio de PACA : Fédération régionale des agriculteurs bio de Provence Alpes Côtes d'Azur

GRAB : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique

Département ACT : Département Action Transitions et Territoires de INRAE

Département SAD: Ancien département Systèmes Agraires et Développement de l'INRA

QVT : Qualité de Vie au Travail

IESF : Société des Ingénieurs et Scientifiques de France

AB : Agriculture Biologique

FREDON : Fédération régionale de lutte et de défense contre les organismes nuisibles

CEFE : Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, unité de recherche du CNRS

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

PCR : Polymerase chain reaction

Remerciements

Tout d'abord, un immense merci à Sara Bosshardt et Arnaud Dufils, mes directeurs de mémoire pour votre écoute au quotidien et votre disponibilité. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée et pour tout ce que ce stage m'a apporté. Par-dessus tout, merci pour vos TRES attentives relectures ! Merci tout particulièrement à Sara, tu as très bien su porter tes 2 casquettes. Une casquette d'encadrante, toujours soucieuse de mon épanouissement, me laissant juste ce qu'il faut de liberté, exigeante et juste à la fois. Nous avons formé une belle équipe. Et une seconde casquette d'amie, qui m'a initié avec tout ton cœur à la douce vie Avignonnaise, m'a fait découvrir tes bons plans et m'a permis de très belles rencontres. Sans vouloir passer pour une lèche-botte, je te souhaite de tout mon cœur une bonne continuation dans ton aventure de thèse qui, j'en suis sûre, ne sera pas une thèse « au rabais » !

Merci à Anthony Roume, mon tuteur pédagogique pour vos relectures et précieux conseils.

Merci Anne Guérin et Pascale Guillermin, partenaires scientifiques du stage et plus largement le GIS Fruits, soutien financier.

Merci aux chercheurs que j'ai sollicités durant mon stage pour leur expertise et qui m'ont gracieusement apporté leur aide : Bruno Rasmussen pour avoir fortement remis en question mes protocoles, Sylvaine Simon pour ses encouragements et conseils, Vitor Ferreira pour ce regard d'éthologue et Cécile Thomas qui m'a permis de plonger dans le monde passionnant de l'identification des carabes.

Un énorme merci à Lise Roy, chercheuse du CEFE, qui a rendu possible cette expérimentation hors du commun sur le terrain d'expérimentation du CEFE. Merci pour ta grande bienveillance et tes encouragements durant ces 2 mois passés en ta compagnie au CEFE. Merci pour ta perpétuelle bonne humeur et de m'avoir partagé avec passion tes bouillonnantes idées et projets ! ! Merci à toute l'équipe du terrain expérimental du CEFE pour la conception, la mise en place et l'entretien du poulailler et des parcours de l'expérimentation.

Merci aux agriculteurs de la ferme de la Durette, qui ont accepté de subir nos expérimentations.

Comment oublier Vérane, accompagnatrice technique des expérimentations avignonnaises mais aussi morale avec toujours une petite blague sous le coude, racontée bien sûr avec l'accent provençal « C'est l'histoire de 3 nains… ».

Je remercie les stagiaires d'Ecodev : Floriane, Mélanie, Matilda, Kipédène (qui ont partagé avec moi cette « cave » qui nous servait de bureau), Mamadou et Abal.

Merci à toute l'équipe d'écodev', autant à la team cantine qu'à la team tupperware sans jugement de valeur ! Merci pour les bonnes tranches de rire à table, les blagues et anecdotes limites qu'il n'est pas opportun de citer ici, les aides ponctuelles sur R, et les brainstormings autour de nos interrogations professionnelles et personnelles.

Merci bien sûr à mes 6 poulettes de Montpellier qui n'ont pas hésité à sacrifier leur vie pour la science, oups… mais qui ont gentiment attendu la fin des expérimentations, ouf ! RIP les poules : House, Aibasquaise, Loulou, AndBear, Idor, Opot.

Merci à l'Isara pour ces 5 années extraordinaires et le bagage qu'elle me laisse, tant sur le plan professionnel que personnel. J'y ai passé les années les plus riches de ma vie et je souhaite de tout cœur que les futurs étudiants aient la même chance que moi de suivre ces enseignements pointus dans une ambiance extraordinaire.

Merci à mes parents, toujours là pour moi, que ce soit pour m'encourager dans les moments de stress, pour me mettre un « coup de pression » quand j'en ai besoin ou pour relire mes fautes d'orthographe.

Aussi merci à ma rayonnante Marion, qui a trouvé le moyen de venir me rejoindre ici, comme si on manquait de soleil à Avignon...

Enfin, ce n'est pas sans un petit pincement au cœur que je remercie mes Sexy'colocs : Jackie, Renaud, Benoit, Owen et particulièrement Jérémie. Mon chef sauss' à l'oreille attentive et à la répartie percutante (attention aux chevilles). Tes éclats de rire résonneront j'en suis sûre longtemps dans ma tête quand je repenserai à ces 6 mois inoubliables à Avignon.

1. Introduction

1.1. Contexte général de la production de pommes dans le Vaucluse

La pomme représente la première production fruitière en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), ce qui fait de cette région la première région productrice de pommes de France (Agreste 2021a) avec 10 000 ha de vergers de pommes et 18% de la production nationale en 2021 (Agreste 2022). Cette production est très importante dans le Vaucluse, avec près de 343 000 tonnes récoltées en 2019 (Agreste 2021a), et est constituée en grande majorité de trois variétés de pommes à couteau : les variétés Gala, Golden et Granny (FranceAgriMer 2021). Malgré un recours croissant à des moyens de lutte non-chimiques contre les ravageurs des fruitiers (Boreau de Roincé et al. 2010), la pomme reste une des productions avec le plus fort IFT[1] avec une moyenne en France de l'ordre de 30 IFT (Agreste 2021).

Le carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* (Linnaeus, 1758) est considéré comme le ravageur le plus important des vergers de pommiers dans le monde (Guermah 2019). La larve de ce lépidoptère attaque exclusivement les fruits et peut causer de fortes pertes de rendement allant jusqu'à la perte entière de la récolte s'il n'est pas maitrisé (Jacquot et al. 2020). Le carpocapse représente aujourd'hui un enjeu majeur pour la production de pommes en Provence, particulièrement dans la filière bio, où il occasionne de fortes pertes de rendement. Ainsi, 90% des traitements insecticides en verger de pommiers sont destinés à lutter contre le carpocapse (Matar 2015).

1.2. Contexte agricole et scientifique

L'enjeu actuel de dépendance aux intrants des filières arboricoles du sud de la France et particulièrement du Vaucluse pousse les agriculteurs à explorer des alternatives à la gestion chimique des bio-agresseurs. Dans ce sens, certain.e.s arboriculteur.rice.s se diversifient et introduisent des animaux et notamment des volailles dans leurs vergers pour de multiples raisons, l'une d'entre elles étant une potentielle régulation des ravageurs par certaines espèces animales (par exemple par les poules pondeuses). Face au manque de références sur ce type de pratique, plusieurs partenaires se sont associés dans le cadre du PEI[1] DEPASSE (Développement des cultures Pérennes ASSociées à l'Elevage). Dans ce PEI, Bio de PACA, le GRAB, l'unité Ecodéveloppement de INRAE PACA, le Parc Naturel Régional des Alpilles et d'autres acteurs se proposent d'explorer les pratiques de pâturage d'animaux en cultures pérennes, afin d'identifier leurs atouts, et d'étudier leurs impacts socio-économiques et agronomiques pour accompagner au mieux ces démarches agroécologiques chez les arboriculteur.rice.s de la région. Ainsi, l'introduction de poules pondeuses en verger de pommiers représente une des pratiques de diversification explorées.

1.3. Structure d'accueil du stage et partenaires scientifiques

Différentes structures sont impliquées dans la réalisation de ce stage. En ce qui concerne l'encadrement, le stage a été mené au sein de l'unité Ecodéveloppement INRAE PACA (Avignon), unité qui fait elle-même partie du département ACT (Action Transitions et Territoires) de INRAE. De plus, deux structures associées au GIS « Fruits » (Groupement d'Intérêt Scientifique de la filière fruitière française impliqué dans la recherche, l'accompagnement et la formation avec un axe de recherche important sur la connaissance et la maitrise des bio-agresseurs) sont partenaires de ce projet de stage : Agrocampus-Ouest et l'IFPC (Institut Français des Productions Cidricoles). D'un point de vue financier, le GIS « Fruits », qui accompagne des projets innovants, participe aussi au financement de stages de mémoires

[1] Pour les abréviations : voir la Table des Abréviations

de fin d'études comme celui-ci. Certaines expérimentations ont aussi été permises par des financements issus de la Fondation de France.

D'un point de vue scientifique, mon stage vient en appui à une thèse démarrée en octobre 2020 par Sara Bosshardt au sein de l'unité Ecodéveloppement. Cette thèse a pour objectif de caractériser et de modéliser les interactions animal/végétal, dans le but de travailler sur la conception de stratégies de pilotage de vergers pâturés par des volailles. Deux services écosystémiques sont plus précisément étudiés dans cette thèse : la gestion de l'enherbement et la régulation de ravageurs des fruitiers par les poules pondeuses. L'étude de la gestion de l'enherbement ne sera pas du tout détaillée dans ce rapport, même si j'ai, durant ce stage, participé à différents travaux et relevés liés à ces expérimentations. En revanche, mon stage avait pour but d'approfondir, par une approche expérimentale, les connaissances concernant un éventuel service de régulation des ravageurs par les poules pondeuses. Plus précisément, il s'agissait d'étudier le potentiel de régulation d'un ravageur particulier, le carpocapse des pommes.

Ce thème de stage s'inscrit bien dans la stratégie de la structure d'accueil et de ses évolutions stratégiques. En effet, l'ancêtre du département ACT, le département SAD (Systèmes Agraires et Développement) fondé en 1979, est né d'un constat sur l'existence de mutations majeures et de transformations irréversibles du secteur de l'agriculture vers la modernisation après la seconde guerre mondiale. En effet, cette modernisation a fait face à de nombreuses critiques et a entrainé un sentiment de désenchantement pour certains agronomes. C'est alors que des chercheurs de l'INRA se sont détachés des orientations classiques de recherche de l'époque pour avancer vers une agronomie plus systémique (avec notamment la prise en compte des sciences socio-économiques)(Cornu 2021), et tournée vers l'action (une recherche « pour, sur et avec les acteurs » (INRAE 2021)). Ce sujet de mémoire s'inscrit parfaitement dans l'histoire du département et les orientations actuelles du département ACT. En effet, ce sujet interdisciplinaire croise sciences végétales et animales avec des outils permettant de comprendre les interactions complexes au sein d'agroécosystèmes diversifiés promus et mis en place par des acteurs de terrain. Par ailleurs, les approches mobilisées sont à l'interface entre différentes disciplines (agronomie, écologie des populations et du paysage, éthologie, etc…).

1.4. Problématisation

Ce stage se propose de répondre à la problématique suivante : **Dans le contexte de production de pommes du sud-est de la France, quel est le potentiel de régulation du carpocapse de la pomme par des poules pondeuses en verger-pâturé de pommiers ?**

Une autre question vient compléter cette problématique : les poules peuvent-elles avoir un impact non-désiré sur les arthropodes épigés du verger et notamment sur certains auxiliaires des pommiers ?

Dans un premier temps, nous nous appuierons sur une synthèse bibliographique afin d'explorer les multiples interactions en jeu dans un verger de pommiers pâturé par des poules, de mieux connaitre le ravageur ciblé, *Cydia pomonella*, et de réaliser un état de l'art concernant sa régulation par les poules afin de mettre en avant les trous de connaissances sur ce sujet. Une partie « matériels et méthodes » présentera, dans un second temps, les trois protocoles imaginés et/ou mis en place durant ce stage : 1) l'étude du potentiel de régulation du carpocapse en conditions naturelles, 2) l'étude des mécanismes de régulation du carpocapse en conditions contrôlées et enfin, 3) l'exploration d'un contre-effet éventuel sur la biodiversité épigée du verger. Ensuite, les résultats issus des expérimentations obtenus à ce jour seront présentés puis discutés. Enfin, nous aborderons des aspects de Qualité de Vie au Travail et conclurons.

2. Synthèse bibliographique

2.1. Introduction : reconnecter les cultures pérennes et l'élevage

L'ultra-spécialisation de l'agriculture, notamment en France, a mené à une déconnection spatiale et disparition des interactions écologiques entre productions animales et végétales autrefois interconnectées (Clark 2004). D'après le recensement agricole de 2020, les exploitations en polyculture-élevage représentent en nombre 10,4% des exploitations françaises, et ont subi une baisse de 41% en 10 ans (Agreste 2021b). Cette spécialisation de l'agriculture a mené à une augmentation des rendements et de l'efficience du travail en UTH/ha (Clark 2004). Cependant, un certain nombre de préoccupations émergent et remettent en question le modèle actuel en ce qui concerne par exemple l'autonomie alimentaire de certaines régions, la forte dépendance aux intrants des exploitations agricoles, le bien-être animal, la dégradation de l'environnement, les pertes de biodiversité, la récente hausse des prix des engrais et aliments pour animaux, les incidents climatiques de ces dernières années (Wagner et al. 2021; Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) 2019; Rosenberg et al. 2019; d'Hardivilliers 2022).

La réintroduction de l'élevage dans les systèmes de cultures spécialisés pourrait représenter un levier important pour améliorer la durabilité des exploitations en favorisant par exemple un certain nombre de services écosystémiques (Jose, Walter, Mohan Kumar 2019). La pratique d'introduction de poules dans les vergers peut être considérée comme du sylvopastoralisme qui est une pratique de l'agroforesterie qui se définit comme « *la combinaison intentionnelle de bétail (bovins, ovins, caprins, volailles, porcs, etc.) avec des arbres ou d'autres plantes ligneuses vivaces et des fourrages sur la même unité de terrain résultant en des avantages mutuels pour chaque composant* »(Jose, Walter, Mohan Kumar 2019). Nous parlerons dans ce rapport de vergers-pâturés pour désigner la pratique étudiée. Les vergers-pâturés doivent être distingués des « parcours arborés dans lesquelles pâturent des poules » car la production principale est, dans le premier cas la production fruitière, et dans le second cas les produits issus de l'élevage de poules (Bosshardt et al. 2022).

Les freins sociotechniques et réglementaires à cette reconnexion culture/élevage sont nombreux comme par exemple le manque de connaissances et de formation des agriculteurs en lien avec la perte de savoir-faire en élevage (Hilimire 2011; Soudet 2021), la disparition des traits de rusticité des animaux (Weigend, Romanov 2002), les règlementations sanitaires et concernant le bien-être animal de plus en plus exigeantes (normes de biosécurité, grippe aviaire (Biofil 2022)).

Les vergers pâturés représentent un objet d'étude complexe où de nombreuses composantes rentrent en interaction. Plus spécifiquement, cette synthèse bibliographique propose de balayer de manière non exhaustive certaines interactions entrant en jeu dans les vergers pâturés par des poules, en mettant en avant les principaux manques de connaissances. Nous décrirons ensuite le ravageur en question en détaillant une interaction particulière : celle entre la présence de poules en vergers et les populations du ravageur des pommiers.

2.2. Le pâturage de poules dans les vergers : des interactions multiples entre les composantes de l'agroécosystème

La Figure 1 représente de manière non exhaustive les différentes composantes de l'agroécosystème entrant en jeu dans un système de verger de pommiers pâturé [2] par des poules. Les flèches correspondent aux principales interactions reliant ces composantes dont certaines sont détaillées dans la suite du texte.

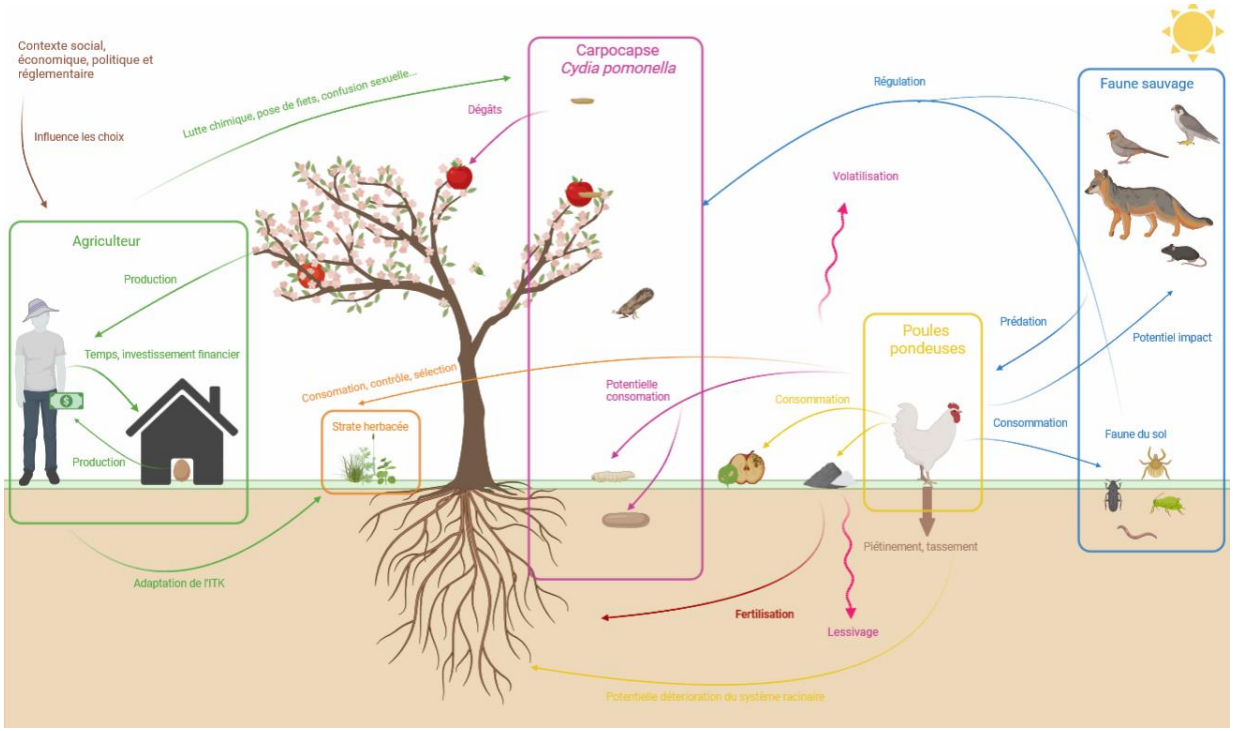


Figure 1 : Schéma synthétique de quelques interactions en jeu dans un contexte d'intégration de poules pondeuses en verger de pommiers. Focus sur le carpocapse de la pomme (Cydia pomonella)

2.2.1. A l'échelle de l'exploitation : les conséquences de cette diversification

2.2.1.1. Un éventuel intérêt économique

L'introduction de poules en système arboricole « classique » peut offrir un certain nombre d'avantages économiques comme celui de générer de nouvelles sources de revenus. En effet, la demande en œufs plein air est en constante augmentation (Yates et al. 2007) et représente aujourd'hui 23,2% de la production d'œufs en France (CSA 2021). Des témoignages d'arboriculteur.rice.s ayant mis en œuvre cette pratique (Osaé Solagro 2014, entretiens de L. Bodineau et D. Jammes) insistent sur le fait que la vente d'œufs peut être complémentaire à la vente de fruits à condition de développer la vente directe (l'œuf étant un très bon produit d'appel). Ce produit représente une source de revenu non-négligeable avec jusqu'à 10% du chiffre d'affaires pour certain.e.s arboriculteur.rice.s (ADAbio

[2] Peut-on parler de « pâturage » pour des poules ? La définition stricte du pâturage est l'« *action de faire pâturer le bétail* » , le bétail étant le « *nom désignant les animaux concourant à la production agricole, la volaille exceptée* » (Larousse 2022). La poule est donc exclue de l'action de pâturage. Cependant, ce terme est employé par les arboriculteur.rice.s qui parlent même de pâturage tournant, d'agro-pastoralisme avec des volailles ou d'élevage de volailles en pâturage. L'utilisation de ce terme remet ainsi la ressource en herbe au centre du système. Cette idée est cohérente avec des études scientifiques concernant la consommation d'herbe par des monogastriques (Roinsard et al. 2017). Dans notre cas, nous avons aussi choisi de conserver ce terme de pâturé/pâturage, dans la mesure où les poules impactent de manière significative la strate herbacée.

2019). La production, plutôt régulière dans l'année malgré une légère baisse hivernale, est un levier de trésorerie important. Certain.e.s arboriculteur.rice.s considèrent cet atelier comme une assurance face aux aléas climatiques (Biofil 2022). La qualité gustative des œufs est aussi souvent mise en avant, mais il est difficile d'affirmer une meilleure qualité nutritionnelle des œufs comme un argument de vente (N.B : la qualité nutritionnelle des œufs selon le mode de production est très discutée (Hidalgo et al. 2008; Kerhoas et al. 2010)).

Le faible coût d'alimentation du lot de poules en verger est aussi un des avantages économiques souvent abordé. En effet, en pâturant dans un verger, les poules ont accès à d'autres sources de nourriture (herbes, invertébrés…) qui viennent compléter une partie de leurs besoins notamment les besoins protéiques (Zandbergen 2016) et potentiellement réduire les coûts en aliment complémentaire. Ce constat est aussi valable pour les poulets de chair. A titre d'exemple, (Koning 2018) a nourri avec un régime réduit en protéines à -50% des poulets en pâturage, et a obtenu un taux de conversion alimentaire équivalent à celui des poulets nourris avec une ration complète . Par ailleurs, les marges obtenues étaient jusqu'à 21% plus importantes du fait des économies en nourriture, preuve d'une bonne valorisation des ressources naturelles du verger.

Malgré tout, les données technico-économiques sur l'impact d'une telle diversification sur le bilan comptable sont peu nombreuses. Certain.e.s arboriculteur.rice.s parlent de la réduction des charges de désherbage chimique et mécanique (Osaé Solagro 2014, entretien de E. Dumbardon-Martia), ou de la réduction du temps d'amortissement de la plantation d'arbres (Yates et al. 2007; Jose, Walter, Mohan Kumar 2019). De plus, les avantages économiques sont à nuancer par rapport à l'investissement non négligeable de départ qui prend en compte l'achat et/ou la construction du bâtiment d'élevage (en moyenne 2000€/ha pour clôturer un verger (ADAbio 2019)), les parcs mobiles ou fixes et les coûts de fonctionnement comme les traitements vétérinaires sur les poules et pour les vides sanitaires des poulaillers (Produire Bio 2021; Biofil 2022).

2.2.1.2. L'impact sur le travail

En ce qui concerne la charge de travail, l'atelier « poule pondeuse » contraint l'arboriculteur.rice à du temps de travail supplémentaire pour la gestion des animaux et des parcs (Osaé Solagro 2014) et à des astreintes de surveillance. Il faut cependant noter que le temps de travail est moins important que dans des systèmes de d'élevage de poule avec accès à un parcours arboré ou pour des élevages de poules pondeuses en batterie (Zandbergen 2016).

L'arrivée des poulaillers mobiles pour les arboriculteur.rice.s a des conséquences sur la pénibilité et la charge de travail. Depuis peu, des entreprises se lancent dans la vente (farmermobil GmbH 2022) de ce type de poulaillers et des agriculteurs construisent eux-mêmes leurs poulaillers mobiles (latelierpaysan 2020; Venot 2021). Ce genre de bâtiment d'élevage offre certains avantages comme une réponse au problème de la dégradation du sol par les poules, en permettant de les déplacer sur différents parcours et de baisser la pression des parasites des poules. Ces poulaillers ne sont pas largement utilisés mais semblent être bien adaptés aux arboriculteur.rice.s souhaitant introduire des poules même si l'agriculteur doit prendre en compte le temps de déplacement de ces poulaillers plusieurs fois par an, déplacement qui n'est pas toujours aisé (*SimonPhotography* 2020)[3]. Par ailleurs, étant donné l'impact des poules sur l'enherbement des parcours, il est nécessaire de déplacer et de réaménager régulièrement ces derniers (Osaé Solagro 2014).

En termes de qualité de vie au travail, les arboriculteur.rice.s évoquent souvent leur plaisir de travailler auprès d'animaux (Venot 2021).

[3] *SimonPhotography est le nom d'une chaine Youtube*

2.2.2. A l'échelle du verger-pâturé : de nombreuses interactions animal-sol-production fruitière

2.2.2.1. La question de l'enherbement : un équilibre fragile qui impose une gestion fine

L'intégration de volailles sous des arbres fruitiers peut contribuer à mieux contrôler la croissance de la strate herbacée et permettre ainsi de réduire l'utilisation d'herbicides et/ou les interventions de désherbage mécanique. En effet, ces dernières impactent la strate herbacée par leur consommation de végétaux, leur comportement de grattage du sol et de piétinement, voir Figure 1. Cependant, les poules semblent assez sélectives et participent à une homogénéisation du couvert (Cosentino 2020). Lavigne, Dumbardon-Martial, Lavigne (2012) qui ont travaillé sur une association poulets-oies-goyaviers, ont observé une augmentation du pourcentage de recouvrement des cypéracées et une disparition de certaines espèces de poacées. L'effet du stade de l'herbe et de la saison sur les habitudes de consommation des poules sont encore méconnus (Roinsard et al. 2017). Contrairement aux poules, essentiellement granivores, d'autres espèces de volailles telles que les oies semblent plus efficientes dans la gestion de l'herbe car elles sont herbivores strictes. Par exemple, en 8 semaines d'expérimentation, Dumbardon-Martial, Lavigne (2012) ont estimé que le pâturage d'oies avait permis de réduire au moins de moitié le nombre de fauches mécaniques.

Le pâturage doit donc parfois être associé à d'autres techniques de désherbage pour gérer les espèces non appétentes pour les poules (Osaé Solagro 2014). Il peut être alors envisagé d'utiliser des mélanges pour prairies comportant des espèces végétales pouvant avoir une appétence similaire, et donc plus adaptés au pâturage.

Le chargement par hectare en poules, les temps de repos des parcelles, la fréquence de retour des poules sur les parcelles sont autant de paramètres qui, mal gérés, peuvent engendrer une modification du couvert enherbé par piétinement ou par pâturage sélectif, et cet effet est difficilement réversible (Sean Clark, Gage 1997). D'après les enquêtes réalisées par les associations du réseau bio (ADAbio et Bio de PACA) et l'ITAVI en 2019, la gestion de l'enherbement par des poules ne fait pas l'unanimité chez les arboriculteur.rices (ADAbio 2019). Pour certain.e.s arboriculteur.rice.s, l'introduction de poules en verger ne leur permet pas de réduire le nombre de passages de désherbage mécanique (ADAbio 2019). Une arboricultrice rencontrée lors de ce stage dit réaliser une tonte mécanique de plus au printemps dans sa parcelle avec poules que dans ses autres parcelles sans poules, car elle observe que l'exploration des poules n'est pas optimale si l'herbe est trop haute.

2.2.2.2. Une fertilisation du sol discutée

L'hypothèse selon laquelle la présence de poules permettrait une fertilisation du verger avantageuse pour la production fruitière n'est pas toujours vérifiée et de nombreuses interrogations demeurent sur le devenir de ces matières organiques dans le sol (Soudet 2021). La vitesse de minéralisation de l'azote est élevée pour les fientes, et il y a des risques de pertes par lessivage ou volatilisation si l'azote n'est pas directement mobilisé. De plus, il y a des risques de sur-fertilisation de certaines zones proches du poulailler (Biofil 2022). Ainsi, les poulaillers mobiles ont pour avantage de pouvoir répartir les fientes sur différentes parties de la parcelle. A notre connaissance, aucune donnée n'est disponible sur l'apport réel en unité d'azote/ha/an d'une telle pratique en verger.

2.2.2.3. Compatibilité de la présence de poules avec les itinéraires techniques arboricoles

L'introduction de poules dans les parcelles impose des contraintes qui ne sont parfois pas compatibles avec les pratiques habituelles d'arboriculture. Prenons l'exemple de la production cidricole de pommes. La récolte se fait mécaniquement à même le sol à l'aide de vibreurs à pinces, andaineurs, récolteuses… Les « nids de poules » dans lesquels se bloquent les pommes, peuvent ainsi poser problème (Guerin et al. 2020).

D'autre part, la présence de poules au moment de certains travaux dans les fruitiers peut être un obstacle aux passages de tracteurs, nécessitant de déplacer les poules ou imposant aux arboriculteur de disposer d'une parcelle de repli adjacente où « stocker » les poules pendant les traitements. Certains traitements peuvent avoir des conséquences sur la santé des poules mais un flou réglementaire règne sur des besoins de confinement des poules pendant les traitements et sur les durées minimums avant retour des poules sur les parcelles. Certain.e.s arboriculteur.rice.s en bio disent par exemple isoler les poules 24h durant les traitements (Café Agro 2020). Un paragraphe mettant en évidence le flou législatif autour de l'association verger-poules constitue l'Annexe A :

Enfin, certaines poules ont tendance à monter dans les arbres ou à plus endommager les troncs et les racines d'arbres (Biofil 2022).

2.2.2.4. L'arbre : une composante qui participe au bien-être des poules

La littérature (Broom, Galindo, Murgueitio 2013), et les témoignages de professionnels mettent en avant la capacité des arbres et arbustes à participer au bien-être des poules en procurant de l'ombre, un abri contre la pluie, et en fournissant aux volailles des espaces pour se protéger des dangers extérieurs. L'ANSES (L'Agence Française nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) propose la définition suivante du bien-être animal : *« Le bien-être d'un animal est l'état mental et physique positif lié à la satisfaction de ses besoins physiologiques et comportementaux, ainsi que de ses attentes. Cet état varie en fonction de la perception de la situation par l'animal. »* (ANSES 2018). En ce sens, les arbres fournissent des abris, de la nourriture et des bienfaits médicaux aux poules (Philipps, Engel, Wolfe 2002). Les espaces arborés leur permettent d'exprimer des comportements innés car les poules sont originellement adaptées à la vie dans les forêts (Philipps, Engel, Wolfe 2002).

2.2.2.5. Un contre-effet possible des poules sur les auxiliaires de culture

De la même manière que les poules pourraient réguler un ravageur particulier de la pomme, le carpocapse des pommes (hypothèse développée dans la partie 3.1.4.3), les poules pourraient impacter de manière négative les populations d'auxiliaires des vergers directement ou indirectement (voir Figure 1). D'après Mathews, Bottrell, Brown (2004), si il est bien géré, le verger est un écosystème qui facilite les assemblages de prédateurs généralistes ce qui diminue les risques d'épidémies et d'invasions d'insectes. L'introduction de poule pourrait donc, d'une manière non-intentionnelle, avoir un impact sur ces arthropodes auxiliaires du verger. Cette hypothèse préoccupe les arboriculteur.trice.s et a constitué durant le stage une question de recherche secondaire.

En effet, les poules se nourrissent d'invertébrés de la surface du sol comme les carabes, les staphylins, les araignées, les lombrics (Boreau de Roincé 2012). Leur comportement (creusage de trous dans le sol, grattage), leur piétinement du sol, leur consommation de végétaux ainsi que les modifications bio-chimiques du sol liées aux déjections pourraient aussi impacter les habitats des invertébrés de la surface du sol. Certains de ces invertébrés sont connus pour être des auxiliaires des pommiers : c'est le cas des carabes qui sont des prédateurs potentiels de la mouche des pommiers (*Rhagoletis pomonella)*, et du carpocapse de la pomme *(Cydia pomonella*) (Sean Clark, Gage 1997). La poule est un prédateur généraliste qui a un fort potentiel de prédation. La mortalité d'un ravageur particulier est difficilement attribuable à un seul prédateur. En revanche, les prédateurs sont impliqués dans de nombreuses interactions trophiques dans leur écosystème, notamment avec d'autres prédateurs (Boreau de Roincé 2012; Peisley, Saunders, Luck 2016). Ici, il semblerait qu'un assemblage de prédateurs comprenant notamment des prédateurs généralistes a un meilleur effet de contrôle du ravageur que les assemblages sans prédateur généraliste (Boreau de Roincé 2012). Les poules pourraient donc impacter les ravageurs, mais aussi les auxiliaires du verger : un effet « contre-productif » de la présence des poules sur les auxiliaires des pommiers est donc possible (et pas seulement les auxiliaires participant à la lutte contre le carpocapse).

Aucun article n'étudie néanmoins la relation entre le pâturage de poules et la biodiversité du sol. En revanche, des travaux ont montré l'impact négatif du pâturage de bétail sur cette biodiversité. Pour Kruess, Tscharntke (2002), le pâturage a un impact sur la biodiversité des insectes épigés, avec une biodiversité et une richesse spécifique décroissante lorsque l'intensité du pâturage de bétail augmente avec une biodiversité jusqu'à 50% plus basse dans les zones pâturées de manière intensive avec quelques exceptions par exemple pour les coléoptères. Les hypothèses explicatives seraient une préférence de certaines espèces d'arthropodes pour les herbes hautes, les herbes hautes soutenant plus de biodiversité que les herbes basses. Le pâturage réduirait aussi la continuité de l'alimentation pour les arthropodes phytophages (Kruess, Tscharntke 2002). Pöyry et al. (2006) confirment que les insectes herbivores sont très sensibles aux perturbations et ont donc une préférence pour les prairies non-pâturées par les vaches.

Ce trou de connaissance sur l'impact des poules sur les arthropodes a ainsi donné lieu à la création d'une expérimentation durant mon stage, désignée par la suite comme « l'expérimentation Arthropode ».

2.2.3. Une multitude d'autres interactions ajoutant de la complexité de gestion

La diversification des systèmes arboricoles avec des poules pondeuses rajoute de nouvelles interactions et complexifie les agroécosystèmes (Bosshardt et al. 2022). Des agriculteurs expriment leurs réticences face à certaines contraintes de ces systèmes : des problèmes de vols de poules, ou de prédation par les rapaces et les renards, un trop fort investissement financier, une difficulté à gérer la charge de travail supplémentaire, des problèmes de surpâturage et de dégâts sur les arbres (Biofil 2022) comme illustré Figure 1. Cette revue de littérature n'est pas exhaustive et de nombreuses interactions ne sont pas développées comme les interactions entre certaines pratiques culturales et la présence de poules (par exemple les relations poules/faune (risques d'attaques de prédateurs sauvages, éventuelle réduction des campagnols, risques de parasitisme des poules), les interactions directes entre les arbres et les poules (dégâts des poules sur les écorces des arbres, racines et parties végétales basses), etc…

Une de ces nombreuses interactions fait l'objet d'une attention particulière dans ce mémoire, à savoir l'interaction entre la présence des poules et les ravageurs des arbres fruitiers et plus particulièrement l'impact des poules pondeuses en verger-pâturé sur le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella)*.

2.3. La gestion du carpocapse des pommes (*Cydia pomonella)* par les poules en verger

2.3.1. Le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*) un ravageur problématique

Le carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella),* communément appelé ver de la pomme, est un insecte de l'ordre des Lépidoptères et de la famille des Tortricidés (Catalogue of life 2022). Le carpocapse est présent sur tous les continents (sauf l'Antarctique) (Dai, Li, Ban 2022). Il est considéré comme un ravageur courant des pommiers, poiriers, cognassiers. Il peut aussi, mais de manière moins courante, attaquer les abricotiers, pruniers, pêchers, amandiers, etc. (Balachowsky 1966). Etant carpophage, ce ravageur se nourrit exclusivement de fruits ou de fructification des végétaux (Balachowsky 1966). Il peut engendrer jusqu'à 90% de perte de production fruitière (Matar 2015). Sans aucune protection des cultures, la perte de récolte peut être totale (Jacquot et al. 2020).

Actuellement, et dans le sud de la France, la stratégie de lutte est souvent une combinaison de différents leviers :

- **Lutte chimique** : Actuellement, les moyens de lutte contre le carpocapse sont majoritairement les insecticides chimiques (Boreau de Roincé 2012). Les insecticides utilisés sont les pyréthrinnoïdes et organophosphorés (amenés à disparaître), les insecticides de type pyrimicarde et ethiophencarbe (action aphicide sélective), les acaricides clofentezine et

hexythiazox et les régulateurs de croissance d'insectes. *Cydia pomonella* a développé des résistances à la plupart des classes d'insecticides autorisés (organophosphates, pyréthrinoïdes, carbamates, néonicotinoïdes, lactones macrocycliques etc…) qui représentent pourtant encore la majorité des traitements phytosanitaires (Boreau de Roincé 2012).

- **Lutte biologique classique** : La lutte biologique par pulvérisation de virus de la granulose est également largement utilisée en agriculture biologique (AB), mais là encore, des résistances à ce virus apparaissent, ce qui a amené au développement d'isolats alternatifs du virus pour contourner les résistances (Ecophytopic 2018).
- **Lutte par perturbation** : La perturbation de la reproduction par lâcher de mâles stériles ou diffusion d'hormones de confusion sexuelle est utilisée surtout en AB. La confusion sexuelle est largement utilisée mais n'est efficace qu'à condition de commencer avec les premiers vols (DRAAF PACA 2022a) et que les populations ne soient pas trop importantes (Salamin et al. 2007).
- **Lutte physique** : La lutte physique s'est imposée dans le sud de la France comme un moyen de lutte privilégié avec les filets Alt'carpo installés en mono rang ou mono parcelle. Cependant, ils représentent un investissement important et une surcharge de travail non négligeables (Ecophytopic 2018). Ces filets ne permettent pas de s'affranchir totalement des insecticides mais permettent de réduire de 6 à 10% les IFT (Dewailly 2014).
  Des bandes pièges cartonnées ondulées sont aussi souvent posées à l'automne autour des troncs dans le but de piéger les larves qui cherchent un endroit où diapauser, mais certains parlent de piégeage de masse lorsque ces pièges sont régulièrement détruits et remplacés. Ils sont alors vus comme un moyen de lutte complémentaire (Jacquot et al. 2020).
- **Utilisation d'hôtes résistants**. Il n'existe pas de pommiers OGM en réponse à la problématique carpocapse, l'intérêt des marchés étant à l'heure actuelle limité. Mais la sélection variétale tend vers la recherche de variétés moins sensibles au carpocapse (Parveaud 2010; Boreau de Roincé 2012).
- Enfin, la **lutte biologique par conservation** peut représenter un levier complémentaire. L'idée est de modifier l'environnement et/ou les pratiques pour encourager ou introduire de la biodiversité fonctionnelle notamment des parasitoïdes, souvent des hyménoptères ou diptères qui piquent ou pondent leurs œufs dans les larves de carpocapse (Matar 2015). Cependant, les populations de parasitoïdes sont particulièrement sensibles aux insecticides. L'installation de nichoir à mésanges représente aussi un levier, dans la mesure où ces dernières pourraient se nourrir de carpocapses (Garcia, Minarro, Martinez-Sastre 2021)
- Aucun moyen de **lutte biochimique** n'a fait ses preuves (matières actives issues d'êtres vivants : enzymes ou spores issus de bactéries, champignons)
- **D'autres leviers sont en cours de développement :** Des essais avec un parasitoïde des œufs de lépidoptère, le trichogramme, ont été réalisés par le GRAB (Jacquot et al. 2020) mais n'ont pas montré d'effet significatif des trichogrammes sur les œufs de carpocapse en condition de verger. Ces essais restent cependant prometteurs, le trichogramme étant un parasitoïde d'autres œufs de lépidoptères. L'inoculation de nématodes entomophages au pied du tronc des arbres est une pratique qui vise à impacter les populations diapausantes de carpocapses (Odendaal, Addison, Malan 2016). Les lâchers de carpocapses stériles (dans le but de réduire le taux de reproduction) sont également en cours d'expérimentation en France et intéressent particulièrement le CTIFL.

Avec l'apparition des résistances aux insecticides chimiques, et les efficacités partielles de moyens de lutte alternative (Ecophytopic 2018), la filière de la pomme est aujourd'hui dans une impasse grandissante. De plus, le changement climatique semble avoir un effet positif sur la dynamique du ravageur : les dates de premiers vols avancent dans le temps, et on observe en conditions méditerranéennes de plus en plus de générations, le carpocapse pouvant désormais réaliser jusqu'à

trois générations consécutives. L'augmentation récente du nombre d'individus réalisant une troisième génération est également due en partie à l'arrivée massive de variétés plus tardives telles que la Pink Lady (Ricci 2009).

2.3.2. Cycle de vie du carpocapse

2.3.2.1. Cycle général

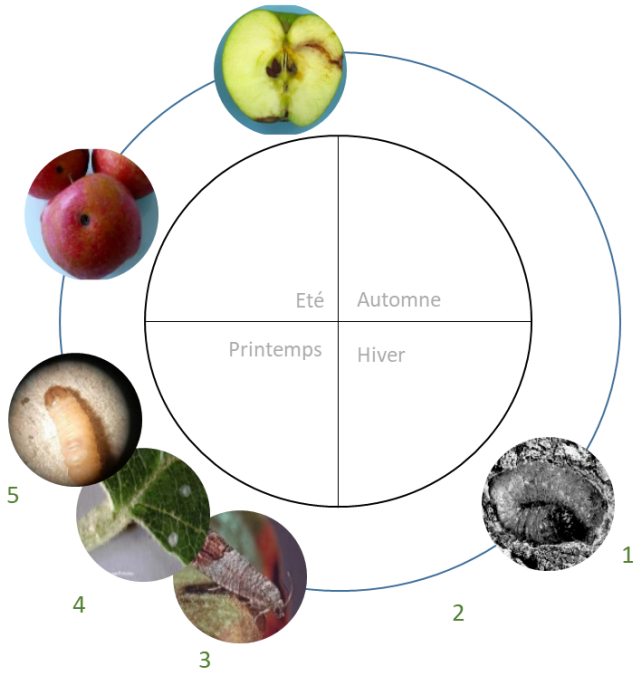
1 **Larve diapausante /Cocon hivernal** : Il existe 2 types de cocon : l'hibernaculum (en hiver) et le cocon léger si le développement est continu sans diapause (Balachowsky 1966). La chenille en diapause est au 5ème stade de développement dans un hibernaculum blanc sali de matières organiques. Elle tourne sur elle-même et se « camoufle » en incorporant des petits morceaux de bois autour du cocon et devient alors presque invisible à l'œil nu (Solomon et al. 1976). La chenille est en position de fer à cheval dans un cocon hautement imperméable à partir de fin juillet en fonction de la photopériode et de la température.

2 **Chrysalide** : La larve fait un remaniement de son cocon avant de se nymphoser, puis la chrysalide creuse un trou dans le cocon avant d'éclore à l'air libre. Les nymphoses se produisent le jour souvent dès la fin de la floraison des pommiers et dépendent de la photopériode et de la température. Il est possible de mettre fin à une diapause en imposant une température élevée en laboratoire. La diapause peut également se prolonger : une « double hibernation » est possible (Boreau de Roincé 2012). Des observations de phénologie des arbres peuvent aider à prévoir les premières émergences. Les papillons émergent de leur chrysalide sur une plage de temps assez étalée de deux à trois mois. Il n'y a pas de lien entre les dates d'éclosion et le type d'arbres-hôte (Balachowsky 1966).

3 **Papillon** : Les papillons ont un comportement crépusculaires : ils sortent le soir entre le début de la tombée de la nuit, mâles comme femelles, pour se nourrir, pondre, et s'accoupler. Les femelles peuvent être fécondées plusieurs fois, mais la majorité du temps, elles ne le sont qu'une seule fois. La durée de vie du papillon est de l'ordre de 9 à 13 jours.

4 **Œufs** : Les œufs sont déposés individuellement (parfois par tas de deux ou trois) sur les pousses, feuilles ou fruits sur une surface lisse et de préférence non loin des fruits. La ponte a lieu dès l'apparition des premières fleurs de fruitiers. Le nombre d'œufs pondus par femelle varie de quelques-uns à plus de 300 (Solomon et al. 1976). L'incubation des œufs est d'environ 7 à 11 jours pour la première génération (Balachowsky 1966).

5 **Chenille** : Les chenilles émergent des œufs. Elles naissent sur les feuilles rejoignent les fruits guidées en partie par leur olfaction. Elles sont capables de parcourir jusqu'à 3 mètres et sont alors exposées aux prédateurs. La chenille fait des morsures d'exploration sur les fruits. Les attaques laissent des cicatrices et favorisent la contamination des fruits par la pourriture. Les chenilles mangent préférentiellement les pépins. L'attaque de la pulpe est faite uniquement pour créer un chemin jusqu'au pépin, puis la chenille agrandit sa galerie de pénétration pour évacuer ses excréments. Puis la chenille quitte le fruit la nuit. Un même fruit peut être attaqué par plusieurs larves (Balachowsky 1966). La larve réagit positivement au tigmotactisme : ce qui permet de capturer les chenilles dans des bandes-piège en carton ondulé.



Les différentes générations s'enchainent au cours de la saison.

Figure 2 : Cycle de vie du carpocapse des pommes (Cydia pomonella). Figure réalisée à partir de photos issues de (Balachowsky 1966), (Ecophytopic 2018), (FMC France 2019), Noémie Séon.

2.3.2.2. Phases de vulnérabilité face aux prédateurs

Durant certaines phases de son cycle de développement, le carpocapse est particulièrement exposé aux attaques de prédateurs. La recherche d'abris à la surface du sol pour l'hibernation et les phases d'hibernation dans le sol ou dans les anfractuosités des troncs d'arbres, sont deux périodes durant lesquelles le carpocapse est très vulnérable à certains prédateurs comme les arthropodes de la surface du sol et des troncs d'arbres ou autres prédateurs (Epstein et al. 2000). En effet, l'hibernation est possible dans les écorces des troncs d'arbres et des grosses branches. La chenille creuse alors une logette dans l'écorce ou se loge dans les cassures de branches. Certains mammifères peuvent grimper dans les arbres et manger les larves en grattant les écorces. Quand la chenille ne trouve pas d'abris, que le tronc est trop lisse, elle descend au niveau du sol, et recherche des éléments pour se cacher comme des tiges, des fruits tombés, des morceaux de bois ou même des anfractuosités dans le sol. Elle est alors vulnérable aux prédateurs du sol. Si le sol est trop propre ou trop dur, elle regagne le tronc. Il est aussi possible qu'elle rejoigne le tronc après une chute accidentelle (Balachowsky 1966). Certains auteurs ont cherché à repérer la présence ou absence de larves dans le sol. Dans certains cas, ils n'ont trouvé aucune larve diapausante dans le sol (Balachowsky 1966). Dans d'autres cas, les larves ont été trouvées dans le sol sans doute car les arbres n'avaient plus d'écorces (Solomon et al. 1976). Ainsi, trouver et quantifier le nombre de larves en diapause dans un verger est très complexe.

2.3.3. La quantification de la régulation du Carpocapse par les poules : une thématique peu explorée

Plusieurs articles techniques et témoignages d'agriculteurs abordent la question de la réduction du nombre de ravageurs par le pâturage des poules. Cette réduction peut faire l'objet d'observations d'agriculteurs (Bestman, Timmermans 2021) ou elle est posée comme une hypothèse fortement plausible (Osaé Solagro 2014). Certains médias et articles (Produire Bio 2021) mettent en avant des exploitations agricoles présentées comme innovantes et qui revendiquent l'existence d'un effet positif des poules sur la gestion des ravageurs dans leur système : c'est le cas de la ferme des Milles Fruits (42), ou de la ferme de Laurent Bodineau (63). Les agriculteurs parlent aussi du rôle prophylactique des poules dû à l'ingestion de fruits pourris tombés au sol, porteurs de la tavelure ou de larves de certains ravageurs (Bio de PACA 2017; Osaé Solagro 2014). La décomposition des feuilles semble aussi être accélérée par le piétinement des poules, et certains agriculteurs mettent en avant l'impact de ce piétinement sur l'inoculum de tavelure, stemphyliose et œufs de carpocapse présents sur ces feuilles (Colleu 2020). Cependant, très peu d'articles scientifiques se sont intéressés à ces questions (Bosshardt et al. 2022).

Parmi les quelques articles existants, Clark, Gage (1996) ont étudié l'effet de la présence de poules et d'oies sur quatre ravageurs des cultures dans un verger de pommiers en association avec des cultures de pommes de terre en inter-rang. Ces ravageurs (charançon de la prune (*Conotrachelus nenuphar*), mouche de la pomme (*Rhagoletis pomonella*), scarabée japonais (*Popillia japonica*), et doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*)) passent la majorité de leur cycle de vie à la surface du sol, et seraient donc accessibles aux volailles. Cependant, les résultats de cette étude n'ont pas confirmé le potentiel de contrôle des ravageurs par les volailles. En effet, la réduction de l'abondance des insectes ravageurs (pas observation directe sur les arbres, et comptage d'ovipositions et bandes adhésives) n'a pas induit une réduction significative des dégâts sur les fruits. En revanche, l'analyse des contenus stomacaux des poules a montré l'ingestion de 33 différents éléments dont beaucoup d'insectes et de manière indifférente des prédateurs généralistes, parasitoïdes, détritivores et herbivores. La présence de carpocapse n'est pas précisée dans l'article. Cette grande variété dans le régime alimentaire des poules confirme cependant la pression de prédation des poules sur les arthropodes épigés.

De leur côté, Pedersen et al. (2004) ont étudié l'effet de poules pondeuses sur l'hoplocampe des pommiers (*Hoplocampa testudinea*) et la cécidomyie des poirettes (*Contarinia pyrivora*). Ils ont observé une réduction du nombre d'insectes piégés dans les vergers de poiriers avec des poules de l'ordre de 50 à 75% par rapport au traitement sans poules. De la même manière, cette réduction atteignait 10 à 25% l'année suivante. Cette baisse d'insectes capturés sur des pièges ne s'est encore une fois pas traduit par une amélioration du rendement (même rendement en kg par arbre pour les deux traitements). La qualité des fruits est définie comme le pourcentage de fruits avec dommages sur la peau causés par le carpocapse, la tenthrède du pommier et le tortrix. La qualité n'a pas été significativement réduite par la présence de poules : 8,3% de fruits piqués par le carpocapse dans le traitement sans poules contre 7,4% avec poules et aucune différence majeure n'a été constatée pour les autres ravageurs.

D'autres travaux se rapprochent de la problématique de mon stage : la poule n'est pas le seul prédateur potentiel de ravageurs d'arbres fruitiers. Ainsi, certains auteurs ont étudié la prédation de ravageurs par des oiseaux sauvages (Solomon et al. 1976), ou la prédation du carpocapse par les arthropodes du vergers (Epstein et al. 2000).

Ainsi, les mécanismes impliqués dans la lutte biologique par les volailles sont encore méconnus et restent à explorer. En réponse à ce manque de connaissances et en l'absence totale de preuve d'une consommation possible du carpocapse du pommier par les poules, ce stage propose donc d'explorer,

par l'expérimentation, un potentiel service écosystémique qui pourrait venir en réponse à de nombreux enjeux des productions arboricoles actuelles. Cette perspective soulève cependant de nombreuses questions : l'introduction de poules en verger pourrait-elle représenter un moyen de lutte complémentaire à la lutte conventionnelle ? Un.e arboriculteur.rice qui introduit des poules dans ses vergers pourrait-il.elle se passer complètement d'autres moyens de lutte ? Les éventuels gains de rendements seraient-ils assez significatifs pour compenser l'investissement et le temps liés à ce nouvel atelier ? Si l'effet des poules sur le carpocapse s'avère bénéfique, cette pratique pourrait-elle être étendue à d'autres ravageurs et dans d'autres contextes ?

3. Matériels et méthodes

Dans le but de répondre aux trous de connaissances identifiés en amont, plusieurs expérimentations ont été conçues, mises en place et suivies durant ce stage dont les protocoles seront développés dans cette partie Matériels et méthodes.

3.1. Présentation générale des expérimentations

3.1.1. Démarche générale

D'après Boreau de Roincé et al. (2010), l'évaluation du potentiel de régulation d'un ravageur par lutte biologique est une question complexe qui peut se traiter en trois grandes étapes. (i) Dans la première étape, il faut tout d'abord étudier les stades de correspondances trophiques entre le cycle du ravageur et celui de l'organisme de régulation. Cet aspect a été approché par une recherche bibliographique sur le cycle du carpocapse et l'identification des stades pendant lesquels le carpocapse était le plus exposé aux poules. (ii) La seconde étape consiste à quantifier la régulation et l'efficacité du régulateur suivant différents paramètres : densité du régulateur et densité de proies notamment. Cette étape est abordée dans mon stage par le recours à l'expérimentation. (iii) Enfin, il faut s'intéresser aux interactions plus larges qui existent à l'échelle du paysage et de l'agroécosystème qui influencent la présence et l'abondance des ravageurs et régulateurs en question. Dans ce stage, j'ai donc évalué expérimentalement une interaction de ce type à savoir le potentiel impact des poules sur les arthropodes de la surface du sol.

Des enquêtes et expérimentations chez des arboriculteur.rice.s ayant déjà testés une association poule-verger, avaient déjà été mises en place dans le cadre du projet DéPASSE (cf partie 1.2) Ainsi, sept enquêtes avec ces arboriculteur.rice.s ont été réalisées en 2018 et quelques arboriculteur.rice.s disaient alors observer un effet positif de la présence de poules sur les ravageurs. En complément, des approches expérimentales avaient été envisagées pour éprouver ces retours d'expérience et objectiver les observations mais n'ont pas pu aboutir pour des raisons de prédation et de vol des volailles chez les arboriculteur.rice.s. La thèse de Sara Bosshardt et ce stage ont donc été des opportunités pour mettre en place de nouvelles expérimentations avec des protocoles plus précis et des suivis plus fins concernant cette interaction. Ces expérimentations pourraient représenter la première « preuve de concept » de régulation voire de prédation du carpocapse par les poules.

A terme, ces données ont aussi pour but d'être exploitées dans le cadre de la thèse de Sara Bosshardt afin de calibrer un modèle de populations de carpocapse, et produire, en discussion avec des acteurs de terrain lors d'ateliers de conception, une gamme de stratégies de pilotage de système de vergers-pâturés.

3.1.2. Synthèse des différentes expérimentations

En tout, quatre expérimentations seront présentées dans ce rapport. Deux d'entre elles avaient été imaginées et mises en place par Sara Bosshardt : SaniCarpo et PataFix. Les suivis ont ensuite été réalisés durant le stage. Avec l'aide de l'équipe encadrante, j'ai conçu et mis en place les deux autres expérimentations : PrédaCarpo et Arthopodes. Le Tableau 1 synthétise les informations principales concernant les différentes expérimentations et servira de guide à la compréhension du reste du rapport. Un tableau beaucoup plus détaillé est présenté en Annexe B :.

Tableau 1 : Tableau synthétique de présentation des expérimentations

Nom de l'expérimentation	Localisation	Période	Objectif	Chargement en poules	Espèces fruitières
PrédaCarpo	Montpellier (terrain expérimental du CEFE)	1/03/2022 - 7/04/2022	Etudier l'impact de la présence de poules pondeuses en verger-pâturé sur des populations de carpocapse en diapause en conditions non naturelles	600 poules/ha	Oliviers (verger conservatoire)
SaniCarpo	Avignon (Ferme de La Durette)	01/2022 - 10/2022	Evaluer une éventuelle réduction des populations de carpocapse par le pâturage des poules **hivernal** en conditions de verger de pommier	548 poules/ha et 727 poules/ha	Pommiers en production (variétés Garance et Goldrush)
PataFix		07/2021 - 10/2022	Evaluer une éventuelle réduction des populations de carpocapse par le pâturage des poules **toute l'année** en conditions de verger de pommier	192 poules/ha (s) et 243 poules/ha (m)	Pommiers en production (variétés Reinette grise et rouge provençale d'hiver)
Arthropodes		17/05/2022 - 12/07/2022	Explorer un éventuel effet non-désiré du pâturage des poules sur les arthropodes de la surface du sol		

3.1.3. Les lieux d'expérimentation

Les expérimentations sont réparties sur deux sites. Le premier, **la Ferme de la Durette** en Avignon**,** accueille trois des expérimentations appelées PataFix, SaniCarpo et Arthropodes. Plusieurs partenaires dont le GRAB, l'INRAE et Terre de liens sont associés à cette ferme pilote en verger-maraicher de 6 ha dont 4,5 ha cultivés (Grab 2011)(Voir vue satellite de la ferme Figure 3). Les expérimentations s'inscrivent dans un système en production, qui impose, contrairement à des parcelles purement expérimentales, de trouver des compromis avec les agriculteur.rice.s et de s'adapter à ce qui est déjà en place. Le second site se situe sur le **terrain d'expérimentation du CEFE** (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) de Montpellier dans le cadre d'un partenariat avec Lise Roy, chercheuse s'intéressant aux dynamiques de populations de l'acarien *Dermanyssus gallinae* en lien avec l'élevage de volailles. Cette expérimentation a été nommée PrédaCarpo.

3.1.4. Objectifs et hypothèses des expérimentations

3.1.4.1. SaniCarpo et PataFix

Les expérimentations SaniCarpo et PataFix ont pour objectif de répondre à la question suivante : **Le pâturage des poules en verger de pommiers permet-il une réduction des populations et des dégâts de carpocapses ?**

SaniCarpo a pour **objectif** d'évaluer l'impact de poules en pâturage durant la période d'hiver. PataFix étudie l'impact de poules en pâturage toute l'année.

Les **hypothèses** de travail sont les suivantes :

- La présence de poules dans le verger pourrait permettre une réduction de l'inoculum de carpocapse dans une parcelle à fort antécédent de pression en carpocapse,
- Les poules étant omnivores, un des mécanismes envisagés dans cette régulation est celui de l'ingestion du carpocapse,
- Une réduction de l'inoculum hivernal de carpocapse pourrait avoir pour conséquence une baisse des émergences des papillons au printemps et une réduction du nombre de fruits piqués en fin de 1ère génération et à la récolte.

Cependant, ces deux dispositifs expérimentaux ne permettent pas de comprendre finement quels sont les mécanismes en jeu dans cette éventuelle régulation. Hypothétiquement, la prédation (consommation directe) n'est pas le seul mécanisme pouvant mener à une réduction des populations

de *C. pomonella* par la présence de poules. Une autre expérimentation, PrédaCarpo, a donc été conçue et mise en place durant mon stage pour tenter de mieux comprendre les différents mécanismes entrant en jeu.

3.1.4.2. PrédaCarpo

L'expérimentation PrédaCarpo tente de répondre à la question suivante : **Quelle est la dynamique de prédation des poules en conditions contrôlées sur des larves de carpocapse en diapause disposées en densité connues dans un verger ? Et quels peuvent-être les impacts des poules sur des larves en diapause et ainsi, quels autres mécanismes entrent en jeu dans une éventuelle mortalité de larves en diapause ?**

Pour tenter de répondre à ces questions, des larves de *C. pomonella* en diapause ont été cachées dans les premiers centimètres du sol d'un verger avec des poules en pâturage et d'un verger sans poules (témoin), puis l'état de ces larves a été suivi.

L'hypothèse principale est que les poules pourraient impacter les populations de carpocapses en diapause par consommation directe mais aussi par dérangement de l'environnement et altération des cocons.

Cette expérimentation lève un certain nombre de sous-questions : quelles sont les modalités d'exploration de l'espace par les poules pondeuses et dans quelle mesure la dynamique de prédation est susceptible d'être reliée à des comportements précis des poules dans certaines zones (rang/ inter-rang) ? À quelle vitesse les poules peuvent remettre en surface un cocon de carpocapse enterré dans les premiers centimètres du sol ? Les poules entrainent-elles une pression indirecte sur les cocons de carpocapse (par déterrage des cocons ou en les endommageant) ? Prédatent-elles les cocons de carpocapse en diapause disposés dans les anfractuosités des troncs ?

3.1.4.3. Arthropodes

Enfin, la dernière expérimentation, Arthropodes, a pour objectif une prise de recul sur d'autres interactions que pourraient avoir les poules avec un autre compartiment de cet écosystème de verger pâturé à savoir celui des arthropodes épigés. Cette expérimentation répond à une interrogation forte des parties prenantes du stage et des arboriculteur.rice.s rencontré.e.s : **la présence de poules ne pourrait-elle pas avoir un impact non désiré sur les populations d'arthropodes du verger (possiblement des auxiliaires) ?**

L'hypothèse est la suivante : les poules étant omnivores et ayant une forte action de modification de la surface du verger (cf partie 2.2.2.1), elles pourraient impacter négativement les populations d'auxiliaires des vergers de manière directe ou indirecte.

3.2. Les expérimentations

3.2.1. SaniCarpo et PataFix : Etude du potentiel de régulation du carpocapse en conditions naturelles

L'expérimentation PataFix a démarrée en juillet 2021, et l'expérimentation SaniCarpo en janvier 2022 (voir Tableau 1).

3.2.1.1. Matériel

3.2.1.1.1. *Parcelles expérimentales*

La Figure 3 schématise le plan d'expérience et la disposition des parcelles expérimentales au sein de l'exploitation. L'expérimentation SaniCarpo est mise en place sur deux « parcelles » de pommiers. Chaque parcelle est en fait constituée d'un rang élargi de pommiers et chacun des deux rangs est composé d'une variété de pommes différente : Garance et Goldrush (les parcelles SaniCarpo sont en vert sur la Figure 3). De la même manière, PataFix est mise en place sur deux autres « parcelles » de

pommiers : avec chacune une variété de pomme différente : Reinette grise et Rouge provençale d'hiver (les parcelle PataFix sont en orange sur la Figure 3).

Chacune de ces « parcelles » est séparée en deux modalités : une modalité avec des poules en pâturage (en bleu) et une modalité sans poules en pâturage (en violet).

Autrement dit, nous testons donc l'effet de deux facteurs sur deux réponses.

- Facteur 1 : Le pâturage de poules avec deux modalités : « avec poules » et « sans poules »
- Facteur 2 : La période de pâturage avec deux modalités : pâturage permanent (dispositif « PataFix ») et pâturage temporaire (dispositif « SaniCarpo »).

Les deux réponses observées sont : le nombre de fruits piqués, le nombre de carpocapses piégés.

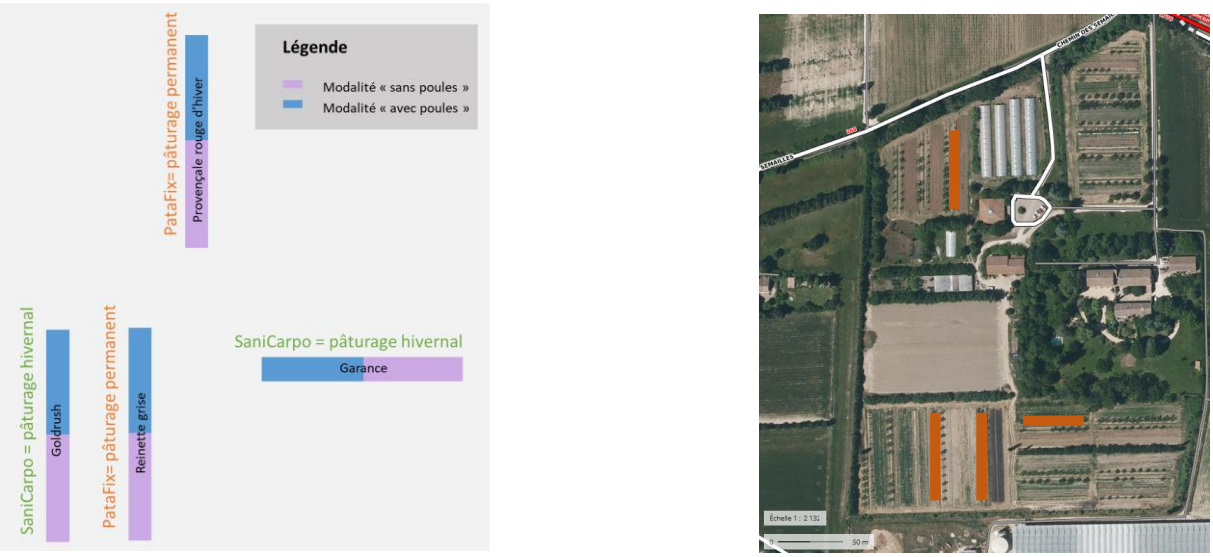


Figure 3 : A gauche, schéma du plan d'expérience avec disposition spatiale des parcelles (échelle non respectée). A droite, vue satellite des parcelles (en orange) au sein de la ferme de la Durette (Géoportail 2022)

Dans le cadre de ces expérimentations, les arbres fruitiers sont conduits sans pesticides chimiques et irrigués en gravitaire localisé sur le rang. Hormis les arrosages et la taille hivernale, les parcelles expérimentales n'ont reçu en 2022 aucune intervention des arboriculteur.rice.s (pas d'éclaircissage ni de travail du sol).

3.2.1.1.2. *Les filets*

Figure 4 : Photo d'une parcelle de l'expérimentation PataFix, après baisse des filets Alt'Carpo jusqu'au sol

Des filets Alt'Carpo à mailles de 5.50 mm x 2.20 mm ont été baissés entre le 7 et le 12 avril, après pollinisation. Les filets ont pour but d'isoler tout le rang de l'extérieur du verger, tout en piégeant dedans les carpocapses endogènes à la parcelle. Chaque filet est en effet tendu sur les arbres en mono-rang, et ce jusqu'au sol, où il y est plaqué par des sacs de pierres et sardines de manière à créer une enceinte fermée ne pouvant ni laisser entrer, ni laisser sortir de carpocapses. Le tunnel de filet est divisé au milieu du rang en deux sous-parcelles grâce à un sas formé de deux portions de filet (cf Figure 4). La double paroi du sas permet un meilleur isolement des deux modalités. Une première modalité comportait des poules en hiver ou durant toute l'année, et une seconde modalité était le témoin sans poules.

3.2.1.1.3. *Les poules*

Des poules « rousses » ont été utilisées dans cette expérimentation. Il s'agissait de poules de réforme provenant d'un élevage plein-air. Pour l'expérimentation « SaniCarpo », les poules ont été présentes du 13 janvier au 1er mars 2022 (soit environ sept semaines) et dans l'expérimentation « PataFix», les poules sont présentes depuis juillet 2021, et l'expérimentation prendra fin après la récolte des pommes fin octobre (soit un peu plus d'un an de pâturage au total).

3.2.1.2. Méthodes

3.2.1.2.1. *Piégeage des carpocapses adultes à l'aide de pièges attractifs à phéromones*

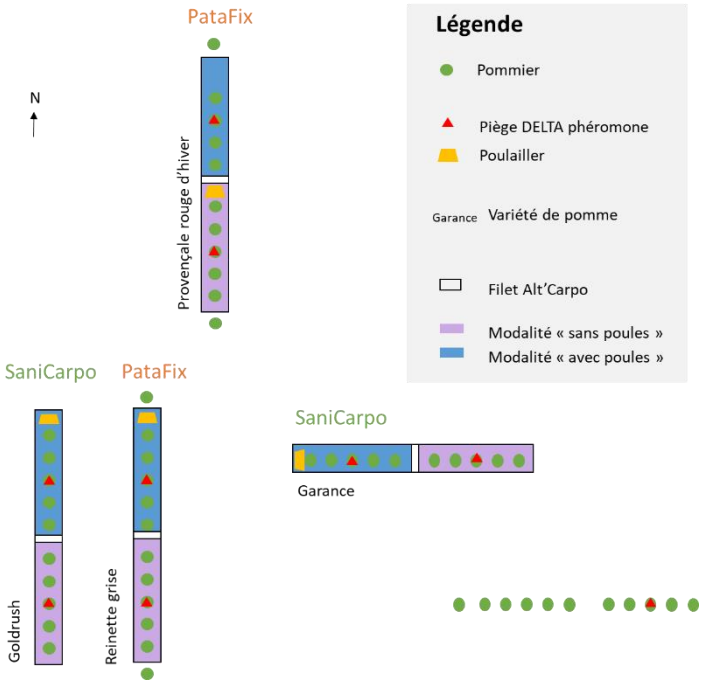


Figure 5 : Schéma synthétique du dispositif expérimental (échelle non respectée)

Des pièges de type « delta », attractifs à analogues de phéromones femelles (pièges KOPPERT® DELTA PHERODIS Cydia pomonella, Deltatrap 08002) ont servi à effectuer un suivi temporel des populations de carpocapses adultes mâles. Ces pièges sont constitués d'une plaque engluée et d'une capsule diffusant les phéromones, le tout protégé par un toit triangulaire en plastique blanc. En tout, neuf pièges ont été posés. Sur la Figure 5, les pièges sont figurés par des triangles rouges. Dans chacune des quatre parcelles, deux pièges (un piège par modalité) ont disposé sur le pommier central (Figure 5). De plus un piège extérieur au dispositif a été déposé dans une rangée de pommiers sur la même exploitation agricole mais à environ 150 m du piège le plus proche (piège illustré dans la rangée en bas à droite du schéma de la Figure 5). Ce piège sert de référence dans des conditions sans poules en pâturage et sans filet.

Les rédacteurs du BSV (Bulletin de Santé du Végétal) ont identifié la date de biofix (début du vol pour lequel la moitié des pièges surveillés ont capturé au moins un carpocapse) au 19 avril pour le secteur d'Avignon (DRAAF PACA 2022b). Les pièges ont donc été disposés le 14 avril 2022. Durant toute l'expérimentation, les capsules de phéromones ont été renouvelées tous les 30 jours comme conseillé par le fabricant. Les plaques engluées ont aussi été régulièrement changées en cas de trop fort salissement. Un comptage des papillons présents sur les plaques engluées a été réalisé de manière hebdomadaire.

3.2.1.2.2. *Les comptages de fruits piqués*

Les fruits « piqués » sont été comptés à deux moments de l'année : un premier comptage a eu lieu en fin de première génération du carpocapse les 29 et 30 juin 2022, et un second comptage aura lieu à la récolte (entre septembre et octobre selon les variétés). Tous les arbres de toutes les modalités ont fait l'objet d'un comptage du nombre de pommes total et du nombre de pommes piquées sur l'arbre et au sol. Une pomme est notée comme « piquée » si elle présente les symptômes d'une piqûre de carpocapse. Deux types de piqûre existent : la piqûre sèche (dégât superficiel de l'épiderme sans formation de galerie par la larve) et la piqûre active (présence de galerie). Les expérimentateurs comptent aussi les pommes tombées au sol (dont les pommes piquées) et les regroupent dans un

contenant non hermétique laissé sur la parcelle. Cette précaution permet de ne pas recompter ces fruits une seconde fois à la récolte tout en laissant sur place les éventuelles larves contenues dans les fruits, afin de ne pas impacter la population totale de carpocapses sous filets. Dans les parcelles de l'expérimentation PataFix, un pommier supplémentaire à chaque extrémité du rang n'était pas sous filet et faisait l'objet d'un comptage de fruits piqués afin d'estimer la pression du ravageur à l'extérieur des filets.

3.2.2. PrédaCarpo : Etude des mécanismes de régulation du carpocapse en conditions contrôlées

Principe général : Des carpocapses en diapause ont été disposés dans un verger scindé en deux modalités : une modalité avec des poules et une modalité sans poules. Les larves ont été dissimulées dans les premiers centimètres du sol et dans des anfractuosités de troncs d'arbres. L'état des larves a fait l'objet d'un suivi à pas de temps régulier.

3.2.2.1. Matériel

3.2.2.1.1. *La parcelle expérimentale*

Figure 6 : Photo aérienne de la parcelle expérimentale. Au fond : le poulailler relié à la modalité "avec poule", au premier plan de la photo la modalité « sans poules ». Au milieu, la parcelle est partagée par un grillage à poule non franchissable.

Cette expérimentation a été réalisée dans un verger conservatoire d'oliviers planté en 2010 avec une densité équivalente de l'ordre de 2400 arbres/ha (Figure 6). Le recours à cette parcelle nous a permis de nous rapprocher des conditions d'un verger de pommiers tout en s'affranchissant de la présence de carpocapses. En effet, l'olivier n'étant pas un hôte du carpocapse, la parcelle est en théorie exempte de toute présence de ce ravageur. Au pied des rangs, du broyat de bois est régulièrement apporté : le sol est donc différent sous les arbres et entre les rangs. La parcelle a été découpée en deux zones d'environ 100 m² chacune représentant les deux modalités testées : « avec poules » et « sans poules ». Les deux parcelles ont été conduites de manière similaire et la couverture du sol était sensiblement identique au début de l'expérimentation (gestion mécanique de l'enherbement).

3.2.2.1.2. *Les poules*

Six poules ont été utilisées dans cette expérimentation. Il s'agit de poules de réforme provenant d'un élevage plein-air. Les expérimentations sur les poules ont été menées dans le respect de la réglementation sur l'expérimentation animale (numéro de référence du comité d'éthique : 2339-2015101122029640 v4). Elles provenaient de vergers expérimentaux dans lesquels elles avaient l'habitude de pâturer. Les poules sont repérées individuellement grâce à des bandes adhésives de couleur sur leurs deux pattes comme l'ont fait Ferreira et al. (2021). Les poules seront désignées individuellement dans la suite du rapport par la couleur de leur bande adhésive : orange, jaune, blanche, bleue, rouge, et verte. Les six poules ont accès à un parcours extérieur qui correspond à la modalité « avec poules ». La surface disponible par poule est de 16 m²/poule soit un chargement équivalent de l'ordre de 600 poules/ha. A titre de comparaison, les arboriculteur.rice.s qui pratiquent l'association vergers/poules utilisent habituellement un chargement de l'ordre de 50 à 100 poules/ha (ADAbio 2019).

3.2.2.1.3. *Infrastructures et conditions d'élevage*

Un poulailler a été placé dans la modalité « poules ». Il était équipé de nichoirs, de pondoirs et contient de la paille. Il était surélevé et abritait en dessous des abreuvoirs dispensant de l'eau de boisson *ad libitum*. Des bacs (un de sable et un d'eau) ont été mis en place afin d'assurer l'expression des comportements naturels des poules (« bain de poussière » et baignade). Un distributeur automatique

de nourriture délivrait une ration journalière de 100 g d'aliment complet[4] par poule. Une restriction alimentaire modérée est donc mise en place afin de pousser les poules à exprimer leur comportement naturel de recherche de nourriture dans l'environnement[5]. Le poulailler se fermait la nuit et s'ouvrait automatiquement les matins à horaires fixes. Il était constitué d'une cuve IBC neuve aménagée pour présenter les mêmes caractéristiques qu'un poulailler classiquement utilisé par des arboriculteur.rice.s en verger ou par des particuliers.

3.2.2.1.4. *Descriptif du zonage dans la parcelle*

Chacune des deux moitiés de la parcelle (sur la Figure 7 : modalité « sans poules » en haut et « avec poules » en bas) a été respectivement découpée en 24 zones virtuelles d'environ 3,60 m² matérialisées par des fils tendus à environ 1,10 m de hauteur pour ne pas gêner le déplacement des poules (quadrillage de la Figure 7). Les zones définissent des espaces dans lesquels les suivis seront réalisés (Ferreira et al. 2022) (voir partie **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les suivis). Chaque zone est identifiée par un numéro (numéros sur la Figure 7) écrit sur un panonceau visible de loin. De plus, pour l'analyse, les zones de la parcelle ont été regroupées dans 4 catégories.

Figure 7 : Schéma de la parcelle et du dispositif expérimental

- Les zones sous un rang d'olivier : les zones 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20,
- Les zones dans un inter-rang : les zones 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24,
- Les zones non étudiées, zone où aucune proie n'était cachée (les deux zones blanches dans la modalité « avec poules »), ces zones ont été exclues du dispositif suivant l'hypothèse que les poules auraient un comportement à proximité du poulailler qui serait non représentatif de leur activité sur le reste de la parcelle.
- Le poulailler : zone P

3.2.2.1.5. *Matériel biologique utilisé*

Les larves de *Cydia pomonella* en diapause proviennent de bandes cartonnées pièges préalablement placées dans des vergers de pommiers à proximité d'Avignon entre septembre et octobre 2021. Certaines larves ont été conservées telles quelles sur leur support cartonné d'origine et d'autres ont été placées en octobre 2021 sur des bandes cartonnées neuves. Ces larves ont été protégées de la lumière naturelle et exposées aux températures extérieures de manière à favoriser la mise en diapause naturelle. Enfin, certaines larves ont été fournies par la FREDON Haut-de-France. Dans tous les cas, les larves sont entrées en hibernation (dans un cocon) sur un support cartonné. Les carpocapses tissant naturellement leur cocon dans des anfractuosités, nous ne pouvions pas obtenir de larves en diapause sans support. L'avantage du support cartonné est que le cocon est bien visible par

[4] Aliment complet Bio pour poules pondeuses : maïs, blé, graines de soja extrudées, tourteau de soja, carbonate de calcium, triticale, orge, tourteau de colza, son de blé, remoulage de blé, fèves, féveroles, pois, phosphate bicalcique, chlorure de sodium. (Protéines 16%, Matières grasses 6.7%, cellulose 6.5%, cendres 13.1% sodium 0.17%).

[5] Le fabriquant (Cizeron Bio SA) conseille une ration entre 130 et 135g/jour/poule.

les poules et est facile à manipuler. Pour minimiser la gêne occasionnée par le carton, les bandes cartonnées des cocons ont été découpées au plus proche du cocon pour ne laisser qu'un minimum de carton (Figure 8) (Glen, Milsom 1978).

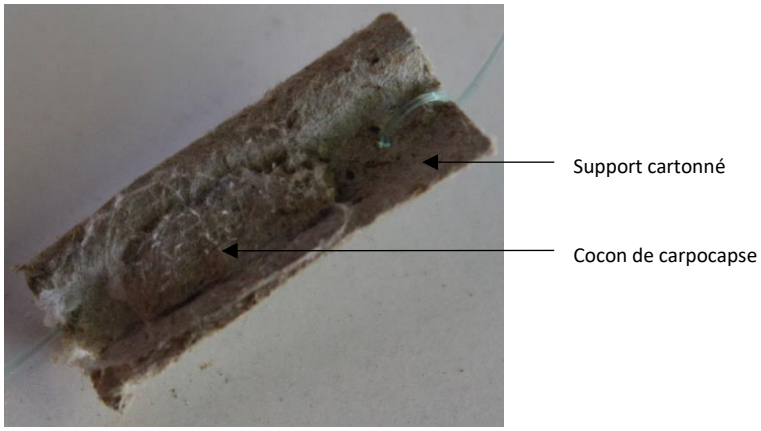


Figure 8 : Photo d'une proie : un cocon de carpocapse sur support cartonné découpé

Dans le reste du rapport, nous parlerons de « proies » pour désigner l'ensemble 1 cocon de carpocapse sur support cartonné découpé. De plus, nous souhaitions tester une éventuelle attirance olfactive ou visuelle des poules pour les larves de carpocapse. Nous avons donc également choisi de dissimuler des supports cartonnés sans cocon de carpocapse, ensemble que nous désignerons par la suite comme « proies sans carpocapse ». Le terme « proie » sera utilisé pour désigner à la fois les cartons avec carpocapse et les cartons sans carpocapse.

3.2.2.2. Méthodes

3.2.2.2.1. *Répétitions*

L'expérimentation a démarré le 1 mars 2022 et a pris fin le 6 avril 2022 afin d'éviter les risques d'émergence de populations de carpocapses (pour rappel, le biofix était fixé au 19 avril) Nous avons réalisé quatre répétitions. Une répétition correspond à trois jours consécutifs d'observations. À la fin de ces trois jours, toutes les proies étaient retirées et à chaque nouvelle semaine, des nouvelles proies étaient réinstallées. Ces manipulations sont nécessaires pour pallier l'absence de suivi durant le week-end. Deux semaines préliminaires à l'expérimentation ont aussi permis de tester et d'ajuster les protocoles qui ont ensuite été fixés et répétés à l'identique pendant les quatre répétitions. En moyenne, chaque répétition a duré 29h de pâturage net, c'est-à-dire que les poules avaient accès à la parcelle en pâturage durant 29h : ce temps exclut les nuits durant lesquelles les poules sont enfermées dans le poulailler.

3.2.2.2.2. *Choix des suivis*

3.2.2.2.2.1. Suivis des proies

Dans la littérature, différentes méthodes d'évaluation de la prédation d'arthropodes par des oiseaux/poules ont été développées. Certaines sont présentées en Annexe C :, et ont contribué à la réflexion et à la création du protocole d'évaluation de la prédation du carpocapse par les poules.

Figure 9 : système 1 : sardine + fil de pêche + proie

Dans chacune des 24 zones définies dans chacune des modalités, deux proies ont été dissimulées, soit 48 proies dissimulées en tout par modalité (soit environ 4800 proies/ha). Dans le but de retrouver ces proies, un système d'attache de la proie (Figure 9) était composé d'une sardine plantée dans le sol, repérée à l'aide d'un marqueur blanc auquel est accroché un fil de pêche transparent d'environ 50 cm de longueur. Au bout de ce fil était nouée une proie avec carpocapse (32 cartons/48) ou une proie sans carpocapse (16 cartons/48). Dans chacun de ces cas, la sardine était plantée en milieu de zone, le fil était tendu dans une direction définie aléatoirement (8 directions possibles et une direction définie par tirage au sort) et dissimulé au maximum sous quelques centimètres de terre, débris du sol. La répartition des proies sans carpocapse et les directions des fils étaient changées entre chaque répétition pour éviter un

éventuel effet d'apprentissage des poules. Les proies étaient tous retirés à la fin de chaque répétition (fin de semaine) et réinstallés au début de la semaine/répétition suivante.

Un second type de système de dissimulation des larves dans l'environnement a été utilisé durant toute la durée de l'expérimentation à savoir des troncs de chênes évidés dans l'écorce desquels des larves étaient cachées. Ces troncs ont été disposés de manière à encercler le véritable tronc des oliviers et mimer un tronc dans lequel une larve pourrait réaliser une diapause. Un support avec une proie (support cartonné + cocon) a été placé dans chacun des troncs par l'intérieur du tronc de manière à être visible depuis l'extérieur (Figure 10).

Figure 10 : Fente par laquelle une larve en diapause est visible, disposée sur chaque tronc

Figure 11 : à droite un système de tronc de chêne évidé. A gauche une caméra à détection de mouvement/piège photo

Il y avait sept troncs de chênes évidés dans chacune des deux modalités. Une caméra de type « piège photo » a été en plus disposée devant un tronc de chêne évidé par modalité (Figure 11). Le but était de prendre en photo des oiseaux sauvages ou poules en train de prédater la larve (Peisley, Saunders, Luck 2016).

Le suivi principal a consisté en une observation bi-journalière de l'état des dispositifs sardine + fil + proie selon la grille d'observation suivante (Tableau 2).

Tableau 2 : Grille d'observation de l'état des dispositifs

Observations pouvant témoigner de la prédation des poules	Larve disparue	La larve est observée comme « disparue » si le cocon a un trou et la larve n'est plus présente dans le cocon, ou si le papillon a émergé en laissant derrière lui sa pupe, ou si la larve n'est plus du tout présente.
	Cocon abimé	Le cocon est endommagé.
	Proie disparue	La proie entière (cocon + support cartonné) initialement attachée au bout du fil de pêche a été décrochée/arrachée/décomposée et non retrouvée au bout du fil.
	Trou dans le cocon	Le cocon présentait une ouverture ronde typique à l'une de ses extrémités et la larve était encore présente dans le cocon.
	Tronc de chêne évidé : Larve disparu	La larve est observée comme « disparue » si le cocon a un trou et la larve n'est plus présente dans le cocon, ou si le papillon a émergé en laissant derrière lui sa pupe (observé une seule fois) ou si la larve n'est plus présente.
Observations pouvant témoigner d'autres mécanismes	Proie remise à la surface	La proie est retrouvée à la surface du sol, la proie n'est plus enterrée sous les quelques centimètres de terre/débris du sol. Elle peut être retrouvée dans une autre orientation que celle préalablement définie.
	Fil arraché	Fil arraché
	Sardine déterrée	Sardine déterrée
	Indéterminé	Les cas des observations ne rentrant pas dans les catégories précédentes

Pour l'analyse, l'hypothèse a été faite que certaines observations sont susceptibles de témoigner de la prédation par les poules du carpocapse en diapause. Ces observations sont, parmi celles définies dans le Tableau 2 : « larve disparue », « cocon abimé », « proie disparue », « trou dans le cocon », ainsi que les observations liées à l'état des larves cachées dans les troncs de chênes évidés.

Ce suivi était réalisé deux fois par jour autour de 9h et de 15h30. Cette période a été choisie de manière à ce que le temps de présence des poules dans le verger soit égal entre deux relevés, soit 6h30 de pâturage effectif (Figure 12). Dans la suite du rapport les « temps de pâturage net » représentent les périodes où les poules ont accès au parcours, c'est-à-dire que les nuits sont exclues.

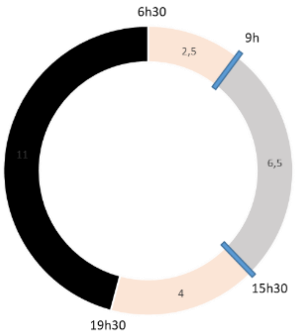


Figure 12 : En bleu le positionnement des suivis dans la journée . En noir la période où les poules ne pâturent pas : elles sont enfermées dans le poulailler

Chaque proie disparue était remplacée (Sabatier et al. 2016) pour ne pas faire varier la densité de proies à la parcelle.

3.2.2.2.2.2. Suivi du comportement des poules

L'observation et la quantification de la prédation sont des méthodes souvent lourdes à mettre en place et certains aspects sont difficilement quantifiables par des suivis de prédation uniquement. Il a donc été envisagé de réaliser des observations de comportement des poules dans le but d'étudier les dynamiques de prédation en fonction du moment de la journée ou encore les habitudes de prédation à l'échelle de l'individu. Deux méthodes sont présentées en Annexe D :. La méthode choisie pour l'expérimentation est celle du scanning. Pour cela, l'observateur se place à un point qu'il reporte sur un plan. Il reste deux minutes immobile pour habituer les poules à sa présence. Il observe ensuite chacune des poules une par une en indiquant la zone où elle se trouve et l'action qu'elle adopte au moment où il pose les yeux sur elle. L'observateur peut utiliser des jumelles (Ferreira et al. 2022). Les différentes actions des poules à observer ont été choisies suite à des lectures (Ferreira et al. 2020; 2021b; 2022; Ross et al. 2019; Bosco et al. 2014; Murillo et al. 2020). Ces actions sont définies par l'éthogramme présenté Tableau 3**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, afin de limiter au maximum le biais d'interprétation de l'expérimentateur. Les suivis ont été réalisés par la même personne durant une journée par répétition, avec un scanning toutes les 30 min entre 9h et 17h.

Tableau 3 : Ethogramme de l'expérimentation PrédaCarpo

Comportement	Action	Description
Recherche de nourriture dans le parcours (RNP)	Gratte sol	La poule gratte le sol avec ses pattes (indifféremment sol nu ou herbe ou terre ou cailloux…)
	Pique sol	Comportement ponctuel, la poule touche le sol avec son bec
	Debout curieuse	Elle peut être selon les cas : - entre 2 coups de bec sur le sol, - en train de marcher mais en regardant le sol, - juste avant ou après une séquence de grattage du sol
Prélèvement d'herbe	Pique herbe	La poule arrache un/des brins d'herbe avec son bec
Alimentation à la zone de nourrissage (AZN)	Mange/boit	Prise en compte de : - boit dans l'abreuvoir - boit dans le bac de baignade - mange dans la mangeoire
Locomotion et station	Se déplace	La poule se déplace en courant ou en marchant
	Debout passive	La poule se tient droite et observe autour d'elle ou regarde l'observateur, elle ne se déplace pas, elle n'est pas allongée
Autre	Agressivité	La poule attaque ses congénères par des coups de becs ou menace de les attaquer
	Autre	La poule est dans le poulailler, elle couve, elle se lave le plumage, elle chante, elle s'étire, elle becte sa bague, elle se roule dans la terre, elle se baigne dans le bac d'eau, elle baille, elle dort, elle glousse/caquette, elle est allongée
Comportements jamais observés	Pique tronc	Cas où l'observateur identifierait que la poule touche directement la proie avec son bec
	Gratte tronc	La poule touche un tronc avec ses pattes, indifféremment de l'emplacement du coup de patte

	Pique proie	Cas où l'observateur identifierait que la poule touche directement la proie avec son bec

Pour l'analyse, certaines actions ont été regroupées entre elles en « comportements » plus généraux (première colonne du Tableau 3)

- Le comportement « **recherche de nourriture dans le parcours (RNP)** » regroupe les actions « gratte le sol », « pique le sol » et « debout curieuse » : ce comportement est lié à la recherche de nourriture, « foraging », en faisant l'hypothèse que c'est lorsque la poule manifeste ces comportements qu'elle peut impacter directement les proies cachées de l'expérimentation.
- Le comportement « **prélèvement d'herbe** » désigne l'action « pique de l'herbe »,
- Le comportement « **alimentation à la zone de nourrissage (AZN)** » désigne l'action « mange/boit »,
- Le comportement « **locomotion et station** » regroupe les actions « se déplace » et « debout passive »,
- Un comportement est désigné comme « **autre** » lorsque les poules font les actions suivantes : « agressivité » et « autre ».

3.2.2.2.2.3. Tests complémentaires

Afin de tenter de répondre à quelques interrogations dans la phase de conception de l'expérimentation, un test de sélectivité de la poule dans le choix de ses proies a été réalisé et est décrit en Annexe E :. De plus, le potentiel d'émergence du matériel biologique utilisé a été testé grâce à un protocole de cages à émergence décrit en Annexe F :.

3.2.3. Arthropodes : Exploration d'un contre-effet éventuel sur la biodiversité épigée du verger

3.2.3.1. Matériel et méthode

3.2.3.1.1. *Choix de la méthode d'échantillonnage*

La méthode des pièges à fosse ou Barber (Barber 1931) a été utilisée pour comparer les parcelles avec des poules et les parcelles sans poules. Il s'agit d'une méthode d'échantillonnage destructrice qui piège les arthropodes se déplaçant à la surface du sol et permet de mesurer des activité-densité.

Des pots de yaourt blancs de 9,5 cm de diamètre et 12,5 cm de profondeur (taille se rapprochant au maximum des recommandations de Bouget, Nageleisen (2009) Ø=8,5cm, h=11cm), ont été remplis au 3/4 d'un mélange capable de conserver et de faire couler les individus piégés (Figure 13). Le liquide est composé de 75% de propylène glycol (conservateur), 25% d'eau et d'une goutte de liquide vaisselle transparent sans odeur (tensioactif). Le propylène glycol, souvent critiqué pour sa toxicité, a été malgré tout préféré à d'autres liquides du fait de sa bonne efficacité de capture (Bouget, Nageleisen 2009), de sa conservation, de sa non-attractivité, de son coût raisonnable. Ce choix a été fait sur les conseils de chercheurs rencontrés (Bruno Rasmussen, Anthony Roume, Sylvaine Simon) et de tests préalablement réalisés avec de l'eau salée. Un toit carré en plastique supporté par 3 tuteurs visibles (Figure 13) empêchait le pot de se remplir d'eau de pluie ou d'arrosage. Une cage grillagée protégeait le pot des poules.

Figure 13 : Photos des pièges BARBER en place, à droite : un piège recouvert du grillage anti-poules

3.2.3.1.2. *Parcelles*

Les pièges Barber ont été installés dans les parcelles de la Durette accueillant déjà l'expérimentation PataFix. Il s'agit donc de l'expérimentation avec des poules présentes toute l'année, ce qui permet ainsi de comparer les modalités « avec poules » et « sans poules ». Les emplacements des trois pots Barber par parcelle ont été choisis aléatoirement pour prendre en compte l'hétérogénéité de la parcelle en échantillonnant dans des zones différentes. En effet, les rangs de pommiers sont chacun entourés par d'un côté une planche de maraîchage, et de l'autre une autre rangée d'arbres de différentes espèces (poiriers et pêchers). Les pots ont été répartis de manière aléatoire dans la longueur de la parcelle, avant tout pour prendre en compte un hypothétique gradient dans l'intensité de pâturage des poules (de moins en moins intense en s'éloignant du poulailler) dans les modalités « avec poules ».

3.2.3.1.3. *Méthodes d'identification*

Une fois le contenu des pots collecté, les arthropodes étaient conservés à 4°C jusqu'à identification à la loupe binoculaire au laboratoire. Puis ils étaient triés, identifiés et stockés dans l'alcool à 70°.

Concernant le choix des groupes, en prenant en compte les contraintes de temps et de compétences, le choix a été fait de créer une classification en groupes et de réaliser un focus sur une seule famille d'intérêt : les carabidae. Les identifications ont donc été faites jusqu'à différents niveaux taxonomiques : jusqu'à l'ordre pour la plupart des individus, jusqu'à la famille pour les fourmis et forficules, jusqu'au genre pour les staphylins et jusqu'à l'espèce pour les carabidae. Les carabes ont été choisis comme groupe d'intérêt pour différentes raisons. Tout d'abord, ils représentent une famille très présente dans beaucoup d'écosystèmes, tant en termes de diversité qu'en termes d'abondance. Par ailleurs, la méthode de piégeage par pot Barber est bien adaptée à cette famille. Enfin, ces coléoptères sont souvent cités comme des auxiliaires potentiels des cultures. Du fait de leur diversité de régimes alimentaires entre espèces (phytophages, carnivores, polyphages), et de la variabilité de leur potentiel de régulation de ravageurs (Roume 2011), il est pertinent d'effectuer une identification jusqu'à l'espèce.

- Des groupes ont été constitués et décrits ci-dessous de la manière suivante : taxon latin (rang taxonomique, nom commun)

  Oniscidea (ordre, cloportes), Formicidae (famille, fourmis), Aleochara (genre, Staphylins), Araneae (ordre, araignées), Opiliones (ordre, opillions), Coleoptera (ordre, coléoptères hors staphylins), Myriapoda (sous-embranchement, milles-pattes), Orthoptera (ordre, grillons, sauterelles et criquets), Forficulidae (famille, perce-oreilles), Hemiptera (ordre, principalement des punaises), Blattoptères (ordre, blattes),
- Une différenciation de taille des individus a été faite pour les coléoptères, staphylins et araignées en différenciant les individus <5 mm et ceux >5 mm. En effet, la jeune larve de carpocapse sortie de l'œuf mesure 14 mm de long pour atteindre jusqu'à 20 mm au dernier stade larvaire, stade d'hibernation (Balachowsky 1966). Nous faisons donc l'hypothèse que

seuls les individus de plus de 5 mm et au régime alimentaire prédateur pourraient prédater des larves de carpocapse en diapause et les larves adultes se déplaçant au sol (même si les œufs de carpocapse font au maximum 1 mm, ils sont généralement pondus sur les feuilles, et la faune auxiliaire étudiée est celle de la surface du sol).

- Pour les mêmes raisons, le choix a été fait de ne pas compter les individus dont la taille était inférieure à 1 mm.
- Certains groupes n'ont pas été comptabilisés comme les hyménoptères hors fourmis, les limaces, les escargots, les lépidoptères, les diptères…
- Les arthropodes à des stades juvéniles et larvaires ont été comptés mais pas identifiés.
- Les comptages de fourmis ont été simplifiés et approximés par 4 classes : 5, 10, 20, ou +de 50 individus.

3.2.3.1.4. *Outils d'identification*

Pour les identifications des ordres, les outils d'indentifications ont été : le livre ***Insectes de France et d'Europe occidentale*** (Chinery, Legrand 2012), ***Clé d'identification des principales familles d'insectes d'Europe*** (Jacques, Eric, Frédéric 2016)**.** D'autres outils numériques ont été utilisés : le site internet de l'INPN pour la taxonomie (INPN 2022) et inaturalist.org.

Pour les identifications à l'espèce des Carabidae, la ***Clé de détermination des Carabidae des paysages agricoles du nord-ouest de la France*** (Roger, Jambon, Bouger 2013) a été la principale clé utilisée**.** Les identifications ont été validées par Cécile Thomas, spécialiste des Carabidae dans l'unité PSH de INRAE PACA (Avignon). Ces Carabidae ont ensuite été placés dans des petits pots et constituent une première étape dans la création d'une collection d'arthropodes du laboratoire de l'unité Ecodéveloppement.

3.2.3.1.5. *Méthodes d'analyse*

Les indices de biodiversité choisis pour approcher la richesse, la biodiversité et l'équitabilité sont les suivants :

- La population totale piégée : nombre d'individus piégés dans un espace donné, pour une période, dans tous les pots BARBER.
- L'activité-densité (ou abondance) : nombre d'individus piégés dans un espace donné, pour une période, dans un ensemble de pots BARBER.
- La richesse en groupes : nombre de groupes différents.
- La richesse spécifique (S) : nombre d'espèces différentes.
- L'indice de Shannon (H), permettant de calculer la biodiversité spécifique, défini par :

$$\mathrm{H} = -\sum_{i=1}^{S} p_i . \log_b . (p_i)$$

Avec :

p_i = l'abondance proportionnelle de l'espèce entre 0 et 1

S = la richesse spécifique

$-b$ = la base du logarithme

- L'indice d'équitabilité de Piélou (J) (Pielou 1993) : le taux d'homogénéité proportionnelle de l'abondance des espèces individuelles défini par

$$J = \frac{H}{H_{max}}$$

Avec :

H = Indice de Shannon

H_{max} = valeur de diversité théorique maximale ($\log_b S$)

Ces indices ont été calculés et comparés grâce au package *Vegan de R.*

3.3. Méthodes d'analyse statistique

Les données brutes des différentes expérimentations ont été compilées dans des tableurs Excel puis analysées à l'aide du logiciel RStudio (2022.02.3+492 "Prairie Trillium" Release (1db809b8323ba0a87c148d16eb84efe39a8e7785, 2022-05-20) for Windows).

Données	**Type de données**	**Représentations graphiques**	**Tests statistiques**
Etat des proies	Quantitatives (comptages)	Boites à moustaches Courbes temporelles/nuages de points Heatmaps Courbes de probabilités de survie	ANOVA t-tests
Comportement de poules	Qualitatives uniquement	Pie-charts Bar-pots Heatmaps Graphs AFC/ACM Graphique en mosaïque	Khi² AFC ACM
Piégeage de carpocapse	Quantitatives	Courbe temporelle	
Fruits piqués	Quantitatives	*Données non-traitées dans le cadre du stage*	
Arthropodes	Quantitatives	Boites à moustaches Courbes temporelles Histogrammes	ANOVA

Pour les graphiques *GGplot2* a été le package utilisé en grande majorité. D'autres packages ont été utilisés pour l'analyse statistique comme *FactoMineR, dplyr, ade4, factoextra…*

Utilisation de la fonction de survie. Les packages *survival et survminer* ont permis d'analyser et visualiser les dynamiques de proies déterrées selon la méthode d'analyse de survie de Kaplan, Meier (1958). Les analyses de survies sont couramment utilisées dans le cadre d'expérimentations dans le domaine médical mais aussi en écologie dans l'étude de survies de populations (Sabatier et al. 2016). On observe généralement, pour un panel de patients, les temps d'apparition d'un certain évenement (mort, rémission, rechute) (Rich et al. 2010). Ici, le déterrage d'une proie représente l'évènement observé. Dans l'expérimentation, lorsque qu'une proie a été déterrée, elle est comptée comme « morte » pour tous les autres relevés dans la même répétition. On crée une variable bouléenne où 1 étant : la proie a été déterrée et 0 : la proie n'a pas été déterrée jusqu'à la fin de la répétition. La méthode de Kaplan-Meier (KM) (Kaplan, Meier 1958) est une méthode non paramétrique utilisée pour estimer la probabilité de survie à partir des durées de survie observées. Les packages permettent de traiter et de visualiser ces données de survie. Le modèle permet de prendre en compte les données censurées : données pour lesquelles aucun évènement n'a été observé jusqu'à la fin des suivis.

La fonction « Survival » ou fonction de survie, est définie ainsi :

$$S(t) = \Pr(T > t)$$

Avec :

$S(t)$: Probabilité de survie ou probabilité qu'un sujet survive au-delà d'un temps donné, dans notre cas la probabilité qu'une proie soit encore enterrée au-delà d'un temps donné.

On estime qu'au temps 0 la probabilité de survie est égale à 1, soit $S(t_0) = 1$

Et, au temps t_i :

$$S(t_i) = S(t_{i-1})(1 - \frac{d_i}{n_i})$$

où :

$S(t_{i-1})$: la probabilité qu'une proie soit encore enterrée à t_{i-1}

d_i : le nombre d'événements à t_i

n_i : le nombre de proies enterrées juste avant t_i

Le temps de survie médian correspond à une probabilité de survie de 0,5. Dans notre cas, le temps de survie médian correspond au temps pour lequel la proie a 50% de chances de ne pas avoir été déterrée. Le test de log-rank est communément utilisé pour comparer des courbes de survie entre elles.

4. Résultats

4.1. SaniCarpo et PataFix : Etude du potentiel de régulation du carpocapse en conditions naturelles

Ce paragraphe présente les premiers résultats des expérimentations SaniCarpo et PataFix qui ont pour but d'évaluer l'impact de la présence de poules en verger sur les émergences de carpocapses et sur la qualité des pommes et ainsi évaluer le potentiel de régulation du carpocapse (méthodes correspondantes partie 3.2.1. Ces expérimentations sont toujours en cours et les conclusions définitives seront obtenues en fin d'année 2022.

4.1.1. Des résultats de piégeages de carpocapses mitigés

Pour rappel, un piège delta phéromone a été déposé dans chacune des modalités des expérimentations SaniCarpo et PataFix (selon le protocole défini dans la partie 3.2.1.2.1). Le graphique (Figure 14**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présente le nombre d'individus piégés en cumulé dans chacun des pièges entre le 14 avril et le 28 juillet 2022.

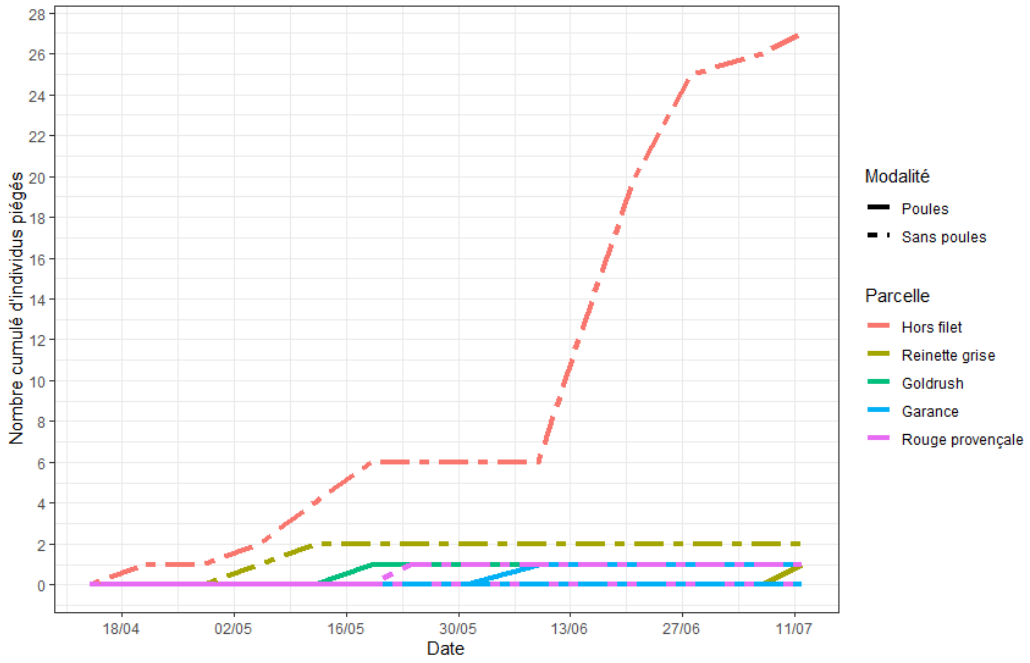


Figure 14 : Graphique du nombre de carpocapses adultes piégés en cumulé

Le nombre de carpocapses piégés dans les huit parcelles sous filets s'est révélé faible : un à trois individus par modalité (Tableau 4).

		Nombre total d'individus piégés par parcelle entre le 14/04/2022 et le 28/07/2022
PataFix	Avec poules	1
	Sans poules	3
SaniCarpo	Avec poules	2
	Sans poules	0

Tableau 4 : Tableau synthétique du nombre cumulé de carpocapses adultes piégés entre le 14/04 et le 28/07/2022

Le faible nombre de carpocapses piégés ne permet pas d'établir de différence significative entre les deux modalités « avec poules » et « sans poules ». Ainsi, sur les six individus piégés sous filets, 50% ont été piégés dans les parcelles avec les poules et 50% dans les parcelles « sans poules ». Dans les parcelles de l'expérimentation PataFix, avec des poules en pâturage toute l'année, un seul carpocapse a été piégé

contre deux dans la parcelle de l'expérimentation SaniCarpo, avec des poules en pâturage uniquement l'hiver.

Le piège « hors filet » Figure 14 rend compte de la forte pression carpocapse dans une rangée non loin des parcelles expérimentales et sans filets (voir disposition Figure 5). Au 28 juillet, 35 papillons avaient été piégés au total avec une brutale augmentation des piégeages entre le 9 et le 21 juin.

De manière générale, peu de carpocapses ont été piégés par cette méthode.

4.1.2. Premières tendances de fruits piqués suites aux comptages de première génération

Comme décrit dans la partie 3.2.1.2.2, les comptages de fruits piqués réalisés les 29 et 30 juin 2022 ont eu pour but d'estimer les dégâts de carpocapses issus de la première génération de la saison, et ne sont donc que des résultats partiels. Un second comptage aura lieu à la récolte.

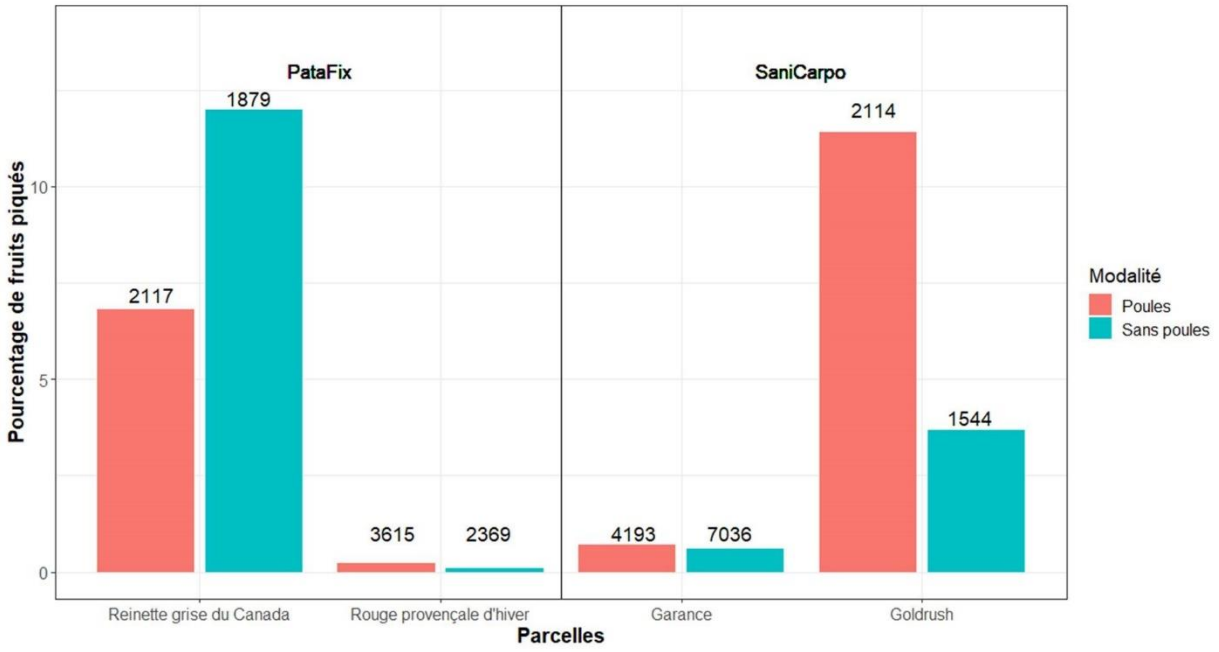


Figure 15 : Histogramme présentant le pourcentage de fruits piqués selon des modalités « poules » et « sans poules » et les dispositifs expérimentaux. A gauche, les pourcentages pour l'expérimentation Patafix (deux variétés). A droite, les pourcentages pour l'expérimentation SaniCarpo (les deux variétés). En haut des barres, la somme des fruits comptés pour tous les arbres de chaque parcelle (Source : Sara Bosshardt)

Sur les quatre parcelles, seulement dans un cas un nombre inférieur de fruits piqués a été compté dans les modalités avec les poules que dans les modalités sans poules : pour la parcelle Reinette grise (Figure 15). Les pourcentages de fruits piqués sont plutôt bas (de 0,08% à 11,97% au maximum) et les différences en nombre de fruits piqués entre modalités ne sont pas très grandes. Néanmoins, une forte hétérogénéité de cet indicateur est observée à l'arbre dans chacune des modalités.

L'effet potentiel des poules sur les populations de carpocapses de première génération ne se traduit donc pas pour l'instant par une réduction systématique du nombre de fruits piqués, car seulement une parcelle présente un nombre inférieur de fruits piqués dans la modalité « avec poules ».

4.2. PrédaCarpo : Etude des mécanismes de régulation du carpocapse en conditions contrôlées

Pour rappel cette expérimentation a eu pour but d'observer l'action des poules sur des larves de carpocapse en diapause dissimulées dans l'environnement (voir 3.2.2).

4.2.1. Observations qualitatives sur la dégradation de la strate herbacée par les poules

En deux mois de présence sur la parcelle expérimentale, les poules ont rapidement dégradé la strate herbacée. Elles ont exercé une pression très intense dans la première semaine après leur arrivée avec une différence visuelle notable (Figure 16) particulièrement sous les rangs d'arbres.

Figure 16 : Photos de l'évolution de la parcelle sur un mois, modalité « avec poule »s. Les dates des photos sont, de gauche à droite : 1/03/22, 8/03/22, 15/03/22, 23/03/22, 29/03/22

Les poules n'ont pas engendré de dégradations des troncs et des branches d'arbres. Cependant la forte pression de grattage du sol à proximité des arbres a mis à nu les racines de certains arbres. Le sol en périphérie de parcelle, le long des clôtures électriques, semble moins impacté que le centre de la parcelle. En revanche, la zone devant le poulailler présente, à la fin de l'expérimentation, un sol quasiment mis à nu avec de nombreux trous de type « nids de poules » (voir photo en Annexe G :). Une seconde série de photos prise d'un point de vue différent dans la parcelle est disponible en Annexe H :.

4.2.2. Pas de prédation des carpocapses en diapause par les poules

4.2.2.1. Sur les proies cachées dans les premiers centimètres à la surface du sol

Parmi toutes les observations faites sur l'état des proies cachées sur la parcelle, certaines observations témoignant de la prédation par les poules, sont analysées dans ce paragraphe. Le Tableau 5, présente une synthèse des fréquences d'observation de chaque état selon les modalités « avec poules » et « sans poules ».

*Tableau 5 : Tableau comparatif des fréquences des différents états observés des proies pouvant témoigner de la prédation par les poules. Significativité des tests : ANOVA sur les moyennes des fréquences de l'état observé entre les modalités « avec poules » et « sans poules ». Codes de significativité : *** p-value [0, 0.001].*

Numéro de la répétition	Larve disparue		Cocon abîmé		Proie disparue ***		Trou dans le cocon	
	Avec poules	Sans poules	Avec poules	Sans poules	Avec poules	Sans poules	Avec poules	Sans poules
1	3	2	0	2	8	1	15	17
2	4	3	0	0	7	0	5	5
3	1	1	1	0	15	0	1	2
4	0	1	0	0	0	0	1	4
Total sur toutes les répétitions	8	7	1	2	30	1	22	28

L'état « **larve disparue** » était selon nos hypothèses l'état le plus représentatif de la prédation. Cependant, sur les répétitions 1, 2, 3 et 4, l'observation n'a été faite que 8 fois sur 640 observations dans la modalité « avec poules » et 7 fois dans la modalité « sans poules », sans mettre en évidence une différence statistiquement significative entre ces deux modalités (ANOVA, F=0,59, df=1, P=0.816). Les poules ne semblent donc pas avoir causé de disparition de larves.

L'état « **cocon abîmé** » a été relevé de manière anecdotique, seulement 1 fois dans la modalité « avec poules » et 2 fois dans la modalité « sans poules » durant toute la durée de l'expérimentation. Les poules n'ont pas eu d'effet de détérioration visible des cocons.

L'état « **proie disparue** » a été plus souvent observé dans la modalité « avec poules » (Tableau 5), avec une différence significative par rapport à la modalité « sans poules » (ANOVA, df=1, F=27.61, P=2.48e-07 ***). En effet, les proies ont disparu en tout 30 fois dans la modalité « avec poules » sur 960 observations (soit 3,1% des observations) et une seule fois dans la modalité « sans poules ». La répétition 3 est celle où l'observation a le plus souvent été faite : 15 fois dans la modalité « avec poules ».

L'état « **trou dans le cocon** » a été observé de manière non significativement différente entre les modalités « avec poules » et « sans poules » (ANOVA, df=1, F= 2.07, P=0.156). On observe toutefois une forte hétérogénéité entre les répétitions, avec la répétition 1 qui présente un plus fort taux de cocons troués : 15/32 dans la modalité « avec poules » et 17/32 dans la modalité « sans poules » contre seulement en moyenne 3/32 dans le reste de l'expérimentation.

Parmi les cinq états des proies pouvant témoigner de la prédation, seul l'état « proie disparue » est correlé à la présence des poules.

4.2.2.2. Sur les proies cachées dans les troncs de chênes évidés

Les **troncs de chêne évidés** sont restés en place du 1/03/2022 au 27/04/2022 soit 57 jours en tout. Aucune larve de carpocapse dissimulée dans les troncs de chêne évidés n'a disparu et aucun cocon n'a été abimé, et ce dans aucune des deux modalités. Seulement un évènement significatif a été relevé le 17/04/2022 avec une larve sortie de son cocon par un petit trou dans la modalité « sans poules ». En revanche, des oiseaux sauvages ont été aperçus à proximité de ces troncs par les expérimentateurs et pris en photo par les pièges photos disposés sur certains troncs. Les photos et la liste des espèces rencontrées sont présentées en Annexe I :.

Ce suivi n'a donc ici pas permis de montrer une consommation de carpocapses en diapause par par d'autres oiseaux.

4.2.3. Les poules déterrent les proies cachées

L'état **« proie déterrée** » a fait l'objet d'une étude approfondie dans la modalité avec les poules.

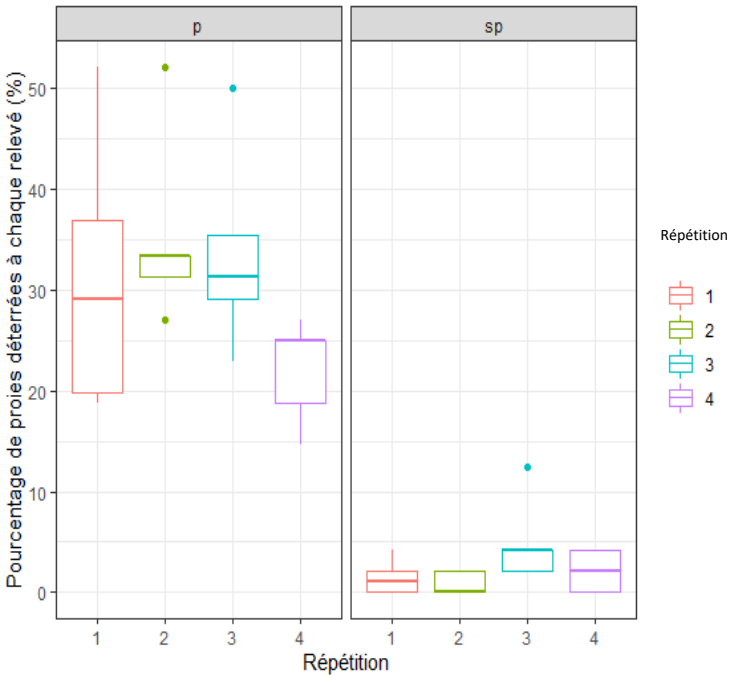


Figure 17 : Boxplot du pourcentage de proies (proies avec carpocapse et proies sans carpocapse confondues, soit 48 par modalité) déterrées à chaque relevé. Entre chaque relevé d'une répétition, chaque proie déterrée était ré-enterrée. p = « avec poules » et sp= « sans poules »

En moyenne, 14,67 proies sur les 48 cachées étaient déterrées à chaque relevé dans la modalité avec les poules (écart-type de 5,14), soit en moyenne 30,66% des proies cachées.

Il y a eu significativement plus de proies déterrées dans la modalité « avec poules » que dans la modalité « sans poules » (Figure 17)(ANOVA comparant les moyennes du nombre de proies déterrées par relevé en fonction des deux modalités, df=1 , F=136,6, P=1.8e-14 ***), ce qui confirme le rôle des poules dans la remise en surface des proies.

Le graphique ci-dessous (Figure 18Figure 16) témoigne de la dynamique de déterrage des proies en fonction du temps de pâturage pour les différentes répétitions.

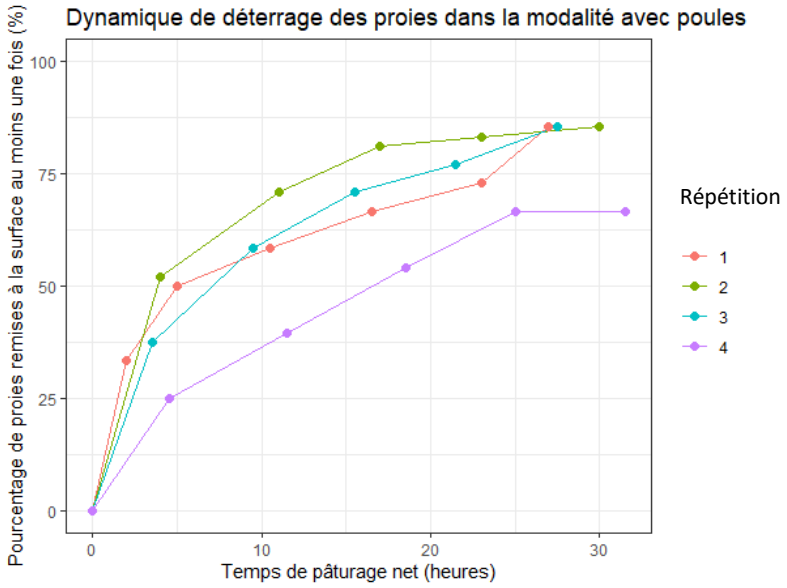


Figure 18 : Dynamique de déterrage des proies en fonction du temps de pâturage par répétition dans la modalité « avec poules ». En abscisse : le temps de pâturage net des poules en heures. En ordonnée, le pourcentage de proies (sur les 48 proies pour chaque répétition) ayant été au moins une fois remises à la surface durant la répétition, c'est-à-dire une proie déterrée une fois est comptée comme déterrée jusqu'à la fin de la répétition.

Les déterrages des proies ont suivi une dynamique plutôt similaire entre les répétitions, témoignant de l'existence d'un mécanisme de déterrage non aléatoire (les répétitions étant les différentes couleurs sur la Figure 18). On observe pour toutes les répétitions une forte intensité de déterrage des proies dans les premières heures de pâturage des poules, suivi d'une augmentation croissante jusqu'à un palier après environ 25h de pâturage net des poules. En moyenne sur les quatre répétitions, 80,72% (±9,38%) des proies ont été déterrées au moins une fois durant la répétition dans la modalité « avec poules ». A la fin des répétitions 1, 2 et 3, 85,42% des proies étaient déterrées. La répétition 4 se différencie des autres avec un pourcentage de proies déterrées à la fin de la répétition plus faible : 68,75%. En moyenne, 2,41 (±1,57) proies étaient déterrées par heure de pâturage net des poule. Des

Une analyse de type Kaplan-Meier (méthode décrite partie 3.2.3.1.5) sur les données de déterrage des proies nous a aussi permis de calculer, entre autres, la probabilité au cours du temps pour une proie de rester enterrée.

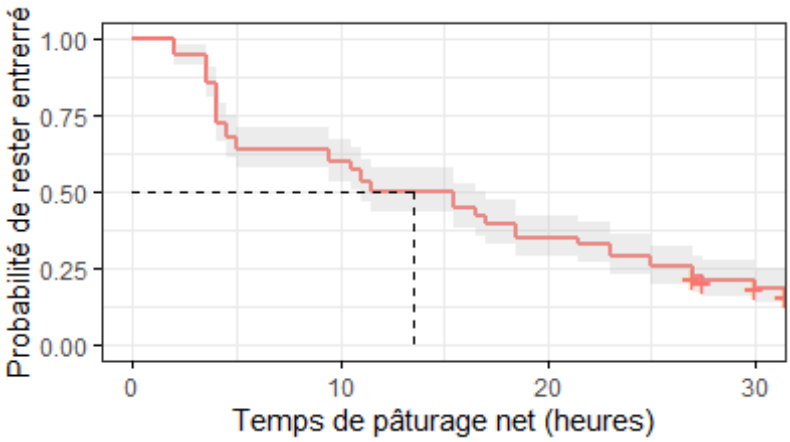


Figure 19 : Graphique de Kaplan-Meier représentant l'évolution au cours du temps des probabilités de non-déterrage des proies. La courbe représente la probabilité qu'une proie soit encore enterrée au-delà d'un temps donné. Ligne pointillée : temps de survie médian. Zone grisée : intervalle de confiance.

On observe dans le graphique en escalier de Kaplan-Meier ou « courbe de survie » (Figure 19), une baisse rapide de la probabilité de rester enterré. La probabilité moyenne d'être restée enterrée après seulement 30h de pâturage est de 0,124. La moyenne du temps de survie médian sur les quatre répétitions est de 13,5 heures de pâturage.

Cependant, les courbes de Kaplan-Meier sont significativement différentes entre les répétitions (Figure 20) (test du log-rank, test pour comparer des courbes de survies, Chisq= 16.3, ddl=3, p= 0.001).

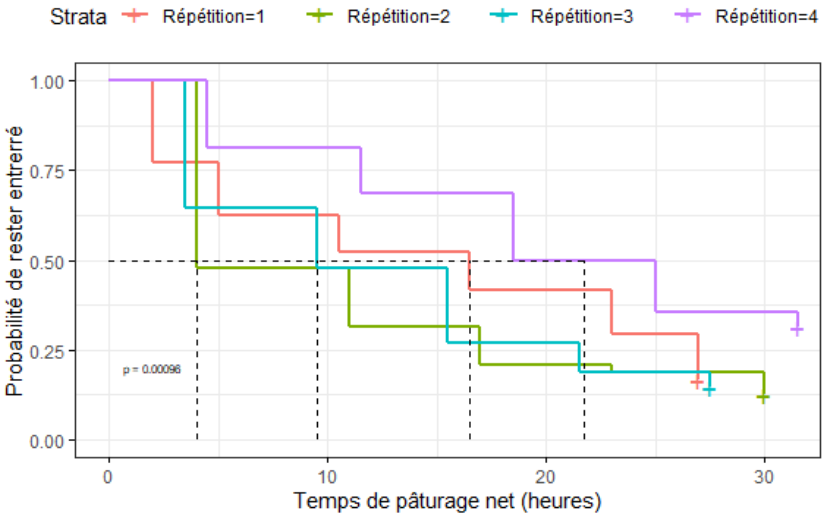


Figure 20 : Graphique de Kaplan-Meier représentant l'évolution au cours du temps des probabilités de non-déterrage des proies. Les courbes de différentes couleurs représentent les courbes de probabilité pour les différentes répétitions. P-value : test de log-Rank, comparaison des répétitions entre elles. Lignes pointillées : temps de survie médian pour chaque répétition.

Les temps de survie médians sont également différents avec, pour la répétition 2, un temps de survie médian très court (4h), et des temps de survie de 9,5h pour la répétition 3, de 16,5h pour la répétition 1 et de 21,8h pour la répétition 4. Ces quatres répétitions montrent la non-uniformité dans le temps de la dynamique de déterrage des proies par les poules.

4.2.4. Les caractéristiques de ce phénomène de déterrage en lien avec les comportements des poules

Dans cette partie, nous proposons d'explorer plus en détail ces observations de déterrage des proies. Il s'agit de préciser notamment leurs caractéristiques spatiales, temporelles, et leur lien avec les comportements des poules afin d'étudier la pertinence de ces caractéristiques par rapport à un éventuel service de régulation de ravageurs en conditions réelles.

4.2.4.1. Déterrage

4.2.4.1.1. *Des proies déterrées dans tout le parcours mais de manière hétérogène*

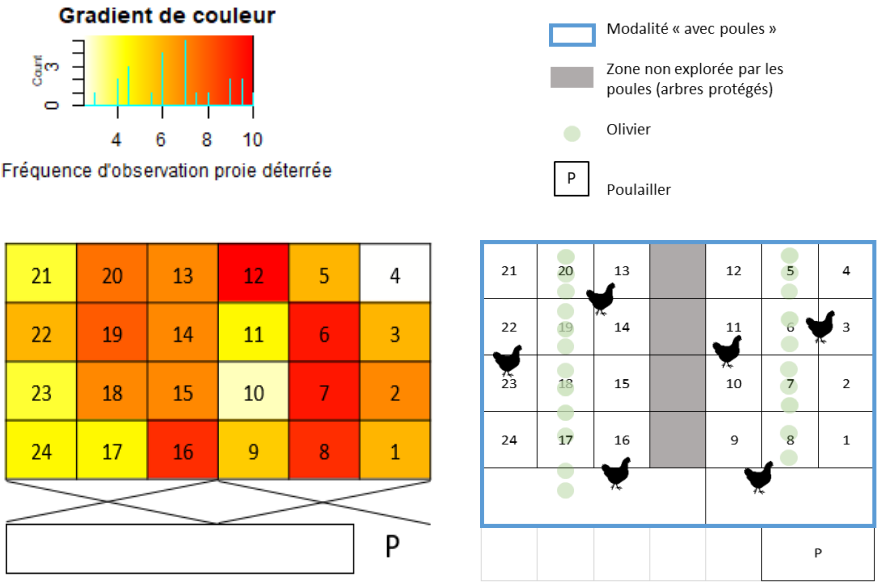


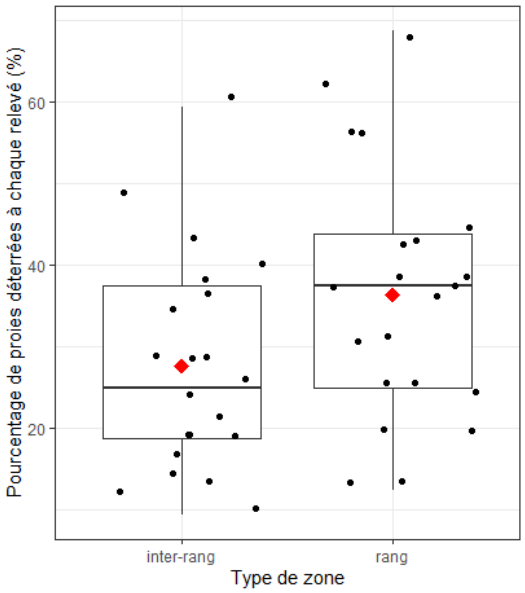
Figure 21 : A gauche, Heatmap des observations de déterrage des proies dans la parcelle avec poules. Cette carte présente, par un gradient de couleur pour chaque zone, le nombre de fois où les proies ont été remises à la surface (en cumulé) au cours des quatre répétitions (la valeur représentée est la moyenne des fréquences de déterrage pour les deux proies cachées dans chacune des zones). Le quadrillage représente le zonage avec un numéro dans chaque zone. Les croix représentent les zones non étudiées. P= le poulailler. A droite, représentation schématique de la parcelle

Les proies ont été déterrées partout sur le parcours. Au total sur les quatre répétitions, une proie dans une zone était déterrée 6,42 fois sur les 20 relevés (5 relevés par répétition) (moyenne des deux proies de chaque zone). Chaque proie a été déterrée au minimum de

2,5 fois et au maximum de 10 fois (Figure 21). Ces observations confirment l'exploration de l'ensemble du parcours par les poules et une potentielle pression sur les proies sur tout le parcours.

Cependant, on observe des zones où les fréquences de déterrage des proies sont particulièrement élevées. Par exemple, dans la zone 8, proche du poulailler et de l'aire de nourrissage, les proies sont fréquemment déterrées (en moyenne 9 fois sur les 20 relevés). En revanche, les deux autres zones proches du poulailler (zones 1 et 9) présentent des fréquences de déterrage plus faibles et ne font pas partie des 10 zones pour lesquelles les fréquences de déterrage sont les plus importantes. Dans les quatre zones avec les plus faibles fréquences moyennes de déterrage, on trouve les zones 4, 21 et 23 qui sont des zones de bord de parcelle indiquant une certaine crainte des poules vis à vis du filet électrique.

Des cartes thermiques plus détaillées (pour chacune des répétitions) sont présentées en Annexe J :.



Pour rappel, les 24 zones ont été classées en deux différents types de zones : des zones sous un rang d'arbres et zones dans un inter-rang. Le boxplot Figure 22 montre que la proportion de proies déterrées à chaque relevé était plus importante dans les zones situées sous un rang d'oliviers que dans les zones d'inter-rang, indiquant une plus forte pression des poules sur les proies cachées sous les arbres, différence de pourcentage significative entre les deux types de zones (ANOVA, df=1, F=3.71, p=0,0612).

Figure 22 : Boxplot du pourcentage de proies déterrées en fonction du type de zone (sous un rang ou dans l'inter-rang). Chaque point représente le pourcentage de proies déterrées pour un relevé sur toutes les proies cachées dans les zones de rang et sur toutes les proies cachées dans les zones d'inter-rang. Losange rouge=moyenne.

4.2.4.1.2. *Pas de différence dans le déterrage des proies en fonction du moment de la journée*

Pour rappel, les proies observées comme déterrées lors du relevé de l'après-midi sont le résultat du pâturage des poules de 9h à 15h30 et les proies déterrées le matin sont le résultat du pâturage de 15h30 à 9h (les poules n'ayant pas accès au parcours la nuit). Dans la modalité « avec poules » au relevé de l'après-midi, en moyenne 32% des proies étaient déterrées contre 26,8% de proies déterrées lors des relevés du matin. Cette différence entre les moyennes n'est pas significative (Test de comparaison de moyenne t-test, pvalue=0,369), et indique que les proies sont déterrées indifféremment en fonction de ces deux moments de la journée. Un boxplot de comparaison de proies remises à la surface en fonction du moment de la journée est disponible en Annexe K :.

4.2.4.2. Etude des comportements des poules

4.2.4.2.1. *Les poules passent la majorité de leur temps en recherche de nourriture*

Grâce aux « scans » de comportement réalisés à pas de temps réguliers sur chacune des six poules, nous avons pu établir des « budgets temps » accordés à tel ou tel comportement.

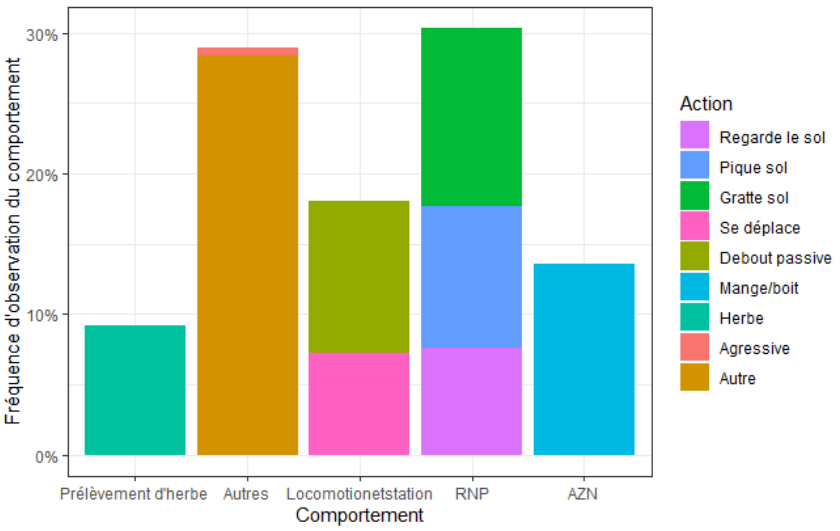


Figure 23 : Barplot des comportements avec le détail des différentes actions. La fréquence d'observation du comportement en pourcentage représente la part de chaque comportement parmi toutes les observations faites durant les répétitions 1, 2 3 et 4.

La Figure 23 montre que les comportements majoritaires sont les comportements liés à la recherche de nourriture dans le parcours (RNP). En effet, les poules ont consacré 30,33% de leur budget temps d'une journée de pâturage de 9h à 17h à ce comportement. Les autres comportements représentent 13,52% du temps à l'alimentation à la zone de nourrissage (AZN), 9,15% à manger de l'herbe, 18,03% à se déplacer ou être debout sans rien faire (comportements de locomotion et station). Cependant, les comportements « autres » représentent aussi une part importante du budget temps des six poules : 28,96% du temps.

4.2.4.2.2. *Des comportements de recherche de nourriture plutôt uniformes au cours de la journée*

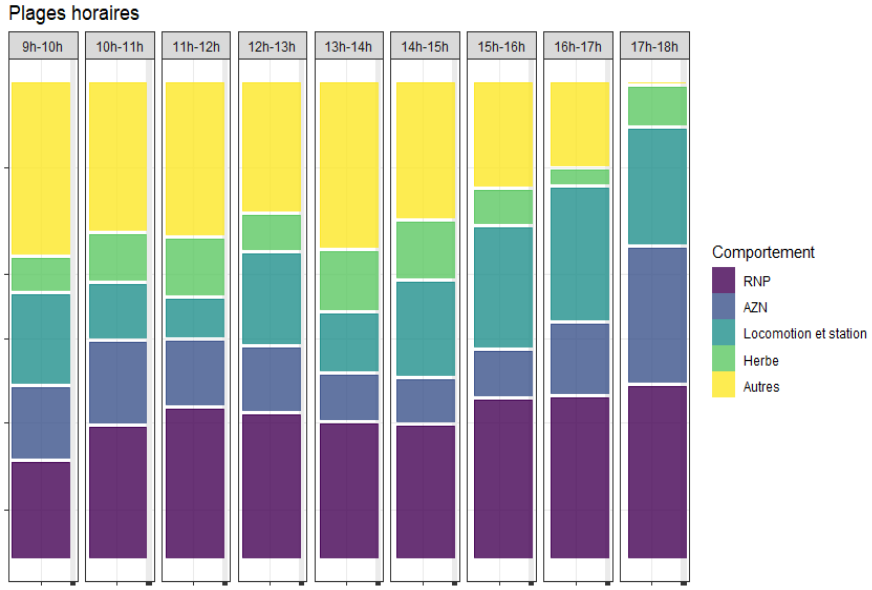


Figure 24 : Graphique en mosaïque présentant la part de chaque comportement en fonction des heures de la journée. Chaque colonne correspond à une plage horaire d'observation des comportements. Les quatre répétitions ont été regroupées.

Les variables comportement et heure de la journée présentent une dépendance statistiquement significative (X-squared = 52.168, df = 32, p-value = 0.01363). Cependant, ces variations d'importance des comportements selon le moment de la journée ne concernent pas tous les comportements. En effet, les comportements de recherche de nourriture dans le parcours (RNP) semblent représenter une proportion plutôt constante tout au long de la journée (Figure 24).

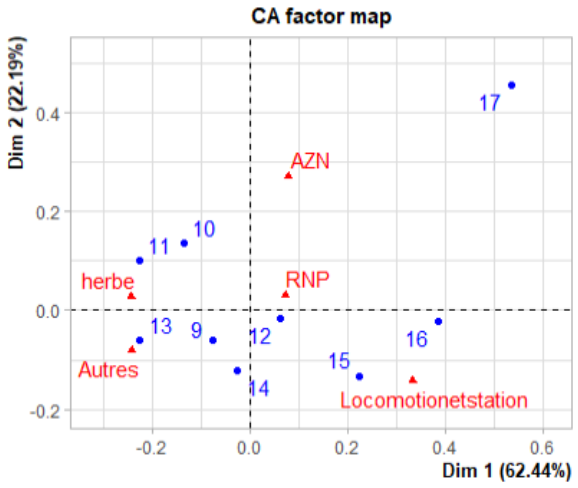


Figure 25 : AFC des variables comportement et heure de la journée. Le point 9 indique les observations de comportement qui ont eu lieu entre 9h et 10h, le point 10 entre 10h et 11h, etc...

L'AFC présenté en Figure 25 permet d'établir des liens plus fins entre certains comportements et les heures de la journée. Le comportement AZN (alimentation dans la zone de nourrissage) est très lié à la période entre 17h et 18h (X-squared = 639.15, df = 1, p-value <2.2e-16). La période entre 13h et 14h est liée aux comportements de consommation d'herbe comme on peut le voir sur l'AFC Figure 25. Les comportements de locomotion et station sont plutôt liés aux dernières heures de la journée : entre 15h et 18h (droite de l'axe 1). En revanche, les comportements de recherche de nourriture dans le parcours (RNP) au centre du graphique de l'AFC, ne sont pas liés à un horaire en particulier, ce qui confirme la tendance relevée plus tôt : les poules recherchent de la nourriture indifféremment de l'heure de la journée.

4.2.4.2.3. *Les poules préfèrent les zones sous les rangs d'arbres que les inter-rangs et adoptent des comportements différents selon les zones*

En prenant en compte qu'il y a un nombre plus élevé de zones d'inter-rang que de zones de rang, les poules passent quand même significativement plus de temps dans les zones situées sur le rang (X-squared = 67.91, df = 1, p-value < 2.2e-16).

Tableau 6 : Tableau de contingence en pourcentage, pour chaque type de zone : dans le rang et zone d'inter-rang, part de chaque comportement sur le total de toutes les observations de comportement. Sommes sur les 4 répétitions.

	Autres	Locomotionetstation	RNP	herbe	AZN
InteRang	19.47	21.37	40.08	19.08	0.00
Rang	30.08	21.48	41.02	6.64	0.78

De plus, il y a un fort lien entre le comportement des poules et le type de zone dans laquelle elles se trouvent (rang ou inter-rang) (X-squared = 34.147, df = 4, p-value = 6.953e-07) (Tableau 6). Le comportement de prélèvement d'herbe est plus représenté dans les zones d'inter-rang que sous les arbres Tableau 6 : Tableau de contingence en pourcentage, pour chaque type de zone : dans le rang et zone d'inter-rang, part de chaque comportement sur le total de toutes les observations de comportement. Sommes sur les 4 répétitions. (X-squared = 16.715, df = 1, p-value = 4.343e-05). Les comportements de recherche de nourriture dans le parcours (RNP) sont observés en proportion identique dans les zones de rang et d'inter-rang (X-squared = 0.016435, df = 1, p-value = 0.898).

4.2.4.2.4. *Des différences interindividuelles marquées dans les comportements de recherche de nourriture par les poules*

On s'intéresse ici à regarder la variabilité des comportements selon les individus. Pour rappel, les six poules de l'expérimentation étaient distinguées individuellement par des bandes adhésives de couleur différente (orange, jaune, blanche, bleue, rouge, et verte).

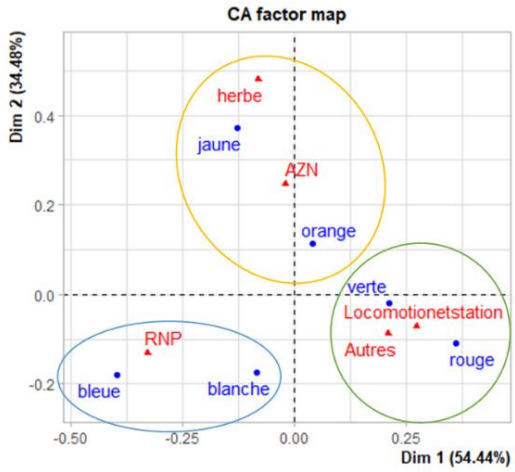


Figure 26 : AFC des variables comportements et poule (chaque poule étant signifiée par la couleur de sa bague).

Tableau 7 : tableau de contingence en pourcentage, proportion de chaque comportement observé par poule

	Autres	Locomotionetstation	RNP	herbe	AZN
blanche	30.3	17.2	37.7	7.4	7.4
bleue	20.5	11.5	50.0	4.9	13.1
jaune	20.5	13.1	27.9	17.2	21.3
orange	27.9	19.7	27.0	13.9	11.5
rouge	36.1	28.7	18.0	4.9	12.3
verte	38.5	18.0	21.3	6.6	15.6

Durant l'expérimentation, nous avons remarqué des différences interindividuelles marquées entre les poules au niveau du comportement. La variable du comportement et l'identification des poules sont très significativement dépendantes (X-squared = 90.86, df = 20, p-value = 5.242e-11). Comme visible sur le graphique de l'AFC (Figure 26), certains éléments des lignes du tableau de contingence (Tableau 7) sont fortement liés aux colonnes, par exemple « poule rouge » et le comportement de « locomotion et station » sont proches et se situent à l'extrême droite de l'axe 1. A l'opposé de l'axe 1 la poule bleue et les comportements de « recherche de nourriture dans le parcours » (RNP) sont très proches donc très liés. Sur l'axe 2, la poule jaune est très liée au comportement de prélèvement d'herbe. Avec la représentation de cette AFC, il est alors possible de regrouper les poules en sous-groupes selon leurs habitudes comportementales. Ces sous-groupes de poules avec leurs comportements caractéristiques sont présentés sur le graphique de l'AFC (Figure 26), entourés en couleur. On distingue alors trois groupes :

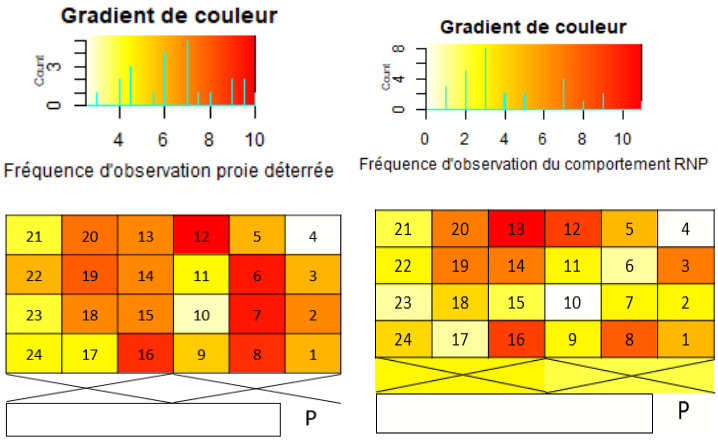
- « Les poules exploratrices » : les poules bleue et blanche sont très liées au comportement de recherche de nourriture sur le parcours (RNP) avec respectivement 50% et 37,7% de leur budget temps individuel (Tableau 7). Ces poules bleue et blanche ont des comportements très similaires.
- « Les poules passives » : les poules rouge et verte ont des comportements non liés à la recherche de nourriture dans le parcours, et une majorité de comportements « autres ».
- « Les poules complètes » : orange et jaune, situées plutôt au centre de l'axe 1 de l'AFC, présentent des proportions de chaque comportement très homogènes. Ces deux poules sont également celles qui passent le plus de temps à prélever de l'herbe.

En Annexe L :, un graphique en mosaïque représente la proportion de chaque comportement observé chez les différentes poules.

Ces analyses comportementales des poules ont permis de mettre en lumière une forte activité de recherche de nourriture des poules dans le parcours, nuancée par des hétérogénéités dans l'exploration spatiale de la parcelle, des variations dans les comportements au cours de la journée et de fortes différences interindividuelles.

4.2.4.2.5. *Pas de lien avéré entre les actions des poules et les zones où les proies étaient les plus fréquemment déterrées*

Enfin, nous nous sommes intéressés au lien entre les comportements des poules dans certaines zones et le déterrage des proies, en comparant des heatmaps de fréquence de déterrage et de fréquence d'observation des comportements de recherche de nourriture.



Déterrage des proies

Comportement de recherche de nourriture dans le parcours (RNP)

Figure 27 : Ces deux cartes sont des représentations spatiales des données. Le quadrillage représente le zonage de la parcelle avec un numéro dans chaque zone. Les croix représentent les zones non étudiées. P= le poulailler.

A gauche : Heatmap des observations de déterrage des proies dans la parcelle avec poules (voir légende Figure 22)

A droite : Heatmap des fréquences d'observation du comportement de recherche de nourriture dans l'environnement (RNP). Cette carte présente par un gradient de couleur pour chaque zone le nombre de fois où le comportement RNP a été observé en cumulé au cours des quatre répétitions.

Visuellement, on observe que certaines zones où le déterrage des proies était particulièrement fort sont aussi des zones où les comportements de recherche de nourriture étaient importants, comme dans les zones 8, 16, 12,13 et 19. A l'opposé, les zones 10 et 4 sont visuellement des zones où le déterrage des proies et les comportements de recherche de nourriture n'étaient pas fréquents.

Les données de comportement et les données de déterrage de proies n'ont cependant pas montré de corrélation entre elles. Le test de corrélation de Pearson pour les quatre répétitions confondues donne le résultat suivant : t=1,0216, df=22, p-value=0,3181, cor=0,2128 (et cor= 0,398, 0,123, -0,083, -0,293 pour respectivement les répétitions 1, 2, 3 et 4). Il n'y a donc pas de liens clairs entre les zones où les proies étaient les plus souvent déterrées et les comportements de recherche de nourriture par les poules.

Pour chacune des zones et pour chaque répétition, des heatmaps de fréquence d'observations des poules et des comportements de recherche de nourriture sont présentées en Annexe J :.

4.3.Effet de la présence de poules sur les arthropodes épigés du verger

Un protocole de piégeage a été mis en place pour tester l'effet de la présence de poules sur les arthropodes de la surface du sol (cf partie 3.2.3). Deux parcelles de variété différente de pommes (Reinette grise du Canada et Rouge provençale d'hiver) présentent chacune les deux modalités « avec poules » et « sans poules ».

4.3.1. Inventaire général

Au total, 3 925 arthropodes ont été piégés durant ces sept semaines de piégeage avec pots Barber. Pour les deux modalités confondues (« avec poules » et « sans poules »), les fourmis correspondent au groupe fonctionnel le plus représenté en activité-densité d'individus piégés et comptent pour 26,80% du total d'individus piégés. Suivent ensuite les araignées (18,29%), les cloportes (13,71%), les blattes (9,83%), les staphylins (8,94%), les opilions (6,80%), les autres coléoptères (3,13%), les orthoptères (1,94%), et enfin les forficules (1,10%). Les autres groupes fonctionnels (hémiptères, myriapodes et autres) sont retrouvés dans des proportions négligeables. Il y a une forte hétérogénéité dans l'activité-densité entre les différents groupes (ANOVA, F=28.842, df=12, P<2^{e}-16).

Au total, nous avons identifié huit ordres récurrents, croisés dans les deux modalités : Isopoda, Hymenoptera, Coleoptera, Araneae, Opiliones, Orthoptera, Dermaptera, Hémiptera. A l'échelle de l'ordre, l'ordre des Coléoptera arrive à la 4ème place des ordres les plus représentés avec 12,08% des individus totaux car représenté par les staphylins et les autres coléoptères.

Parmi les différents groupes, ont été piégé : des détritivores comme les cloportes, des omnivores comme les blattes, fourmis, certains orthoptères, des phytophages comme certains coléoptères, certaines araignées, certains orthoptères et enfin des prédateurs comme les opilions, certaines araignées, les staphylins, et certains coléoptères.

4.3.2. Pas de différence significative de l'activité-densité des différents groupes entre les modalités « avec poules » et « sans poules »

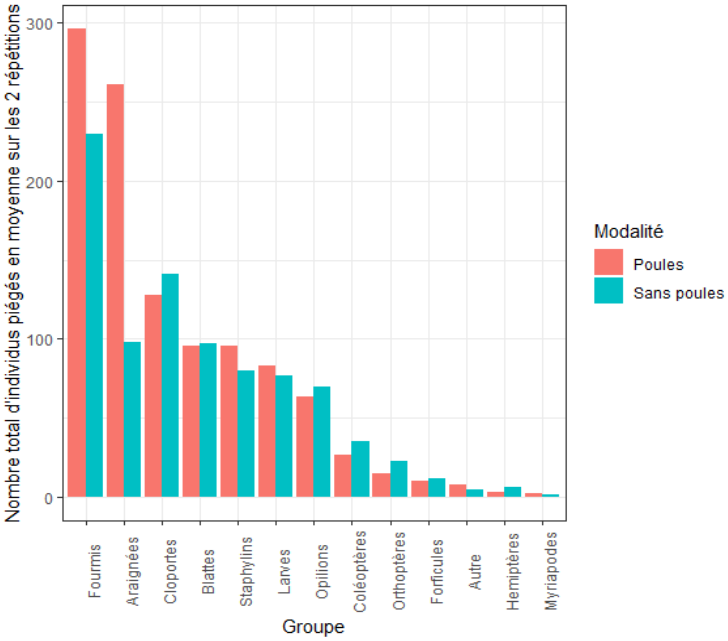


Figure 28 : Histogramme du nombre moyen d'individus piégés sur les 2 parcelles par groupe et par modalité (« sans poules » et « avec poules »).

Les pots Barber de la modalité « avec poules » ont piégé significativement plus d'araignées que les pots de la modalité « sans poules » (ANOVA, F=15.47, df=1, P=0.00199), voir l'histogramme Figure 28. Cependant, aucune différence significative d'activité-densité n'est relevée entre les deux modalités pour les autres groupes : absence de différences significatives dans les tests pour les cloportes (F= 0.036, df=1, P=0.853), les fourmis (F= 1.834, df=1, P= 0.201), les staphylins (F=0.043, df=1, P=0.839), les coléoptères (F= 0.435, df=1, P=0.522), les blattes (F=0.001, df=1, P=0.98) et les orthoptères (F=0.881, df=1, P=0.397).

La différence statistiquement significative d'activité-densité pour le groupe « araignées » entre les modalités « avec poules » et « sans poules » est particulièrement marquée pour la parcelle Reinette grise du Canada (F= 16.42, df=1, P=0.0016) et n'est pas significative pour la parcelle Rouge provençale d'hiver (F= 1.235, df=1, P=0.288).

4.3.3. Une variabilité dans les résultats de piégeage entre les deux parcelles de variété différente de pommes

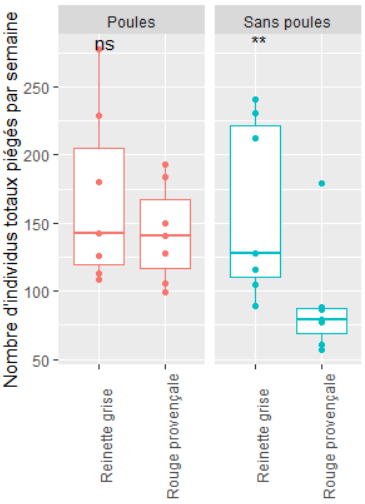


*Figure 29 : Boxplot du nombre total d'individus piégés (tous groupes confondus) par modalité et par parcelle. Chaque point représente la somme des individus piégés dans les 3 pots à une date de relevé (7 dates en tout). Codes de significativité : comparaison du nombre d'individu piégé entre les 2 parcelles de chaque modalité, ** p-value (0.001, 0.01], ns : non significatif.*

Les pots de la modalité « sans poules » placés dans la parcelle Rouge provençale ont moins piégé d'individus que les pots dans les trois autres traitements (Figure 29). Au sein de la modalité « sans poules », une différence statistiquement significative du nombre d'individus piégés (Figure 29) est mise en évidence entre les deux variétés

4.3.4. Pas d'effet des poules sur la diversité des carabes

	Sans poules	Avec poules	tot
Carabus coriaceus	1	1	2
Brachinus sclopeta	0	1	1
Harpalus dimidiatus	1	4	5
Harpalus distingendus	1	2	3
Microlestes spp	1	0	1
Calathus fuscipes	5	4	9
Calathus circumseptus	0	1	1
Pseudophorus rufipes	3	2	5
Ophonus azureus	0	1	1
Ophonus sabulicola	0	1	1
Cycindera germanica	1	3	4
Acinopus picipes	2	1	3
Acinopus ssp	1	0	1
	16	21	37

Sur les 474 coléoptères piégés au total (staphylins inclus) durant les sept semaines de suivi, 37 coléoptères appartenaient à la famille des Carabidae (soit 7,81% des coléoptères). 16 carabes ont été piégés dans la modalité « sans poules » et 21 dans la modalité « avec poules ». Les 37 individus piégés représentent en tout 13 espèces différentes, dont les effectifs par espèce sont présentés Tableau 8. La richesse spécifique est de 9 espèces rencontrées dans la modalité « sans poules » et de 11 espèces dans la modalité « avec poules ».

Tableau 8 : Nombre d'individus piégés par espèce dans les deux modalités

Le genre le plus représenté en activité-densité est *Cathalus* avec 10 individus piégés au total (5 dans la modalité « avec poules » et 5 dans la modalité « sans poules »), suivi de *Harpalus* avec 8 individus et *Pseudophorus* avec 5 individus. Un pic dans le nombre d'individus piégés a été remarqué entre le 24 mai et le 14 juin.

Tableau 9 : Comparaison des différents indicateurs de biodiversité des Carabidae pour les deux modalités « avec poules » et « sans poules » en prenant en compte tous les individus piégés au cours de la période d'expérimentation

Modalité	Richesse spécifique (S)	Shannon (H)	Pielou (J)
Poules	11	2,227	0,929
Sans poules	9	1,977	0,900

Les moyennes des indices de Shannon de chaque semaine sont pour la modalité « avec poules » de 0.675 et pour la modalité « sans poules » de 0.388. La différence entre les deux modalités n'est pas significative (df=1, F=1,01, P=0.335). L'indice de Shannon général (avec la somme des individus piégés pour chaque espèce sur toutes les semaines) est de 2.227 dans la modalité poules et 1.977 dans la modalité sans poules. De la même manière, les indices d'équitabilité de Piélou pour toutes les semaines est presque identique entre les deux modalités mettant en avant les abondances identiques de différentes espèces. Ces résultats ne permettent pas de mettre en avant de différences dans la diversité les Carabidae due à la présence de poules.

5. Discussion

5.1. Discussion des résultats

5.1.1. En fin de G1, impossible de conclure sur un éventuel effet de la présence des poules sur les émergences de carpocapse et sur les fruits piqués

Dans les expérimentations SaniCarpo et PataFix, les résultats ont permis de mettre en avant deux constats communs dans les deux modalités (« avec poules » et « sans poules ») : les taux de fruits piqués au premier comptage sont particulièrement bas et les pièges delta dans les parcelles sous filets ont piégé très peu de papillons. Ces observations vont à l'encontre des hypothèses de départs, nous nous attendions à des taux de fruits piqués beaucoup plus importants et des piégeages en raison de l'historique des parcelles d'essai.

Alors pourquoi si peu de piégeages cette saison sous les filets des expérimentations ? Et pourquoi si peu de fruits piqués sous ces mêmes filets ?

En ce qui concerne les **piégeages**, la pression carpocapse particulièrement forte sur le site d'étude aurait dû se traduire par des piégeages importants dans les parcelles sous filets. Or, ce n'a pas été le cas. Les piégeages à l'extérieur des filets ont suivi les pics de populations annoncés par le bulletin de santé du végétal (BSV)[6]. En effet, le BSV du 15 juin (DRAAF PACA 2022c) alertait de la « forte pression » de carpocapses pour une première génération ce qui correspondait bien à l'augmentation progressive du piégeage extérieur aux filets. Le BSV annonçait aussi un début du vol de deuxième génération le 14 juin, ce qui correspondait à nouveau au pic de piégeage observé dans le piège extérieur (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). On aurait alors pu s'attendre à une augmentation parallèle des piégeages de première génération dans les parcelles sous filets et à un pic de piégeage équivalent correspondant à la deuxième génération.

L'hypothèse principale pouvant expliquer les faibles piégeages sous les filets pourrait être liée au choix du système de piégeage mal adapté aux spécificités du site d'essai avec des pièges disposés trop proches les uns des autres. Miller et al. (2010) détaille ainsi les mécanismes qui guident les carpocapses mâles jusqu'à la source de phéromones : les carpocapses détectent la phéromone, entrent en contact avec le panache, puis sont guidés jusqu'à la source. L'échec des piégeages dans nos expérimentations pourrait être dû à des attractions trop nombreuses, et donc des « interférences » dans les panaches de phéromones. En effet, dans le cas de « compétitions » entre différentes sources d'attraction, la fréquence à laquelle les carpocapses trouvent les pièges est réduite (Miller et al. 2010). Les carpocapses présents sous les filets de nos expérimentations étaient contraints par le filet et ne pouvaient pas a priori partir vers d'autres sources de phéromones mais ont pu être « perturbés » et ne pas trouver le piège présent dans la parcelle. Le fabriquant des pièges conseille une densité de 1 à 2 pièges par hectare, les pièges étant capables de piéger à une distance d'une centaines de mètres à plusieurs kilomètres (Chafaa 2008). Dans notre expérimentation, la densité était de 9 pièges pour 4,8ha soit 1,88 pièges/ha. Le problème n'était donc pas la densité à l'hectare mais plutôt que certains pièges étaient très rapprochés les uns des autres (parfois moins de 30 m d'écart). Le piège extérieur sans filet était disposé au-delà de cette distance ce qui pourrait expliquer qu'il n'ait pas ou peu été impacté. Il est aussi possible que le vent ait également joué un rôle dans le faible nombre de papillons piégés (Mani, Wildbolz 1977). En effet, de forts épisodes de vents ont eu lieu durant les expérimentations et certaines parcelles étaient fortement exposées au mistral.

[6] Le BSV se base sur un modèle de population (modèle carpocapse DGAL-Onpv/Inoki®)

De manière analogue, concernant les **taux de fruits piqués**, sur les trois pommiers placés hors des filets qui ont fait l'objet de comptages de fruits piqués, deux témoignent d'une très forte pression carpocapse au sein de la ferme accueillant les expérimentations respectivement 65,17% et 93,42% de fruits piqués, en comparaison, les pourcentages de fruits piqués dans les modalités sous filets sont en Annexe M :. De plus, ces parcelles avaient été initialement choisies car elles présentaient un historique de forte pression carpocapse (les pourcentages de fruits piqués la saison dernière sont également détaillés en Annexe M :). Les parcelles n'ayant subies aucun traitement contre le carpocapse, on pouvait alors faire l'hypothèse que l'inoculum de carpocapse hivernant localement était fort.

Une première **explication** pourrait reposer sur le fait qu'il soit encore trop tôt dans la saison pour observer un effet sur fruits piqués. La population de carpocapse étant croissante durant la saison avec un enchainement des générations, il est préférable d'attendre les comptages à la récolte (Franck et al. (2011). Lors de la saison précédente et d'après l'arboricultrice de la Ferme de la Durette, la différence entre les attaques de G1 et celles de G3 était très importante, plus particulièrement sur la variété Goldrush. On peut donc s'attendre à une tendance d'augmentation des attaques de la même manière cette saison.

Une autre **hypothèse** plausible pour expliquer ce faible taux de fruits piqués dans les parcelles sous filets pourrait être liés à l'impact des filets sur l'accouplement. En effet, les filets perturbent physiquement les accouplements ayant normalement lieu au-dessus de la frondaison des arbres et donc réduisent les pontes et par conséquent les attaques de larves de deuxième génération (Capowiez et al. (2013). C'est ce principe même qui est recherché par les arboriculteurs mettant en place des filets Alt'Carpo. Cette dernière hypothèse pourrait expliquer pourquoi les taux de fruits piqués sont si bas sous les filets.

De plus, la différence entre les piqûres sur fruits en 2022 et en 2021 (Annexe M :) pourraient être expliquée par le fait que les filets avaient été déployés beaucoup trop tardivement en 2021, les carpocapses endogènes n'ont donc pas la même subit la même perturbation de la reproduction qu'en 2022.

Dans les expérimentations SaniCarpo et PataFix, aucun effet des poules n'a été mis en avant. Ces premiers résultats ne permettent pas de confirmer les hypothèses définies dans la partie 3.1.4.1. L'impossibilité de conclure s'explique en partie par les différences non significatives de piqûres entre les deux modalités, les très faibles taux de fruits piqués et la quasi absence de piégeage dans les parcelles. Par ailleurs, les comptages finaux de fruits piqués se feront à la récolte, et permettront de confirmer ou nuancer les premières tendances observées.

5.1.2. Pas d'observation de la consommation directe des carpocapses dans l'expérimentation PrédaCarpo

Dans l'expérimentation PrédaCapo, les poules n'ont pas consommé les larves de *C. pomonella* cachées dans les premiers centimètres du sol. L'observation « proie disparue » (support cartonné + cocon) a été faite significativement plus dans la modalité « avec poules » que « sans poules » (voir partie 4.2.2), mais ne témoigne pas, selon nous, d'une prédation des poules. Plus vraisemblablement, ces disparitions pourraient être dues à la circulation des poules sur la parcelle et leurs comportements de grattage/picorage. Ces disparitions ont également pu être favorisées par l'humidité qui fragilisait le support cartonné. Les autres observations d'état des proies n'ont pas permis de mettre en avant la prédation. De plus, aucun événement de prédation sur les proies placées dans le dispositif de troncs de chêne évidés n'a été observé. Cette observation complémentaire marque un résultat intéressant, ainsi dans ce contexte expérimental, les poules n'ont pas consommé de carpocapse en diapause dans les anfractuosités des troncs, pourtant un des lieux de diapause préférentiel des carpocapses (MacLellan 1960). Des résultats contraires ont été observés sur des oiseaux sauvages (Solomon et al. 1976).

Cependant, le test de sélectivité des poules, expliqué en Annexe E : a permis de confirmer que les poules pouvaient consommer du carpocapse donné directement « à la gamelle » sous ses formes « carpocapse nu » mais aussi « larve diapausante en cocon » dans une moindre mesure. De plus, même si la capacité de prédation des poules sur larves en diapause n'a jamais été prouvée, les oiseaux sauvages prédatent les larves en diapause (Solomon et al. 1976) et les poules étant des prédatrices omnivores (Clark, Gage 1996) au même titre que ces oiseaux, elles pourraient adopter les mêmes comportements alimentaires.

Plusieurs suppositions permettraient d'expliquer l'absence d'observations de prédation durant l'expérimentation alors que les poules peuvent consommer du carpocapse lorsqu'on leur en donne.

Notre hypothèse principale repose sur le fait que le support cartonné utilisé n'était pas adapté et représentait un « obstacle » à la consommation du carpocapse par les poules. Nous supposons que la matière cartonnée, la forme de la découpe, la couleur, l'odeur ou encore la grosseur des supports cartonnés représentaient un obstacle pour les poules. En complément, durant le test de sélectivité, il a été remarqué que les supports cartonnés « gênaient » les poules pour atteindre les larves et que le carpocapse en diapause sur support cartonné donné aux poules faisait souvent l'objet d'un refus de consommation. Cette supposition n'exclut pas l'hypothèse de départ selon laquelle les poules pourraient consommer des larves de carpocapse en diapause en conditions naturelles et expliquerait alors l'absence d'observations de prédation dans notre dispositif.

En second lieu, la larve en diapause n'est peut-être finalement pas le stade du carpocapse préférentiellement prédaté par les poules. L'expérimentation est centrée sur un stade précis du carpocapse : la larve en diapause. Or, il existe deux autres stades où les carpocapses sont plus vulnérables aux prédateurs : lorsque les œufs éclosent et que les larves partent en recherche de fruits, et lorsque les larves quittent les fruits et l'arbre à la recherche de lieux d'hibernation au sol (Solomon et al. 1976). Durant ces deux phases très courtes, les larves sont particulièrement exposées aux attaques d'oiseaux (Glen, Milsom 1978). Il est donc possible que la poule ne soit pas particulièrement attirée par les carpocapses en diapause mais plutôt par les larves errantes au sol. Cette hypothèse va dans le sens du test de sélectivité qui confirme l'attirance des poules pour les proies en mouvement (Annexe E :). Ceci pourrait expliquer qu'aucune prédation des larves en diapause n'ait été observée. Cependant, en conditions réelles, dès que les larves quittent les fruits, elles se mettent immédiatement à la recherche d'un lieu d'hibernation, et le font la plupart du temps la nuit (Balachowsky 1966), ce qui réduit les chances d'une prédation par les poules.

Finalement, il est possible que les poules ne consomment pas de carpocapse en conditions naturelles de verger. Même si, durant le test de sélectivité, des poules ont été observé en train de consommer des larves de carpocapse, ce protocole ne représentait pas les réelles conditions de recherche de nourriture en verger. Cette hypothèse ne peut être totalement confirmée sans d'autres expérimentations notamment sans les résultats d'analyses PCR de fientes de poules récoltées en parcelle afin d'identifier la présence ou non d'ADN de carpocapse. Ces analyses seront réalisées ultérieurement sur des échantillons déjà récoltés, la démarche est expliquée en Annexe N :).

5.1.3. Mais certains mécanismes ont été mis en avant concernant un éventuel impact indirect des poules sur les populations de carpocapses en diapause

Nous dressons ici différents autres mécanismes mis en lumière lors de l'expérimentation PrédaCarpo qui pourraient selon nous impacter les carpocapses en diapause et engendrer une baisse des populations de ce ravageur. La prédation directe, ou consommation, n'est sans doute pas le seul mécanisme régissant les interactions poules-carpocapses en diapause.

Premièrement, la remise à l'air libre des larves en cocon cachées dans le sol pourrait impacter leur survie. Nos données montrent que la probabilité pour une proie d'être déterrée au bout de 30h de pâturage dans les conditions expérimentales est de 0,876 soit une probabilité particulièrement forte. Il est à préciser que d'un point de vue « terrain », cette très courte durée de pâturage est bien inférieure aux durées réelles de pâturage pratiquées par les arboriculteurs (plusieurs semaines). Les caractéristiques des observations de déterrage des proies par les poules (partie 4.2.3) mettant en avant une uniformité du déterrage des proies dans l'espace et au cours d'une journée, accompagné d'un comportement régulier et important de recherche de nourriture. Ces résultats confirment que les poules sont en mesure de remettre à la surface une très forte proportion de carpocapses en diapause potentiellement présents dans les débris de la surface du sol des vergers. Les carpocapses ainsi déterrés se rendent exposés aux dangers de l'environnement extérieur (prédateurs, aléas climatiques…).

De plus, il pourrait y avoir un effet des poules par détérioration des cocons en lien avec leur comportement de grattage du sol. Dans l'expérimentation PrédaCarpo, nous n'avons pas observé directement de détérioration des cocons de *C. pomonella* par les poules (observation de « cocons abîmés ») vraisemblablement à cause du support cartonné protégeant le cocon. Cependant, la dynamique de déterrage des proies cachées met en avant une forte pression des poules sur les couches superficielles du sol (Figure 18). Il y a donc de fortes probabilités pour que les cocons de carpocapse en conditions naturelles soient impactés par les griffes ou le bec des poules et soient ainsi éventuellement endommagés. Balachowsky (1966) indique : *« Si l'on perfore l'hibernaculum ou y découpe une ouverture, […] ces dérangements déterminent une assez forte mortalité »*. Ainsi, le simple fait que les poules détériorent les cocons pourrait accentuer la mortalité des larves. Pour nuancer, il semble cependant difficile que les griffes des poules perforent les cocons étant donné que, en conditions naturelles, les cocons sont protégés dans des tiges d'herbe ou dans des morceaux de bois, et peu d'entre eux sont en diapause à même le sol ou sur des feuilles mortes là où ils seraient plus accessibles (Balachowsky 1966). L'hypothèse selon laquelle les poules pourraient impacter les populations de *C. pomonella* par détérioration des cocons n'a pas été confirmée par l'observation mais reste plausible.

Un troisième mécanisme entrerait en jeu dans la mortalité des larves en diapause dans le verger, à savoir l'effet indirect de la modification de l'environnement par les poules et notamment la modification de la strate herbacée. Des recherches menées sur l'effet du pâturage sur les insectes des milieux agricoles (Kruess, Tscharntke 2002; Pöyry et al. 2006), convergent sur le fait que l'intensité du pâturage impacte négativement l'abondance et la diversité des espèces d'insectes du sol par plusieurs mécanismes liés au pâturage : baisse de la croissance végétale, de l'architecture végétale et de la diversité végétale (Kruess, Tscharntke 2002). Clark, Gage (1996) ont observé une réduction des dommages du charançon de la prune (91% de fruits piqués dans la modalité poules/oies et 79% dans les modalités sans volailles) et selon eux, cette réduction serait due à un effet indirect des volailles qui, en consommant l'herbe, modifieraient l'environnement du charançon, et réduirait son activité. Ainsi, il est probable que les poules, par modification de la strate herbacée et de la structure du sol limitent les ressources et les sites d'hibernation pour le carpocapse.

A termes, ces résultats ouvrent des voies pour creuser certains mécanismes, jusqu'ici non étudiés. De plus, dans le cadre de la thèse de Sara Bosshardt, la partie 4.2.3 concernant le déterrage des proies sera réutilisée dans un modèle de dynamique de populations de carpocapses afin d'incorporer un impact des poules.

5.1.4. Difficile de conclure sur un potentiel impact des poules sur les arthropodes

Les résultats « Arthropodes » n'ont pas montré d'impact de la présence des poules ni sur les abondances d'arthropodes épigés du verger, ni sur les abondances et la diversité des carabes. Aucun de ces ordres n'a été affecté par la présence de poules. Cette expérimentation met en évidence la présence

sur les parcelles d'arthropodes présentés comme des prédateurs redoutables des carpocapses comme les fourmis (Balachowsky 1966), les forficules (Peisley, Saunders, Luck 2016), les carabes (Boreau de Roincé et al. 2010), dont la plupart sont des polyphages se nourrissant d'une grande variété d'insectes (Riddick, Mills 1994). Même si dans notre essai, les prédateurs principaux du carpocapse n'ont pas été affectés par les poules, il est impossible d'affirmer que le service assuré par ces auxiliaires ne soit pas affecté par la présence de poules. Cet absence d'impact des poules sur la biodiversité des arthropodes épigés sera également discutée dans la partie 5.2.3.

Le piégeage Barber présente cependant des limites. La méthode Barber est très dépendante de l'activité des arthropodes et de leur densité locale autour des pièges. De plus, le nombre d'individus et groupes de petits arthropodes, et d'arthropodes peu mobiles ne sont pas représentatifs de la réalité (Bouget, Nageleisen 2009). La méthode des pots Barber est insuffisante pour décrire les populations piégées de manière absolue mais reste intéressante dans le cadre d'une comparaison de différents sites (Spence, Niemelä 1994). Des analyses multivariées sont pertinentes pour relier un groupe à un service et à un itinéraire technique (Mesmin 2018) mais dans notre cas, le nombre de répétitions réalisées ne permet pas d'obtenir une analyse statistique fiable.

Ensuite, il est difficile de lier la présence ou l'absence de certains arthropodes au service de régulation rendu. L'analyse du nombre d'individus piégés par groupe taxonomique présente la limite d'inféoder aux différents groupes une importance équivalente de fonctionnalité ce qui n'est pas le cas et ce qui ne permet pas de conclure sur l'impact qu'aura la baisse de population de certains groupes sur les services de lutte biologiques. L'identification à l'espèce aurait permis de classer tous les individus selon leur régime alimentaire et ainsi d'estimer un impact potentiel sur les proies disponibles dans le verger, même si penser « mesurer » un service rendu en estimant la contribution de chaque groupe fonctionnel semble complexe (Mesmin 2018). Une approche plus « fonctionnelle » avec le regroupement des individus selon leurs traits fonctionnels (taille et régime alimentaire) s'éloigne de la vision très taxonomique, mais aurait permis d'approcher le lien entre un arthropode et sa capacité potentielle de prédation d'un ravageur.

5.2. Prise de recul

Dans cette partie, nous proposons d'explorer, avec un regard plus fin les paramètres qui ont rendus les résultats de ces différentes expérimentations particulièrement complexes à analyser. Ces difficultés ont été imposées (comme les aléas climatiques ou les nombreuses interactions au sein d'un système complexe, difficiles à prendre en compte) ou ont découlées de choix faits lors de la conception des expérimentations (comme la complexité liée à la mise en place de l'expérimentation chez des agriculteur.rice.s).

5.2.1. Imprévus liés aux aléas climatiques

Le contexte climatique a joué un rôle dans les résultats obtenus dans les différentes expérimentations. Ici, il a été choisi d'illustrer ce point avec l'exemple de l'influence de la pluie sur les observations de cocons troués durant l'expérimentation PrédaCarpo.

Dans l'expérimentation, nous pensons que les cocons observés « troués » ne l'ont pas été à cause de l'action des poules (pas de différences entre les deux modalités, et constat fait durant la première répétition uniquement) mais l'ont été à cause de l'humidité.

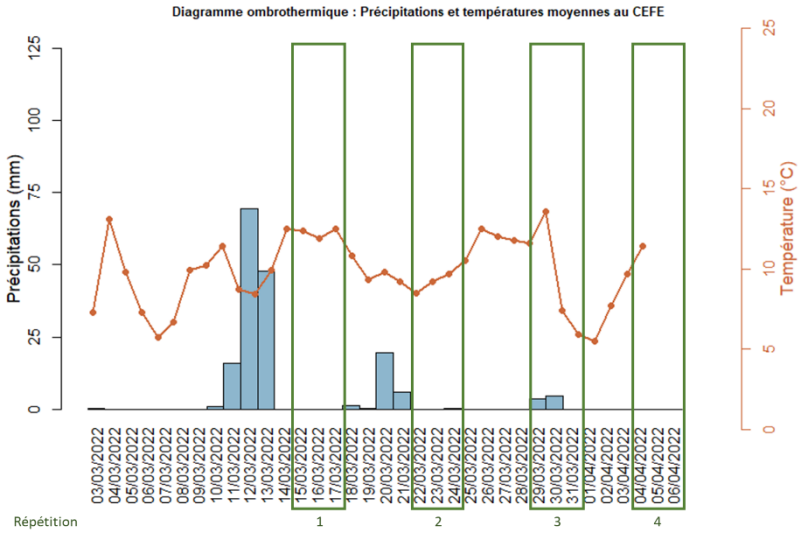


Figure 30 : Source des données : Terrain d'expériences du CEFE, CNRS, 1968-2022

Le diagramme ombrothermique (Figure 30) réalisé grâce aux données de la station météo du terrain d'expérimentation du CEFE présente les données journalières de cumul de précipitation et de moyenne de température, récupérées sur la durée de l'expérimentation. Les limites vertes encadrent les quatre différentes répétitions de l'expérimentation. On peut noter que la première répétition a été précédée de trois jours de fortes précipitations (un épisode pluvieux à caractère cévenol). Glen, Milsom (1978) ont observé l'humidité du sol poussaient les larves à déserter le cocon. Dans leurs observations, 50% des larves quittaient les cocons dans un sol saturé en eau. Dans notre cas, même si les proies n'étaient pas installées dans la parcelle durant les précipitations, le sol est resté humide durant toute la semaine suivante, particulièrement dans le paillage sous les arbres, ce qui a pu déclencher la sortie de diapause d'une partie des larves de carpocapse.

Parmi les autres aléas climatiques, on peut aussi citer le vent qui a parfois emporté les filets, retirant ponctuellement au dispositif sa capacité à exclure les parcelles des vols de carpocapses extérieurs.

5.2.2. L'expérimentation dans une ferme qui impose un cadre de contraintes

Les expérimentations SaniCarpo et PataFix, bien qu'elles soient conçues sur un modèle factoriel, c'est-à-dire évaluant un facteur principal (la présence de poules) sur deux réponses (les populations des carpocapses et les attaques de pommes), ont été mises en place chez des arboriculteurs dans un système déjà existant avec toutes les contraintes inhérentes.

Les dispositifs expérimentaux SaniCarpo et PataFix, mis en place « on-farm » ont imposé des contraintes complémentaires, comme des parcelles avec des variétés différentes. Les résultats de fruits piqués très hétérogènes entre les parcelles mettent en avant un fort effet variété. Les pommiers des parcelles des variétés Reinette Grise et Goldrush sont beaucoup plus attaqués que Rouge Provençale et Garance. Cet effet variétal peut être dû à une variabilité dans l'émission composés volatils et donc leur attractivité pour le carpocapse (Knight et al. 2014). Peisley, Saunders, Luck (2016) ont également observé ce fort effet variétal sur les dégâts à la récolte, rendant difficile l'interprétation des données de prédation de carpocapse par les oiseaux sauvages. Toutefois, la multiplicité des variétés et donc des sensibilités variétales peut représenter un point fort de l'étude, dans la mesure où cela permet de disposer d'un gradient de réponses in fine, plus riche mais plus complexe pour interpréter les résultats, rajoutant une variable à l'équation.

5.2.3. Des dispositifs expérimentaux soumis à une complexité importante

Il s'avère en fait très complexe de lier la présence des poules à une éventuelle réduction des populations de carpocapse, ou un éventuel impact sur la richesse, l'abondance et/ou la diversité des arthropodes en conditions « réelles ». En effet, de multiples interactions sont en jeu entre les différents compartiments du système : la state herbacée, le sol, la biodiversité du sol et les poules. Tous ces compartiments du système étant eux même très dépendants, à une échelle plus large, du contexte

climatique, du paysage et des choix de conduite des agriculteur.rice.s. Même si la présence des poules n'a pas été synonyme d'une baisse dans les abondances d'arthropodes, c'est loin d'être le seul facteur entrant en jeu.

5.2.3.1. Une forte complexité dans les interactions : exemple des interactions poules-couverts-arthropodes

Premièrement, les variations des hauteurs d'herbe dans la saison ont impliqué des variations de l'intensité de l'exploration des parcelles par les poules. Nous avons observé un pic dans les hauteurs d'herbe à partir d'avril 2022 (voir Figure 31). Cette brusque augmentation des hauteurs d'herbe a également eu lieu dans les parcelles « avec poules » en rouge sur la Figure 31. Nous pensons que cette herbe a pu empêcher les poules d'explorer l'intégralité du parcours, les poules ayant du mal à se déplacer dans les herbes très hautes (observation personnelle et dires d'arboriculteurs). Dans un système géré de manière « réelle », l'arboriculteur aurait sans doute fauché l'herbe, l'exploration des poules auraient donc peut-être été plus uniforme sur la parcelle, et donc plus impactante sur les arthropodes.

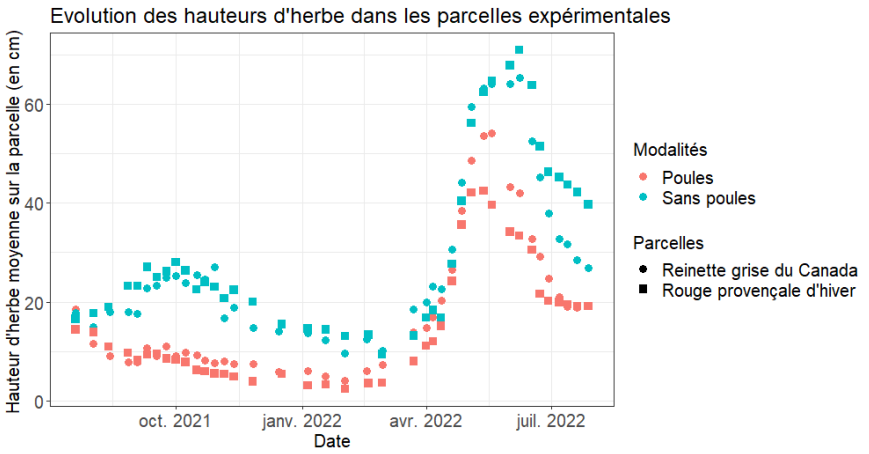


Figure 31 : Evolution des hauteurs d'herbe dans les deux parcelles accueillant l'expérimentation PataFix et Arthropodes. Source : Sara Bosshardt.

Dans un second temps, les hauteurs d'herbe dans les parcours sont un exemple de paramètre entrant en jeu et étant impliqué dans de multiples interactions. L'absence de différences significatives entre les parcelles pâturées ou non par les poules rend bien compte de la complexité des interactions entre poules-couvert-arthropodes. En effet, même si les poules n'ont pas eu dans notre cas, d'effet direct sur les arthropodes en les consommant, elles ont participé à la modification du couvert herbacée, auquel les arthropodes sont très sensibles. Le pâturage des poules participe à une homogénéisation (baisse de la diversité floristique) du couvert par piétinement et par sélection des espèces consommées (Cosentino 2020; Sean Clark, Gage 1997), mais ne mène pas à une baisse uniforme des hauteurs d'herbe sur toute la parcelle (ADAbio 2019).

Ainsi, il est difficile de transposer les études faites sur les relations entre hauteurs d'herbe et abondance et la diversité des arthropodes du sol, les différents groupes réagissant de manière différente à une modification de hauteur d'herbe. Par exemple, Dennis, Young, Bentley (2001) ont constaté que l'abondance des arachnides capturés dans les pots Barber était plus importante lorsque l'herbe était haute plutôt que dans une parcelle pâturée par des vaches ou des moutons présentant un couvert plus ras. Dans notre cas, l'abondance des araignées était plus importante dans les parcelles avec les poules, là où l'herbe était en moyenne plus basse. De la même manière, certaines espèces d'arthropodes généralistes des niveaux trophiques hauts (herbivores et prédateurs) sont plus attirées par les herbes hautes (Pöyry et al. 2006). Et à l'inverse, des espèces comme les herbivores spécialistes préfèreraient une végétation plus basse.

Enfin, dans notre cas, la forte hétérogénéité de hauteur du couvert due aux refus de pâturage des poules offre une diversité importante de hauteurs d'herbe ce qui pourrait encourager la biodiversité structurelle des insectes (Pöyry et al. 2006) et peser plus de poids que le simple paramètre des hauteurs d'herbe.

Enfin, la couverture du sol autour du piège a également une grande influence sur l'efficacité du piégeage en créant des obstacles physiques au déplacement des arthropodes (Bouget, Nageleisen 2009) et en ralentissant leurs déplacements (Crist et al. 1992). L'herbe haute a un impact sur l'activité des arthropodes comme les Carabidae engendrant une baisse des captures (Greenslade 1964).

5.2.3.2. L'expérimentation animale rajoute de la complexité

Les résultats d'une expérimentation animale comme celle-ci présentent la limite de dépendre fortement des comportements et de l'imprévisibilité des animaux de l'expérimentation. Ainsi, les résultats obtenus ne sont pas généralisables dans l'absolu à tous les contextes de production.

Par exemple, les relations de domination-soumission entre les six poules de l'expérimentation PrédaCarpo ont sans doute influencé les résultats de comportement et de déterrage des proies. En effet, les relations sociales entre poules ont une influence sur l'accès ou non de certaines poules aux zones du parcours. Les six poules provenaient initialement de parcelles différentes. Lors de leur transport, des comportements d'agressivité et de piquage ont été observés. À l'arrivée sur le verger, des combats ont eu lieu et plusieurs poules se sont démarquées. Gottier (1968) explique que ces premiers combats ont une forte influence sur les futures relations sociales au sein du lot. Il est cependant difficile d'établir une « hiérarchie » pour discuter les résultats, les relations hiérarchiques pouvant être « triangulaires » (exemple : la poule A domine B, qui elle-même domine C, mais la poule C peut également dominer la poule A) (Gottier 1968). Plus tard dans l'expérimentation, les comportements d'agressivité sont restés courants, les poules bleu et jaune étaient particulièrement violentes et les poules verte, rouge et orange, victimes de piquage, avaient un accès difficile à la mangeoire et à l'abreuvoir. Ces dernières avaient également une constante peur vis-à-vis de leurs congénères et de l'expérimentateur, rendant difficiles les scans de comportement.

Les résultats obtenus sur la prédation et le comportement des poules sont donc difficilement transposables dans le cas d'un système de verger-pâturé chez un.e arboriculteur.trice. L'effectif réduit de poules (n=6) dans l'expérimentation PrédaCarpo implique un manque de représentativité par rapport à la taille des lots de poules réellement utilisés par les arboriculteurs. Il est concevable, que dans un lot de poules plus grand, les effets soient diamétralement différents.

5.3. Discussion générale

5.3.1. Critiques et propositions pour de nouveaux protocoles

Après une prise de recul, nous proposons ici des critiques et des pistes d'améliorations des protocoles des expérimentations menées.

5.3.1.1. PrédaCarpo

Concernant l'expérimentation PrédaCarpo, la période d'expérimentation était peut-être non-optimale pour étudier la prédation des poules à cause de la forte disponibilité de ressources alimentaires alternatives pour les poules. Bien que des actions préalables aient été menées pour optimiser l'exploration de la parcelle par les poules comme la réduction de la ration journalière par poule, l'expérimentation ayant eu lieu en début de printemps (mars, avril), le couvert végétal offrait des ressources alimentaires en quantité et en qualité aux poules. Leur recherche de nourriture aurait peut-être été plus intense en hiver avec un couvert offrant moins de ressources et qui aurait poussé les poules à davantage explorer.

De plus, les changements dans la forme de proies utilisées expliquent certaines différences dans la dynamique de prédation entre les différentes répétitions. En effet, l'expérimentation PrédaCarpo s'est déroulée sur quatre répétitions. La répétition 4 présente une dynamique de déterrage des proies significativement plus lente que les trois premières répétitions. Cette différence pourrait s'expliquer par la forme de la proie légèrement différente et la manière dont le fil était attaché. Durant la répétition 4, le fil de pêche entourait toute la proie et pour les répétitions 1, 2 et 3, le fil était attaché par un nœud

passant dans un petit trou du carton (à droite sur la Figure 32). Ce changement de forme a pu changer la manière dont les relevés étaient faits car les proies étaient légèrement plus petites, diminuant les chances pour les poules de les toucher par hasard avec leurs pattes en grattant. De plus, cette nouvelle forme imposait un changement dans les repères visuels de l'expérimentateur. Enfin, dernière hypothèse, les carpocapses étaient moins visibles car plus petits, donc moins attractifs pour les poules.

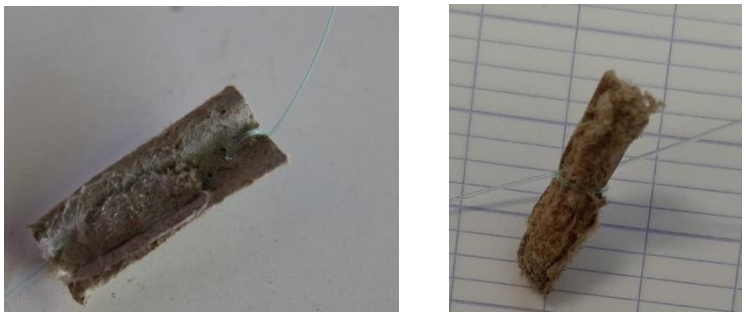


Figure 32 : A gauche, exemple de proie utilisée répétitions 1, 2, 3 (attachée en haut par un fil de pêche passant par un petit trou). A droite, exemple de proie utilisée répétition 4 (attachée par un fil de pêche entourant le cocon).

Ce changement dans la forme des proies a été imposé par un nombre limité de proies en raison des difficultés à les obtenir. Pour de futures expérimentations, et dans un contexte de nombre de proies limitées, il serait envisageable de diminuer la densité de proies cachées dans les parcelles afin de privilégier le nombre de répétitions.

Les protocoles d'observation des comportements des poules pourraient être améliorés. Tout d'abord, l'utilisation de caméras auraient pu permettre de s'affranchir de la présence d'expérimentateurs sur la parcelle. En effet, les poules ont été curieuses par rapport aux expérimentateurs et ont eu tendance à se rapprocher de nous lorsque nous effectuions leurs observations. Pour éviter ce biais, nous avons réalisé les observations de comportement à partir de différents points de vue autour de la parcelle mais cette précaution était sans doute insuffisante. De plus, la méthode d'observation est perfectible. Des méthodes d'observation continue auraient pu permettre des analyses fines mais celles-ci auraient été trop chronophages. La méthode du scan sampling utilisée a le désavantage de minimiser les comportements ponctuels. Il aurait fallu réduire l'intervalle entre les observations à moins de 5 minutes ce qui permet d'éviter de sous-estimer des comportements ponctuels (Ross et al. 2019) comme « pique le sol » et « gratte le sol ». L'intervalle trop long entre les observations pourrait en partie expliquer la non-corrélation entre les comportements de recherche de nourriture dans le parcours et les données spatiales de déterrages des proies.

Enfin, le zonage défini était difficilement visible de loin. Il serait possible de réduire le nombre de zones, Ferreira et al. (2021a) se sont par exemple limités à 2 zones d'observation.

5.3.1.2. SaniCarpo et PataFix

Pour les expérimentations SaniCarpo et PataFix, il serait possible de modifier les techniques de piégeage. Nous pourrions conseiller de réitérer l'expérience dans un tout autre contexte expérimental, aves des parcelles plus éloignées les unes des autres pour éviter le biais lié aux interférences entre les diffuseurs de phéromone des pièges. De plus, un autre type d'attractif aurait pu être envisagés. Les pièges à *kairomones (attractif alimentaire)* qui attirent les mâles et les femelles *C. pomonella*, accouplées ou non, auraient offert un plus fort potentiel d'attraction. Ainsi, l'utilisation de ces pièges aurait peut-être permis de piéger un plus large spectre d'individus (Knight et al. 2014). Si ce type de pièges est choisi, il faut être conscient de l'impact du piégeage des femelles sur les populations des deuxièmes et troisièmes générations.

5.3.1.3. Arthropodes

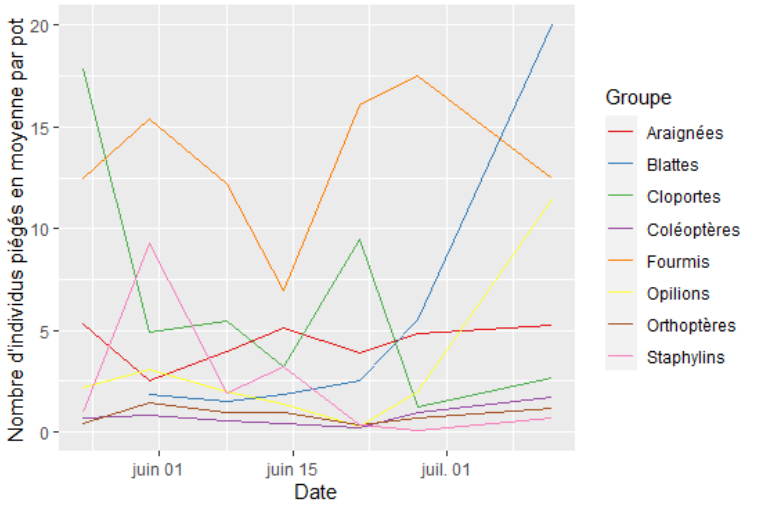


Figure 33 : Evolution temporelle des piégeages par groupe sur les 7 semaines d'expérimentation

Enfin, concernant l'étude de l'impact des poules sur les **arthropodes** de la surface du sol, un conseil serait de poursuivre ce protocole sur une période de temps plus longue pour que la période de pâturage des poules couvre l'intégralité des cycles des arthropodes potentiellement présents. La Figure 33 présente la dynamique temporelle du nombre d'individus piégés en cumulé dans les deux modalités confondues (« avec poules » et « sans poules »). Elle illustre bien les fortes variations d'abondance dans le temps dans les différents groupes et la difficulté de dissocier, sur une si courte période, l'effet de la prédation ou le simple effet de variation de piégeage dû aux cycles des arthropodes. Pour les carabes, on considère que le stade larvaire est particulièrement sensible aux prédateurs, mais selon les espèces, ce moment est variable, certaines espèces réalisent leur cycle sur plusieurs années, certaines hivernent sous forme larvaire et d'autres passe l'hiver sous forme adulte (Roume 2011). Il serait donc envisageable de tester l'impact des poules durant plusieurs mois voire années pour gommer ces variations.

De plus, l'expérimentation pourrait être complétée avec des études portant sur d'autres types d'auxiliaires. En effet, en se concentrant sur les arthropodes de la surface du sol, car directement accessibles par les poules, un certain nombre d'ennemis naturels du carpocapse et d'autres ravageurs du verger ont été exclus de l'analyse, comme ceux de la canopée ou ceux vivants dans les herbes hautes, par exemple certains hyménoptères parasitoïdes (Matar 2015). Cette option aurait nécessité d'autres méthodes d'échantillonnage complémentaires (filets fichoirs, battage des branches…) et plus de compétences pour l'identification.

Enfin, le protocole de capture était sans doute léger pour qu'une tendance puisse se dégager. Le design de l'expérimentation imposait certaines limites qui ont contraint l'expérimentation à deux répétitions et seulement trois pots par modalité ce qui n'est sans doute pas assez. L'expérimentation étant située chez des arboriculteurs pour lesquels la sauvegarde des auxiliaires du verger était un axe important, il n'était alors pas envisageable d'augmenter la densité des pots Barber puisque cette méthode est destructrice. Dans le cadre d'une mise en place d'un même type de suivi sur d'autres parcelles, il serait préférable d'augmenter le nombre de pots par modalité et plus de répétitions.

5.3.2. Des protocoles innovants conçus et mis en place

Pour attester de la prédation de larves, certaines méthodes existantes ont été adaptées et améliorées. L'utilisation d'individus réels de *C. pomonella* nous a permis de reproduire au maximum les conditions réelles de diapause ce qui n'aurait pas été possible avec de fausses larves en pâte à modeler (Garcia, Minarro, Martinez-Sastre 2021; Peisley, Saunders, Luck 2016). Le système original d'attache du cocon par un fil de nylon nous a permis de nous affranchir de la colle utilisée par Glen, Milsom (1978) pour fixer les larves, source potentielle d'un biais lié à l'olfaction des poules. Les fil de nylons nous ont également permis d'éviter le dépôt des larves dans des boites de pétris dans la parcelle (Mathews, Bottrell, Brown 2004) qui n'aurait pas forcément permis de retrouver les larves disparues et d'attester de l'état du cocon. Aussi, il a fallu faire preuve d'ingéniosité pour reproduire des écorces dans lesquelles

les larves seraient en diapause. Cela a été permis grâce au dispositif de faux troncs de chêne évidés entourant les vrais troncs d'arbres du verger et est un dispositif complètement original.

Dans les expérimentations SaniCarpo et PataFix, la pose des filets jusqu'au sol, (protocole jamais mis en œuvre) a permis de s'affranchir des migrations de carpocapses issus d'autres parcelles de l'exploitation ou alentour. Ces filets ont donc permis de quantifier les émergences et les piqûres sur fruits réellement issues des carpocapses ayant effectués leur diapause, l'hiver, au sein même de la parcelle.

La phase de conception de l'expérimentation PrédaCarpo a représenté un travail important car aucune expérimentation de ce genre n'avait été essayée auparavant. Le protocole en lui-même représente une avancée concernant la manière d'évaluer un service de « lutte biologique » dans un système aussi complexe. L'expérience acquise a par exemple servi à produire un guide de préconisations pour la conception d'expérimentations de ce type à destination du GIS Fruits et constitue le Document Ressource de mon stage. Ces protocoles pourraient également être généralisables à l'étude de certains autres ravageurs des pommiers comme la mouche du pommier (*Rhagoletis pomonella*), le charançon de la prune (*Conotrachelus nenuphar*), la tordeuse du pommier (*Platynota idaeusalis*) ou le puceron du pommier (*Eriosoma lanigerum*), qui réalisent au moins une partie de leur cycle au sol, et sont ainsi également exposés aux prédateurs de la surface de sol (Mathews, Bottrell, Brown 2004), et donc éventuellement aux poules.

5.3.3. Perspectives pour la recherche

De nombreux chercheurs se penchent actuellement sur la problématique du carpocapse avec une grande diversité dans les approches. Ce stage, au fur et à mesure de son avancée et des constats faits grâce à l'expérience de terrain, a mis en avant des manques de connaissances sur de nombreux sujets. Ces manques de connaissances ont pu être classés en plusieurs catégories : un manque de connaissance les mécanismes réellement en jeu, un besoin de méthodologie dans un but de mise en place de nouvelles expérimentations, et des trous de connaissances et manque de références pour les arboriculteurs.

Tout d'abord, la synthèse bibliographique a mis en avant une absence totale de recherches étudiant l'impact de l'introduction de poules sur la régulation des ravageurs, et l'étude des poules comme « moyen de lutte biologique », voir paragraphe 2.3.3. De plus, la démarche a mis en avant un manque d'informations sur l'impact de l'introduction des poules sur les autres compartiments de l'agroécosystème. L'introduction de poules dans l'environnement du verger soulève donc des questions peu ou pas explorées dans la littérature scientifique : les poules rentrent-elles en compétition avec d'autres espèces pour les ressources comme les oiseaux des milieux agricoles ? Quel est l'impact de la présence de poules sur la strate végétale, sur les vers de terre et sur les arthropodes du sol ? Des études sur l'impact du pâturage sur les arthropodes et sur le couvert ont été mené pour du pâturage d'ovin et de bovins (Pöyry et al. 2006; Kruess, Tscharntke 2002; Dennis, Young, Bentley 2001) mais pas concernant l'impact des volailles. De telles recherches pourraient trouver utilité dans le cadre de l'accompagnement à la diversification des vergers par l'élevage mais aussi pour les parcours de poules en plein air. Pour illustrer cette idée, prenons l'exemple de campagnol provençal. Ce rongeur représente un enjeu majeur dans les vergers du sud de la France, provoquant de forts dégâts dans les vergers en attaquant les racines. L'hypothèse selon laquelle les poules, par leur présence pourraient effrayer et éloigner les campagnols n'a jamais été étudiée et fait l'objet de désaccords chez les arboriculteurs (Bosshardt et al. 2022). Il serait pertinent de creuser cette question par d'autres expérimentations.

Dans un deuxième temps, les phases de conception des expérimentations ont permis de mettre en avant le manque de connaissances en lien avec l'importance de décrire et comprendre la biologie du ravageur (Jones, Wiman 2008), afin de mieux comprendre les mécanismes liés aux attaques et d'optimiser en conséquence les protocoles expérimentaux. En effet, certains mécanismes sont encore

compliqués à quantifier comme l'impact des colonisations de carpocapse extérieurs à une parcelle par vols, la proportion de carpocapses réalisant réellement leur diapause au sein même du verger en fin de saison, et les paramètres de ses déplacements (distance parcourue, influence des conditions climatiques, etc.).

Enfin, l'expérimentation et les discussions avec des arboriculteurs ont permis de mettre en lumière le manque de références pour les acteurs de terrain. Un premier exemple est le suivant : il serait intéressant de creuser les études d'éthologie sur les troupeaux de poules dans les vergers afin d'accompagner les agriculteurs sur des questions récurrentes : quelle race de poule choisir ? Un assemblage de plusieurs races permettrait-il d'optimiser l'exploration de la parcelle ? Quelle réponse des poules au stress, à la nouveauté, à l'arrivée dans une nouvelle parcelle ?... Ou même, est-il possible d'encourager l'apprentissage de la recherche de nourriture chez les jeunes poules (Ferreira et al. 2021a) ? Quels paramètres ont un impact sur les poules et leur aptitude à explorer les vergers (taille des arbres, variétés de pommiers, alignement des arbres…). Certaines pratiques d'arboriculteurs pour optimiser au mieux l'exploration des poules relèvent plutôt pour l'instant de tests personnels et d'échanges entre arboriculteurs, comme par exemple les choix de chargements, de races, de disposition du poulailler ou de répartition des mangeoires dans la parcelle (Mancinelli 2017).

5.3.4. Perspectives pour les agriculteurs

Ces expérimentations font ressortir des paradoxes dans les choix de conduite des vergers-pâturés. Par exemple, les arboriculteur.rice.s sont amené.e.s à trouver un compromis entre un pâturage intensif de poules optimisant la gestion de l'herbe et éventuellement la régulation du carpocapse, et un pâturage moins intensif dans un but de préservation de la biologie du sol et du couvert herbacé. En effet, il pourrait être conseillé de mettre en place du pâturage sur le long terme des poules, pour augmenter les chances de réduire l'inoculum de carpocapse, d'année en année et l'environnement perturbé par les poules pourrait diminuer les risques de recolonisation (Kruess, Tscharntke 2002). Mais de manière contradictoire, pour espérer sauvegarder le couvert et les autres arthropodes du verger, il pourrait être conseillé de mettre en place du pâturage tournant, de jouer sur le chargement (les dynamiques de populations qui dépendent de relations top-down comme ici sont densité-dépendantes (Dib et al. 2010)), d'alterner entre plusieurs animaux en pâturage avec des sélectivités différentes, des poids différents et des comportements de pâturage différents (Rook, Tallowin 2003), etc..

Cette démarche de recherche « on farm » ouvre la voie pour de nouvelles expérimentations mêlant une diversité d'acteurs. Ainsi, par ces travaux préliminaires, nous espérons pouvoir enclencher une dynamique de mise en place d'expérimentations sur le système poules-verger chez des arboriculteurs pour des expérimentations encore plus « systémiques », c'est-à-dire prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux de l'association. De plus, la mise en place de suivis sur plusieurs exploitations aux conditions très différentes, avec un protocole uniformisé, pourrait constituer le début d'un réseau « Expériment'acteurs » (Havard et al. 2020) et tamponner les effets très locaux dans les résultats. Cette démarche plus générale pourrait aussi permettre d'approcher certaines questions qui ont de l'importance : Quels sont les risques de cette diversification ? Quelle est l'acceptabilité de ce genre de pratique auprès des arboriculteurs dans une région comme le sud de la France à forte identité de production de pommes en systèmes majoritairement « conventionnels » ? Quels sont les différents points de vue des arboriculteurs ? Quels sont les débats, controverses, paradigmes autour de cette association ?

5.3.5. Perspectives pour la gestion du carpocapse

Ce stage fait ressortir plusieurs points concernant la gestion de ce ravageur :

La stratégie de lutte contre ce ravageur doit être une combinaison de pratiques plutôt que la recherche de la solution miracle. Même s'il s'avérait, suite aux expérimentations, que la régulation du carpocapse par les poules pondeuses soit efficiente, ce levier ne peut pas être le seul levier de lutte à

mettre en œuvre. Les solutions utilisées actuellement sont partielles. Une arboricultrice rencontrée durant le stage exposait son point de vue en expliquant que pour elle, les filets Alt'Carpo n'étaient pas une solution durable, mais seulement une manière de contourner le problème de manière locale. Pour elle, la solution résidait dans la combinaison de plusieurs leviers.

La régulation du carpocapse devrait de plus faire l'objet d'une gestion territoriale plus aboutie. Conseiller de mettre en place des poules dans les vergers comme solution à tous les arboriculteurs d'une même région n'est pas du tout envisageable. Cependant, ces expérimentations soulignent l'importance d'une gestion à plus grande échelle que celle de la parcelle : celle des exploitations et du paysage. Un exemple de stratégie territoriale déjà mis en place : le programme OKSIR, (Sterile Insect Release Program OKSIR 2022) mené depuis 30 ans au Canada, basé sur des techniques de lâchers de mâles stériles de carpocapse, a permis de réduire de 90% l'utilisation d'insecticides sur la région. Ce type de stratégie peine à se mettre en place en France car elle nécessite une vision à long terme, une collaboration fine entre acteurs, et une évolution des règlementations (Le Corre 2019).

Des questions se posent aussi sur la faisabilité de la mise en place à échelle plus large de ces pratiques comme l'introduction de poules pondeuses en verger : quels sont les acteurs impliqués dans ces systèmes, les filières sont-elles adaptées ? La société encourage-t-elle ce type de pratiques ? Quels sont les manques de connaissances des arboriculteurs, quelles sont les voies et processus d'apprentissage et comment accompagner ces transitions de pratiques ?

6. Réflexion autour de la QVT

J'ai choisi d'expliquer ici une compétence que je pense avoir développée pendant mon stage, la compétence « **concevoir une ingénierie de projet prenant en compte le travail** », et les conséquences du développement de cette compétence sur le travail des personnes. Mon stage a comporté un grand axe autour de l'expérimentation. Sur le terrain, j'ai collaboré avec différentes personnes de l'INRAE : Vérane Sarnette (technicienne de recherche) Sara Bosshardt (doctorante), et Arnaud Dufils (assistant ingénieur). De plus, j'ai été en contact avec les équipes du terrain d'expérimentation du CEFE de Montpellier et de la ferme pilote de La Durette. L'expérimentation nécessite une organisation particulière du travail. La mise en place de la circulation d'informations par écrit fait partie des axes de travail autour de la QVT : j'ai mis en place un système de cahier d'expérimentation/carnet de bord où chaque expérimentateur indiquait les tâches qu'il avait réalisées et les tâches à faire lors des prochaines visites sur le terrain. Ces cahiers, je pense, ont permis des gains de temps en évitant des oublis. Pour l'organisation du matériel, j'ai créé un « sac d'expérimentation » avec le matériel à emporter sur le terrain. Pour la circulation des données, nous avons créé un dossier et un agenda partagés pour faciliter l'échange des fichiers d'expérimentation et partager nos disponibilités mutuelles. Cependant, ce dispositif a été très peu utilisée, une communication orale a souvent été privilégiée et a convenu aux collaborateurs tous présents sur le même site. Des réunions hebdomadaires sur la thèse en cours ainsi que sur mon stage ont permis d'encourager l'expression des différents acteurs sur les projets, de se soutenir collectivement en cas de problèmes évoqués par les uns ou les autres, d'estimer les besoins en main d'œuvre et les temps de travail liés à chaque tâche. En ce qui concerne la gestion des poules : l'équipe de recherche de l'INRAE ne se rendait sur les lieux d'expérimentation que quelques jours par semaine. Le reste du temps, il a fallu mettre en place une organisation « d'astreinte poules » avec les animaliers de l'équipe permanence de CEFE de Montpellier et les personnes présentes sur la ferme pilote de la Durette (personnel de la ferme et autres partenaires du projet DEPASSE) pour les nourrir et veiller à leur bien-être. La mise en place de distributeurs automatiques a permis de diminuer au maximum la présence d'opérateurs sur le terrain le week-end. De plus, je pense avoir participé à améliorer l'environnement de travail et le climat social au travail en prenant part activement à la vie de l'Unité Ecodéveloppement.

7. Conclusion

7.1. Conclusion générale du stage

Pour tenter de répondre à l'enjeu urgent de recherche de solutions alternatives à l'emploi de produits phytopharmaceutiques dans la gestion du carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*), ce stage, par une approche expérimentale, a cherché à évaluer le potentiel de régulation du carpocapse par les poules pondeuses dans les vergers du sud de la France. L'hypothèse principale reposait sur le fait que les poules pourraient consommer en hiver les carpocapses en diapause dans les premiers centimètres du sol. Plusieurs expérimentations ont donc été imaginées, mises en place, suivies et les premiers résultats ont été analysés et discutés.

Les dispositifs expérimentaux de l'étude du potentiel de régulation du carpocapse en conditions naturelles n'ont pas montré d'effets des poules sur les émergences de carpocapses de première génération ni sur les dégâts sur les pommes. Ces résultats qui devront être complétés à terme par les comptages de fruits piqués à la récolte. L'expérimentation évaluant la prédation de carpocapses en diapause par des poules pondeuses en conditions contrôlées n'a pas mis en avant de consommation directe du ravageur au stade hivernant par les poules mais a cependant permis d'identifier d'autres mécanismes pouvant être impliqués dans une éventuelle mortalité du ravageur en diapause, tels que l'augmentation du risque d'exposition des cocons aux conditions extérieures, la détérioration physique des cocons par l'action de grattage des poules et la modification des propriétés de la surface du sol. De manière complémentaire, ce stage a aussi contribué à explorer le compromis coût-bénéfice de l'intégration de poules pondeuses pouvant potentiellement assurer un service de lutte biologique contre un ravageur, mais aussi causer des dommages sur les populations d'arthropodes du sol. Les résultats des piégeages par pots Barber n'ont pas montré d'effets des poules sur l'abondance des arthropodes épigés du verger et sur l'abondance et la diversité des carabes.

Ce stage, et la thèse dans laquelle il s'inscrit, représentent un premier pas dans l'exploration de cet éventuel service rendu par les poules vues comme des « agents de lutte biologique ». Cette recherche « d'éclaireur » a permis d'identifier des mécanismes et de mettre en avant d'importants manques de connaissances principalement concernant la caractérisation des nombreuses interactions en jeu.

7.2. Bilan personnel et confrontation à la Charte d'Ethique de l'Ingénieur

La charte d'Ethique de l'Ingénieur, publiée par IESF, définit des valeurs qui doivent guider l'ingénieur dans l'exercice de son métier et le rôle que l'ingénieur a à jouer dans la société. En tant qu'ingénieure en cours de formation, certaines valeurs ont pris une importance particulière dans mon stage, et représentent, je pense des axes dans la manière dont j'ai réalisé mes missions, dont j'ai remis en cause mes compétences et dont j'ai appréhendé mon apport vis-à-vis de la société.

Une valeur importante de **diffusion et de transmission** de mon expérience a particulièrement guidé mon stage. Les expérimentations SaniCarpo et PataFix ont représenté des outils de sensibilisation intéressant. En effet, lors d'une journée technique organisée par le GRAB le 16/06/2022 à destination d'acteurs de l'arboriculture (techniciens, conseillers, agriculteurs, étudiants, et porteurs de projets), les expérimentations ont été présentées ce qui a donné lieu à de multiples échanges. De la même manière, j'ai présenté mes travaux le 9/06/2022 à l'Unité Ecodéveloppement de l'INRAE, et le 15/06/2022 à une équipe du CEFE. Ces interventions m'ont permis de confronter mes points de vue et mon humble expérience aux critiques et commentaires des différents publics avec **respect et ouverture**. Les piégeages d'arthropodes par pots Barber ont permis de dresser un inventaire de la biodiversité d'arthropodes présente entre avril et juillet sur les parcelles de la ferme de la Durette. Cet inventaire

répond également à une demande des parties prenantes de la ferme : agriculteurs et chercheurs du GRAB, particulièrement sur les carabes présents et sur les méthodes d'analyse de données de piégeage

D'autre part, j'ai effectué ce travail en gardant toujours à l'esprit la recherche du « **meilleur résultat en utilisant au mieux les moyens** ». La prise en compte des dimensions humaines (petit effectif de l'équipe, compétences très diverses), économiques (respect du budget imposé par la thèse, benchmark pour le choix des matériels, ré-emploi de matériels de récupération pour les expérimentations, inventivité pour des solutions « home made »…) et environnementales (déplacements privilégiant au maximum les moyens de mobilité douce, choix de protocoles à l'impact minimal sur le milieu…), m'ont permis de produire ces résultats avec une efficience maximum.

Grace aux interactions avec l'équipe, j'ai également été amenée à adopter de la **rigueur** autant dans mon travail d'expérimentation sur le terrain que dans l'analyse et le traitement des données. J'ai été initiée à l'écriture scientifique, avec laquelle j'étais très peu familière. J'ai découvert ses codes, sa méthodologie et son formalisme. J'estime avoir acquis des compétences concernant les traitements de données. J'ai également pris **conscience des limites de mes compétences** concernant le traitement statistique par exemple et compris la nécessité d'un regard extérieur et expérimenté. En prenant conscience des limites de mes compétences, je pense avoir su admettre mes erreurs mises en avant lors des relectures, et j'espère avoir pu les prendre en compte.

Liste bibliographique

ADABIO, 2019. Introduction de poules dans les vergers, une pratique qui porte ses fruits - Le guide pratique. *Document non publié fourni à titre personnel*. 2019.

AGESTE, 2021. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018. IFT et nombre de traitements. *CHIFFRES ET DONNÉES*. mai 2021. pp. 12.

AGRESTE, 2021a. Agreste- MÉMENTO 2020 - Provence-Alpes-Côte d'Azur. L'essentiel de l'agriculture régionale. [en ligne]. mars 2021. [Consulté le 17 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/020_Inst_Paca/CA06/Agreste_PACA_2020_21.pdf

AGRESTE, 2021b. Recensement agricole 2020|Agreste, la statistique agricole. [en ligne]. 10 décembre 2021. [Consulté le 11 avril 2022]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Pri2105/detail/

AGRESTE, 2022. Pomme. En 2022, une production française de pommes au niveau de la moyenne 2017-2021|Agreste, la statistique agricole. [en ligne]. 16 août 2022. [Consulté le 17 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/IraFru22100/detail/

ANSES, 2018. ANSES proposes a definition of animal welfare and sets the foundation for its research and expert appraisal work | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. [en ligne]. 16 février 2018. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.anses.fr/en/content/anses-proposes-definition-animal-welfare-and-sets-foundation-its-research-and-expert

BALACHOWSKY, Alfred Serge, 1966. *Entomologie appliquée à l'agriculture: Lépidoptères. 2 v*. Masson.

BARBARO, Luc, RUSCH, Adrien, MUIRURI, Evalyne W., GRAVELLIER, Bastien, THIERY, Denis et CASTAGNEYROL, Bastien, 2017. Avian pest control in vineyards is driven by interactions between bird functional diversity and landscape heterogeneity. *Journal of Applied Ecology*. 2017. Vol. 54, n° 2, pp. 500-508. DOI https://doi.org/10.1111/1365-2664.12740.

BARBER, H. S., 1931. TRAPS FOR CAVE-INHABITING INSECTS. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*. 1931. Vol. 46, n° 2, pp. 259-266.

BESTMAN, Monique et TIMMERMANS, Bart, 2021. Commercial apple orchards in poultry freerange areas - Increase revenues from your investment in animal welfare. *EURAF* [en ligne]. 15 avril 2021. [Consulté le 1 avril 2022]. Disponible à l'adresse : https://euraf.isa.utl.pt/node/1720

BIO DE PACA, 2017. Le pâturage en vergers - Les agriculteurs Bio de PACA, livret de références. [en ligne]. décembre 2017. [Consulté le 12 avril 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.bio-provence.org/Le-paturage-en-vergers

BIOFIL, 2022. Biofil n°140 Mars/Avril 2022 | Biofil.fr. Cultures fruitières, les animaux alliés du verger. *Biofil* [en ligne]. 2022. Vol. Mars/Avril 2022, n° 140. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.biofil.fr/dernieres-parutions/vient-de-paraitre-biofil-n140-mars-avril-2022/

BOREAU DE ROINCÉ, Catherine, 2012. *Biodiversité et aménagements fonctionnels en verger de pommiers : Implication des prédateurs généralistes vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs.* [en ligne]. phdthesis. AgroParisTech. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00952799

BOREAU DE ROINCÉ, Catherine, RICARD, jean-michel, GARCIN, Alain, JAY, Michel, MANDRIN, Jean_François, LAVIGNE, Claire et BOUVIER, Jean-Charles, 2010. Fonctionnalité des auxiliaires vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs du pommier. Première étape. . 1 janvier 2010.

BOSCO, Alessandro, MUGNAI, Dr, ROSATI, Adolfo, PAOLETTI, Andrea, CAPORALI, Silvia et CASTELLINI, Cesare, 2014. Effect of range enrichment on performance, behavior and forage intake of free-range chickens. *The Journal of Applied Poultry Research*. 23 avril 2014. Vol. 23, pp. 1-9. DOI 10.3382/japr.2013-00814.

BOSSHARDT, Sara, SABATIER, Rodolphe, DUFILS, Arnaud et NAVARRETE, Mireille, 2022. Changing perspectives on chicken-pastured orchards for action: A review based on a heuristic model. *Agricultural Systems*. 1 février 2022. Vol. 196, pp. 103335. DOI 10.1016/j.agsy.2021.103335.

BOUGET, Christophe et NAGELEISEN, L. M., 2009. *Les méthodes proposées par le groupe Inv.Ent.For. en forêt tempérée : chap. 2, part III.1 Le piège à fosse* [en ligne]. ONF. [Consulté le 24 juin 2022]. ISBN 978-2-84207-343-5. Disponible à l'adresse : https://hal.inrae.fr/hal-02593483

BROOM, D. M., GALINDO, F. A. et MURGUEITIO, E., 2013. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 22 novembre 2013. Vol. 280, n° 1771, pp. 20132025. DOI 10.1098/rspb.2013.2025.

CAFÉ AGRO, 2020. Unité Expérimentale Recherche Intégrée - Gotheron - Café Agro – Poules en vergers : pourquoi ? comment ? [en ligne]. 20 février 2020. [Consulté le 19 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www6.paca.inrae.fr/ueri/Contrats-et-projets/Expe-DEPHY-Ecophyto-II-ALTO/Cafe-Agro-Poules-en-vergers-pourquoi-comment-le-20-fevrier-2020

CAPOWIEZ, Yvan, SEVERAC, Guilhem, SAGNES, Jean-Louis, ALAPHILIPPE, Aude, CROS, Claire, PARISI, Luciana, SIMON, Sylvaine, SAUDREAU, M., FRANCK, Pierre, LAVIGNE, Claire, PLÉNET, Daniel, SIEGWART, Myriam, ANGEVIN, Frédérique, MAZZI, Christophe et RAULT, Magali, 2013. *Impacts agronomiques et environnementaux d'une méthode de lutte permettant de reduire fortement l'usage des pesticides : les filets ALt-Carpo en arboriculture* [en ligne]. Contract. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. [Consulté le 22 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189809

CARTER, Maureen et FEENY, Paul, 1986. TECHNIQUES FOR MAINTAINING A CULTURE OF THE BLACK SWALLOWTAIL BUTTERFLY, PAPILIO POLYXENES ASTERIUS STOLL (PAPILIONIDAE). *JOURNAL OF THE LEPIDOPTERISTS' SOCIETY*. 1986. Vol. 39, n° 2, pp. 9.

CATALOGUE OF LIFE, 2022. Cydia pomonella Linnaeus, 1758 | COL. [en ligne]. 2022. [Consulté le 14 février 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.catalogueoflife.org/data/taxon/6BTP8

CHAFAA, Smail, 2008. *Contribution à l'étude bioécologique d'un bio agresseur du pommier (Cydia pomonella L.) (Lepidoptera : Tortricidae) et estimation des dégâts dans la région de AinTouta (w. Batna)* [en ligne]. Thesis. INA. [Consulté le 12 avril 2022]. Disponible à l'adresse : http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/443

CHINERY, Michael et LEGRAND, Jean, 2012. *Insectes de France et d'Europe occidentale*. Paris : Flammarion. ISBN 978-2-08-128823-2.

CLARK, E. A., 2004. Benefits of Re-Integrating Livestock and Forages in Crop Production Systems. . 2004. DOI 10.1300/J411v12n01_06.

CLARK, M. Sean et GAGE, Stuart H., 1996. Effects of free-range chickens and geese on insect pests and weeds in an agroecosystem. *American Journal of Alternative Agriculture*. mars 1996. Vol. 11, n° 1, pp. 39-47. DOI 10.1017/S0889189300006718.

CLARK, Sean, GAGE, Stuart, DELIND, Laura et LENNINGTON, Marian, 1995. The compatibility of domestic birds with a nonchemical agroecosystem. *American Journal of Alternative Agriculture*. 1 septembre 1995. Vol. 10, pp. 114-121. DOI 10.1017/S0889189300006275.

COLLEU, Sylvie, 2020. Etude REVE: Reconnexion verger - élevage, dossier documentaire. . 2020. pp. 12.

CORNU, Pierre, 2021. *La systémique agraire à l'INRA - Histoire d'une dissidence - Pierre Cornu (EAN13 : 9782759231768) | Librairie Quae : des livres au coeur des sciences* [en ligne]. [Consulté le 10 juin 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.quae.com/produit/1641/9782759231768/la-systemique-agraire-a-l-inra

COSENTINO, Carlo, 2020. First results on the evaluation of the ground-cover biodiversity in an agroforestry poultry system. *Acta fytotechnica et zootechnica*. 1 décembre 2020. Vol. 23, n° Monothematic Issue, pp. 15-22. DOI 10.15414/afz.2020.23.mi-fpap.15-22.

CRIST, T. O., GUERTIN, D. S., WIENS, J. A. et MILNE, B. T., 1992. Animal movement in heterogeneous landscapes: an experiment with Eleodes beetles in shortgrass prairie. *Functional ecology* [en ligne]. 1992. [Consulté le 24 juin 2022]. Disponible à l'adresse : https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Animal+movement+in+heterogeneous+landscapes%3A+an+experiment+with+Eleodes+beetles+in+shortgrass+prairie&author=Crist%2C+T.O.&publication_year=1992

CSA, 2021. CSA / COMITÉ NATIONAL POUR LA PROMOTION DE L'OEUF (CNPO) Les œufs en France. *https://csa.eu/* [en ligne]. 2021. [Consulté le 23 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://csa.eu/news/les-oeufs-en-france/

CTIFL, 1999. *Guide de bonnes pratiques d'hygiène: fruits et légumes frais non transformés*. Paris : Les Editions des Journaux officiels. ISBN 978-2-11-074801-0.

DAI, Wen-Ting, LI, Jin et BAN, Li-Ping, 2022. Genome-Wide Selective Signature Analysis Revealed Insecticide Resistance Mechanisms in Cydia pomonella. *Insects*. janvier 2022. Vol. 13, n° 1, pp. 2. DOI 10.3390/insects13010002.

DEBUSSCHE, M. et ISENMANN, P., 1985. Frugivory of transient and wintering European robins Erithacus rubecula in a Mediterranean region and its relationship with ornithochory. *Ecography*. 1985. Vol. 8, n° 2, pp. 157-163. DOI 10.1111/j.1600-0587.1985.tb01166.x.

DENNIS, Peter, YOUNG, Mark R et BENTLEY, Christopher, 2001. The effects of varied grazing management on epigeal spiders, harvestmen and pseudoscorpions of Nardus stricta grassland in upland Scotland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. juillet 2001. Vol. 86, n° 1, pp. 39-57. DOI 10.1016/S0167-8809(00)00263-2.

DEWAILLY, Anne, 2014. Pomme : combiner différents leviers pour baisser les IFT. *Chambre d'agriculture Tarn-et-Garonne* [en ligne]. 2014. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/sites/default/files/ARBO_MIDIPY_DEWAILLY_TRAJ_2014_0.pdf

DGCCRF, 2020. Sécurité des denrées alimentaires : la DGCCRF contrôle la présence de contaminants chimiques dans notre alimentation. [en ligne]. décembre 2020. [Consulté le 15 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/securite-des-denrees-alimentaires-la-dgccrf-controle-la-presence-de-contaminants-chimiques

D'HARDIVILLIERS, Renaud, 2022. Les prix des engrais et de l'énergie toujours en hausse. *La France Agricole* [en ligne]. 17 janvier 2022. [Consulté le 11 avril 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.lafranceagricole.fr/actualites/intrants-les-prix-des-engrais-et-de-lenergie-toujours-en-hausse-1,1,4001928199.html

DIB, Hazem, SIMON, Sylvaine, SAUPHANOR, Benoît et CAPOWIEZ, Yvan, 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. *Biological Control*. 1 novembre 2010. Vol. 55, n° 2, pp. 97-109. DOI 10.1016/j.biocontrol.2010.07.005.

DRAAF PACA, 2022a. Bulletin de Santé N°12 - 18 mai 2022. *DRAAF PACA* [en ligne]. 19 mai 2022. [Consulté le 20 mai 2022]. Disponible à l'adresse : http://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/bulletin-de-sante-no12-18-mai-2022-a3241.html

DRAAF PACA, 2022b. Bulletin de Santé N°10 - 04 mai 2022. [en ligne]. 5 mai 2022. [Consulté le 17 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/Bulletin-de-Sante-No10-04-mai-2022

DRAAF PACA, 2022c. Bulletin de Santé N°16 - 15 juin 2022. [en ligne]. 15 juin 2022. [Consulté le 27 juin 2022]. Disponible à l'adresse : http://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/bulletin-de-sante-no16-15-juin-2022-a3286.html

ECOPHYTOPIC, 2018. Protection contre le carpocapse des pommes et des poires | Ecophytopic. [en ligne]. 2018. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/pic/concevoir-son-systeme/protection-contre-le-carpocapse-des-pommes-et-des-poires

EPSTEIN, D L, ZACK, R S, BRUNNER, J F, GUT, L et BROWN, J J, 2000. Effects of Broad-Spectrum Insecticides on Epigeal Arthropod Biodiversity in Pacific Northwest Apple Orchards. *ENVIRONMENTAL ENTOMOLOGY*. 2000. Vol. 29, n° 2, pp. 9.

FARMERMOBIL GMBH, 2022. Poulailler mobile avec technique innovative. *farmermobil GmbH* [en ligne]. 2022. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://farmermobil.com/fr/

FERREIRA, Vitor, BARBARAT, Maxence, LORMANT, Flore, GERMAIN, Karine, BRACHET, Mathilde, LOVLIE, Hanne, CALANDREAU, Ludovic et GUESDON, Vanessa, 2020. Social motivation and the use of distal, but not local, featural cues are related to ranging behavior in free-range chickens (Gallus gallus domesticus). *Animal Cognition*. 1 juillet 2020. Vol. 23. DOI 10.1007/s10071-020-01389-w.

FERREIRA, Vitor Hugo Bessa, SIMONI, Arthur, GERMAIN, Karine, LETERRIER, Christine, LANSADE, Léa, COLLIN, Anne, MIGNON-GRASTEAU, Sandrine, LE BIHAN-DUVAL, Elisabeth, GUETTIER, Elodie, LERUSTE, Hélène, CALANDREAU, Ludovic et GUESDON, Vanessa, 2021a. Working for food is related to range use in free-range broiler chickens. *Scientific Reports*. 18 mars 2021. Vol. 11, n° 1, pp. 6253. DOI 10.1038/s41598-021-85867-2.

FERREIRA, Vitor Hugo Bessa, SIMONI, Arthur, GERMAIN, Karine, LETERRIER, Christine, LANSADE, Léa, COLLIN, Anne, MIGNON-GRASTEAU, Sandrine, LE BIHAN-DUVAL, Elisabeth, GUETTIER, Elodie, LERUSTE, Hélène, CALANDREAU, Ludovic et GUESDON, Vanessa, 2021b. Working for food is related to range use in free-range broiler chickens. *Scientific Reports*. 18 mars 2021. Vol. 11, n° 1, pp. 6253. DOI 10.1038/s41598-021-85867-2.

FERREIRA, Vitor, SIMONI, Arthur, GERMAIN, Karine, LETERRIER, Christine, LANSADE, Lea, COLLIN, Anne, GRASTEAU, Sandrine, BIHAN-DUVAL, Elisabeth, GUETTIER, Elodie, LERUSTE, Hélène, LOVLIE, Hanne, CALANDREAU, Ludovic et GUESDON, Vanessa, 2022. Foraging Behavior Shows Individual-Consistency Over Time, and Predicts Range Use in Slow-Growing Free-Range Male Broiler Chickens. *Frontiers in Veterinary Science*. 7 février 2022. Vol. 9, pp. 814054. DOI 10.3389/fvets.2022.814054.

FMC FRANCE, 2019. Carpocapse des pommes. [en ligne]. septembre 2019. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : http://www.fmcagro.fr/fr/nos-expertises/connaitre-les-ravageurs-des-cultures/carpocapse-des-pommes/index.htm

FRANCEAGRIMER, 2021. Bilans de campagne fruits : La pomme en 2020-2021. [en ligne]. septembre 2021. [Consulté le 17 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://rnm.franceagrimer.fr/bilan_campagne?menu=fruits

FRANCK, P., RICCI, B., KLEIN, E. K., OLIVARES, J., SIMON, S., CORNUET, J.-M. et LAVIGNE, C., 2011. Genetic inferences about the population dynamics of codling moth females at a local scale. *Genetica*. juillet 2011. Vol. 139, n° 7, pp. 949-960. DOI 10.1007/s10709-011-9598-5.

GARCIA, Daniel, MINARRO, Marcos et MARTINEZ-SASTRE, Rodrigo, 2021. Enhancing ecosystem services in apple orchards: Nest boxes increase pest control by insectivorous birds. *Journal of Applied Ecology*. mars 2021. Vol. 58, n° 3, pp. 465-475. DOI 10.1111/1365-2664.13823.

GÉOPORTAIL, 2022. © IGN 2022 - Géoportail, le portail national de la connaissance du territoire. [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.geoportail.gouv.fr/

GLEN, D. M. et MILSOM, N. F., 1978. Survival of mature larvae of codling moth (Cydia pomonella) on apple trees and ground. *Annals of applied Biology*. 1978. Vol. 90, n° 2, pp. 133-146.

GOTTIER, Richard F., 1968. The Dominance-Submission Hierarchy in the Social Behavior of the Domestic Chicken. *The Journal of Genetic Psychology*. juin 1968. Vol. 112, n° 2, pp. 205-226. DOI 10.1080/00221325.1968.10533796.

GRAB, 2011. Projet Durette. *Grab* [en ligne]. 28 avril 2011. [Consulté le 11 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.grab.fr/durette/

GREENSLADE, P. J. M., 1964. Pitfall Trapping as a Method for Studying Populations of Carabidae (Coleoptera). *The Journal of Animal Ecology*. juin 1964. Vol. 33, n° 2, pp. 301. DOI 10.2307/2632.

GUERIN, Anne, GUILLERMIN, Pascale, BAUDUIN, Remi, BICHE, D., COFFON, R., BROUSSAUD, N., CARDON, Jean-Charles, CORROYER, B., CORROYER, N., DENIS, A., GILLES, Y., JOUVE, H., ROUX, B. Le, PARIS, D., PETIT, Bernard, THIERY, D. et DIDELOT, Frédérique, 2020. Verger Cidricole de Demain : les enseignements après 6 ans

d'expérimentation système pour réduire les intrants en jeunes vergers cidricoles. *Innovations Agronomiques*. 2020. Vol. 79, pp. 173. DOI 10.15454/dn38-de90.

GUERMAH, Dyhia, 2019. *Bioécologie du carpocapse du pommier Cydia pomonella L. (Lepidoptera :Tortricidae) et inventaire de la faune arthropodologique dans des vergers de pommier traités et écologique dans la région de Tizi-Ouzou (Sidi Nâamane et Draa Ben Khedda)* [en ligne]. Thesis. Universite Mouloud MAMMERI. [Consulté le 11 avril 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.ummto.dz/dspace/handle/ummto/8391

HAVARD, Morgane, ALAPHILIPPE, Aude, DEYTIEUX, Violaine, ESTROGUES, Vianney, LABEYRIE, Baptiste, LAFOND, David, MEYNARD, Jean Marc, PETIT, Marie Sophie, PLÉNET, Daniel, PICAULT, Sébastien, TCHAMITCHIAN, Marc et FALOYA, Vincent, 2020. Guide de l'expérimentateur système: concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes. . 5 juin 2020. pp. 173.

HIDALGO, A., ROSSI, M., CLERICI, F. et RATTI, S., 2008. A market study on the quality characteristics of eggs from different housing systems. *Food Chemistry*. 1 février 2008. Vol. 106, n° 3, pp. 1031-1038. DOI 10.1016/j.foodchem.2007.07.019.

HILIMIRE, Kathleen, 2011. Integrated Crop/Livestock Agriculture in the United States: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*. 4 avril 2011. Vol. 35, n° 4, pp. 376-393. DOI 10.1080/10440046.2011.562042.

INPN, 2022. INPN - Inventaire national du patrimoine naturel (INPN). *Inventaire National du Patrimoine Naturel* [en ligne]. 2022. [Consulté le 24 juin 2022]. Disponible à l'adresse : https://inpn.mnhn.fr/accueil/index

INRAE, 2021. Intranet ACT - Le Département ACT. [en ligne]. 30 avril 2021. [Consulté le 10 juin 2022]. Disponible à l'adresse : https://intranet.inrae.fr/act/Le-Departement-ACT

JACQUES, Mignon, ERIC, Haubruge et FRÉDÉRIC, Francis, 2016. *Clé d'identification des principales familles d'insectes d'Europe*. Presses Agronomiques de Gembloux. ISBN 978-2-87016-141-8.

JACQUOT, Maxime, FRÉZEL, Julia, GASPARI, Chloé, LIBOUREL, Gilles, MEUNIER, Zoé, SIMOND, Maëlle, DUFILS, Arnaud, SARNETTE, Vérane et ECODÉVELOPEMENT, INRAE, 2020. ESSAIS DE DEUX ESPECES DE PARASITOIDES TRICHOGRAMMES (HYMENOPTERA, TRICHOGRAMMIDAE) POUR LE CONTROLE DU CARPOCAPSE DES POMMES (CYDIA POMONELLA). . 2020. pp. 6.

JOACHIM, Jean, 1996. Populations et dialectes : cas du Pinson des arbres. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*. avril 1996. Vol. 27, n° 27, pp. 5-16.

JONES, Vincent P. et WIMAN, Nik G., 2008. Longevity of the adult codling moth, Cydia pomonella, and the obliquebanded leafroller, Choristoneura rosaceana, in Washington apple orchards. *Journal of Insect Science*. 2008. Vol. 8, n° 1.

JOSE, Shibu, WALTER, W.D. et MOHAN KUMAR, B., 2019. Ecological considerations in sustainable silvopasture design and management. *Agroforestry Systems*. 1 février 2019. Vol. 93, pp. 317-331. DOI 10.1007/s10457-016-0065-2.

KAPLAN, E. L. et MEIER, Paul, 1958. Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *Journal of the American Statistical Association*. 1958. Vol. 53, n° 282, pp. 457-481. DOI 10.2307/2281868.

KERHOAS, Nathalie, GUILLEVIC, Mathieu, BORDAIS, E., CHESNEAU, Guillaume et WEILL, Pierre, 2010. Le mode de production influence la composition lipidique de l'oeuf. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 1 janvier 2010. Vol. 24, pp. S98-S98.

KIRK, David, EVENDEN, Matthew et MINEAU, Pierre, 1996. Past and Current Attempts to Evaluate the Role of Birds as Predators of Insect Pests in Temperate Agriculture. *Current Ornithology*. 1 janvier 1996. Vol. 13, pp. 175-269. DOI 10.1007/978-1-4615-5881-1_5.

KNIGHT, A., CICHON, L., LAGO, J., FUENTES-CONTRERAS, E., BARROS-PARADA, W., HULL, L., KRAWCZYK, G., ZOLLER, B., HANSEN, R., HILTON, R. et BASOALTO, E., 2014. Monitoring oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with combinations of pheromones and kairomones. *Journal of Applied Entomology*. 2014. Vol. 138, n° 10, pp. 783-794. DOI 10.1111/jen.12138.

KONING, Else, 2018. Restoring functional interrelationships between livestock and agricultural crops : investigating the economic and environmental sustainability of an integrated broiler rearing system in a biodynamic fruit orchard | MSc theses online. [en ligne]. 2018. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://library.wur.nl/WebQuery/theses/2248209

KRUESS, Andreas et TSCHARNTKE, Teja, 2002. Contrasting responses of plant and insect diversity to variation in grazing intensity. *Biological Conservation*. 1 août 2002. Vol. 106, n° 3, pp. 293-302. DOI 10.1016/S0006-3207(01)00255-5.

LAROUSSE, 2022. Définitions : pâturage - Dictionnaire de français Larousse. [en ligne]. 2022. [Consulté le 11 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/p%C3%A2turage/58743

LATELIERPAYSAN, 2020. Poulailler mobile. *L'Atelier Paysan* [en ligne]. 2020. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.latelierpaysan.org/Poulailler-mobile-2444

LAVIGNE, Anaïs, DUMBARDON-MARTIAL, Eddy et LAVIGNE, Christian, 2012. Les volailles pour un contrôle biologique des adventices dans les vergers. *Fruits*. septembre 2012. Vol. 67, n° 5, pp. 341-351. DOI 10.1051/fruits/2012029.

LE CORRE, Maude, 2019. L'Insecte stérile a son collectif. *Réussir fruits & légumes | FLD* [en ligne]. 2019. [Consulté le 29 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.reussir.fr/fruits-legumes/linsecte-sterile-a-son-collectif

LÉGIFRANCE, 2011. Paragraphe 1 : Dispositions générales. (Articles R211-48 à R211-53) - Légifrance. [en ligne]. 2011. [Consulté le 15 août 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006195317/#LEGISCTA000006195317

LEHNER, PHILIP N., 1992. Sampling Methods in Behavior Research. *Poultry Science*. 1 avril 1992. Vol. 71, n° 4, pp. 643-649. DOI 10.3382/ps.0710643.

MACLELLAN, C. R., 1960. Cocooning Behaviour of Overwintering Codling Moth Larvae. *The Canadian Entomologist*. juin 1960. Vol. 92, n° 6, pp. 469-479. DOI 10.4039/Ent92469-6.

MANCINELLI, Alice Cartoni, 2017. Chicken Adaptability in Alternative Systems Adaptive Response of Chicken Strains to the Organic and Free Range Rearing Systems. *Journal of Dairy & Veterinary Sciences* [en ligne]. 10 novembre 2017. Vol. 4, n° 4. [Consulté le 19 juillet 2022]. DOI 10.19080/JDVS.2017.04.555644. Disponible à l'adresse : https://juniperpublishers.com/jdvs/JDVS.MS.ID.555644.php

MANI, E. et WILDBOLZ, Th., 1977. The dispersal of male codling moths (Laspeyresia pomonella L.) in the Upper Rhine Valley. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*. 1977. Vol. 83, n° 1-4, pp. 161-168. DOI 10.1111/j.1439-0418.1977.tb02386.x.

MATAR, Mariline Maalouly, 2015. Déterminants du parasitisme larvaire du carpocapse du pommier au Sud Est de la France. . 2015. pp. 170.

MATHEWS, Clarissa R., BOTTRELL, Dale G. et BROWN, M.W., 2004. Habitat manipulation of the apple orchard floor to increase ground-dwelling predators and predation of Cydia pomonella (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Biological Control*. juin 2004. Vol. 30, n° 2, pp. 265-273. DOI 10.1016/j.biocontrol.2003.11.006.

MESMIN, Xavier, 2018. La régulation naturelle des insectes ravageurs des cultures légumières et ses conséquences sur la production: quantification du service fourni et recherche de leviers pour son intensification. . 2018. pp. 279.

MEZANI, Samy, 2001. Suivi de la Fauvette mélanocéphale Sylvia melanocephala en Bourgogne, de 2001 à 2004. . 2001. pp. 9.

MILLER, J. R., MCGHEE, P. S., SIEGERT, P. Y., ADAMS, C. G., HUANG, J., GRIESHOP, M. J. et GUT, L. J., 2010. General principles of attraction and competitive attraction as revealed by large-cage studies of moths responding to sex pheromone. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 5 janvier 2010. Vol. 107, n° 1, pp. 22-27. DOI 10.1073/pnas.0908453107.

MORIN, Jérôme, 2010. *Guide des oiseaux des forêts et campagnes*. Paris : Belin. ISBN 978-2-7011-5388-9.

MURILLO, Amy C., ABDOLI, Alireza, BLATCHFORD, Richard A., KEOGH, Eamonn J. et GERRY, Alec C., 2020. Parasitic mites alter chicken behaviour and negatively impact animal welfare. *Scientific Reports*. 19 mai 2020. Vol. 10, n° 1, pp. 8236. DOI 10.1038/s41598-020-65021-0.

NEWBERRY, R. C., HUNT, J. R. et GARDINER, E. E., 1988. Influence of Light Intensity on Behavior and Performance of Broiler Chickens1. *Poultry Science*. 1 juillet 1988. Vol. 67, n° 7, pp. 1020-1025. DOI 10.3382/ps.0671020.

ODENDAAL, D., ADDISON, M. F. et MALAN, A. P., 2016. Entomopathogenic nematodes for the control of the codling moth (Cydia pomonella L.) in field and laboratory trials. *Journal of Helminthology*. septembre 2016. Vol. 90, n° 5, pp. 615-623. DOI 10.1017/S0022149X15000887.

OSAÉ SOLAGRO, 2014. Osez l'AgroÉcologie : Réintroduire le pâturage dans les cultures pérennes enherbées. *OSAE* [en ligne]. 2014. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://osez-agroecologie.org/reintroduire-le-paturage-dans-les-cultures-perennes-enherbees

PARVEAUD, Claude-Eric, 2010. Sensibilité aux bioagresseurs de 36 variétés de pommiers en situation de faibles intrants. *Arbo Bio*. mai 2010. N° n° 148, pp. 2.

PEDERSEN, H Lindhard, OLSEN, A, HORSTED, K, KORSGAARD, M et PEDERSEN, B, 2004. Combined production of broilers and fruits. . 2004. pp. 6.

PEISLEY, Rebecca K., SAUNDERS, Manu E. et LUCK, Gary W., 2016. Cost-benefit trade-offs of bird activity in apple orchards. *PeerJ*. 30 juin 2016. Vol. 4, pp. e2179. DOI 10.7717/peerj.2179.

PHILIPPS, Lois, ENGEL, Cindy et WOLFE, Martin, 2002. Development of an agroforestry system for chicken production. . 2002. pp. 2.

PIELOU, E. C., 1993. Measuring biodiversity: quantitative measures of quality. [en ligne]. 1993. [Consulté le 26 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.vliz.be/nl/imis?refid=9751

PÖYRY, Juha, LUOTO, Miska, PAUKKUNEN, Juho, PYKÄLÄ, Juha, RAATIKAINEN, Katja et KUUSSAARI, Mikko, 2006. Different responses of plants and herbivore insects to a gradient of vegetation height: an indicator of the vertebrate grazing intensity and successional age. *Oikos*. 2006. Vol. 115, n° 3, pp. 401-412. DOI 10.1111/j.2006.0030-1299.15126.x.

PRODUIRE BIO, 2021. Introduire des poules dans les vergers : une pratique qui porte ses fruits ! *Produire Bio* [en ligne]. 2021. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/introduire-des-poules-dans-les-vergers/

RICCI, Benoît, 2009. *Dynamique spatiale et dégâts de carpocapse dans la basse vallée de la Durance* [en ligne]. [Consulté le 11 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00453639/document

RICH, Jason T., NEELY, J. Gail, PANIELLO, Randal C., VOELKER, Courtney C. J., NUSSENBAUM, Brian et WANG, Eric W., 2010. A practical guide to understanding Kaplan-Meier curves. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*. septembre 2010. Vol. 143, n° 3, pp. 331-336. DOI 10.1016/j.otohns.2010.05.007.

RIDDICK, Eric W. et MILLS, Nicholas J., 1994. Potential of Adult Carabids (Coleoptera: Carabidae) as Predators of Fifth-Instar Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Apple Orchards in California. *Environmental Entomology*. 1 octobre 1994. Vol. 23, n° 5, pp. 1338-1345. DOI 10.1093/ee/23.5.1338.

ROGER, Jean-Luc, JAMBON, Olivier et BOUGER, Guillaume, 2013. Clé de détermination des Carabidae paysages agricoles du Nord Ouest de la France. *Rennes: SAD-Paysage, Institut National de Recherche Agronomique*. 2013.

ROINSARD, Antoine, BRACHET, M., FERCHAUD, S., GAIN, C., GERMAIN, K., GIDENNE, T., GOBY, J. P., JUIN, H., MARTIN, G. et MAUPERTUIS, F., 2017. *Valorisation de l'herbe par des monogastriques en agriculture biologique: des expériences à poursuivre*. Fourrages.

ROOK, Andrew J. et TALLOWIN, Jeremy R.B., 2003. Grazing and pasture management for biodiversity benefit. *Animal Research*. mars 2003. Vol. 52, n° 2, pp. 181-189. DOI 10.1051/animres:2003014.

ROSENBERG, Kenneth V., DOKTER, Adriaan M., BLANCHER, Peter J., SAUER, John R., SMITH, Adam C., SMITH, Paul A., STANTON, Jessica C., PANJABI, Arvind, HELFT, Laura, PARR, Michael et MARRA, Peter P., 2019. Decline of the North American avifauna. *Science*. 4 octobre 2019. Vol. 366, n° 6461, pp. 120-124. DOI 10.1126/science.aaw1313.

ROSS, L., CRESSMAN, M. D., CRAMER, M. C. et PAIRIS-GARCIA, M. D., 2019. Validation of alternative behavioral observation methods in young broiler chickens. *Poultry Science*. 1 décembre 2019. Vol. 98, n° 12, pp. 6225-6231. DOI 10.3382/ps/pez475.

ROUME, Anthony, 2011. *Quelle est la contribution des milieux semi-naturels à la diversité et la répartition des assemblages de Carabidae circulants et hivernants dans un paysage rural tempéré ?* [en ligne]. phd. [Consulté le 1 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001577/

SABATIER, Rodolphe, DURANT, Daphné, FERCHICHI, Sameh, HARANNE, Khalil, LÉGER, François et TICHIT, Muriel, 2016. Effect of cattle trampling on ground nesting birds on pastures: an experiment with artificial nests. *European Journal of Ecology*. 10 janvier 2016. Vol. 1. DOI 10.1515/eje-2015-0012.

SALAMIN, C, CHARMILLOT, P J, PASQUIER, D, PEEVA, P et ACW, Agroscope Changins-Wädenswil, 2007. Efficacité du virus de la granulose appliqué par trempage des pommes sur des larves de carpocapse Cydia pomonella. . 2007. Vol. 39, pp. 3.

SEAN CLARK, M. et GAGE, Stuart H., 1997. The effects of free-range domestic birds on the abundance of epigeic predators and earthworms. *Applied Soil Ecology*. 1 juin 1997. Vol. 5, n° 3, pp. 255-260. DOI 10.1016/S0929-1393(96)00130-8.

SOLOMON, M. E., GLEN, D. M., KENDALL, D. A. et MILSOM, N. F., 1976. Predation of Overwintering Larvae of Codling Moth (Cydia pomonella (L.)) by Birds. *Journal of Applied Ecology*. 1976. Vol. 13, n° 2, pp. 341-352. DOI 10.2307/2401784.

SOUDET, 2021. *La reconnexion verger-élevage*. 2021.

SPENCE, John R. et NIEMELÄ, Jari K., 1994. SAMPLING CARABID ASSEMBLAGES WITH PITFALL TRAPS: THE MADNESS AND THE METHOD. *The Canadian Entomologist*. juin 1994. Vol. 126, n° 3, pp. 881-894. DOI 10.4039/Ent126881-3.

STERILE INSECT RELEASE PROGRAM OKSIR, 2022. OKSIR The Sterile Insect Release (SIR) Program is an area wide environmentally friendly approach to managing the codling moth population in the Okanagan, Similkameen and Shuswap Valleys. [en ligne]. 2022. [Consulté le 20 mai 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.oksir.org/

SUIVI TEMPOREL DES OISEAUX COMMUNS (STOC), 2019. Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) Muséum National d'Histoire Naturelle, département homme et environnement. *Vigie-Nature* [en ligne]. 2019. [Consulté le 13 avril 2021]. Disponible à l'adresse : http://www.vigienature.fr/fr/suivi-temporel-des-oiseaux-communs-stoc

SIMON PHOTOGRAPHY, 2020. UNIQUE ‼ ON DEPLACE LE POULAILLER MOBILE À LA FERME. [en ligne]. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.youtube.com/watch?v=Ukf9k6RMibI

VENOT, Céline, 2021. Guide pratique : Introduire des poules dans les vergers : une pratique qui porte ses fruits | Ecophytopic. [en ligne]. 29 avril 2021. [Consulté le 21 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/pic/proteger/introduire-des-poules-dans-les-vergers-une-pratique-qui-porte-ses-fruits

WAGNER, David L., GRAMES, Eliza M., FORISTER, Matthew L., BERENBAUM, May R. et STOPAK, David, 2021. Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en ligne]. 12 janvier 2021. Vol. 118, n° 2. [Consulté le 6 mai 2021]. DOI 10.1073/pnas.2023989118. Disponible à l'adresse : https://www.pnas.org/content/118/2/e2023989118

WEIGEND, S. et ROMANOV, M. N., 2002. The World Watch List for Domestic Animal Diversity in the context of conservation and utilisation of poultry biodiversity. *World's Poultry Science Journal*. décembre 2002. Vol. 58, n° 4, pp. 411-430. DOI 10.1079/WPS20020031.

YATES, Christopher, DORWARD, Peter, HEMERY, Gabriel et COOK, Paul, 2007. The economic viability and potential of a novel poultry agroforestry system. *Agroforestry Systems*. 1 janvier 2007. Vol. 69, n° 1, pp. 13-28. DOI 10.1007/s10457-006-9015-8.

ZANDBERGEN, Jelmer, 2016. MSc thesis Introducing poultry in orchards to restore ecological relationships in agricultural production systems - Fruittuin van West. [en ligne]. 2016. [Consulté le 28 mars 2022]. Disponible à l'adresse : https://www.readkong.com/page/msc-thesis-introducing-poultry-in-orchards-to-restore-9943971

Annexes

Annexe A : **Flou législatif autour des pratiques d'introduction de poules dans les vergers**

Le stage a permis de confirmer le flou législatif autour des pratiques de combinaison élevage - production végétale rendant complexe l'accompagnement de la mise en place de ce genre de pratique. Dans le cadre de l'intégration de poules pondeuses en vergers, des questions d'arboriculteurs restent en suspens : Les poules doivent-elles être sorties de la parcelle durant les traitements et dans quels délais ? Les fruits tombés au sol et entrés en contact avec les déjections de poules peuvent-ils être commercialisés et quelles précautions sanitaires prendre ? Le guide de bonnes pratiques d'hygiène et d'application des principes HACCP pour les fruits et légumes frais non transformés indique « Il est conseillé, autant que possible, de tenir les animaux à l'écart des zones de production » (CTIFL 1999). Les articles R211-48 à R211-52 du code de l'environnement impose des règlementations pour les « terrains faisant l'objet d'épandage d'effluents agricoles et la qualité sanitaire des produits destinés à la consommation humaine qui en sont issus » (Légifrance 2011) et le règlement (CE) n°315/93 édité par la DGCCRF fixe les teneurs maximales de contaminants pour la gestion des risques sanitaires pour tous les circuits alimentaires (DGCCRF 2020). Ces textes restent évasifs concernant les pratiques de niche.

Annexe B : **Description détaillée des expérimentations**

Lieu d'expérimentation			Protocoles				Parcelles			
Nom de l'expérimentation	Dates	Localisation	Objectif	Hypothèses	Protocole rapide	Suivis	Surface de parcelle	Nombre de poules	Chargement équivalent en poule	Espèces fruitières
PrédaCarpo	1/03/2022 - 7/04/2022	Montpellier (terrain expérimental du CEFE)	Etudier l'impact de la présence de poules pondeuses en verger-pâturé sur des populations de carpocapse en diapause en conditions contrôlée	Les poules consommeraient directement les larves de carpocapse en diapause. La recherche de nourriture des poules pourrait avoir un effet sur les populations de carpocapse en diapause (par détérioration des cocons, piétinement…). Les poules pourraient modifier l'environnement et donc impacter les sites de diapause des cocons (mise à nu du sol, modification physico-chimique du sol…).	Pâturage ponctuel de poules Parcelle divisée en 2 modalités (avec poules et sans poules). Proies cachées dans la parcelle (dans les sites naturellement privilégiés pour les diapauses) Dispositif de zonage	Suivi de l'état des proies Suivi de comportement des poules	Avec poule 100,69m² Sans poule 99,84m²	6	600 poules/ha	Oliviers (verger conservatoire)
SaniCarpo	01/2022 - 10/2022	Avignon (Ferme de La Durette)	Evaluer une éventuelle réduction des populations de carpocapse et réduction des fruits piqués, par le pâturage des poules en conditions de verger de pommier	Régulation des populations de carpocapse dû à la présence de poules **en hiver** Réduction des émergences et des dégâts sur les pommes	Pâturage hivernal de poules Parcelles divisées en 2 modalités (avec poules et sans poules). 2 parcelles	Piégeage phéromones, Comptages de fruits piqués	Ave poule : 55 m² et 73 m² Sans poule : 76 m² et 77 m²	4 + 2	548 poules/ha et 727 poules/ha	Pommiers en production (variétés Garance et Goldrush)
PataFix	07/2021 - 10/2022			Régulation des populations de carpocapse dû à la présence de poules **toute l'année** Réduction des émergences et des dégâts sur les pommes	Pâturage continu de poules Parcelles divisées en 2 modalités (avec poules et sans poules). 2 parcelles Parcelles sous filet dès les premières emmergences Pots BARBER (3 pots par traitement)	Pots Barber	Avec poule : 104m² et 82 m² Temoin : 90m² et 73m²	2 + 2	192 poules/ha et 243 poules/ha	Pommiers en production (variétés Reinette grise et rouge provençale d'hiver)
Arthropodes	17/05/2022 - 12/07/2022		Explorer un éventuel effet non-désiré du pâturage des poules sur les arthropodes de la surface du sol	Effets non-désirés sur les populations d'arthropodes de la surface du sol (dont des potentiels auxiliaires des pommiers)						

Annexe C : **Réflexion, comment quantifier/attester de la prédation ?**

L'utilisation de fausses larves. Par exemple, Garcia, Minarro, Martinez-Sastre (2021) ou Peisley, Saunders, Luck (2016) ont utilisé des fausses larves en pate-à-modeler disposées sur les branches et ont compté les marques faites dessus par les oiseaux. Par comparaison avec la prédation de vraies larves, le comptage des attaques sur larves en plastique sous-estimait la prédation réelle selon (Peisley, Saunders, Luck 2016) mais d'autres papiers ne font pas ce constat. Le véritable intérêt à utiliser des larves en pate-à-modeler est de pouvoir identifier le prédateur grâce à la marque de son bec. Cette méthode n'a pas été retenue dans le cadre du stage.

La quantification in situ de la prédation. Mathews, Bottrell, Brown (2004) ont utilisé des larves de carpocapse élevées en laboratoire qu'ils ont attachées avec du fil nylon puis placées dans une boite de pétri disposée dans la parcelle. Les larves étaient ensuite observées au microscope pour attester de traces de prédation par les araignées et carabes. Le pourcentage de larves consommées était aussi calculé. Les boites de pétris étaient filmées ou observées directement par un expérimentateur. Dans une autre étude, Solomon et al. (1976) a étudié la prédation de larves de carpocapse en diapause par des oiseaux sauvages. Ils ont lâché sur des bûches de pommiers de 2 m de longueur des larves de carpocapse élevées en laboratoire, tracé les endroits où elles faisaient leurs cocons sous l'écorce avec des punaises, placé les grumes/bûches dans les vergers et examiné à intervalles réguliers la survie ou la perte de chaque larve. Certaines bûches « témoins » étaient recouvertes d'un grillage pour exclure les oiseaux. De leur côté, Glen, Milsom (1978) ont découpés des cocons créés en conditions contrôlées entre des écorces et du carton découpé et collé sur des arbres pour observer la prédation par des oiseaux ou dans des boites de pétri avec de la terre et de la litière. Ces études ont été des sources d'inspiration pour élaborer les protocoles mis en place durant le stage.

Annexe D : **Choix de la méthode d'étude du comportement des poules**

Dans la littérature, deux principales méthodes d'observation des comportements des poules sont utilisées « la méthode d'échantillonnage continue » et « la méthode d'échantillonnage par scanning ». Avec la méthode d'échantillonnage continue, chaque animal est observé en continu sur une durée plus ou moins longue (30 secondes par exemple). Les actions des poules sont décrites en termes « d'évènements » si le comportement observé dure moins de 1s ou en termes « d'états » s'il dure plus longtemps (dans ce cas il est chronométré). Les comportements sont listés dans un éthogramme qui les décrits avec précision (Ferreira et al. 2021a). La méthode d'échantillonnage continue est désignée comme la méthode absolue pour l'observation de toutes les espèces d'animaux, et a par exemple été utilisée par Clark et al. (1995) sur des poules. Elle permet d'enregistrer très finement toutes les composantes du comportement d'un animal pendant une période donnée. Cependant, cette méthode est coûteuse en temps et la facilité de mise en place dépend du degré de technologie de l'expérimentation (caméras…), le niveau de compétence de l'observateur, et peut-être rapidement biaisée par la fatigue (Ross et al. 2019).

La méthode par scanning est utilisée pour enregistrer le comportement d'un individu ou d'un groupe d'individus à des moments séquentiels prédéfinis dans le temps (Lehner 1992). Souvent, ce scan est réalisé à l'aide de vidéo/photos. Par exemple, Newberry, Hunt, Gardiner (1988) ont observé à intervalle de trente minutes 24h/24h les comportements dans des zones de parcours définies pour avoir le pourcentage de poules actives ou inactives. Le scanning peut représenter une alternative moins coûteuse que la méthode d'échantillonnage continue et a été validée pour l'observation de poules pondeuses (Ross et al. 2019). Le scanning est une méthode efficace pour évaluer le comportement chez les volailles lorsque les comportements qui intéressent l'expérimentateur sont fréquents et de longue durée (Lehner 1992). La méthode finalement retenue est celle du scanning.

Annexe E : **Suivi complémentaire, le test sélectivité**

Un test complémentaire a été réalisé le 22/02/2022 durant la phase de conception de l'expérimentation « PrédaCarpo » afin de la calibrer et tester quelques hypothèses. La question posée est en premier lieu était : si les larves ne sont pas dissimulées dans l'environnement mais visibles directement par les poules, ces dernières mangent-elles le carpocapse ? Dans la même manière, mangent-elles le carpocapse lorsqu'il est au stade de cocon ? Puis, les poules ont-elles des préférences dans leur choix de proie telles que la taille de la proie, la couleur, la mobilité ? Si les poules ont le choix entre plusieurs proies dont le carpocapse, consomment-elles préférentiellement le carpocapse ? Et enfin, le matériel biologique envisagé pour l'expérimentation est-il adapté (c'est-à-dire, les poules consomment-elles les carpocapses sur les supports cartonnées dans les cocons ?).

Méthode :

Nous avons disposé sur un plateau des chenilles/vers/larves de différentes espèces et à différents stades sur des emplacements du plateau repéré par des numéros. Le plateau était placé dans une cage avec une poule. Nous notions ensuite l'ordre dans lequel les larves avaient été consommées et en combien de temps comme sur le tableau Figure 34Figure 34.

Test de selectivité		
Expé provenance des poules :		
Poule n° :		
	Ordre de préférence	Temporalité
Pimpkie blanc		
Teigne Blanche		
Carpo mort		
Vers de farnie		
Asticot Blanc		
Dandros		
Carpo Vivant		
Vers de terre		
Carpo en diapause		

Figure 34 : A gauche, le tableau utilisé lors du test de sélectivité. A droite, le plateau avec les proies disposées dans l'ordre du tableau (de gauche à droite)

J'ai testé 9 proies dont : une larve de carpocapse vivante, une larve de carpocapse morte, et un carpocapse en diapause sur support cartonné. Le protocole a été testé sur 8 poules provenant de 3 groupes (3 poulaillers différents). J'ai filmé chaque session. Chacune a duré entre 5 et 10 min. Le test s'arrêtait au moment où la poule avait tout consommé, si ce n'était pas le cas au bout de 10 min, l'expérimentation prenait fin et les vers non-consommés était notés comme « refus de consommation ».

Résultats :

	Moyenne de l'ordre de la consommation	Nombre de refus de consommation / 8 répétitions
Pimpkie blanc	3,83	3
Teigne Blanche	1,86	2
Carpo mort	4,50	3
Vers de farnie	2,29	2
Asticot Blanc	3,86	2
Dandros	3,63	1
Carpo Vivant	4,67	3
Vers de terre	4,13	1
Carpo en diapause	4,60	4

Figure 35 : tableau de résultats du test de Sélectivité

- La teigne blanche attire particulièrement les poules et est mangée en 1ère position dans 5 cas sur 8, souvent suivi par le vers de farine. Il s'agit des deux plus grosses larves et celles qui étaient les plus mobiles sur le plateau.

- le carpocapse en diapause sur carton a été consommé par seulement 4 poules sur 8, contre 5 pour les carpocapse morts et vivants, ce qui fait du carpocapse en diapause la proie avec le plus de refus de consommation.

- il n'y a pas eu de consommation du carton.

- les poules consomment du carpocapse quand on leur en fournit.

- observation intéressante : dans le cas du carpocapse en diapause, le carton, légèrement recourbé, empêche le bec des poules d'accéder au cocon dans le creux du carton.

Discussion :

Ce test complémentaire a eu un rôle très exploratoire et aucune conclusion seule ne peut ressortir aux vues des nombreux biais (nombre très faible de répétitions, bruits pendant la manipulation, poules stressées par leur déplacement, dispositif très peu représentatif des conditions réelle de prédation…). Cependant, il nous a permis de confirmer que la poule était très peu sélective des proies, qu'elle avait une bonne vision des proies. Un point a particulièrement attiré notre attention : le support cartonné sur lequel est construit le cocon de larve de carpocapse en diapause pourrait représenter un obstacle à la consommation de carpocapse durant l'expérimentation qui a suivi. Suite à cet essai et au préalable de l'expérimentation Prédacarpo, nous avions donc réfléchi à une autre manière de tester la prédation sur le carpocapse en diapause.

Annexe F : **Suivi complémentaire, cages à émergences**

A la suite de l'expérimentation PrédaCarpo, le 29/04/2022, nous avons placé dans des cages à émergence, des larves de carpocapse en diapause afin d'évaluer les potentiels d'émergence du matériel biologique utilisé lors de cette expérimentation (méthode décrite entre autre par Carter, Feeny (1986)). Une cage se composait d'une portion de tube en PVC de 25cm de diamètre et 10 cm de hauteur entièrement enfermée dans un filet Alt'Carpo. Nous avons testé les émergences de plusieurs types de proies :

- N (naturelles) : bandes cartonnées ondulées récupérées autour de troncs de pommier durant l'hiver comportant des cocons de carpocapse. Les cartons étaient ensuite découpés autour des cocons. Ce type de proies a représenté 50% des proies utilisées lors de l'expérimentation PrédaCarpo. Les proies disposées dans les cages à émergence n'ont pas servi pour l'expérimentation et ont été conservées à 4°C.
- A (artificielles) : cartons comportant des cocons de carpocapse. Les larves de carpocapse avaient été récupérées dans des pommes puis mis en diapause artificiellement au laboratoire sur des supports cartonnés. Les supports cartonnés avaient ensuite été découpés autour des cocons. Ce type de proies a représenté 50% des proies utilisées lors de l'expérimentation PrédaCarpo. Les proies disposées dans les cages à émergence n'ont pas servi pour l'expérimentation et ont été conservées à 4°C.
- F (FREDON) : cocons de carpocapse fournis par la FREEDON Hauts-de-France utilisés durant la répétition 4 de l'expérimentation.
- M (Montpellier) : cartons non découpés avec cocon de carpocapse, ayant subi une semaine en condition extérieure durant l'expérimentation PrédaCarpo.

Pour chacun de ces types de proies, 2 cages avec 10 cartons ont été testés. (10 cartons pour chacun des 4 traitements*2 répétitions). Les cages à émergences ont été disposés à l'extérieur durant 2 mois, puis congelées afin de tuer les papillons emprisonnés.

Résultats : les proies ont été comptées comme « émergées » si le cocon troué ne contenait plus de larve. La proie a été compté comme intact si le cocon n'était pas troué et que la larve morte était encore présente à l'intérieur du cocon.

Tableau 10 : Résultats des cages à émergence

	Nombre de proies ayant "émergées" sur 10		
	Cage 1	Cage 2	Moyenne
N	10	10	10
F	5	2	3,5
A	7	7	7
M	10	10	10

Les proies utilisées dans l'expérimentation PrédaCarpo étaient donc bien vivantes et capables d'émerger. Ces résultats confirment donc les sorties de carpocapse de leur cocon de manière spontanée la première répétition.

Annexe G : **Nid de poule**

Figure 36 : Poule prenant un "bain de poussière" dans un trou type « nid de poule »

Annexe H : **Photos d'évolution de la parcelle.**

Figure 37 : Photos de l'évolution de la parcelle en 1 mois, modalité avec poules. Les dates des photos sont, de gauche à droite : 2/03/2022, 8/03/2022, 15/03/2022, 23/03/2022, 30/03/2022

Annexe I : **Les oiseaux des pièges photos**

Figure 38 : Oiseaux sauvages pris par les pièges photos de l'expérimentation PrédaCarpo

Les oiseaux observés (identification par des ornithologues du CEFE Montpellier), de gauche à droite sur les photos :

- Pinson des arbres (*Fringilla coelebs*), l'hiver, il est strictement végétarien et ne mange des insectes qu'en été et le plus souvent dans la canopée (donc peu de concurrence possible sur la ressource carpocapse en diapause au sol ou sur la surface des troncs) (Joachim 1996),
- Rouge gorge familier (*Erithacus rubecula*), espèce la plus prise en photo, frugivore et insectivore surtout en sortie d'hiver, début de printemps où les invertébrés représentent leur source de nourriture principale (Debussche, Isenmann 1985),
- Mésange charbonnière (*Parus major*), consommatrice de larves pendant la période de nourrissage des oisillons, et connue pour consommer le carpocapse (Garcia, Minarro, Martinez-Sastre 2021; Barbaro et al. 2017; Kirk, Evenden, Mineau 1996),
- Fauvette mélanocéphale ou fauvette à tête noire (*Sylvia melanocephala),* qui a un régime principalement insectivore mais consomme quelques fruits et baies quand ils sont disponibles (Mezani 2001),
- Rouge queue noire (*Phoenicurus ochruros*), essentiellement insectivore (Morin 2010)

Annexe J : **Heatmaps détaillées**

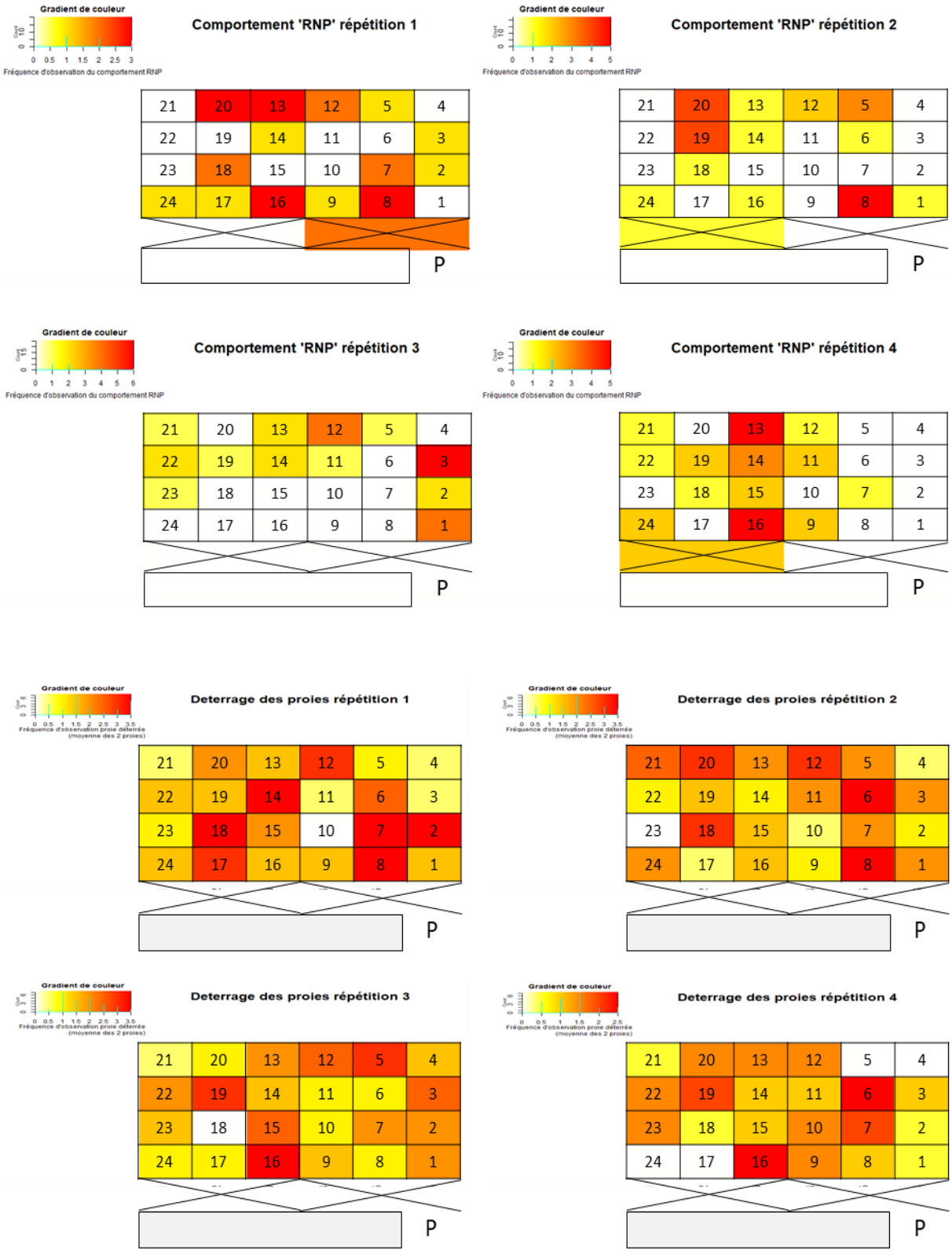


Figure 39 : En haut, Heatmaps des fréquences d'observation du comportement de recherche de nourriture dans l'environnement (RNP). Cette carte présente par un gradient de couleur pour chaque zone le nombre de fois où le comportement RNP a été observé durant chacune des 4 répétitions. En bas : Heatmaps des observations de déterrage des proies dans la parcelle « avec poules ». Cette carte présente par un gradient de couleur pour chaque zone le nombre de fois où les proies ont été remise à la surface (en cumulé) au cours d'une répétition (la valeur représentée est la moyenne des fréquences de déterrage des 2 proies cachées dans chacune des zones).

Annexe K : **Boxplot du déterrage en fonction du moment de la journée**

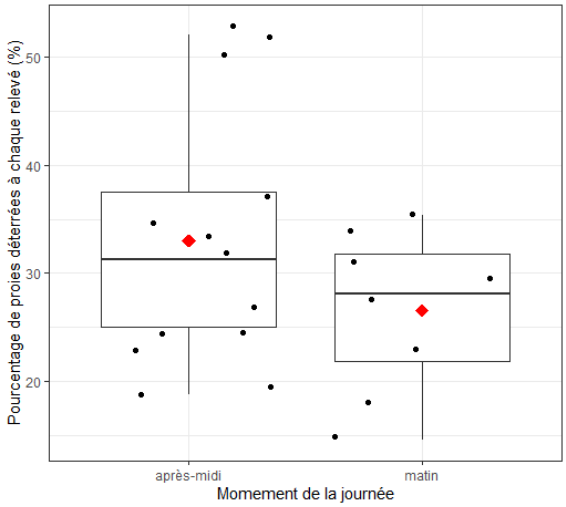


Figure 40 : Boxplot du pourcentage de proies remis à la surface en fonction du moment de la journée (après-midi ou matin). Chaque point représente le pourcentage de proies déterrées pour un relevé. Losange rouge=moyenne.

Annexe L : **Graphique en mosaïque des différents comportements en fonction des poules**

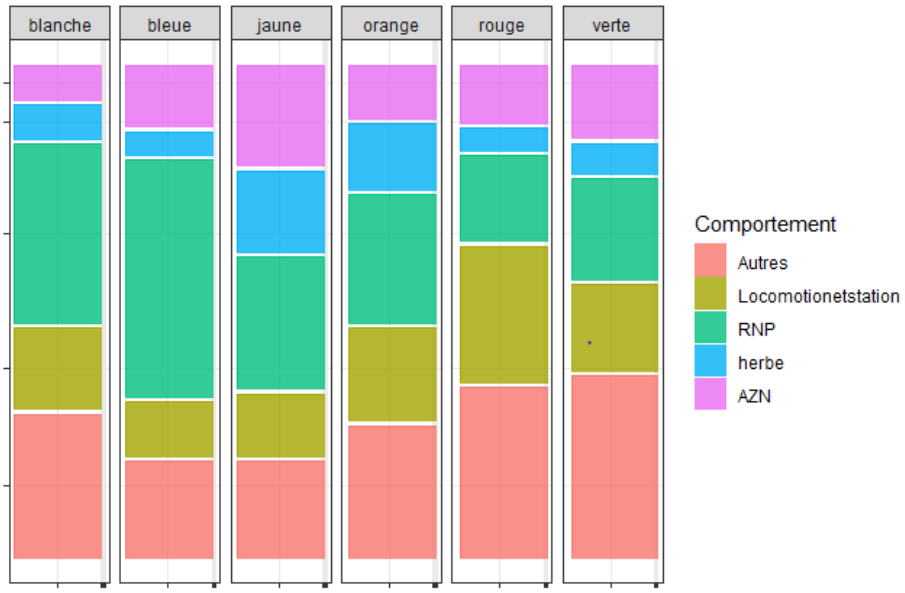


Figure 41 : Graphique en mosaïque représentant la part de chaque comportement dans le budget-temps de chaque poule.

Annexe M : **Comparaison des fruits piqués saisons 2021 – saison 2022**

Parcelle	Modalité	juil-21	oct-21	juil-22
Provençale rouge d'hiver	Poules	31,69%	30,40%	0,22%
	Sans poules	30,93%	28,64%	0,08%
Reinette grise du canada	Poules	42,89%	42,92%	6,80%
	Sans poules	45,64%	61,06%	11,97%
Garance	Poules			0,72%
	Sans poules			0,60%
Goldrush	Poules			11,40%
	Sans poules			3,69%

Figure 42 : Tableau des moyennes de pourcentages de fruits piqués selon la prcelle (différentes variétés) et la modalité

Annexe N : **Analyses PCR**

Pour tester la présence d'ADN de carpocapse dans les fientes de poules et ainsi attester d'une éventuelle ingestion de carpocapse par les poules en conditions réelles, des analyses PCR auront lieu en septembre 2022. On utilise l'amplification de l'ADN des proies par PCR : souvent on choisit une seule amorce spécifique qui permet de reconnaitre l'ADN spécifique de l'espèce en question (Boreau de Roincé et al. 2010; Matar 2015). Boreau de Roincé (2012) a mis en place des amorces pour le carpocapse et a défini des protocoles qui seront utilisées pour identifier la présence d'ADN de carpocapse dans les fientes de poules. Il est nécessaire de réaliser un étalonnage afin de calculer le temps de demi-détection c'est-à-dire « le temps pour lequel la moitié des prédateurs sont toujours détectés positifs à la consommation du ravageur par la PCR diagnostique ». Il faut donc réaliser un test alimentaire qui consiste à faire consommer au prédateur le ravageur ciblé en conditions contrôlées et à récupérer des excréments à intervalle de temps régulier pour tester la période pour laquelle de l'ADN du ravageur est détectable dans les fientes (Boreau de Roincé et al. 2010). Dans notre cas, le test alimentaire a déjà été effectué en amont du stage et nous a permis d'adapter le protocole de récupération des fientes dans l'environnement en conséquence.

Pour la récupération de fiente, les poules étaient lâchées dans les parcelles le matin, puis fermées dans le poulailler pendant 30min. L'expérimentateur restait proche du poulailler pour intervenir en cas de piquage entre les poules et stopper immédiatement la manipulation. Une plaque en plastique propre était placée sur le sol du poulailler. Trente minutes plus tard, l'expérimentateur récupérait les fientes fraiches déposées sur la plaque dans des pots individuels stériles à l'aide de gants. Les échantillons prélevés étaient ensuite identifiés et placé au congélateur pour des analyses prévues en septembre 2022.

Auteur :
SEON Noémie

Thème : RECHERCHE - DEVELOPPEMENT
Confidentiel : Non

Etude du potentiel de régulation du carpocapse de la pomme par des poules pondeuses en verger-pâturé

Assessment of codling moth control by laying hens in apple orchards

Mots-clés : Cydia pomonella, carpocapse, poules pondeuses, vergers-pâturés, pommiers, diversification, lutte biologique, régulation, expérimentation, arthropodes
Key-words : Cydia pomonella, codling moth, laying hens, apple orchards, chicken-pastured orchards, diversification, biological control, regulation, experimentation, arthropods

Résumé :
Le carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*) est un ravageur majeur des pommiers du sud de la France. Il a développé des résistances à la plupart des classes d'insecticides chimiques, et les moyens de lutte alternative présentent des efficacités partielles. Dans une optique de régulation du carpocapse, quelques arboriculteurs introduisent des poules pondeuses dans leurs parcelles et témoignent d'une réduction des dégâts à la récolte.
L'objectif de ce stage est d'évaluer, par une approche expérimentale, le potentiel de régulation du carpocapse par des poules pondeuses en verger-pâturé de pommiers. Deux grands dispositifs expérimentaux ont été mis en place. Un premier dispositif chez des agriculteurs a eu pour but d'évaluer l'impact de la présence des poules sur les populations de carpocapse et sur les fruits piqués par ce ravageur. Un second dispositif dans lequel des carpocapses étaient artificiellement cachés a permis d'approfondir l'étude des mécanismes de régulation en jeu. Enfin, des pièges Barber ont permis d'explorer un éventuel contre-effet des poules sur certains auxiliaires du verger.
Les résultats partiels du premier dispositif n'ont pas permis d'identifier d'impact des poules sur les populations émergentes de carpocapse ni sur la qualité de la production en conditions réelles. Le second dispositif n'a pas mis en évidence le mécanisme de prédation du carpocapse par des poules mais a permis d'identifier d'autres mécanismes liés à des perturbations de l'environnement pouvant impacter la survie du carpocapse en diapause. Enfin, la biodiversité des arthropodes épigés, et notamment de carabes, n'a pas été impactée par la présence des poules. Les mesures à la récolte des pommes viendront compléter ces résultats partiels.
Par ailleurs, de futures analyses PCR permettront d'évaluer la présence d'ADN de carpocapse dans les fientes et faire alors la preuve ou non d'une ingestion de carpocapses par les poules.

Abstract :
The codling moth (*Cydia pomonella*) is a major pest of apple trees in France. It has developed resistances to most classes of chemical insecticides, and alternative control methods are only partially effective. In order to control codling moth, some growers introduce laying hens in their orchards and emphasize a reduction of damages at harvest.
The main goal of this internship is to evaluate, through an experimental approach, the potential of codling moth control by laying hens in apple orchards. Two experimental setups have been designed. The first one was conducted in farmers' fields to evaluate the impact of the presence of the hens on codling moth populations and on the fruits damages caused by moths. A second system in which codling moths were artificially hidden allowed to identify regulatory mechanisms. Finally, pitfall traps were used to explore a possible unintended effect of hens on beneficial insects in the orchard.
The ongoing results of the first system did not allow us to identify any impact of the hens on emerging codling moth populations or on the quality of the production under real conditions. The second system did not demonstrate the predation of codling moths by hens, but allowed the identification of other mechanisms related to environmental disturbances that could impact the survival of overwintering codling moths. Finally, the biodiversity of epigeous arthropods, especially carabid beetles, was not impacted by the presence of hens.
Fruit-damages counts at the apple harvest will complete these partial results. In addition, future PCR analyses will permit the evaluation of the presence of codling moth DNA in the droppings and then prove or not the ingestion of codling moths by the hens.

Nombre de pages du document final : 56

Demandeur (entreprise, organisme...) :

INRAE UNITE ECO DEVELOPPEMENT