



HAL
open science

Lutte biologique par conversation dans les vergers de pommiers : peut-on manipuler les communautés d'araignées pour augmenter leur efficacité contre certains ravageurs

Sadeq Alzubik Belkair

► To cite this version:

Sadeq Alzubik Belkair. Lutte biologique par conversation dans les vergers de pommiers : peut-on manipuler les communautés d'araignées pour augmenter leur efficacité contre certains ravageurs. Autre [q-bio.OT]. Université d'Avignon, 2018. Français. NNT : 2018AVIG0348 . tel-02076311

HAL Id: tel-02076311

<https://theses.hal.science/tel-02076311>

Submitted on 22 Mar 2019

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

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



Thèse de doctorat

Présentée par

ALZUBIK BELKAIR Sadeq

- Ecole doctorale Sciences et Agrosociétés (ED 536)

Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

- IMBE- Institut Méditerranéen de Biodiversité et Ecologie UMR 7263

Equipe : "Biomarqueurs Environnement Santé"

- Unité PSH – Plantes et Systèmes de culture Horticoles –

Institut National de la Recherche Agronomique

INRA « Centre d'Avignon »

Lutte biologique par conservation dans les verges de pommiers : peut-on manipuler les communautés d'araignées pour augmenter leur efficacité contre certains ravageurs ?

Soutenue le 13 décembre 2018

Membres de jury

M. Mickaël HEDDE	Chargé de recherche, INRA, Montpellier	Rapporteur
M. Nicolas DESNEUX	Directeur de Recherche, Institut Sophia Agrobiotech	Rapporteur
Mme. Camille DUMAT	Professeure, Université de Toulouse	Examinatrice
Mme. Magali RAULT	Maitre de conférences, Université d'Avignon	Directrice
M. Yvan CAPOWIEZ	Chargé de recherche, INRA, Avignon	Membre invité
M. Christophe MAZZIA	Maitre de conférences, Université d'Avignon	Membre invité

Sommaire

Introduction générale.....	12
1 La production de pommes	13
1.1 La production de pomme dans le monde et en France.....	14
1.2 Les principaux ravageurs du pommier dans le sud-est de la France.....	15
1.3 L’usage des insecticides dans les vergers de pommiers	23
2 La lutte biologique	24
2.1 Définition et généralités	24
2.2 Les avantages de la lutte biologique	25
2.3 Les grands types de lutte biologique.....	26
2.4 Les organismes utilisés en lutte biologique	30
3 Les araignées: des prédateurs redoutables	33
3.1 L’histoire du nom Arachnida	33
3.2 L’alimentation des araignées	34
3.3 Les différentes méthodes de chasse des araignées.....	35
3.4 Les araignées comme agents de lutte biologique dans les agroécosystèmes.....	39
3.5 Le cas particulier du verger de pommiers.....	40
3.6 Les manipulations de l’habitat et contrôle biologique par araignées.....	43
3.7 L'utilisation de <i>Cheiracanthium mildei</i> et <i>Clubiona</i> sp pour la lutte biologique.....	45
Les chapitres et les objectifs de la thèse.....	51
Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l’environnement proche sur les communautés d’araignées présentes en verger de pommiers en Provence.....	52
1 Introduction	53
2 Méthodes et matériels.....	55
2.1 Les vergers et la caractérisation de leur environnement proche	55
2.2 Piégeage et identification des araignées	58
2.3 Analyses statistiques	59
3 Résultats	60
3.1 Communautés d’araignées capturées à l’automne 2015.....	60

3.2	Communautés d'araignées capturées à l'hiver 2016	69
4	Discussion	74
4.1	La méthode des bandes pièges	74
4.2	Des communautés d'araignées dominées par quelques taxons.....	75
4.3	Effet des modes de protection sur les communautés d'araignées	75
4.4	Effet de l'environnement proche des vergers	76
4.5	Différences entre les saisons	78
5	Conclusions	78
Chapitre 2 : Activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous climat méditerranéen		
		80
1	Introduction	83
2	Material and Methods.....	84
2.1	The study orchard	84
2.2	Sampling strategy.....	85
2.3	Statistical analysis	86
3	Results	86
3.1	Total arthropod abundance over time	86
3.2	Seasonal dynamics of spider communities	89
3.3	Classification of spiders according to their winter activity	89
3.4	Characteristics of the spider communities depending on the seasons	92
4	Discussion	92
4.1	Many spiders are active during the Mediterranean winter.....	92
4.2	Ecological significance of cardboard bands	97
5	Conclusions	98
Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (<i>Cheiracanthium mildei</i> et <i>Clubiona leucapsis</i>) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse.....		
		100
1	Introduction	104
2	Material and Methods.....	106
2.1	The source orchard.....	107
2.2	The target orchard	107
2.3	Monitorings of arthropods	108

2.4	Codling moth abundance	109
2.5	Statistical analysis	109
3	Results	110
3.1	Spiders within the transferred traps	110
3.2	Abundance of <i>C. mildei</i> and <i>C. leucapsis</i> . in the target orchard before and after the release (carboard traps)	112
3.3	Abundance of spiders and earwigs after the release (transparent shelters)	113
3.4	Relationships between arthropods in shelters and codling moth	116
4	Discussion	117
4.1	Enhancing spider populations in crops	117
4.2	Survey and temporal dynamics of the released spiders	117
4.3	Efficiency of the release of spiders and their effects against <i>C. pomonella</i>	119
	Discussion générale	122
1	Facteurs expliquant la présence et l'abondance d'araignées	123
1.1	Effet des pesticides	123
1.2	Effet de l'environnement proche (haies, parcelles avoisinants,...)	124
2	Dynamique hivernale	125
2.1	Plusieurs genres d'araignées sont actifs pendant l'hiver méditerranéen	125
2.2	Les bandes pièges et leur signification écologique	127
3	Peut-on manipuler la communauté d'araignées ?	129
3.1	Augmenter l'abondance de la communauté d'araignées dans les cultures	129
3.2	Dynamique temporelle d'araignées lâchées	130
3.3	Efficacité et durabilité des lâchers d'araignées et leur effet contre le carpocapse	132
	Perspectives	133
1	Apprendre à considérer l'hiver comme une période où il se passe des choses dans les cultures pérennes	134
2	Transférer ou lâcher des araignées est possible : de la lutte biologique à « l'ingénierie écologique »	136
3	L'usage actuel des pesticides n'est pas (si) rédhibitoire	139
	Références	141
	Résumé	180
	Summary	180

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes co-encadrements Yvan Capowiez et Christophe Mazzia pour leurs encadrement scientifique et gentillesse. Je leur suis très reconnaissant pour leurs encouragements et leur dévouement du début à la fin de ma thèse. Mes sincères remerciements vont à Magali Rault, directrice de ma thèse, pour sa disponibilité, de son suivi de mes travaux, et de son encadrement et ses conseils bien utiles.

Je tiens à remercier les membres de mon comité de thèse, Sylvaine Simon, Olivier Blight, Alain Pasquet, pour leur investissement et leurs conseils très intéressants et qui étaient d'une grande utilité pour réaliser ce travail. Un remerciement particulier s'adresse à Alain pour son aide dans la rédaction d'articles et le suivi de ce travail.

Je remercie chaleureusement les membres du jury et les rapporteurs d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse.

Un grand merci au Centre libyen de recherche en biotechnologie, au ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique libyen, et à l'ambassade libyenne en France pour leur confiance et leur soutien financier qui m'ont permis d'arriver au terme de ce travail de thèse dans des conditions idéales.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail. Merci en particulier aux stagiaires qui ont pris part dans ce travail et à Odile Mascle pour son aide précieuse.

Merci à ma famille : ma mère, mon père, mes sœurs et frères, et à mon épouse pour leurs encouragement et soutien sans faille. Je tiens à vous exprimer ici ma reconnaissance et ma gratitude.

Liste des figures

<i>Figure 1. Répartition en pourcentages de la production de pomme en France selon les régions. (Planetoscope,2017).</i>	15
<i>Figure 2. Champ infesté et une colonie de puceron cendré sous une feuille</i>	20
<i>Figure 3.Les dégâts et la déformation causés par le carpocapse (Photo prise par Al Zubik).</i>	22
<i>Figure 4.Diagramme replaçant la lutte biologique dans le contexte de la lutte intégrée (d'après Eilenberg et al. 2001).</i>	26
<i>Figure 5.Nombre d'introductions d'auxiliaires de lutte biologique classique par décennie (d'après Cock et al. 2016).</i>	27
<i>Figure 6.taxonomiques des auxiliaires utilisés en lutte biologique par augmentation entre 1900 et 2010 (d'après Van Lenteren, 2012).</i>	28
<i>Figure 7.Cheiracanthium mildei</i>	47
<i>Figure 8. Différentes espèces de Clubiona sp</i>	50
<i>Figure 9. les vergers sélectionnés autour d'Avignon.</i>	56
<i>Figure 10. bandes piège en carton ondulé sur l tronc d'un pommier</i>	59
<i>Figure 11. Représentation en pourcentage de l'effectif total des différents taxons d'araignées capturés à l'automne 2015 dans les bandes pièges.</i>	60
<i>Figure 12. Pseudeuophrys erratica</i> <i>Figure 13. Nurscia albomaculata</i>	61
<i>Figure 14. Cheiracanthium mildei</i> <i>Figure 15. Phrurolithus festivus</i>	61
<i>Figure 16. Distributions des dominances pour les vergers conduits en PFi ou en AB. (la différence est significative au seuil de 5%).</i>	63
<i>Figure 17. Abondances moyennes des 4 taxons les plus fréquents en fonction du mode de protection phytosanitaire des vergers</i>	63
<i>Figure 18. projection sur les 2 premiers axes (représentant xx% de la variabilité) des taxons (panel en haut à gauche), des vergers regroupés en 2 groupes de protection phytosanitaire (haut-droite) ou en 3 groupes en séparant les poiriers PFI des pommiers PFI .</i>	65
<i>Figure 19. Principales caractéristiques des communautés d'araignées capturées dans les vergers regroupés par protection phytosanitaire et par fruit.</i>	66
<i>Figure 20. Visualisation des caractéristiques de l'environnement proche (indice de qualité des haies et pourcentage de vergers bordant les vergers cibles) pour l'ensemble des vergers.</i>	67

Figure 21. Projection sur les 2 premiers axes des résultats de l'analyse discriminante sur les 4 modalités séparant l'indice synthétique des haies et le mode de protection phytosanitaire (les poiriers ont été ôtés de l'analyse).68

Figure 22. Représentation en pourcentage de l'effectif total des différents taxons d'araignées capturés à l'hiver 2016 dans les bandes pièges (total sur 39 vergers).69

Figure 23. Abondances moyennes des 4 taxons les plus fréquents en fonction du mode de protection phytosanitaire des vergers.70

Figure 24. projection sur les 2 premiers axes (représentant xx% de la va-riabilité) des taxons (panel de gauche), des vergers regroupés en 2 groupes de protection phytosanitaire (droite). ...71

Figure 25. Principales caractéristiques des communautés d'araignées cap-turées dans les vergers regroupés par protection phytosanitaire.....72

Figure 26. Visualisation des caractéristiques de l'environnement proche (indice de qualité des haies et pourcentage de vergers bordant les vergers cibles) pour l'ensemble des vergers.73

Figure 27. Mean (andSE) abundance of spider in dynamic (temporary) or static (entire sampling period) cardboard traps in the experimental orchard free of pesticides (n = 20). Colours separated the three seasons defined by the Hierarchical Ascending Classification.....88

Figure 28. Mean, minimum and maximal values for daily temperatures (°C) recorded close to the orchard from the 1th of September to the 1th of June. Vertical arrows indicate the separation between the seasons as defined by the Hierarchical Ascending Classification.90

Figure 29. mean abundance caught in dynamic and static traps (grey circle) of both earwig species caught in the experimental orchard free of pesticides. Dynamic traps were repeatedly attached to trees whereas static traps were attached once in August.91

Figure 30. Analysis of the structure of the active spider communities found in dynamic traps (repeatedly attached) as a function of sampling date: (a) Hierarchical Ascending Classification applied to the results of the PCA ; (b) projections of the sampling date (note that there are no temporary, repeatedly attached traps in the beginning of September) in the first two axes of the PCA; (c) projections of the spider genus in the first two axes of the PCA; (d) 80%-CI ellipses for each season as defined by the HAC.93

Figure 31. Bar plot of the percentage of winter-activity for the main spider genera. Winter activity was defined as the abundance caught in dynamic traps laid in winter divided by the total caught in the three seasons (colours separated spider genera with low (dark grey), moderate (soft grey) or high (black) winter activity).94

Figure 32. Mean abundance caught in dynamic (black triangle) and static traps (grey circle) for six chosen genera corresponding to spiders with a low (first row) moderate (second row) or high (third row) winter activity. Dynamic traps were repeatedly attached whereas static traps were attached once in August95

Figure 33. Abondance moyenne de C. mildei dans les 68 vergers à l'automne 2015..... 100

Figure 34. Spring (red) and fall (green) mean (and SE) abundance of Cheiracanthium mildei and C. leucapsis. per tree in the experimental orchard from 2014 to 2017 (n= 40).The release occurred in December 2015. Bars bearing sharing a letter are not significantly different (each season was tested separately). 113

Figure 35. Mean abundance per tree of Cheiracanthium mildei, C. leucapsis., Olios argelasius and earwigs (n = 160) observed in plastic shelters in 2016 (red) and 2017 114

Liste des tableaux

- Tab. 1. Les principaux ravageurs du pommier
- Tab. 2. Les différents types de chasse des araignées
- Tab. 3. Les différents types de chasse des araignées au cas du pommier en Provence
- Tab. 4. Répartition des vergers dans les différentes catégories de protection phytosanitaires (AB ou PFI) pour les 2 saisons d'étude
- Tab. 5. Abundance of the main spider species present in the organic source orchard trapped using corrugated cardboards in November 2015
- Tab. 6. Results of the GLM comparing maximum abundances in the transparent shelters for each main taxon and each peak between 2016 and 2017
- Tab. 7. Summary of the GLM model (2016 and 2017)

Liste des abréviations

- AB** : Agriculture **B**iologique
- BSV** : Bulletin de Santé du **V**égétal
- DEPHY** : **D**émonstration, **E**xpérimentation et **P**roduction en **phy**tosanitaires
- ha** : **H**ectare
- HR** : **H**umidité **R**elative
- IFT** : **I**ndice de **F**réquence de **T**raitement
- IGP** : **I**ndication **G**éographique **P**rotégée
- INRA** : **I**nstitut National de la **R**echerche **A**gronomique
- IPM** : **I**ntegrated **P**est **M**anagement

- KM** : Kilomètre
- NCBI** : National Center for **B**iot**e**chnology **I**nformation
- OILB** : **O**rganisation **I**nternationale de **L**utte **B**iologique
- PACA** : **P**rovence-**A**lpes –**C**ôte –**D**'azur
- PFI** : **P**roduction **F**ruitière **I**ntégrée
- SITI** : **S**ystème d'**I**nformation **T**axonomique **I**ntégré

Introduction générale

L'agriculture a subi de profondes évolutions depuis la fin de la dernière guerre mondiale. Ces évolutions visaient principalement à augmenter les rendements et la productivité économique. Elle s'est intensifiée en utilisant une quantité importante de pesticides chimiques pour la protection des cultures dans le monde entier (Köhler et Triebkorn, 2013). Cette intensification utilisant donc de manière massive des intrants (engrais, produits phytosanitaires de synthèse), des variétés à haut rendement, et en ayant recours de façon importante à la mécanisation a effectivement entraîné une augmentation de la productivité. Mais parallèlement elle a aussi eu des conséquences négatives pour l'environnement (diminution de la biodiversité, pollution de l'eau entre autres) et la santé humaine (Matson et al., 1997 ; Griffon, 2007; Bonny, 2010).

Conscient de ce problème et suite au Grenelle de l'Environnement, le gouvernement par l'intermédiaire des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement a mis en place des plans d'action visant à réduire l'utilisation des pesticides. Ainsi le plan Ecophyto I a été lancé en 2007 ; il visait à diminuer de 50% les pesticides. Il s'est terminé en 2018 mais sans résultats probants. Il se poursuit actuellement par le plan Ecophyto II au cours duquel l'objectif est toujours de réduire de 25% les produits phytosanitaires à l'horizon 2020 et de 50% en 2025.

Ce plan Ecophyto 2 est constitué de 6 axes.

- **Augmenter la taille du réseau de ferme DEPHY** avec un objectif de 3 000 fermes impliquées dans le dispositif (lors de la version 1 du plan, 1 900 fermes faisaient parties du dispositif)
- **Poursuivre le dispositif BSV** : le bulletin de santé du végétal donne gratuitement aux agriculteurs et conseillers une indication hebdomadaire de l'état sanitaire des cultures
- **Rénover le dispositif Certiphyto**, désormais valable 5 ans pour l'ensemble des catégories
- **Accompagner 30 000 agriculteurs vers l'agro-écologie**. Cette action nouvelle est en cours de construction pour une mise en œuvre courant 2016.

- Développer l'expérimentation de certificats d'économies de produits phytosanitaires, dispositif législatif issu de la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt d'octobre 2014.
- Soutenir l'expérimentation, le biocontrôle et le renouvellement de l'agroéquipement en mettant en place des financements dédiés à ces actions.

Le travail réalisé au cours de ce doctorat s'inscrit dans ce dernier axe. En effet pour réduire les traitements phytosanitaires et leurs impacts il faut trouver des moyens de lutte alternatifs contre les ravageurs et développer, approfondir ceux déjà existants. Parmi ces moyens, la lutte biologique présente un intérêt réel. Elle consiste à lutter contre des ravageurs des cultures en utilisant des organismes vivants qualifiés d'auxiliaires. Même si pour certaines cultures, des résultats ont été obtenus dans ce domaine notamment en utilisant des lâchers d'auxiliaires, il reste encore des questions à approfondir comme par exemple le maintien de ces populations introduites au moyen d'aménagements.

Durant cette thèse, j'ai mené des expériences dans le cadre de la lutte biologique en vergers de pommiers en région PACA. Cette culture très présente dans cette région possède un indice de fréquence de traitement élevé et constitue donc situation idéale dans le cadre du plan Ecophyto 2. Mes travaux se sont focalisés sur les araignées en tant que prédateurs auxiliaires généralistes de ravageurs du pommier comme le carpocapse ou puceron cendré en essayant globalement de savoir si on peut manipuler les populations d'araignées en les transférant d'une parcelle à une autre, si on peut les maintenir dans le temps d'une année sur l'autre et si elles peuvent rendre un service dans le cadre de la lutte biologique.

1 La production de pommes

Le pommier cultivé est considéré comme un hybride interspécifique, généralement désigné par *Malus x domestica* Borkh. (Korban et Skirvin, 1984). Bien que la dénomination *Malus pumila* Mill. ait été préconisée récemment, *Malus x domestica* Borkh. reste la dénomination de référence dans la base de données taxonomiques du NCBI (National Center for Biotechnology Information) et c'est la plus utilisée actuellement (Qian et al., 2010; Virlet et al., 2014). La pomme est une source d'antioxydants et de fibres alimentaires à faible teneur en calories qui permet une réduction du risque de maladies

cardiovasculaires, de cancer et d'asthme (Eberhardt et al., 2000 ; Colin- Henrion, 2008). La consommation régulière de pommes (2 à 3 par jour) pourrait en effet diminuer de 5 à 15 % le taux de cholestérol (Aprifel, 2008).

1.1 La production de pomme dans le monde et en France

Dans le **monde**, il se récolte environ 64 millions de tonnes de pommes annuellement. La pomme est la 3^{ème} espèce fruitière la plus cultivée au monde, après les agrumes et les bananes. La production mondiale pour 2017-2018 est de 76,2 millions de tonnes.

L'Europe est un grand continent arboricole avec une production de 12 millions de tonnes environ en 2016, tirée par 3 principaux pays producteurs : l'Italie, la Pologne et la France.

La pomme est le fruit le plus consommé en France, loin devant la banane et l'orange. Il s'est récolté environ 1,5 million de tonnes de pommes en France en 2016 (Planetoscope, 2017 ; SNP, 2018). Il existe plus de 7000 variétés de pommes dont 1000 sont encore cultivées en France. C'est la 1^{ère} production fruitière de France avec 1788 milliers de tonnes de pommes produites par an. Environ 38 % des pommes récoltées en France sont exportées. La France est le troisième producteur européen de pommes, derrière la Pologne et l'Italie. En France, la pomme est cultivée principalement dans trois zones qui totalisent plus de 80% des superficies cultivées (Trillot et. al., 2002). Le sud-Est avec les régions Provence totalise 26 % de la production nationale en 2016, suivent le Languedoc en Rhône-Alpes, le Val de Loire avec les Pays de Loire et le Centre et enfin le Sud-Ouest avec Midi Pyrénées et Aquitaine. (Figure1).

Toutefois, depuis une vingtaine d'années, la superficie occupée par les vergers de pommiers en France est en constante diminution ce qui se répercute sur le potentiel de production (Virlet et. al., 2014). Les surfaces de vergers de pommiers français sont passées de 61 000 ha à moins de 44 000 ha pour 8000 exploitations de pomiculture. Le verger national de pommes subit une érosion constante : entre 1992 et 2007, 42,28% des vergers ont même été arrachés. La filière pommes et poires emploie aujourd'hui quelque 50 000 personnes (équivalents temps plein) sur le territoire français, ce qui en fait l'un des principaux pourvoyeurs de main-d'œuvre en milieu rural.



Figure 1. Répartition en pourcentages de la production de pomme en France selon les régions. (Planetoscope,2017)

La consommation du marché français se situe autour de 737 000 tonnes dans les différents circuits de la distribution, auxquelles s'ajoutent 44 000 tonnes en restauration. En France, environ 20 kg de pommes sont consommés par an et par foyer.

Les Golden, Gala et Granny Smith sont les variétés de pomme les plus vendues en France.

1.2 Les principaux ravageurs du pommier dans le sud-est de la France

La pomme est un fruit délicieux qui, malheureusement, est sujet à plusieurs attaques de maladies et de ravageurs qui occasionnent des dégâts importants dans les climats tempérés et méditerranéens Tableau 1. Les ravageurs les plus fréquents sont les pucerons et le carpocapse.

Groupe	Nom français	Nom scientifique
Insectes		
Lépidoptères	Le carpocapse	<i>Cydia pomonella</i> L.
	La tordeuse orientale	<i>Cydia molesta</i> Busck.
	La tordeuse de la pleure	<i>Adoxophyes reticulana</i> Hb.
	La tordeuse rouge des bourgeons	<i>Spilonota ocellana</i> F.
	La tordeuse pâle du pommier	<i>Pseudexentera mali</i> Freeman
	La tordeuse du pommier	<i>Archips argyrospilus</i> Walker
	La phalène brumeuse	<i>Operophtera brumata</i> L.
	La zeuzère	<i>Zeuzera pyrina</i> L.
	Le cossus gâte-bois	<i>Cossus cossus</i> L.
	La sésie du pommier	<i>Synanthedon myopaeformis</i> Borkh.
	La mineuse du pommier	<i>Phyllonorycter blancardella</i> Fabricius
	Le cémiostome du pommier	<i>Leucoptera malifoliella</i> Costa
	L'hyponomeute du pommier	<i>Yponomeuta malinellus</i> Zeller
	Hémiptères	Le puceron cendré du pommier
Le puceron vert non migrant du pommier		<i>Aphis pomi</i> De Geer
Le puceron vert migrant du pommier		<i>Rhopalosiphum insertum</i> Walker
Le puceron lanigère du pommier		<i>Eriosoma lanigerum</i> Hausmann
Le puceron des galles rouges		<i>Dysaphis</i> spp.
Le puceron vert des citrus		<i>Aphis spiraecola</i> Patch
La lygide du pommier		<i>Lygidea mendax</i> Reuter
La punaise terne		<i>Lygus lineolaris</i> Palisot de Beauvois
La cicadelle blanche du pommier		<i>Typhlocyba pomaria</i> McAtee
La cicadelle des rosiers		<i>Edwardsiana rosae</i> L.

	Le membracide bison	<i>Stictocephala bisonia</i> Kopp & Yonke
	La cochenille ostréiforme	<i>Quadraspidiotus ostraeiformis</i> Curtis
	La cochenille virgule du pommier	<i>Lepidosaphes ulmi</i> L.
Diptères	La mouche de la pomme	<i>Rhagoletis pomonella</i> Walsh
	La cécidomyie des feuilles	<i>Dasyneura mali</i> Kieffer
Coléoptères	L'anthonome du pommier	<i>Anthonomus pomorum</i> L.
Hyménoptères	L'hoplocampe du pommier	<i>Hoplocampa testudinea</i> Klug
Thysanoptères	Le thrips californien	<i>Frankliniella occidentalis</i> Pergande
Acariens		
	L'acarien rouge	<i>Panonychus ulmi</i> Koch
	L'acarien jaune	<i>Tetranychus urticae</i> Koch
	Le phytopte libre du pommier	<i>Aculus schlechtendali</i> Nalepa
Maladies		
Champignons	La tavelure du pommier	<i>Venturia inaequalis</i> Cooke
	Le chancre du collet	<i>Phytophthora cactorum</i> Lebert & Cohn
	La moniliose	<i>Monilia fructigena</i> Aderhold & Ruhl.
	Le chancre européen	<i>Nectria galligena</i> Bresad.
Bactéries	Le feu bactérien	<i>Erwinia amylovora</i> Burrill
	Le flétrissement des bouquets floraux	<i>Pseudomonas syringae</i> Van Hall
Virus	La mosaïque du pommier	Genus: Ilarvirus
Nématodes		
	Le nematode des lésions	<i>Pratylenchus vulnus</i> Allen & Jensen
	Le nématode à galle	<i>Meloidogyne incognita</i> Kofoid & White
	Le nématode dague américain	<i>Xiphinema americanum</i> Cobb

Tableau 1. Les principaux ravageurs du pommier (Ohlendorf, 1999; Blommers, 1994; Janick et Moore, 1996)

Les principaux ravageurs en vergers de pommier qui occasionnent des dégâts importants, dans le Sud-est de la France sont :

Les pucerons *Dysaphis plantaginea* (Homoptera : Aphididae) qui sont considérés comme les espèces les plus nuisibles en vergers de pommier (Forrest et Dixon, 1975). Ils se nourrissent de la sève phloémienne en s'alimentant directement dans les cellules des tubes criblés (Giordanengo et al., 2007; Walling, 2008).

Le carpocapse, *Cydia pomonella* (Tableau1), est le principal ravageur de la production de pommes dans le monde (Barnes, 1991; Beers et al.,1993 ; McGuffin et al., 2014 ; Reyes et al., 2015). Outre la pomme, ce ravageur attaque des poires, des coings, des noix et des châtaignes (Pajač, 2011), entraînant des pertes économiques dans la production de fruits (Ciglar, 1998).

1.2.1 ***Le puceron cendré du pommier, *Dysaphis plantaginea* Passerini***

1.2.1.1 La classification du puceron cendré (Passerini, 1860)

Royaume: Animalia

Embranchement: Arthropoda

Classe: Insecta

Ordre: Hemiptera

Sous-ordre: Sternorrhyncha

Famille: Aphididae

Genre : *Dysaphis*

Espèces: *plantaginea*

1.2.1.2 Le cycle de vie du puceron cendré

Les pucerons migrants ailés pondent leurs œufs à l'automne sur les jeunes branches ou sous l'écorce des pommiers et ces œufs éclosent courant mars lors du gonflement des bourgeons. Ensuite, les colonies de pucerons croissent exponentiellement par parthénogénèse, donnent des femelles virginipares aptères et ailées, souvent protégées par les fourmis (Minarro et al., 2010 ; Jones et al., 2006). Les femelles virginipares aptères peuvent, en mai et juin, donner naissance chacune à environ 70 à 80 larves qui deviendront plus tard en été des femelles

parthénogénétiques aptères qui se développeront sur leur hôte secondaire du plantain (*Plantago* spp). (Bonnemaison, 1959; Carroll et Hoyt, 1984).

Les colonies de pucerons sont la cible de divers auxiliaires dans les vergers, à partir de l'éclosion des œufs de pucerons en mars, les auxiliaires arrivent successivement, selon leur précocité liée à la température et aux conditions météorologiques (Minarro et al., 2005 ; Dib et al., 2010). Trois à six générations de fondatrigenes vivipares se développent au cours du printemps et jusqu'au début de l'été. Les ailés qui commencent à apparaître fin mai et leur proportion augmente jusqu'en juin, migrent ensuite vers le plantain (hôte secondaire). Sur cet hôte secondaire, des sexupares aptères et ailés apparaissent. Ces sexupares reviennent ensuite sur le pommier en automne pour pondre les œufs d'hiver.

1.2.1.3 Les dégâts causés par le puceron cendré

Les pucerons sont des insectes de type piqueur-suceur, à stylet perforant et sont parmi les ravageurs les plus nuisibles au pommier (Lathrop, 1928 ; Kehrli et Wyss, 2001; Blommers et al., 2004), surtout en France (Rat-Morris, 1994; Romet, 2004a,b). Ils ingèrent la sève du phloème (sève élaborée) ce qui provoque de forts enrroulements et les dégâts persistent après le départ des pucerons, et peuvent compromettre la récolte en cas de forte infestation mais aussi entraîner une diminution de floraison l'année suivante (Blommers, 1994; Goggin, 2007). Les pucerons peuvent causer des dommages directs aux pommes en fortes densités de population en se nourrissant sur les fruits (Legner et Oatman, 1964), mais dans la plupart des cas, les dommages sont indirects par des réductions de la vigueur générale du pommier. Hamilton et al., 1986 ; Kaakeh et al., 1992 ont montré une réduction de la quantité de photosynthétats produits par les feuilles infestées par les pucerons, cela peut nuire à la production de fruits et avoir des effets néfastes sur la qualité des fruits, notamment la réduction de leur taille des fruits (Filajdić et al., 1995) ou des déformation. Le puceron cendré peut entraîner des pertes économiques significatives liées à des pertes de rendement allant de 30% (De Berardinis et al., 1994, Blommers et al., 2004) à 80% lorsqu'il n'est pas contrôlé (Qubbaj et al., 2005). Une des particularités du puceron est son comportement mutualiste avec les fourmis (Hymenoptere : Formicidae). Les fourmis se nourrissent du miellat produit par les pucerons, assurent la défense de la colonie contre les prédateurs potentiels, maintiennent l'hygiène de la colonie en diminuant le développement de champignon entomopathogènes, et assurent le déplacement des colonies (Stewart-Jones et al., 2008 ;Minarro et al., 2010). (Figure 2)



Figure 2. Champ infesté et une colonie de puceron cendré sous une feuille

1.2.2 *Le carpocapse Cydia pomonella*

1.2.2.1 La Classification du carpocapse (Linnaeus, 1758)

Règne: Animalia

Embranchement: Arthropoda

Classe : Insecta

Ordre: Lepidoptera

Famille: Tortricidae

Genre : *Cydia*

Espèces: *pomonella*

1.2.2.2 Le cycle de développement du carpocapse

Le carpocapse, comme tous les lépidoptères, a une métamorphose complète. Il connaît quatre états : œuf, larve, chrysalide et adulte. Son cycle de vie est synchronisé avec la phénologie de son hôte le plus important, le pommier, puisque les deux espèces ont évolué ensemble et ont des exigences écologiques similaires (Shel'Deshova, 1967 ; Riedl, 1978).

Les papillons mâles et femelles de 18mm d'envergure, se déplacent, s'alimentent, s'accouplent et pondent essentiellement à la tombée du jour. Schumacher et al., (1997) ont constaté que les mâles et les femelles, vierges et fécondées, peuvent voler sur des distances similaires, avec une longueur moyenne mesurée de 11 km et une longueur maximale de 37 km (en ligne droite). Le principal caractère taxonomique utilisé pour la différenciation des sexes est la morphologie de la fin de l'abdomen. Comme décrit par (Howel, 1991), chez la femelle on

observe la papille anale ou "ostium communis", qui est circulaire, brune et la largeur des segments abdominaux. Il est également observé un point sombre sur elle, qui est le "ostium bursae". Le mâle a une extrémité abdominale fermée, consistant en une paire de valves qui tiennent la femelle pendant les rapports sexuels. Les adultes apparaissent en décembre et en janvier (1^{ère} génération de l'année), ils se nourrissent essentiellement d'aliments liquides et n'entraînent aucun impact direct sur les cultures hôtes (pommier, poirier, cognassier, noyer). Ils trouvent au printemps des conditions extrêmement favorables permettant la fécondation et la ponte. L'activité de copulation maximale se produit 48 heures après l'émergence des adultes, puis diminue graduellement et se termine après 10 ou 11 jours.

Suite au vol d'accouplement, la période de ponte la plus active se produit durant les cinq premiers jours de la vie de la femelle (Gehring et Madsen, 1963; Vickers ,1997). La femelle dépose une cinquantaine d'œufs généralement de manière isolée, plus rarement par paquets de 2 ou 3, sur la face inférieure des feuilles en plus grande proportion - et dans certains cas à proximité d'un fruit. La température moyenne du développement du carpocapse fluctue entre 29 et 31°C pour les œufs, les larves et les pupes, respectivement. Au-dessus de ces valeurs, la mortalité augmente progressivement devenant maximum à des températures supérieures à 40°C. Le seuil minimal du développement de ce ravageur accepté dans la plupart des modèles phénologiques est de 10°C (Pitcarin et al., 1991 ; Knight 2007 ; Aghdam et al., 2009). Les larves nouvellement écloses de ces œufs cheminent alors vers les fruits, pour commencer leur alimentation et cherchent un point de pénétration durant une phase nommée « stade baladeur ». Il existe une abondante littérature qui rapporte l'attraction des larves par les fruits en fonction des composés libérés par ces derniers (Sutherland et Hutchins, 1972 ; Landolt et al., 1998 ; Landolt et al., 2000). Les larves creusent une galerie en spirale d'abord juste sous la surface du fruit, puis en direction de la zone des pépins. La larve atteint les graines et passe généralement au troisième stade. C'est ce stade larvaire qui est responsable des dégâts observés sur fruits et qui les rendent non commercialisables pour le producteur. La larve mature quitte le fruit par la même entrée ou par une autre construite à ce moment-là et se dirige vers le sol pour trouver un abri, dans le tronc ou le sol, et rentre en nymphe au sol pour donner une nouvelle génération dans la même saison ou entrer en diapause jusqu'à l'année suivante, selon les conditions climatiques. Généralement, la larve quitte le fruit pendant la nuit, lorsque la température dépasse le seuil minimal de

développement (10°C) (Charmillot ,1976). Cette vie larvaire dure de 20 à 30 jours avec 5 stades successifs (Ferro et Harwood, 1973).

Dans le Sud-est de la France, on observe de 2 à 3 générations annuelles (Balachowsky, 1966 ; Audemard, 1991). Parmi les stades de développement du carpocapse, certains sont plus exposés à la prédation par les ennemis naturels : le stade œuf et le stade larve au sol. Le stade œuf est le stade le plus important à cibler afin d'éviter les dommages ultérieurs liés à l'action des larves. Le cycle total d'une génération (œuf à adulte) nécessite l'accumulation de 45 à 55 degrés-jours.

1.2.2.3 Les dégâts causés par le du carpocapse

Le carpocapse, *Cydia pomonella* (L.), est le principal ravageur de la production de pommes, poires, coings dans le monde (McGuffin et al., 2014 ; Reyes et al., 2015) et entraînent des pertes économiques(Ciglar, 1998).

Les larves se nourrissent à l'intérieur du fruit. Ceux-ci pénètrent habituellement le fruit à travers un petit trou d'entrée (Cormier et al., 2015) qui peut favoriser la pourriture interne, ce qui implique un dommage esthétique et de la qualité empêchant la vente en frais des fruits touchés, et entraînant des pertes économiques tant au stade de la production que de la conservation (Lacey et al., 2008), (Figure3).

Les dommages causés par la première génération de l'insecte ont un impact économique plus faible que ceux des générations suivantes. Cependant, il faut tenir compte du fait qu'une survie larvaire élevée de la première génération entraînera une pression d'attaque plus élevée dans les deuxième et troisième générations.



Figure 3. Les dégâts et la déformation causés par le carpocapse (Photo prise par Al Zubik).

Cet insecte est capable d'endommager jusqu'à 100% de la production (Beers et al., 2003). En général, les dommages aux pommes supérieurs à 1% constituent un niveau inacceptable de dommages en verger commercial ne suivant pas le cahier des charges AB.

1.3 L'usage des insecticides dans les vergers de pommiers

La culture de pommes doit faire face à de nombreux bioagresseurs. Parmi ceux-ci, les plus classiques sont la tavelure et l'oïdium pour ce qui est des champignons et le carpocapse des pommes et le puceron cendré pour ce qui est des insectes. En outre, il existe de nombreux autres bioagresseurs soit mineurs, soit résurgents (i.e. qui peuvent devenir préoccupants lorsque les pratiques phytosanitaires diminuent), par exemple l'hopplocampe ou certaines mineuses des feuilles.

La culture arboricole fait l'objet de nombreuses recherches pour améliorer sa production ainsi que sa protection contre les ravageurs et les maladies (Dib, 2010). La pratique traditionnelle jusque-là était d'appliquer des insecticides dans les vergers de pommiers afin de réduire drastiquement les populations ravageurs. Ainsi, dans le Sud-Est de la France, le pommier est soumis en moyenne à 30-35 IFT (Indice de Fréquence de Traitement) en agriculture conventionnelle et à 25-30 IFT en agriculture biologique, avec notamment 15,7 et 14,9 IFT insecticide respectivement en agriculture conventionnelle et AB (Sauphanor et al., 2009). Malgré cette forte pression phytosanitaire, et par son caractère pérenne, le verger de pommier offre tout au long de l'année un habitat et/ou des ressources pour les ennemis naturels et les ravageurs, ce qui en fait un cas d'étude intéressant pour étudier la régulation naturelle de ces derniers (Marliac, 2014).

Récemment, l'agriculture biologique a connu une forte attention afin de répondre à une demande croissante de la part des consommateurs. Ainsi, la surface en AB en vergers de fruits est en augmentation remarquable, notamment dans la région du Sud-Est de la France avec 4404 ha, soit 4% de vergers en AB (Agreste, 2014).

L'utilisation des pesticides, même raisonnée, peut poser des problèmes de contamination de l'environnement, de réduction de la biodiversité, de risque pour la santé humaine (avant tout pour les travailleurs mais également dans une moindre mesure pour les riverains). Avec le développement de la production en agriculture biologique, la demande sociale pour une

production plus respectueuse de l'environnement se développe en France et plus généralement en Europe. Les pouvoirs publics ont donc décidé depuis 2009 de mettre en place un plan pour diminuer l'usage des pesticides (dans le domaine agricole mais pas seulement), c'est le plan Ecophyto. Il est composé de plusieurs actions dont certaines visent spécifiquement à développer le contrôle biologique (ou lutte biologique) en vue de remplacer certains pesticides.

2 La lutte biologique

2.1 Définition et généralités

L'utilisation excessive de produits chimiques synthétiques a des conséquences de plus en plus perceptible sur la protection des cultures (Stephenson, 2003), des effets nocifs sur l'environnement et la santé (Hallenbeck et al., 2012 ; Van Lenteren, 2012), et un impact économique évident sur la société (Pimentel et al., 1992). Depuis quelques années, des efforts considérables ont été réalisés pour développer des méthodes de lutte alternatives pour faire face aux ravageurs (Hoffmann et al., 1999). Ainsi, le désir de développer des stratégies de protection alternatives des cultures a émergé et s'est orienté vers la lutte intégrée (Quaglietti et al., 2017). La lutte intégrée est une approche globale basée sur l'utilisation de différentes méthodes disponibles consistant notamment, en plus des pesticides, en l'utilisation d'organismes vivants (prédateurs, parasites et pathogènes) (Kogan, 1998 ; Ehler, 2006) pour réduire le développement d'organismes nuisibles (Eilenberg et al., 2001; OILB , 2012). La lutte intégrée fait donc appel à la lutte biologique qui est une méthode de lutte contre des espèces nuisibles par l'utilisation d'une autre espèce qui agit par prédation ou parasitisme (Boivin, 2001). La lutte biologique vise à maintenir l'abondance des nuisibles au-dessous du niveau pour lequel ils causent des dommages économiques (Van Driesche et al. 1996 ; De Bach, 1974) et à limiter les ravageurs et les pathogènes des cultures (Jourdeuil et al., 1991 ; Eilenberg et al., 2001 ; Nicholls et al., 2002; Nicholls et al., 2005).

Au cours de ces dernières décennies, le domaine du contrôle biologique a reçu un intérêt particulier (Stephenson, 2003) et ce pour plusieurs raisons (Van Driesche et al., 2007). Premièrement, pour promouvoir et développer des pratiques agricoles durables pas seulement d'un point de vue économique mais aussi environnemental et social en impliquant les différents acteurs sociaux (organismes de réglementation, producteurs, et grand public) (Kogan, 1998).

Deuxièmement, pour contrecarrer l'émergence de la résistance chez les arthropodes due à l'utilisation courante et régulière de produits chimiques dans la lutte contre les ravageurs.

Les buts du contrôle biologique sont :

- d'encourager l'utilisation d'ennemis naturels, surtout les arthropodes (prédateurs et parasitoïdes), les nématodes et les microorganismes tels que les bactéries et les champignons, pour défendre la faune et la flore de nombreux écosystèmes naturels (voir par exemple, Causton, 2004 pour les Galápagos)
- de diminuer l'utilisation des produits chimiques de type pesticides, fongicides, et herbicides en agriculture (Eilenberg et al., 2001 ; Nicholls et al., 2005; Bulter et al., 2012)

Certains vertébrés comme les poissons ou les oiseaux peuvent également jouer un rôle dans la lutte biologique (Altieri, 1999 ; Brown, 2004).

2.2 Les avantages de la lutte biologique

La lutte biologique contribue à la protection de la biodiversité indigène (par exemple contre les plantes invasives (Van Driesche et Bellows, 1996), et à la préservation de l'agro-biodiversité fonctionnelle qui fournissent des services de régulation (par exemple, la lutte contre les ravageurs (Zhang et al., 2007)). Les ennemis naturels peuvent trouver dans les habitats non cultivés un abri contre les conditions adverses, des sites d'hivernage, des ressources florales, des proies et des hôtes (Gurr et al., 2017) ce qui favorise leur présence et améliore leur efficacité dans la lutte biologique de conservation (Barbosa et Wratten, 1998) (Barbosa, 1998). En effet, l'abondance et la diversité des ravageurs et des ennemis naturels sont affectées par la composition, la conception et la gestion des habitats des cultures et des autres habitats (Hatt et al., 2018). La lutte biologique favorise également la préservation des terres sauvages et le maintien de sols sains en tant que sources de ressources renouvelables et d'utilisation récréative.

La lutte biologique contre les plantes invasives et les insectes a des antécédents différents. Ce n'est que dans les années 1990 que le contrôle biologique des insectes contre les ravageurs environnementaux s'est développé comme un objectif indépendant (Van Driesche, 1996). Les prédateurs et les parasitoïdes peuvent être mobilisés pour contrôler les insectes herbivores (dit contrôle « top-down » (Gurr et al., 2003).

2.3 Les grands types de lutte biologique

L'Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB) joue depuis sa création, dans les années cinquante, un rôle déterminant en favorisant l'évolution de la stratégie phytosanitaire vers la protection intégrée par son engagement en faveur des solutions biologiques. On reconnaît

classiquement trois types différents de lutte biologique (Vincent et al., 1992; van Driesche et al., 1996; Boivin, 2001; Nicholls et al., 2005; Winkler, 2005), qui divergent dans leur application (Eilenberg et al., 2001; OILB, 2012) (Figure 4). Deux de ces stratégies impliquent des lâchers d'auxiliaires.

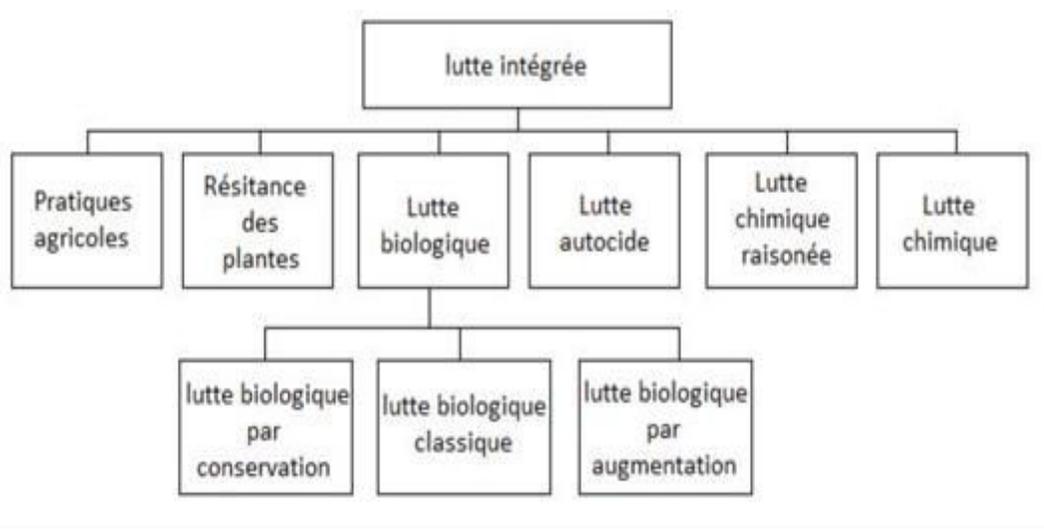


Figure 4. Diagramme remplaçant la lutte biologique dans le contexte de la lutte intégrée (d'après Eilenberg et al. 2001).

La lutte biologique classiq

La lutte biologique classique consiste en l'introduction intentionnelle d'un auxiliaire exotique. Les prédateurs peuvent réduire des populations de ravageurs jusqu'à un point où les dommages économiques sont réduits (Gurr et al., 2000). La lutte biologique classique a été largement utilisée aux États-Unis du début du XXI^{ème} siècle et a contribué à de grands succès dans la protection des cultures (Van Driesche et al., 2010). Cette approche était un succès dans les milieux ouverts (Winkler, 2005) et a conduit à la réduction permanente de plus de 165 espèces de ravageurs dans le monde entier (Van Lenteren et al., 2006).

Le contrôle biologique classique connaît une forte croissance depuis quelques années (van Lenteren, 2012). C'est un outil puissant qui peut potentiellement résoudre de nombreux problèmes de plantes envahissantes et d'insectes dans les écosystèmes naturels (Van Driesche et al., 2010). Pour la suppression au niveau du paysage ou la prévention des dommages émergents causés par une invasion en expansion, un contrôle biologique classique devrait être envisagé (Van Driesche et al., 2008). Le nombre d'introductions par décennie a été en croissance constante depuis la fin du 19^e siècle, à l'exception d'un pic entre 1930 et 1940 et a commencé à diminuer par la suite (Figure 5).

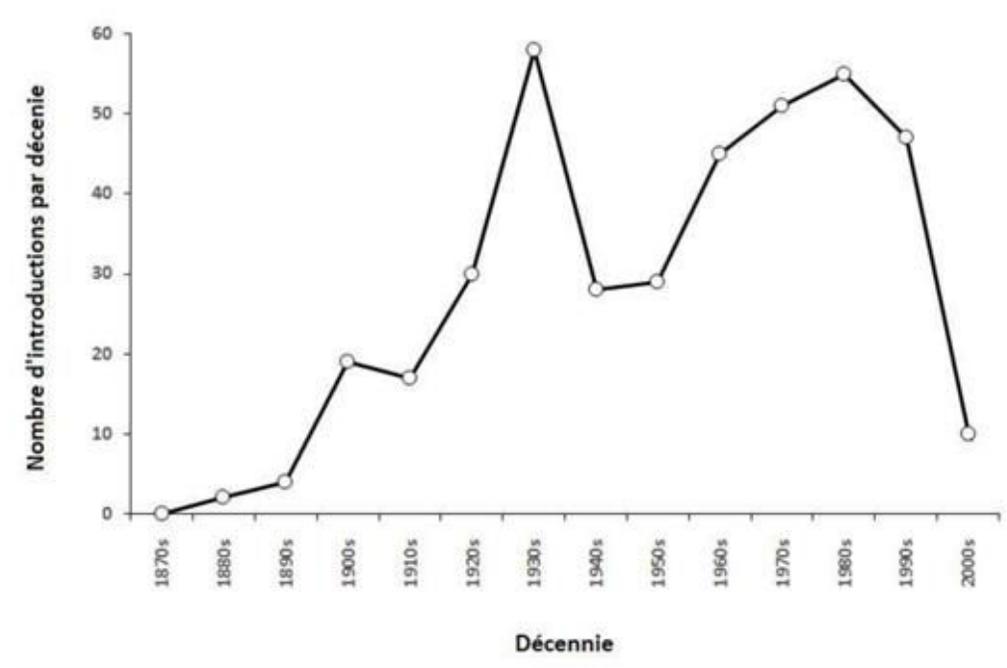


Figure 5. Nombre d'introductions d'auxiliaires de lutte biologique classique par décennie (d'après Cock et al. 2016).

2.3.1 La lutte biologique par augmentation

Le contrôle biologique augmentatif consiste à augmenter les populations d'ennemis naturels en introduisant des individus supplémentaires dans la culture. Les individus sont appelés inoculatifs quand ils ont la possibilité de se reproduire et c'est donc leur descendance qui sera efficace pour contrôler le ravageur pendant une certaine période, mais pas de façon permanente (Eilenberg et al., 2001). Depuis les années 1970, le contrôle biologique par augmentation s'est développé et connaît une forte croissance, même si l'élevage massif d'ennemis naturels existe depuis plus d'un siècle (van Lenteren, 2012). Cette technique est souvent utilisée dans des

systèmes agricoles fermés comme les serres (Winkler, 2005). Par exemple *Encarsia formosa* a été utilisé à grande échelle dans les serres depuis plusieurs dizaines d'années pour lutter contre l'aleurode (Van Lenteren, 2000 ; Eilenberg et al., 2001). Par exemple en France, la lutte contre la pyrale *Ostrinia nubilalis* peut être réalisée par la production et le lâcher en masse de l'auxiliaire *Trichogramma maidis* dans les champs de maïs (Frandon et Kabiri, 1990). La lutte biologique augmentative a également été utilisée depuis 90 ans, et plus de 150 espèces d'auxiliaires sont déjà commercialement disponibles pour la lutte contre environ 100 espèces de ravageurs (van Lenteren et al., 2006),

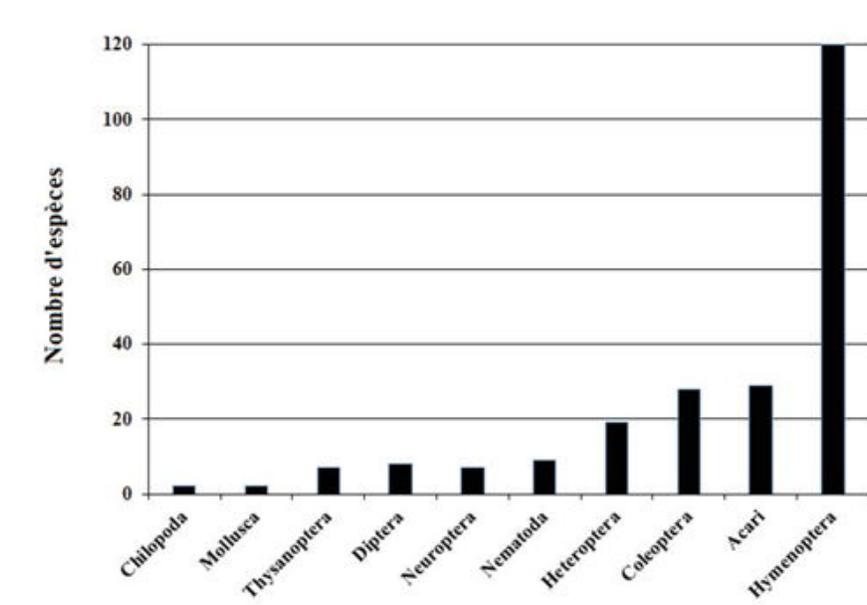


Figure 6. taxonomiques des auxiliaires utilisés en lutte biologique par augmentation entre 1900 et 2010 (d'après Van Lenteren, 2012).

Comme pour la lutte biologique par acclimatation, la très grande majorité des auxiliaires sont des arthropodes (95,2%) parmi lesquels quatre groupes taxonomiques fournissent la plupart des ennemis naturels : les Hyménoptères (52,2%), les Acariens (13,1%), les Coléoptères (12,2%) et les Hétéroptères (8,3%)

2.3.2 La lutte biologique par conservation

La lutte biologique par conservation est une approche durable de la lutte biologique pour protéger et augmenter des ennemis naturels ou autres organismes auxiliaires naturellement présents dans la culture ce qui peut contribuer à une réduction de l'utilisation de pesticides. La

lutte biologique par conservation contribue à la réduction des effets des ravageurs arthropodes dans le cadre d'une stratégie de lutte intégrée contre les ravageurs (IPM) (Boller, 2004 ; Boreau de Roincé, 2012 ; Begg et al., 2017).

En pratique, la lutte biologique par conservation utilise deux types d'actions : **(i)** la réduction de l'utilisation de pesticides ayant des effets néfastes sur les populations d'ennemis naturels **(ii)** la manipulation de l'environnement afin d'augmenter le potentiel de production et des milieux biotiques et les effectifs des auxiliaires de cultures. (Barbosa, 1998). Elle a pour objectif de fournir aux ennemis naturels des ressources indispensables à leur présence et à la stabilité de leurs populations, notamment des ressources alimentaires (nectar, pollen et proies alternatives) ainsi que des sites de reproduction, de refuge et d'hivernage (Nicholls et Altieri, 2002). Par exemple, grâce à la gestion optimale des habitats naturels tels que des zones refuges, des bandes enherbées ou des haies de bordure, le cycle de vie des Chrysopes (*Chrysoperla* spp) au sein des agroécosystèmes a été renforcé et leur effectif a ainsi été augmenté, ce qui devrait favoriser la lutte contre les pucerons (Villenave, 2006).

Actuellement, le frein le plus important au développement d'un contrôle biologique efficace de la conservation ne réside pas dans la conservation des ennemis naturels mais dans leur capacité à fournir un contrôle biologique efficace, fiable et robuste des ravageurs. Ces limites peuvent être compensées dans une certaine mesure en veillant à ce que le contrôle biologique de conservation soit utilisé dans le cadre d'une approche de lutte intégrée (Lamichhane et al., 2016).

De récents et spectaculaires succès dans différentes parties du monde ont favorisé la promotion de la lutte biologique. D'autre part, les lois environnementales visent à réduire l'utilisation des pesticides dans l'agriculture conventionnelle. La popularité ainsi que la demande croissante des produits biologiques rend également la lutte biologique de plus en plus intéressante économiquement.

A titre d'exemple, en France :

- les surfaces engagées en agriculture biologique sont estimées à 1,77 millions d'hectares en Juin 2017, soit une croissance de l'ordre de +15 % en six mois.

- +500 millions d'euros de ventes biologiques au 1er semestre 2017 par rapport au 1er semestre 2016.

La région PACA occupe la 4^{ème} position en termes du nombre des producteurs engagés en agriculture biologique au cours du premier semestre 2017 selon l'agence BIO/OC (www.agencebio.org). Parmi les moyens de lutte biologique les plus utilisés dans le Sud-est de la France, nous pouvons citer :

- **Des moyens de biocontrôle microbiologiques** comme le virus de la granulose, les phéromones de synthèse, et la bactérie *Bacillus thuringiensis* (BT). Le virus de la granulose est utilisé pour lutter contre le carpocapse en culture de pommes, poires et coings. la phéromone de synthèse, la codlemone, qui mime les phéromones des femelles de carpocapse est couramment utilisée pour lutter contre ce dernier par confusion sexuelle. La bactérie *Bacillus thuringiensis* (BT), le premier biopesticide à avoir été homologué dans le monde, est utilisée contre les tordeuses : la tordeuse orientale, ou d'autres tordeuses non sensibles au virus de la granulose.
- **Des moyens de lutte mécanique** comme par exemple les filets AltCarpo élaborés en 2005 par la chambre d'agriculture du Vaucluse pour lutter contre le carpocapse qui agissent comme barrière physique empêchant les rencontres entre les partenaires sexuels et la ponte.
- **Des moyens de lutte par lâcher inondatif** comme par exemple les transferts de forficules entre vergers de pêchers et pommiers pour favoriser la prédation de pucerons.

2.4 Les organismes utilisés en lutte biologique

Les organismes vivants les plus utilisés en lutte biologique contre les arthropodes ravageurs, sont : les microorganismes, les nématodes, les parasitoïdes, et les prédateurs (Vincent et al., 1992; Van Driesche et Bellows, 1996; Boivin, 2001; Boller et al., 2004; Nicolls et al., 2005).

2.4.1 *Les microorganismes*

Les microorganismes regroupent des bactéries dont plus d'une centaine d'espèces ont été identifiées comme ayant un potentiel d'utilisation en lutte biologique (Starnes ,1993 ; Boivin,

2001), des virus (650 - 1200) (Martignoni et al., 1986 ; Cloutier et al., 1992 ; Boivin, 2001), des champignons (700 espèces), et des protozoaires (six phyla) pathogènes aux insectes (Boivin, 2001).

2.4.2 *Les nématodes entomophages*

Certains nématodes sont de redoutables ennemis naturels pour bon nombre d'insectes ravageurs des cultures, les nématodes entomophages exploitent les insectes comme ressource pour se développer et se reproduire. On retrouve des nématodes entomophages dans 30 familles différentes ce qui représente environ 4000 espèces (van Driesche et Bellows, 1996). Les nématodes entomophages sont utilisés contre différentes chenilles (carpocapse, noctuelle, mineuses...) mais nécessitent des conditions humides lors de leur utilisation en automne.

2.4.3 *Les parasitoïdes*

Les parasitoïdes sont une classe d'auxiliaires qui se développent sur ou à l'intérieur d'un autre organisme dit « hôte », mais qui tue inévitablement ce dernier au cours de ce développement ou à la fin de ce développement, (Eggleton et Gaston, 1990; Godfray, 1994; Boller et al., 2004; Nicholls et al., 2005). Un parasitoïde adulte se nourrit habituellement sur le miellat, le nectar ou le pollen, bien que quelques adultes se nourrissent des fluides du corps des hôtes (Nicholls et al., 2005). Normalement, les parasitoïdes sont plus petits de leurs proies et s'attaquent à un stade particulier de développement de la proie. Certaines espèces de parasitoïdes sont également capables de parasiter différents stades œuf et larve, ou larve et adulte (Stireman et al., 2006). Les parasitoïdes laissent souvent des traces de leur activité (par exemple, les momies des pucerons). Le mode de vie parasitoïde, tel que défini plus haut, représente entre 5 et 20% des espèces d'insectes (Eggleton et Belshaw, 1992; Godfray, 1994). Les parasitoïdes infestent principalement d'autres insectes. Cependant, certaines espèces sont capables de parasiter d'autres arthropodes (Feener et al., 1997). Il pourrait y avoir de 125,000 à 6 millions d'espèces d'insectes ayant un mode de vie parasitoïde (Eggleton et Belshaw, 1992) dans 6 ordres : Hyménoptère (67000 espèces, environ 75% des parasitoïdes), Diptère (16000 espèces), Coléoptère (4000 espèces), Neuroptère (50 espèces), Lépidoptère (11 espèces), et Trichoptère (une espèce) (Boivin, 2001).

2.4.4 *Les prédateurs*

Les prédateurs sont des organismes vivants qui tuent des proies pour s'en nourrir ou pour alimenter leurs progénitures souvent au stade larvaire. Ils se nourrissent d'un large éventail de proies, leurs populations sont relativement stables, et ils contribuent à exercer un contrôle continu sur le niveau des populations de proies (Pascal, 1993). Le régime alimentaire des adultes peut consister en des larves (comme les forficules), soit être polliniphage, nectariphage, ou encore se nourrir de miellat des Homoptères (comme les syrphes). Les prédateurs sont généralement plus grands que leurs proies (Vincent et Coderre, 1992; Polis et al., 1992 ; van Driesche et Bellows, 1996; Boller et al., 2004). Plusieurs prédateurs peuvent interagir en synergie pour améliorer la suppression des proies de manière additive (Soluk, 1993 ; Losey et al. 1998 ; Cardinale et al., 2003 ; Snyder et al., 2006), (Chang 1996; Snyder, 2006). On constate souvent que la densité des prédateurs est responsable de l'élimination des proies (Sih, Englund, 1998; Griffen, 2006), en particulier dans les systèmes qui utilisent la faune indigène dans le cadre de systèmes de contrôle biologique (Straub et al., 2008), visant à accroître l'efficacité des diverses guildes d'ennemis naturels existantes (Tylianakis et al., 2010). La prédation est courante dans la nature où les prédateurs jouent un rôle prépondérant dans le maintien des équilibres écologiques. On peut trouver de la prédation aussi bien chez les mammifères, les reptiles, les amphibiens, les oiseaux, les poissons, ainsi que chez les invertébrés (Polis et al., 1989; Polis et al., 1992; Fincke, 1994).

Les prédateurs peuvent être généralistes ou spécialistes. De nombreuses études montrent que les prédateurs généralistes, comme les araignées, peuvent supprimer les ravageurs dans certains agroécosystèmes (par exemple, Fagan et Hurd, 1994 ; Riechert, 1999). En raison de leur omniprésence, de leur densité élevée (par rapport à celle des ravageurs) et de leur réponse fonctionnelle élevée, les prédateurs généralistes ont le potentiel de supprimer les ravageurs, au moins pendant une courte période (Edwards et al., 1979). Les prédateurs spécialisés, comme les coccinellidés ou les acariens prédateurs, peuvent contrôler la population de ravageurs (Solomon et al., 2000), tandis que les prédateurs généralistes (polyphages), plus abondants que les spécialistes, peuvent contribuer réduire la survenue des pullulations.

L'utilisation des araignées en lutte biologique est très rare et peu d'études sont reportées dans la littérature scientifique (Mansour, 1980) et ce malgré leur bon potentiel en tant que prédateurs généralistes.

3 Les araignées: des prédateurs redoutables

3.1 L'histoire du nom Arachnida

Toutes les araignées filent la soie, mais pas toutes pour en faire des toiles. Arachnida, la classe à laquelle appartiennent les araignées, tire son nom de l'infortunée Arachne, qui fût transformée par Athena en une araignée après que la fille audacieuse prétendit être une meilleure tisserande que la déesse (Wise, 1993).

Il existe dans le monde environ 47000 espèces d'araignées (World Spider Catalog) dont 1700 en France sont des prédateurs omniprésents dans tous les écosystèmes terrestres. Ce sont des chélicérates (ils sont munis de chélicères permettant l'injection du venin dans la proie). Les araignées sont des prédateurs généralistes qui attaquent principalement les insectes, mais mangent aussi d'autres arthropodes, y compris parfois d'autres araignées. Toutefois, l'évolution a pu mener à une adaptation de certaines espèces devenues spécialistes. A l'exception de deux familles, les araignées sécrètent du venin qui est une neurotoxine puissante permettant aux araignées de tuer leurs proies rapidement. Les proies sont généralement plus petites ou de taille équivalente. Les araignées ont la particularité de pouvoir survivre à de longues périodes de jeûne, principalement en attendant des proies plutôt qu'en les cherchant activement, et aussi en abaissant leur taux métabolique basal en l'absence de proies suffisantes pour soutenir la croissance et la reproduction (Anderson, 1970).

Classification selon (SITI). (Système d'Information taxonomique intégré)

Classification des Arachnides : Cuvier, 1812 ; Clerck, 1757

Règne: Animalia

Sous-règne: Bilateria

infra-règne: Protostomia

Super-embr.: Ecdysozoa

Embranchement: Arthropoda

Sous- embr.: Chelicerata

Classe: Arachnida

Ordre: Araneae

3.2 L'alimentation des araignées

En plus des adaptations physiologiques dues aux périodes de pénuries alimentaires, les différents modes temporels et spatiaux de recherche de nourriture par les araignées suggèrent que les araignées se sont adaptées à la rareté des proies au fil des années (Wise, 1993).

En outre, bien que les araignées soient des prédateurs généralistes, leur évolution a pu mener à une adaptation de certaines espèces devenues spécialistes. L'adaptation à un certain type de proie est liée aux différentes méthodes de chasse employées par les espèces d'araignées (Pekár et Toft, 2015). Les araignées consomment plutôt des proies plus petites qu'elles (Nentwig et Wissel, 1986 ; Erickson et Morse, 1997 ; Michalko et Pekár, 2015a).

En effet, des araignées sténophages se spécialisent sur certaines proies parfois considérées comme pauvres au niveau nutritionnel (fourmis, cloportes), probablement grâce à une adaptation de leur métabolisme (Pekár et Toft, 2015). *Zodarion rubidum*, une araignée de la surface du sol et un spécialiste de la consommation de fourmis

Chez les araignées, en particulier, la qualité nutritionnelle du régime alimentaire joue sur la reproduction : par exemple, les mâles d'une espèce d'araignée du sol ayant eu une alimentation enrichie en nutriments améliorent leur parade nuptiale, ce qui augmente leur succès d'accouplement (Lomborg et Toft, 2009). De plus, la survie des juvéniles et des adultes augmente avec une alimentation plus riche (plusieurs proies) (Wilder, 2011).

La nourriture n'est probablement pas un facteur limitant pour toutes les populations d'araignées. Cependant, l'accumulation de preuves, à la fois indirectes et directes, montre clairement que les araignées ont souvent faim, au point de présenter des taux de croissance et de reproduction considérablement inférieurs à ce qui est physiologiquement possible (Murdoch, 1985).

Les modèles d'alimentation semblent avoir évolué sous la pression de la limitation de la nourriture. Par exemple, les phénologies des araignées tisseuses de toiles orbitales coïncident souvent avec la disponibilité des proies d'insectes. Lorsque les araignées changent de sites d'alimentation, elles se réinstallent souvent dans des micro-habitats à plus forte abondance de proies.

3.3 Les différentes méthodes de chasse des araignées

Les araignées sont des animaux carnivores. Elles ne se nourrissent que de proies vivantes. Leurs comportements de prédation sont diversifiés ainsi que les moyens utilisés. Il existe de nombreuses stratégies de capture, avec ou sans piège. Les modes de chasse et la structure de l'habitat conditionnent leur répartition dans le milieu. Comme elles sont présentes dans quasiment tous les milieux, les araignées existent sous différentes formes, et possèdent des modes de vie différents en fonction de leur habitat. Cette adaptation s'accompagne de techniques de chasse qui varient d'une espèce à l'autre, en fonction des besoins et des opportunités. Ci-dessous nous présentons une répartition (non exhaustive) des méthodes de chasse les plus répandues.

3.3.1 *La chasse avec toile*

Certaines araignées ont recours à des toiles de différentes formes pour mettre en œuvre des méthodes très variées de construction. Les toiles d'araignées sont tissées et sont en fait des réseaux de fils constitués par la soie en tension que secrètent les araignées. Les toiles peuvent avoir des formes diverses : géométriques ou non, avec ou sans retraite pour l'araignée, trouées au centre ou pas, horizontales ou verticales, mais sont toutes utilisées comme pièges d'interception. Par exemple, chez les Linyphiides, petites araignées, la toile est horizontale, dite "en nappe". L'araignée circule dessous. Chez les Aranéides, comme l'argiope frelon ou l'épeire diadème, les araignées sont pendues la tête en bas au centre de leur toile géométrique verticale.

3.3.2 *La chasse sans toile*

Il existe aussi des araignées qui ne tissent pas de toile et qui utilisent leurs yeux pour chasser (Salticidae) ou d'autres organes sensoriels comme des soies sensibles appelées trichobotries (araignées nocturnes). Elles se déplacent sur un peu tous les types de terrain à la recherche de proies. Lorsqu'elles ont trouvé une proie, les araignées pratiquant la chasse à l'affût s'avancent et finissent par bondir dessus pour la mordre et l'immobiliser avant de la manger. Ces araignées ont une mobilité impressionnante, certaines mêmes, sont capables de faire de grands sauts par rapport à leur taille. Cette faculté leur est utile pour fuir un prédateur. Les araignées pratiquant plutôt la chasse à courre (ou chasse à vue) possèdent en plus de leur vue d'autres capteurs chimiques et/ou mécaniques faisant appel à des poils spécialisés ou des organes présents sur les pattes spécialisés ou des organes présents sur les pattes. Cette méthode de chasse se

pratique particulièrement chez les *Cheiracanthium mildei* qui constituent une partie importante de ma thèse.

Dans le Tableau 2, 3 nous résumons les différents types de chasse des araignées, leurs caractéristiques, ainsi que des exemples, leurs familles et leurs répartitions géographiques.

Type de chasse	caractéristiques	Exemple	Famille	Répartition
Avec toile	géométrique	<i>Hyptiotes paradoxus</i>	Uloboridae	Europe
		<i>Argiope bruennichi</i>	Araneidae	Europe
		<i>Zygiella x-notata</i>	Araneidae	Europe
	tubulaire	<i>Atypus affinis</i>	Atypidae	Répondue en Europe
	en entonnoir	<i>Tegenaria domestica</i>	Agelenidae	Toute la France
Sans toile	mimétisme et chasse à l'affût	<i>Misumena vatia</i>	Thomisidae	Europe
		Philodromus spp	Philodomidae	
	chasse à vue	<i>Evarcha arcuata</i>	Salticidae	Europe
		<i>Cheiracanthium mildei</i>	Eutichuridae	
		<i>Anyphaena accentuata</i>	Anyphaenidae	
		Icius spp	Salticidae	
	lasso de soie	<i>Ordgarius magnificus</i>	Araneidae	Australie
filet de soie	<i>Scytodes thoracica</i>	Scytodidae	presque toute l'Europe	
affût et pêche	<i>Dolomedes fimbriatus</i>	Pisauridae	Europe	
prédation d'autres araignées	<i>Portia fimbriata</i>	Salticidae	Asie, Afrique et Australie	

Tableau 2 : Les différents type de chasse des araignées et quelques exemples d'espèce (tiré de :A la découverte des araignées - 2015 Canard Alain & Rollard Christine. Dunod éditeur).

Strate	Famille	Genre	Technique de chasse
sol	Dysderidae	<i>Dysdera erythrina</i>	Errante nocturne
	Lycosidae	<i>Trochosa hispanica</i>	Errante nocturne
	Lyniphiidae	<i>Tenuiphantes tenuis</i>	Toile en nappe
	Salticidae	<i>Pseudoophonus rufipes</i> <i>Pseudoophonus griseus</i>	
végétation	Eutichuridae	<i>Cheiracanthium mildei</i>	<i>Errante nocturne</i>
	Clubionidae	<i>Clubiona brevipes</i>	
	Anyphaenidae	<i>Anyphaena accentuata</i>	
	Gnaphosidae	<i>Haplodrassus spp</i> <i>Drassodes spp</i> <i>Zelotes spp</i> <i>Gnaphosa spp</i>	
	Thomisidae	<i>Synaema globosum</i> <i>Xystichus spp</i> <i>Ozyptilla spp</i> <i>Thomisus sp</i> <i>Misumena vatia</i> <i>Ebrechtella tricuspida</i>	Chasse à l'affût
	Therididae	<i>Theridion varians</i>	
	Dictynidae	<i>Lathys humilis</i>	
	Araneidae	<i>Nuctenea umbratica</i> <i>Araneus diadematus</i> <i>Araniella cucurbitana</i>	Toile géométrique
	Oxyopidae	<i>Oxyopes lineatus</i>	
	Philodromidae	<i>Philodromus ureolus/cespitem</i>	chasse à vue/ affût
		<i>Carrothus xantogramma</i> <i>Saitis barbipes</i>	

canopée	Salticidae	<i>Salticus zebraneus</i> <i>Ballus chalybeius</i> <i>Carrothus xantogramma</i> <i>Pseudicius encarpus</i>	
		<i>Icius hamatus/subinermis</i>	chasse à vue
		<i>Pseudeuophrys erratica</i> <i>Heliophanus auratus/apiatus/s</i>	
	Thomisidae	<i>Xysticus sp</i> <i>Synaema globosum</i>	
	Araneidae	<i>Nuctenea umbratica</i>	
	Dyctinidae	<i>Lathys humilis</i>	
	Anyphaenidae	<i>Anyphaena accentuata</i>	
	Clubionidae	<i>Clubiona brevipes/spp</i>	
	Eutichuridae	<i>Cheiracanthium mildei</i>	chasse à vue
	Gnaphosidae	<i>Aphantaulax trifasciata</i> <i>Scotophaeus sp</i>	
	Sparassidae	<i>Olios argelasius</i>	
Segestridae	<i>Segestria senoculata</i>		

Tableau 3 : Les différents types de chasse des araignées mais adaptés au cas du pommier en Provence .

3.4 Les araignées comme agents de lutte biologique dans les agroécosystèmes

Les relations trophiques entre les araignées et les autres arthropodes sont complexes et de nombreux facteurs influent sur la dynamique des populations d'insectes ; il est donc difficile d'évaluer la contribution des araignées à la lutte contre les ravageurs sans manipuler le système. Parce que les insecticides affectent souvent les populations d'araignées, des perturbations des populations d'araignées ont souvent été faites involontairement (Wise, 1993). Bien sûr, l'apparition d'espèces nuisibles dans le régime alimentaire des araignées n'est pas la preuve que les araignées diminuent significativement les populations de ravageurs. Cependant l'abondance et les régimes des araignées dans les champs cultivés, les vergers et les forêts suggèrent que les araignées peuvent contribuer à maintenir de faibles densités de ravageurs dans plusieurs de ces systèmes. Les araignées peuvent consommer tant d'autres prédateurs d'arthropodes, y compris d'autres araignées (Nyffeler et al., 1987), la compétition intra-gilde entre les espèces d'araignées peut réduire l'efficacité du complexe araignée dans la limitation du nombre de ravageurs (Spiller, 1986b).

Aussi, les temps de génération des araignées plutôt longs, leur fécondité plutôt faible par rapport à la plupart de leurs proies, le phénomène de prédation intra-gilde, et leur régime eurypage tous rendent peu probable que les araignées suivront de près les populations de proies (Riechert et Lockley, 1984). En fait, certaines données suggèrent que les araignées ne jouent qu'un rôle mineur dans la suppression des ravageurs (Wise, 1993).

D'autres évoquent, au contraire, des preuves indirectes suggérant que les araignées contribuent de manière significative à la suppression des ravageurs dans les agroécosystèmes. Des études sur l'abondance des araignées et les régimes alimentaires dans les agroécosystèmes suggèrent que les araignées contribuent à la limitation des insectes nuisibles dans les cultures de plein champ et les vergers.

Des études de lutte biologique menées dans les vergers de pommiers (Mansour et al., 1980a, 1980b), d'agrumes (Mansour et al., 1984), les plantations d'avocatiers (Mansour et al., 1984), les champs de coton (Mansour, 1987) et les parcelles de vigne (Hogg et al., 2010) ont montré que les araignées jouent un rôle important dans la suppression de certains insectes

nuisibles (les cicadelles, les larves de lépidoptères et les pucerons). Dans le même cadre d'idée, des évaluations de l'importance écologique des araignées ont été entreprises principalement en Europe et aux États-Unis (Whitcomb, 1974 ; Luczak, 1979 ; Nyffeler, 1982 ; Riechert et Lockley, 1984 ; Marc et al., 1999, Rypstra et al., 1999; Sunderland et Greenstone, 1999 ; Toft, 1999 ; Uetz et al., 1999, Wise et al., 1999). Riechert et Lockley (1984) ont proposé que l'assemblage des araignées soit important pour supprimer les populations de ravageurs dans les agroécosystèmes, bien que la prédation par les araignées ne soit pas toujours suffisante pour éviter des dommages économiquement importants. Cependant, l'hypothèse n'est pour l'instant bien étayée.

De nombreuses expériences de terrain soigneusement contrôlées et reproduites de manière adéquate sont nécessaires pour évaluer, d'une manière plus approfondie, l'efficacité des araignées dans la lutte biologique dans des vergers et autres agroécosystèmes (Miliczky et al., 2002).

3.5 Le cas particulier du verger de pommiers

Les araignées ont parfois été décrites comme être des prédateurs efficaces des principaux insectes nuisibles notamment dans les vergers de pommiers (Marc et Canard, 1997 ; Wisniewska et Prokopy, 1997 ; Mathews et al., 2004, Pekár et Kocourek, 2004).

Dans les vergers du Sud-est de la France, notre zone d'étude, 2 ravageurs principaux posent des problèmes : le carpocapse des pommes et le puceron cendré. Nous discutons dans ce qui suit de l'utilisation des araignées contre ces deux ravageurs telle qu'elle rapportée dans la littérature.

3.5.1 *Les araignées comme agent de lutte contre le puceron cendré*

Les araignées ont été observés à plusieurs reprises en train de se nourrir de pucerons de la pomme (Wyss, 1996 ; Fréchette et al., 2006), y compris les pucerons les plus dommageables pour les pommes: *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae). Wyss et al., (1995) ont découvert que les araignées à l'automne peuvent avoir contribué à une réduction significative du nombre de *D. plantaginea* grâce à l'interception des pucerons ailés en automne qui reviennent de leurs plantes hôtes d'été, *Plantago* spp. (Lamiales : Plantaginaceae). Aux États-Unis (Brown et Mathews, 2007), en Espagne (Miñarro et al., 2005) et en France (Dib et al., 2010a, b, 2016), dans les vergers de pommiers expérimentaux et organiques, les araignées étaient fréquemment

observées dans les feuilles roulées causées par l'infestation de *D. plantaginea*. Plus récemment, Cahenzli et al., (2017) ont constaté que l'augmentation de la surface de la toile d'araignées entraîne une réduction du nombre de fondatrices de pucerons au printemps suivant.

3.5.2 *Les araignées comme agent de lutte biologique contre le carpocapse*

Le carpocapse de la pomme (*Cydia pomonella*) est présent presque partout où l'on cultive des pommes. Il est le ravageur le plus nuisible de cette culture pouvant entraîner une perte de rendement de 100% (Sauphanor et Dirwimmer, 2009). Jusqu'à 18 à 20 traitements sont réalisés au cours de la saison de production uniquement pour la lutte contre le carpocapse de la pomme (Boutin, 2001). Cette espèce qui présente 1 à 2 générations par an en France effectue une troisième génération dans le sud du pays. La régulation de la population de carpocapse dès la première génération est primordiale pour réduire suffisamment les dégâts des générations suivantes car une femelle adulte pond 250 œufs (Balachowsky et Bovey, 1966) principalement dans le verger où elle a éclot (i.e., dans un rayon de 80m) (Margaritopoulos et al., 2012).

Marc et Canard, (1999) ont obtenu des résultats préliminaires indiquant le possible rôle important des araignées dans la prédation des larves de Lepidoptera *S. littoralis* dans un verger de pommiers non traité. Les arbres ont été infestés par des masses d'œufs élevées en laboratoire. Les dommages aux feuilles infestées étaient négligeables et aucune larve vivante n'a été observée. La plupart des larves disparaissant le lendemain de l'éclosion quand les araignées sont présentes sur les arbres.

Les araignées errantes nocturnes *Cheiracanthium mildei*, *Clubiona* sp, ont aussi, en partie, causé des effets perturbateurs indirects sur les larves nouvellement écloses (Mansour et al., 1981).

Dans les vergers de pommiers par exemple, il a été démontré que l'abondance des espèces d'araignées et la préservation de la diversité de ces espèces dans les zones cultivées peuvent améliorer la prédation de différents types de proies comme le carpocapse par un cortège d'araignées (Isaia et al., 2010). Les araignées peuvent ainsi être efficaces contre les ravageurs dans les agroécosystèmes (Marc et Canard, 1997).

Dans tous les cas, la lutte biologique contre le carpocapse devrait faire partie d'une combinaison de méthodes utilisées pour assurer une protection durable des cultures dans les vergers des pommiers.

Cheiracanthium mildei abondant dans les vergers de pommiers semble avoir une diète variée avec une forte prédation sur les pucerons, les œufs de lépidoptères (Mansour et al., 1985 ; Miliczky et Calkins, 2002 ; Hogg et Daane, 2011 ; Hogg et al., 2014). *Cheiracanthium* spp peuvent consommer des ennemis naturels tels que les parasitoïdes et la Chrysopidae (Pérez-Guerrero et al., 2013 ; Hogg et al., 2014).

3.5.3 *Le cas particulier de l'hiver*

Il a été longtemps dit que les ravageurs et leurs ennemis naturels se cachent et restent inactifs pendant l'hiver (Pywell et al., 2005 ; Geiger et al., 2009). Ainsi, l'hiver est considéré comme une période de repos pour les arthropodes nuisibles, et leurs ennemis, étant donné que la température ambiante à ce moment-là reste inférieure au seuil de température pour le développement (Jarošik et al., 2011). Cependant, des études ont émis l'hypothèse que certaines araignées peuvent rester actives en hiver et par suite pourraient jouer un rôle important dans la lutte contre les ravageurs (Marc et al., 1997; Marc et Canard, 1999; Korenko et al., 2010a) en chassant les proies à basse température. (Korenko et al., 2010). Boreau de Roince et al., (2013) ont montré que les araignées se nourrissaient des fondatrices en limitant le développement de colonies sur les pommiers. Ceci suggère que la suppression des ravageurs par les prédateurs généralistes (comme les araignées) peut commencer déjà en hiver - une période qui n'a pas suscité un grand intérêt pour la lutte biologique jusque-là.

Ceci dit, ces prédateurs peuvent interférer les uns avec les autres, réduisant ainsi leur potentiel de lutte biologique (Finke et Denno, 2005). La prédation intragilde (IGP) chez les araignées a souvent été observée dans divers habitats agricoles (Hodge, 1999). Cependant, il n'a pas été quantifié dans quelle mesure l'IGP perturbe leur effet de lutte biologique. Par exemple, les larves (*Nilaparvata lugens*) de plants de riz ont été prédatées par deux espèces d'araignées tôt dans la saison (Sigsgaard, 2007). Tôt au printemps, les araignées étaient les principaux prédateurs actifs dans les vergers lorsque les premières colonies de pucerons étaient présentes (Boreau de Roince et al., 2013). Il y a aussi une dispersion passive des araignées pendant l'hiver entre les

parcelles individuelles ainsi qu'entre les habitats environnants pendant l'hiver à des températures favorables (Rieux et al., 1994). En outre, la dispersion de *Philodromus* et d'*Anyphaena*, des *articles actives tôt au printemps*, par ballooning a été observée de novembre à la mi-décembre et de février à mars (Blandenier et al., 2013).

Les araignées hivernales peuvent donc être considérées comme des agents de lutte biologique généralistes très efficaces. Ces prédateurs servent clairement de « tampons » qui limitent la croissance exponentielle initiale des populations de *Cacopsylla* au printemps en verger de poiriers (Pekar et al. 2015).

La régulation par les araignées, seules, risque de ne pas être suffisante pour des vergers de pommiers. Elles peuvent cependant être des acteurs significatifs mais pas uniques d'un contrôle biologique de certains ravageurs en baissant le niveau de l'inoculum notamment en début de saison ou en hiver (Pekár et al., 2015). Les araignées doivent être gérées pour améliorer leur contrôle des pucerons ou de carpocapse dans les programmes de contrôle de conservation biologique. Il est donc nécessaire de comprendre quels facteurs affectent ce contrôle.

Dans ce contexte et au cours de cette thèse, j'étudierai deux facteurs qui peuvent affecter positivement les communautés d'araignées et donc leur potentiel : ce sont « manipulation des habitats » (Landis et al., 2000), et le lâcher d'araignées. Pour planifier ces études, j'ai notamment revisité le travail de Mansour sur les araignées, et en particulier celui concernant *C. mildei*.

3.6 Les manipulations de l'habitat et contrôle biologique par araignées

Les manipulations d'habitat dans les agroécosystèmes ont parfois eu pour cible les araignées dans certains champs et vergers, bien que la prédation des araignées ne soit pas toujours suffisante pour éviter des dommages économiquement importants. Dans certaines expériences, les chercheurs ont augmenté l'abondance des araignées en ajoutant des proies supplémentaires ou en modifiant la structure physique de l'habitat afin d'augmenter les taux de colonisation par les araignées (Wilder, 2011). Dans plusieurs études, une ou deux espèces étroitement apparentées d'araignées errantes - souvent des lycosidae ou des clubionidae - semblent être responsables de la majorité des ravages attribuables aux araignées (Amalin et al., 2001). L'efficacité de la présence d'araignées dans plusieurs de ces expériences peut refléter la

courte durée des études et le fait que les populations étaient confinées dans des cages. Par conséquent, certaines de ces recherches peuvent fournir une impression erronée des effets à long terme d'une araignée particulière.

Les aménagements que l'on peut apporter à une culture en particulier dépendent fortement de la nature de la culture en augmentant la disponibilité en habitats favorables, en ressources alimentaires ou en offrant une protection physique au vent dominant. Ceci est notamment le cas pour les cultures pérennes où les aménagements fonctionnels pluri-pluriannuels peuvent concerner la strate herbacée, la strate arborée et les structures agro-environnementales entourant les parcelles. Mais les aménagements peuvent aussi être intra-parcellaires. Par exemple, dans les cultures pérennes tels que les vergers de pommiers (Mansour, 1984, 1987), de citronniers (Turnbull, 1973), de poiriers (Alston et Murray, 2007; Pekár et al., 2015), de vignes (Hogg et Daane, 2010), ou d'avocats (Mansour et al., 1980), les bandes piège constituent un refuge en hiver pour les araignées de la frondaison qui habituellement trouvent refuge sous l'écorce des arbres.

Miliczky et Horton (2005) ont étudié le lien entre les ennemis naturels colonisant les vergers de pommiers, de poiriers et des certains habitats naturels en comparant les densités d'arthropodes utiles dans les vergers à plusieurs distances des habitats. Les auteurs ont constaté que certaines araignées étaient particulièrement abondantes pendant la floraison.

La culture des haies spontanées sur les bordures des vergers peuvent être conseillés car cela semble limiter la densité larvaire des carpocapses (Ricci et al., 2011). Ces modifications auraient également un impact sur d'autres espèces de ravageurs ou de prédateurs telles que les araignées qui peuvent précéder les larves de carpocapse (Boreau de Roince et al., 2012 ; Traugott et al., 2012).

L'enjeu est alors de comprendre les mouvements entre parcelles ou alors entre parcelles et aménagements (lors de la destruction des cultures en cultures annuelles) ...

3.7 L'utilisation de *Cheiracanthium mildei* et *Clubiona* sp pour la lutte biologique

Notre motivation pour utiliser *C. mildei* et *Clubiona* sp. pour la lutte biologique est en partie due à la reconnaissance croissante du possible rôle joué par ces araignées dans la suppression et le contrôle naturel des ravageurs. Cependant, les recherches et les connaissances disponibles sur la biologie des araignées restent relativement faibles. D'autres espèces de *Cheiracanthium* ont été signalées en nombre significatif dans les champs de coton des États-Unis. (Whitcomb et Bell, 1964) et dans d'autres cultures (Lecaillon, 1905).

Les *C. mildei* et les *Clubiona* sp avec les Salticidae sont les araignées les plus communes dans la canopée de pommiers (Lebfevre, 2016). Ces espèces se nourrissent d'un large éventail d'insectes nuisibles. Ainsi, *C. mildei* est la seule araignée que l'on trouve régulièrement dans les vergers commerciaux en Israël (Mansour, 1981). C'est un prédateur généraliste qui chasse une variété d'espèces d'insectes si efficacement qu'il réduit considérablement leur nombre. Il pourrait être le principal contributeur à la suppression des ravageurs. Le rôle de *C. mildei* dans la suppression des ravageurs peut résulter principalement de son abondance et de son type de chasse errante à la recherche de proies (Mansour, 1980a).

Les Clubionidae est une famille d'araignées errantes, rapides et qui passent la journée dans une retraite de soie et chassent la nuit. Certaines errent sur la surface du sol et d'autres se trouvent sur la végétation (Duffey, 1956 ; Marc, 1993). Marc (1999) a montré le possible rôle d'une clubione (*C. corticalis*) dans le biocontrôle du carpocapse en verger de pommiers.

C'est pour ces raisons que je m'intéresserai dans cette thèse aux facteurs et outils menant à la présence et à l'abondance de *C. mildei* et *Clubiona* sp. dans les vergers de pommiers. J'ai notamment étudié l'effet du lâcher de *C. mildei* et *Clubiona* sp. sur l'abondance de ces araignées, mais aussi sur la diminution du nombre de ravageurs dans les vergers de pommiers, et ce durant deux années consécutives.

3.7.1 *Cheiracanthium mildei*

3.7.1.1 Taxonomique

Royaume: Animalia

Embranchement: Arthropoda

Classe: Arachnida

Ordre: Araneae

Sous-ordre: Araneomorphae

Famille: Eutichuridae

Genre : *Cheiracanthium*

Espèce: *mildei*

3.7.1.2 Distribution, cycle de vie, écologie

L'espèce *C. mildei*, communément appelée « araignée sacrée à longues pattes », appartient au genre *Cheiracanthium*, de la famille des Eutichuridae. *Cheiracanthium* C. L. Koch, 1939 est le seul genre de la famille Eutichuridae Lehtinen, 1967 en Europe. Ce genre a été transféré de la famille Clubionidae Wagner, 1887 à Miturgidae Simon, 1886 (Ramírez et al., 1997) et, plus récemment, à la famille Eutichuridae Lehtinen, 1967 (Ramírez, 2014).

Cheiracanthium a une distribution mondiale et est seulement absent des régions polaires. Sur les 209 espèces connues de ce genre dans le monde (World Spider Catalog, 2016), 29 ont été trouvées en Europe, dont 14 dans la péninsule ibérique (Morano et al., 2014).

Les araignées de ce genre sont des chasseurs rapides sur des plantes ligneuses ou herbacées, et leurs touffes de griffes denses les aident à ramper le long des surfaces inclinées. Les couleurs de leur corps varient généralement du jaune au verdâtre, avec des tons orangés et brunâtres chez certaines espèces (voir Figure 7). Les araignées *Cheiracanthium* appartiennent au groupe connu en anglais sous le nom de "araignées à sac" parce qu'elles filent de petits sacs en soie qui abritent ces chasseurs nocturnes pendant la

journée. Ces sacs sont très visibles, car les araignées les construisent souvent au sommet des hautes herbes et sont donc facilement visibles dans les prairies humides, sur les cultures et en dehors des sentiers (Mansour et al., 1980; Wise, 1993 ; Morano, 2016).



Figure 7. *Cheiracanthium mildei*

C. mildei a été signalée aux États-Unis, en Europe continentale et en Angleterre, en Asie et dans le bassin méditerranéen où elle aurait pu être introduite. Le genre *Cheiracanthium* est représenté par un grand nombre d'espèces en Europe et en Asie. Bonnet, (1961) a répertorié 160 espèces.

L'étude menée par Mansour (1980a) en laboratoire dans des conditions (24 °C + 1 °C, 55-60% HR), a montré que les mâles ont eu besoin d'un délai moyen de 182 (137-207) jours après l'éclosion pour atteindre la maturité et sont devenus adultes après 7 à 8 mues et ont vécu en moyenne 73 jours à l'âge adulte. Les femelles ont eu besoin d'une moyenne de 231 (191-286) jours après l'éclosion pour atteindre la maturité et ont atteint l'âge adulte après 9-10 mues. Elles ont vécu 240 jours en moyenne à l'âge adulte. Les femelles ne se reproduisent qu'une fois et pondent de 1 à 5 fois (en moyenne 1,8), à des intervalles de 30 jours. Elles ont produit en moyenne 35 œufs dans la première éclosion et 31 dans la seconde. Edwards (1958) a observé 112 œufs dans une seule masse d'œufs produite par *C. inclusum*, en laboratoire et Peck et Whitcomb, 1970) ont rapporté pour la même espèce une fourchette de 17 à 86 œufs par masse d'œufs.

D'après l'étude de Mansour (1980a) en Israël, au printemps, les adultes étaient beaucoup plus nombreux que les stades immatures, ce qui indique probablement que *C. mildei* passe l'hiver principalement à l'âge adulte. Les stades juvéniles ont été trouvés principalement à l'automne. La première ponte d'une femelle accouplée au début du printemps atteindra en moyenne sa maturité

en août, et certaines d'entre elles pourraient produire une deuxième génération à l'automne. Les pontes suivantes seront à divers stades de développement immature vers la fin de l'automne.

Les araignées *C. mildei* sont des prédateurs généralistes qui peuvent consommer des ravageurs dans les vergers (Boreau de Roince, 2012 ; Lefebvre, 2016). Dans le cadre du contrôle biologique par la conservation, ils pourraient aider les producteurs de fruits à lutter contre les ravageurs. Ils peuvent être particulièrement efficaces car ils peuvent consommer différentes stades des ravageurs. En outre, *Cheiracanthium* sp. sont des prédateurs généralistes qui à priori restent dans le verger ou à proximité toute la saison, malgré les fluctuations de température (Lefebvre, 2016), de l'abondance du ravageur (Mansour et al., 1980b ; Miliczky et Calkins, 2002) ainsi que la présence de pesticide (Mansour, 1987). Ainsi, parvenir à prouver que *C. mildei* consomment les ennemis naturels en quantité accentuera son utilité en matière de contrôle biologique.

Des tests de prédation effectués par (Miliczky et Calkins, 2002) ont mis en évidence que *C. mildei* se caractérise par un fort potentiel à consommer des œufs de lépidoptère par rapport aux autres araignées chasseuses. L'araignée *C. mildei* a particulièrement montré une capacité à réguler, dans des mésocosmes, d'autres lépidoptères ravageurs des pommiers (Mansour, et al., 1981 ; Corrigan et Bennett, 1987).

3.7.2 *Clubiona* sp

1.1.1.1 Taxonomique

Royaume: Animalia

Embranchement: Arthropoda

Classe: Arachnida

Ordre: Araneae

Sous-ordre: Araneomorphae

Famille: Clubionidae

Genre : *Clubiona*

1.1.1.2 Distribution, cycle de vie, écologie

Tout comme les *Cheiracanthium*, la famille Clubionidae Wagner, 1887 est présente partout dans le monde en dehors des pôles et est constituée de 15 genres et 624 espèces (World Spider Catalog, 2018). En Europe seulement 1 genre est signalé et 50 espèces recensées (Nentwig et al., 2018). Dans les vergers de pommiers, 3 espèces ont été décrites *C. brevipes*, *C. corticalis* et *C. leucapsis* (Marc et Canard, 1997 Lefebvre, 2016) (Figure8). Si l'on s'en tient à ces 3 espèces, leur répartition à l'échelle de l'Europe est homogène puisqu'elles sont présentes partout.

Concernant leur cycle de vie, *Clubiona* sp. est un genre à cycle court sténochrome de printemps. En effet, la durée d'une génération est d'un an pour au moins 93% de la population et la durée de vie des araignées n'excède pas deux ans. La durée de vie des mâles est beaucoup plus courte que celle des femelles : les femelles ont une durée de vie plus longue d'environ 4 mois. La reproduction a lieu au début du printemps, et les araignées deviennent actives dès le mois de mars, donc très tôt dans la saison. Les jeunes passent l'hiver au stade sub-adulte, mais il reste à savoir si la période d'arrêt de développement hivernal correspond à une quiescence ou à une diapause. Concernant les 3 espèces potentiellement présentes dans les vergers, pour *C. brevipes* on trouve des mâles et des femelles respectivement de mars à aout et de janvier à novembre : pour *C. corticalis* de janvier à septembre et toute l'année et enfin pour *C. leucapsis* d'avril à juillet et de mars à septembre (Nentwig et al., 2018).

Ce sont des espèces nocturnes qui chassent à courre et sont considérées comme des prédateurs généralistes. Pendant la journée, elles restent sous des pierres, sous des écorces d'arbres ou d'arbustes, dans la végétation basses dans des retraites de soie. Marc (1993) a réalisé des échantillonnages sous les écorces de pins (où les *Clubiona* sp. construisent généralement une loge de repos en soie) de janvier à août dans une forêt à Rennes en France afin d'étudier la phénologie des *C. corticalis* dans la nature. Concernant leur régime alimentaire, dans la littérature, peu de données existent. Toutefois des travaux de Boreau de Roince (2012, 2013) suggèrent que des Clubionidae (notées *Clubiona* spp dans le texte) mangent des pucerons en vergers de pommier faisant de cette famille de potentiels prédateurs pour la lutte biologique.



C. leucaspis

C. brevipes

C. corticalis

Figure 8. Différentes espèces de *Clubiona* sp

Les chapitres et les objectifs de la thèse

Ce travail de thèse a été découpé en 3 parties :

La première partie vise à faire un état des lieux des communautés d'araignées arboricoles dans les vergers de pommiers et poiriers dans un cadre régional en utilisant un réseau de parcelles commerciales (allant de Lunel à l'ouest, Valence au Nord et jusqu'à Sénas à l'Ouest et au Sud). L'objectif de cette partie était d'identifier les facteurs de gestion et les caractéristiques du verger qui conditionnent une plus grande abondance et diversité d'araignées, suggérant une meilleure survie et reproduction, et ce durant deux saisons (automne 2015 et hiver 2016). C'est le premier chapitre car il va nous permettre de réfléchir aux espèces présentes, aux variations d'abondances de certaines espèces d'intérêt et aux effets premièrement du mode de protection phytosanitaire et deuxièmement de l'environnement proche des vergers.

Le deuxième chapitre donne un éclairage sur la dynamique hivernale de communautés d'araignées dans les vergers de Provence. C'est un point important et souvent négligé car jusqu'ici on pensait que l'inactivité des arthropodes était la règle en hiver. Cela permet en outre de raisonner pour le futur l'action des araignées contre les stades hivernants de certains ravageur des vergers.

Le dernier chapitre décrit une expérience originale de transfert et donc d'introduction de deux espèces d'araignées d'intérêt contre le carpocapse dans un verger expérimental qui est pauvre en ces auxiliaires. Nous avons donc pour cela imaginer une méthode particulière pour suivre et observer les araignées introduites dans le verger cible. Finalement, nous avons essayé de faire le lien avec les populations de carpocapse au sein du verger à l'échelle de l'arbre.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

L'intensification agricole affecte la biodiversité et donc la lutte biologique contre les ravageurs à différentes échelles spatiales (et temporelles). Une complexité paysagère accrue, l'implantation de structures agro-environnementales locales et la gestion des bordures de parcelles ont été promues comme des moyens potentiels pour atténuer la perte de biodiversité et de services écosystémiques associés dans les zones cultivées. Dans ce chapitre, nous avons comme objectif d'étudier l'effet de certaines pratiques agronomiques (et en premier chef, la protection phytosanitaire) et de l'environnement proche des vergers de pommiers dans les Sud de la France sur les communautés d'araignées. Au delà de l'amélioration de la connaissance de ces communautés, nous avons en tête un aspect appliqué : si nous voulons manipuler ces communautés pour augmenter leur rôle dans la lutte biologique, par exemple en favorisant certaines espèces par des aménagements adaptés, il est essentiel de connaître les abondances de chaque espèce et leur dépendances aux caractéristiques de l'agrosystème 'verger'. Il serait en effet difficile ; voire inutile ; de vouloir augmenter de façon importante la présence d'une araignée particulière si celle-ci est très sensible aux pesticides qu'ils soient synthétiques ou naturels.

On peut définir 2 périodes clés où la lutte biologique par conservation à l'aide de prédateurs généralistes est intéressante : l'hiver et le début du printemps (Boreau de Roince et al., 2012) et plus classiquement le printemps et l'été. La première période vise à la diminution des stades dormants des ravageurs qui hivernent dans le verger, comme le puceron cendré en pommiers et le psylle en poiriers. Des résultats antérieurs montrent un intérêt particulier des araignées lors de cette période (Miliczky et Horton, 2005) pour lutter contre le psylle du poirier. La seconde période est liée à la présence des stades actifs des ravageurs (en particulier puceron cendré et carpocapse en pommiers).

1 Introduction

Après des décennies d'expansion et d'intensification des terres cultivées et des pâturages, l'agriculture est désormais la plus grande utilisatrice des terres de la planète et couvre près de 40% de la surface (Foley et al., 2011). Cette expansion agricole est l'une des principales causes de perte d'habitat et de biodiversité dans le monde (Foley et al., 2005; Power, 2010), compromettant ainsi la fourniture de services écosystémiques aux cultures, comme la pollinisation animale et la lutte biologique naturelle (Tscharntke et al., 2008 ; Holzschuh et al., 2016).

La lutte biologique par conservation manipule l'environnement des ennemis naturels afin d'améliorer leur performance, en maximisant leur présence sur le terrain, ce qui peut se traduire par une efficacité accrue contre plusieurs types de ravageurs. La lutte biologique contre les organismes nuisibles peut ainsi empêcher la perte de récolte en maintenant les organismes nuisibles au-dessous du seuil économique, réduisant ainsi le recours aux pesticides (Pickett et Bugg, 1998; Bommarco et al., 2013). L'optimisation de la lutte biologique par le biais d'ennemis naturellement présents nécessite une compréhension de leur fonctionnement contre les ravageurs et de leur dépendance vis-à-vis des facteurs environnementaux.

Les prédateurs généralistes tels que les araignées fournissent des services de lutte Biologique sur les terres agricoles (Riechert et Bishop, 1990; Symondson et al., 2002 ; Nyffeler et Sunderland, 2003). Contrairement aux spécialistes, les araignées ne dépendent pas de la présence du ravageur cible pour leur survie. Leur potentiel de lutte contre les ravageurs dépend donc de leur capacité à créer des densités de population élevées avant la colonisation et à limiter la croissance des populations de ravageurs (Riechert, 1999 ; Birkhofer et al., 2008). Dans le cas d'une augmentation des populations de proies, les araignées peuvent augmenter leur taux de consommation individuelle ou leur propre densité en générant un nombre plus élevé de descendants réussis ou en augmentant l'immigration en provenance des habitats environnants (Marc et al., 1999). Assurer une densité élevée précoce de prédateurs généralistes dans les cultures est donc crucial pour lutter efficacement contre les ravageurs (Riechert et Bishop, 1990 ; Östman et al., 2001). La diversité des araignées peut aussi être influencée par la culture, les pratiques et en particulier l'utilisation d'insecticides, acaricides, fongicides et herbicides (Pekar, 1999). Dans de nombreux cas, l'application d'insecticides a entraîné une diminution de leur

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

abondance et de leur diversité (Park et al., 2007; Santos et al., 2007; Marko et al., 2009). L'abondance et la richesse en espèces des araignées diminuaient dans les vergers selon les pratiques de gestion conventionnelles, en raison de l'utilisation de pesticides non sélectifs, comparativement à la lutte intégrée et aux vergers biologiques, une observation générale pour de nombreux écosystèmes agricoles vergers de fruits (Marko et al., 2009).

Les pommiers sont une culture importante dans les pays méditerranéens et il existe une forte demande de solutions alternatives aux applications de pesticides. Comme les araignées font partie des prédateurs les plus abondants dans les vergers de pommiers, elles pourraient être efficaces contre le carpocapse et le puceron cendré, les principaux ravageurs de cette culture. Afin d'optimiser l'efficacité des araignées, il est essentiel de comprendre leur relation avec les facteurs environnementaux aux échelles locale et paysagère.

Les habitats semi-naturels (SNH) soutiennent la biodiversité et les services écosystémiques associés sur les terres agricoles, contribuant ainsi à une agriculture durable. Cependant, on sait peu de choses sur l'adéquation spécifique des différents types de SNH en tant qu'habitat d'hivernage ou source alternative de ressources des arthropodes prédateurs, malgré le rôle crucial de ces connaissances pour la conservation. Les habitats semi-naturels sont définis par la dominance de la végétation native et la gestion réduite par rapport aux cultures (Holland et al., 2016). Un SNH fournit aux prédateurs généralistes (tels que les araignées) des proies alternatives et des refuges contre les perturbations régulières des champs (Thomas et Jepson, 1997; Thorbek et Bilde, 2004). En culture non pérenne, la présence de SNH pendant la saison de production des cultures augmente la densité de population et la biodiversité des prédateurs arthropodes, améliorant parfois la lutte contre les ravageurs (Rusch et al., 2016; Tschumi et al., 2016).

Les habitats non cultivés ont de fortes densités de population d'araignées agrobiontes et non-agrobiontes (Schmidt et Tschardtke, 2005), mais les preuves de l'importance relative des cultures et de la SNH en tant qu'habitat d'hivernage a été indirectement déduit ou basé sur des études de cas locales (Pfiffner et Luka, 2000; Schmidt et al., 2008). Les modes de vie et les exigences en matière d'habitat des araignées dépendent souvent fortement de l'identité des espèces, différences parfois marquées entre espèces proches (Wise, 1993). Par conséquent, afin d'améliorer la densité des araignées pour la lutte contre les ravageurs, il est crucial de considérer l'influence de différents SNH sur l'ensemble des communautés d'araignées hivernantes, et en

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

particulier sur les espèces d'agrobiontes. En effet, le type de végétation (par exemple boisé ou herbacé) est un facteur déterminant de la composition des communautés d'araignées (Entling et al., 2007).

En outre, de nombreuses études ont montré que les araignées constituent un groupe modèle d'invertébrés approprié pour étudier les impacts écologiques de la qualité de l'habitat et de ses modifications (Bonte et al., 2004; Lambeets et al., 2008). Plusieurs caractéristiques expliquent cela : ce sont des prédateurs généralistes, de nombreuses espèces vivent dans le même habitat, elles habitent de nombreuses niches spatiales et temporelles et sont très faciles à collecter (Wise, 1995). Dans ce travail, nous avons étudié les effets des facteurs locaux et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées dans les vergers de pommiers dans le Sud de la France. Nous avons considéré comme facteurs locaux les SNH (haies et absence de vergers) autour des champs échantillonnés.

Nos objectifs pour cette première partie étaient donc **(i)** d'étudier l'effet des pratiques (traitements phytosanitaires) et de l'environnement (haies et absence de vergers) dans les vergers de pommiers dans le Sud de la France, **(ii)** d'améliorer notre connaissance sur la composition des espèces d'araignées et en particulier celles les plus abondantes; **(iii)** d'étudier l'importance relative des variables environnementales pouvant influencer les araignées dans la canopée de pommiers, et ce durant deux périodes clé de l'année dans le cadre de la lutte biologique, à savoir l'automne et l'hiver.

2 Méthodes et matériels

2.1 Les vergers et la caractérisation de leur environnement proche

Cette étude a d'abord été réalisée dans le sud de la France à l'automne 2015 dans une série de 60 vergers de pommiers ou de poiriers inégalement répartis entre 3 régions, 20 vergers autour de Lunel, 15 vergers autour de Valence et le reste autour d'Avignon (figure 9). La plupart des vergers étaient commerciaux mais certains (moins d'une dizaine) étaient des vergers expérimentaux de l'INRA ou de la Pugère (centre départemental d'expérimentation fruitière). La répartition des vergers entre mode de protection et type de fruit est visible dans le tableau 4.

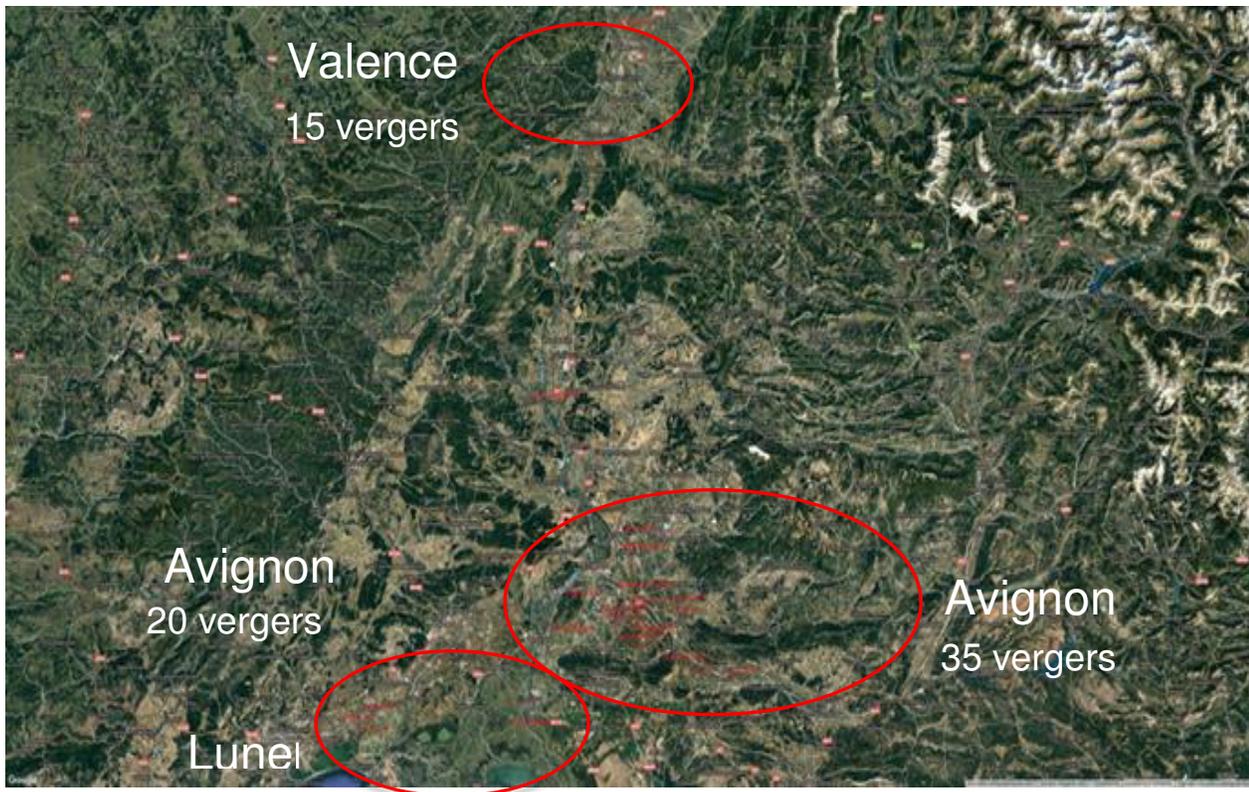


Figure 9. les vergers sélectionnés autour d'Avignon

S'il était possible il y a encore 10 ans de distinguer au sein des vergers qui n'étaient pas en mode de protection de l'AB, des vergers ayant un recours plus ou moins intensifs à l'usage des pesticides, les vergers dit 'PFI' se distinguant des vergers dit « conventionnels », cette différence n'est plus possible car la majeure partie des producteurs ont recours maintenant à la confusion sexuelle contre le carpocapse des pommes et les niveaux d'utilisation de pesticides, s'ils restent variable constituent un continuum et non plus 2 classes séparées.

Il est vite apparu au cours de la thèse que la période hivernale était intéressante, nous avons donc réalisé un second échantillonnage en hiver de l'année 2016 en sélectionnant une quarantaine de vergers très majoritairement commerciaux. La répartition des vergers entre mode de protection et type de fruit est visible dans le Tableau 4.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Saison	Vergers PFI	Vergers AB	remarques
Automne 2015	47	17	12 poiriers PFI
Hiver 2016	15	24	

Tableau 4: Répartition des vergers dans les différentes catégories de protection phytosanitaires (AB ou PFI) pour les 2 saisons d'étude. Tous les vergers sont des vergers de pommiers sauf précision contraire.

A ce jour, nous n'avons pas encore récolté l'intégralité des calendriers de traitement 2015 et 2016. En outre, il est difficile de caractériser précisément une pression phytosanitaire car le simple nombre de traitement (IFT) ne renseigne pas sur la possible toxicité de ces traitements.

A partir des données dont nous disposons, nous pouvons dire que l'IFT moyen entre les vergers AB et les vergers PFI n'est pas significativement différent (avec des valeurs entre 25 et 30) si on ne distingue pas les « produits de biocontrôle » (i.e. ci principalement les insecticides microbiologiques comme le virus de la granulose ou le Bt) pour lesquels on peut faire l'hypothèse que la toxicité vis à vis des auxiliaires est faible. En général, les vergers PFI utilise moins de ces produits de biocontrôle (1.9 +/- 1.1) que les vergers AB (10.9 +/- 2.16). L'IFT des vergers AB devient alors significativement plus faible que celui des vergers PFI si on exclut ces produits.

En outre, il convient de distinguer les vergers PFI de pommiers et de poiriers. Sur un nombre limité de vergers (les producteurs ayant les 2 types de vergers), on observe une IFT de 28.3 (+/- 1.75) pour les pommiers contre 19.9 (+/- 1.43) pour les poiriers, ce ci est à mettre notamment en relation avec la récolte des poires qui a lieu bien plus tôt que celle des pommes. (Sauphanor et al., 2009; Marliac et al., 2015a, Mazzia et al., 2018).

Concernant maintenant l'environnement, chaque verger a été caractérisé au début de l'étude. Nous avons qualifié qualitativement et quantitativement les haies autour des vergers. L'estimation qualitative a simplement consisté à donner une note pour chaque côté du verger visant à estimer la diversité des essences présentes (arbres et arbustes) variant entre 1 (pour une haie monospécifique, généralement de cyprès ou de peupliers) et 2 pour une haie très diversifiée. Cet indicateur vaut 0 quand aucune haie n'est présente sur la face considérée. Au final, nous

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

calculons un indicateur agrégé de la qualité de la haie :

$$HQ = \frac{\sum(a_i l_i)}{\sum l_i}$$

Avec l_i , longueur de la face considérée et q_i indicateur de la qualité de la haie variant de 0 à 2 comme expliqué précédemment.

Nous avons également noté l'occupation du sol sur les 4 faces du verger selon qu'il s'agissait de verger ou non (culture non pérenne, prairie, friche ou espaces verts). Nous calculons alors un pourcentage linéaire (prenant en compte la longueur de chaque face) de verger autour du verger. En outre, certains descripteurs du verger (superficie, forme) ont été calculés.

2.2 Piégeage et identification des araignées

Les populations des araignées ont été collectées à l'aide de la méthode des bandes pièges. Pour la première période d'étude (automne 2015), les bandes pièges ont été posées début septembre et récoltées fin novembre. Nous faisons l'hypothèse que les communautés qui utilisent ces pièges pour hiverner ont subi l'effet des pesticides qui ont été appliqués dans le verger pendant toute la saison de production (mars à août).

Pour la deuxième période (hiver 2016), les bandes pièges ont été posées début décembre 2016 et récoltées fin janvier. Notre hypothèse est que nous piégeons ainsi les araignées actives durant l'hiver (ou tout au moins encore actives jusqu'en décembre). Cette période de piégeage se déroule environ 6 mois après la dernière application de pesticides et nous pensions que l'effet des pesticides serait moins marqué.

Dans chaque verger et à chaque date, sept bandes pièges ont été placés au centre de trois rangées différentes du verger. Les rangées sont séparées les unes des autres par au moins une rangée afin de limiter l'autocorrélation spatiale. La distance minimale entre les pièges était d'environ 10 m.

Pour les deux périodes, nous avons utilisé des pièges en carton ondulé de 10 cm de large et 50 cm de longueur (Figure 10). Par la suite, nous avons encerclé complètement le tronc de chaque arbre.

Pour chaque date de récolte, les bandes ont été numérotées et enfermées dans des sacs en plastique. Leur contenu en arthropodes a été ensuite manuellement collecté et conservé dans de l'alcool à 70° pour une identification ultérieure. Les araignées adultes ont été identifiées au

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

niveau de l'espèce et les juvéniles au niveau du genre en utilisant les clefs disponibles sur le site Spider of Europe (araneae.nmbe.ch) ont été utilisés comme norme pour la taxonomie.



Figure 10. bandes piège en carton ondulé sur l tronc d'un pommier

2.3 Analyses statistiques

Une fois les araignées identifiées au genre, nous avons rempli une matrice site -espèce. Nous avons calculé la dominance de l'espèce majoritaire à l'échelle du verger. Les calculs d'abondance et d'indice de diversité ont été calculés à l'échelle de la bande piège en utilisant le package 'vegan' dans R. Les analyses multivariées (ACP et analyse discriminante) ont été réalisées à l'échelle du verger à l'aide du package 'ade4'. Les analyses statistiques concernant l'abondance et les indices de diversité ont été réalisées en utilisant un modèle mixte (et le package 'LmerTest') en considérant un effet aléatoire « verger » et un seuil de significativité de 0.05.

3 Résultats

3.1 Communautés d'araignées capturées à l'automne 2015

3.1.1 Taxons présents et taxons dominants

Au total, 26107 araignées ont été capturées dans les bandes pièges pendant l'automne 2015 avec 45 genres principaux (i.e. ayant des effectifs supérieurs à 10 individus au total). Une représentation en camembert permet de voir que certains taxons sont très majoritaires (Figure 11). Les 4 premiers taxons qui représentent environ 75% des effectifs sont *Pseudeuophrys erratica* (41.8%), une Salticidae; *Nurscia albomaculata* (20.2%) une Titanoecidae, *Cheiracanthium mildei* (13.1%) une Eutichuridae et *Phrurolithus festivus* (5.2%), une Phrurolithidae. Ensuite, on trouvé des taxons représentant plus de 1% de l'effectif total comme par ordre d'importance les *Theridion* sp. (2.9%, Theridiidae), les *Clubiona* sp. (2.5%, Clubionidae), les *Zelotes* sp. (2.4%, Gnaphosidae), les *Scotophaeus* (1.5%, Gnaphosidae), les *Aphantaulax* sp. (1.3%, Gnaphosidae), les *Heliophanus* sp. (1.2%, Salticidae), les *Ozyptila* sp. (1.2%, Thomisidae), les *Icius* sp. (1.1%, Salticidae) et les *Philodromus* sp. (1.0%, Philodromidae).

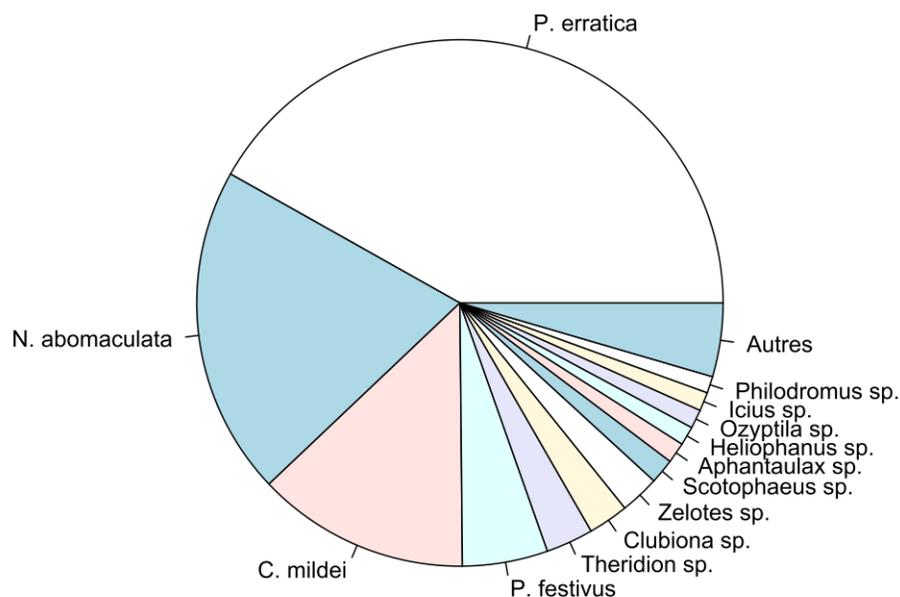


Figure 11. Représentation en pourcentage de l'effectif total des différents taxons d'araignées capturés à l'automne 2015 dans les bandes pièges.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Pseudeuophrys erratica (Walckenaer, 1826). *Pseudeuophrys erratica* (figure 12) est une espèce d'araignée sauteuse (famille des Salticidae) répandue dans toute l'Europe. Les Salticidae sont des chasseuses traquant les proies qui entrent dans leur champ de vision. *P. erratica* se trouve normalement sous l'écorce des arbres ou sous les rochers en lisière de forêt. Les mâles une longueur de corps de : 3,5-4,25 mm, les femelles : 3.0-4.0 mm. Ces araignées possèdent la meilleure acuité visuelle parmi les arthropodes.



Figure 12. *Pseudeuophrys erratica* Figure 13. *Nurscia albomaculata*

Nurscia albomaculata (Lucas, 1846). *Nurscia albomaculata* (Figure 13) est de la famille des Titanoecidae. Cette espèce se trouve en Europe. L'abri est disposé sous les pierres, dans la litière ou les plantes basses et la toile à mailles larges s'étend au-delà de l'entrée (Roberts, 2009). La femelle reste dans sa retraite avec le cocon. Les mâles ont une longueur de : 10-11 mm, et les longueurs des femelles varient de 6.6 à 11mm.

Cheiracanthium mildei (L. Koch, 1864). Cette espèce (Figure 14) se trouve partout en Europe. Elle se cache dans les coins sombres dans un petit sac de soie, se tient généralement durant la journée dans un abri de soie souvent installé sur les plantes. Elle ne construit pas de toile et chasse la nuit (chasse à vue). Les mâles mesurent de 5,78 à 8,5 mm et les femelles de 6 à 10,65 mm.



Figure 14. *Cheiracanthium mildei*



Figure 15. *Phrurolithus festivus*

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Phrurolithus festivus (C. L. Koch, 1835) *P. festivus* (figure 15) est une espèce de la famille des Phrurolithidae. Cette espèce se rencontre en Europe. Elle vit dans les habitats secs (prairies sèches, landes, vignes), dans les forêts et on peut souvent la trouver au contact de fourmis. Les mâles mesurent de 2,2 à 2,9 mm et les femelles de 2,4 à 3,2 mm.

La présence de taxons très majoritaires permet de s'intéresser à la dominance de la communauté en calculant le pourcentage des effectifs représenté par l'espèce majoritaire (dans la plupart des cas, une des 4 espèces majoritaires) dans chaque verger sur les effectifs récoltés dans ce verger. On observe une différence très significative entre les vergers conduits en PFI et ceux conduits en AB (Figure 16 ; $p < 0.001$). En effet, l'espèce majoritaire dans un verger PFI représente en moyenne 47.1% des effectifs alors qu'elle ne représente que 32.0% dans un verger AB.

Si on se focalise maintenant sur les effectifs moyens des 4 taxons dominants, on constate des différences entre les vergers PFI et les vergers AB. Ainsi, *P. erratica* et *N. albomaculata* semble être plus abondants dans les vergers PFI (Figure 17), ces différences sont cependant faibles ($p=0.06$ et $p=0.04$ respectivement) car ces taxons d'araignées ne sont pas présents dans tous les vergers.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

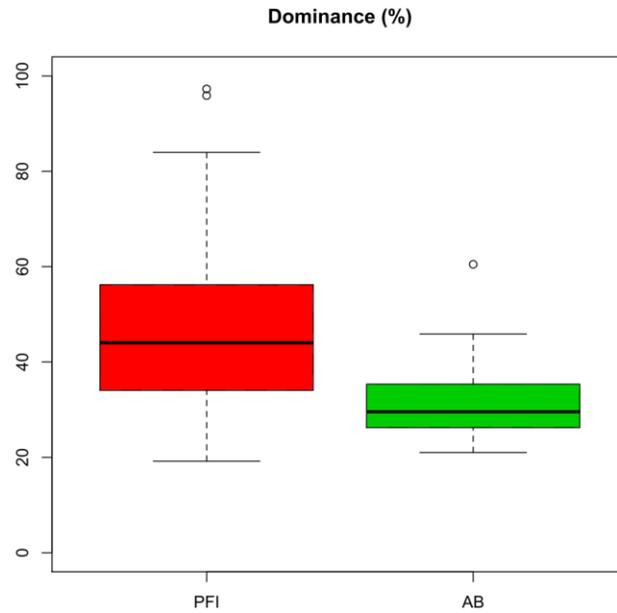


Figure 16. Distributions des dominances pour les vergers conduits en PFI ou en AB. (la différence est significative au seuil de 5%).

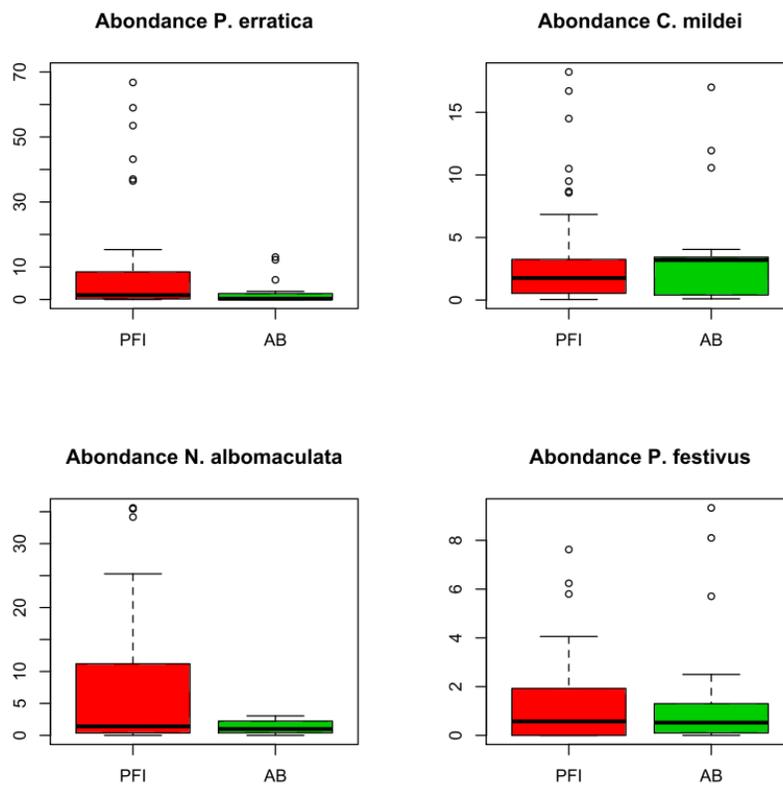


Figure 17. Abondances moyennes des 4 taxons les plus fréquents en fonction du mode de protection phytosanitaire des vergers

3.1.2 *Composition en taxons des communautés et leurs caractéristiques*

Les résultats de l'ACP, après une transformation de Hellinger pour réduire l'influence des doubles zéros, montrent une distinction des modes de protection phytosanitaires selon l'axe 1. La distinction devient encore plus forte et largement significative ($p=0.001$ d'après une analyse discriminante) si on sépare, au sein des vergers PFI, les vergers de poiriers des autres vergers de pommiers (Figure 18). On constate alors que les vergers de poiriers, pourtant en PFI, se projettent à droite de l'axe 1, au même endroit que les vergers AB. La droite de l'axe 1 (les vergers AB) est caractérisée par des taxons comme *Heliophanus* sp., *Ballus* sp., *Clubiona* sp. et *Micaria* sp. alors que les vergers PFI, à gauche de l'axe 1 sont caractérisés par des taxons comme *P. erratica*, *N. albomaculata* et les *Segestrie* sp..

Les caractéristiques principales des communautés seront donc étudiées en considérant 3 groupes: pommiers AB, pommiers PFI et poiriers PFI. Nous n'observons pas de différence significative en matière d'abondance moyenne ni de richesse taxinomique entre les 3 groupes (Figure 19). Par contre, la diversité de Shanon et l'équitabilité de Pielou sont significativement différentes entre d'un côté les pommiers PFI et de l'autre les pommiers AB et poiriers PFI ($p < 0.001$ dans les 2 cas).

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

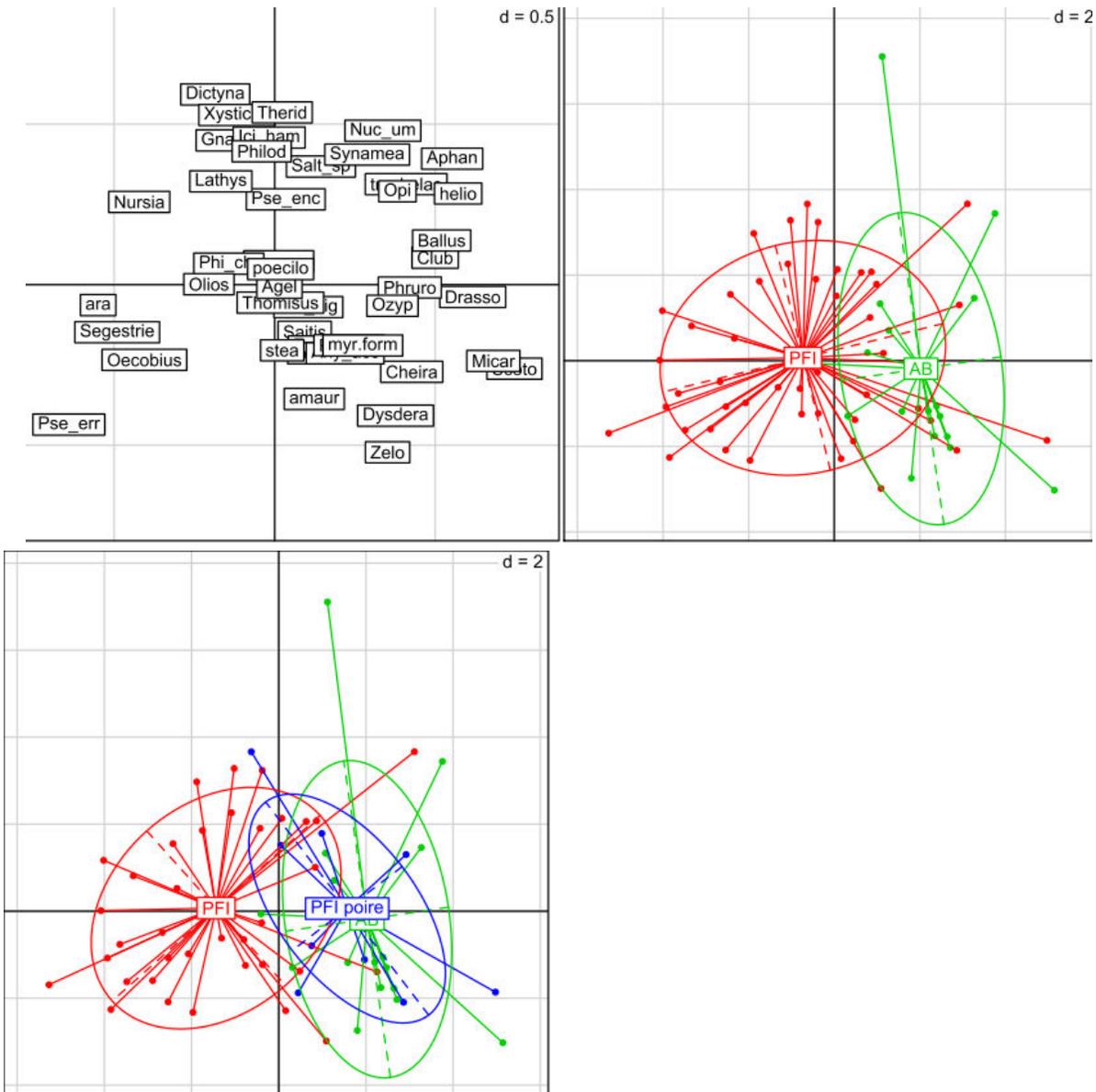


Figure 18. projection sur les 2 premiers axes (représentant xx% de la variabilité) des taxons (panel en haut à gauche), des vergers regroupés en 2 groupes de protection phytosanitaire (haut-droite) ou en 3 groupes en séparant les poiriers PFI des pommiers PFI.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

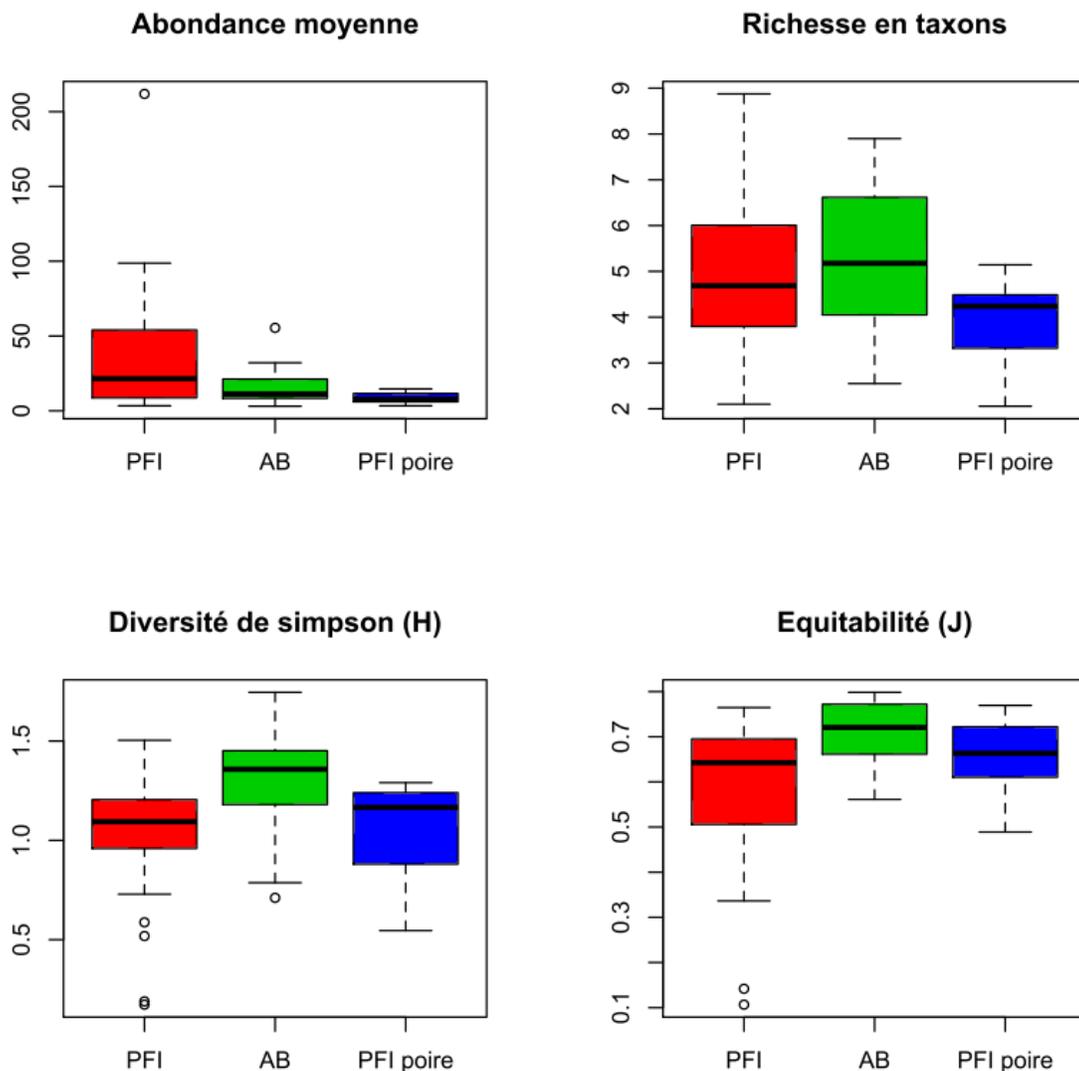


Figure 19. Principales caractéristiques des communautés d'araignées capturées dans les vergers regroupés par protection phytosanitaire et par fruit.

3.1.3 Effets de l'environnement proche

Nous allons donc nous intéresser à 2 caractéristiques de l'environnement proche des vergers, un indice HQ mélangeant la quantité et la qualité des haies et le pourcentage linéaire de vergers autour de la parcelle.

Si on regarde en premier lieu comment se distribuent ces 2 valeurs pour l'ensemble des vergers, on note d'abord qu'il n'y a pas de différence de pourcentage de vergers autour pour les 3 groupes (Figure 20). Par contre, on voit que la qualité des haies est différente entre les pommiers

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

et poiriers PFI (en noir et en vert) et les pommiers AB (en rouge). Par conséquent, l'effet de la qualité des haies ne pourra pas être comparé sans séparer les vergers PFI des vergers AB. Nous avons donc créé 2 variables catégorielles correspondantes aux 2 caractéristiques étudiées. Le pourcentage de verger autour a donné lieu à 3 modalités selon que le verger est isolé, intermédiaire ou encerclé avec comme valeurs seuil de pourcentage de 55 et 90%. L'indice de qualité des haies a été distingué pour les vergers PFI (avec un seuil positionné à 0.5) et les vergers AB (avec un seuil positionné à 1).

L'effet de la qualité des haies et du pourcentage de vergers n'a pas eu d'effet significatif sur les abondances et les différents indices de diversité (résultats non montrés).

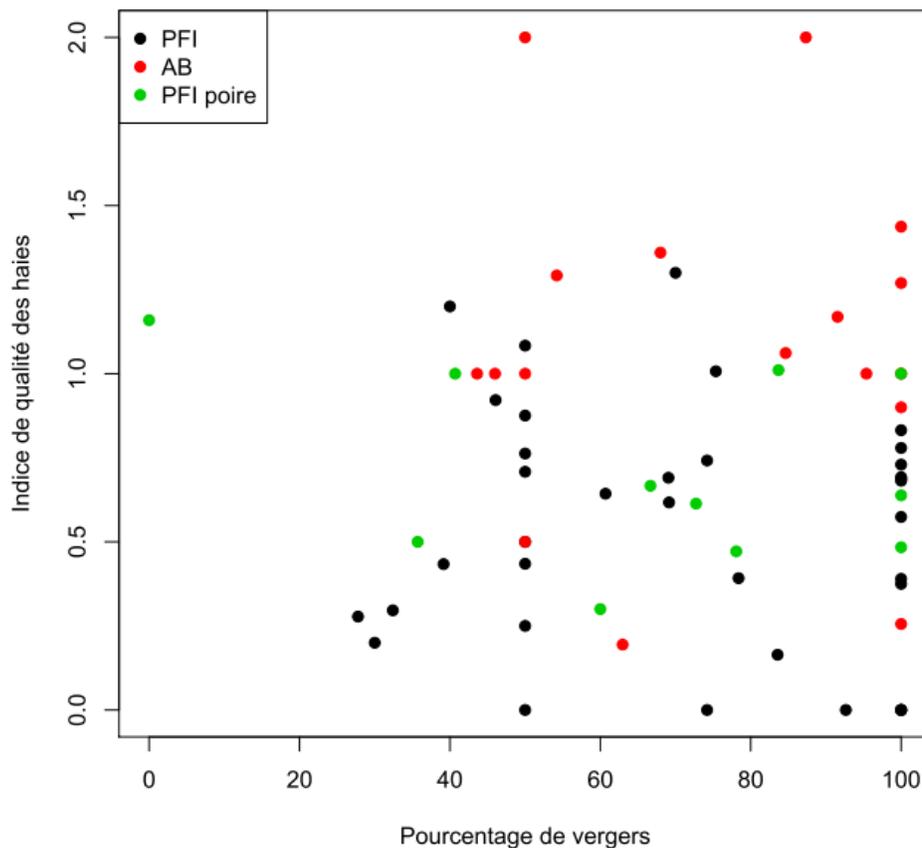


Figure 20. Visualisation des caractéristiques de l'environnement proche (indice de qualité des haies et pourcentage de vergers bordant les vergers cibles) pour l'ensemble des vergers.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Par contre, nous avons pu déceler des effets sur la composition des communautés. En réalisant des analyses discriminantes, nous avons mis en évidence une absence d'effet du pourcentage de vergers sur les communautés (résultat non montré, $p=0.41$). Avec la même méthode, nous avons pu mettre en évidence une différence significative et donc un effet de la qualité des haies uniquement dans les vergers PFI (Figure 21, $p=0.001$) et ce, que les poiriers soient présents ou absents.

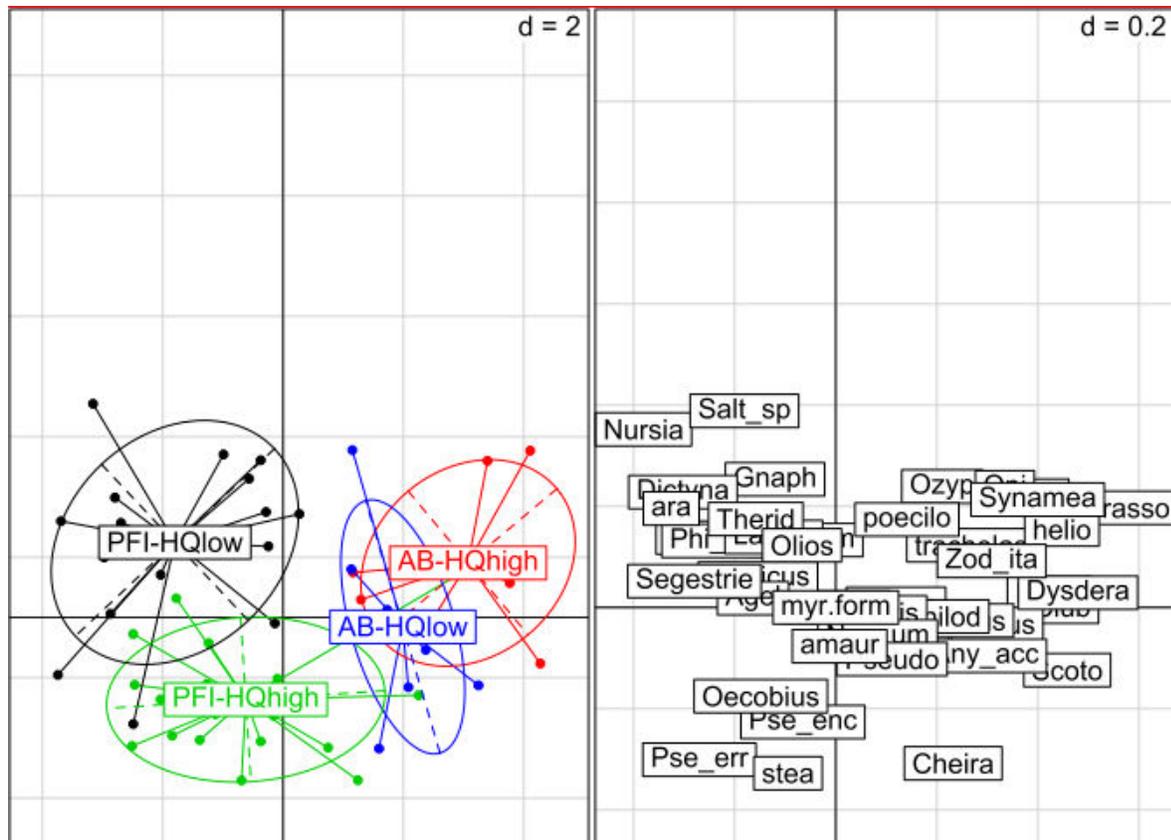


Figure 21. Projection sur les 2 premiers axes des résultats de l'analyse discriminante sur les 4 modalités séparant l'indice synthétique des haies et le mode de protection phytosanitaire (les poiriers ont été ôtés de l'analyse).

Aucune différence significative entre les vergers PFI (poiriers et pommiers séparés) et AB n'a été notée en termes d'abondance et de richesse des araignées pendant les 2 périodes d'automne 2015 et hiver 2016. En revanche, nous avons noté que durant l'étude réalisée en automne 2015, les indices de communauté des araignées sont plus diverses et plus équilibrés en AB qu'en PFI. En ce qui concerne la période hiver 2016, les communautés des araignées étaient plus abondantes et plus riches en taxons dans les vergers AB. Plus généralement, nous avons remarqué que les communautés d'araignées n'étaient pas influencées par la qualité de

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

l'environnement autour du verger, et ce durant les deux phases d'étude en automne 2015 et en hiver 2016.

3.2 Communautés d'araignées capturées à l'hiver 2016

Nous avons échantillonné les araignées dans 42 vergers mais suite aux résultats obtenus précédemment, nous avons décidé d'ôter les 3 vergers de poiriers (PFI) pour simplifier l'interprétation des résultats.

3.2.1 Taxons présents et taxons dominants

Un total de 1806 araignées ont été capturées dans les bandes pièges pendant l'hiver 2016 (soit une moyenne de 4.09 araignées par bande piège) avec uniquement 16 genres principaux (i.e. ayant des effectifs supérieurs à 10 individus au total). Une représentation en camembert permet de voir qu'un taxon est très majoritaire (Figure 22), c'est le cas des *Philodromus* sp. avec 66% des effectifs. Ensuite, on trouve des taxons comme *Lathys* sp (5.7%), *Anyphaena* sp. (4.6%) et *P. erratica* (3.4%). Il est intéressant de noter que parmi ces taxons abondants, deux sont susceptibles de participer à la lutte biologique contre les stades dormants de certains ravageurs, il s'agit des *Philodromus* et des *Anyphaena* sp. (Miliczky et Horton, 2005).

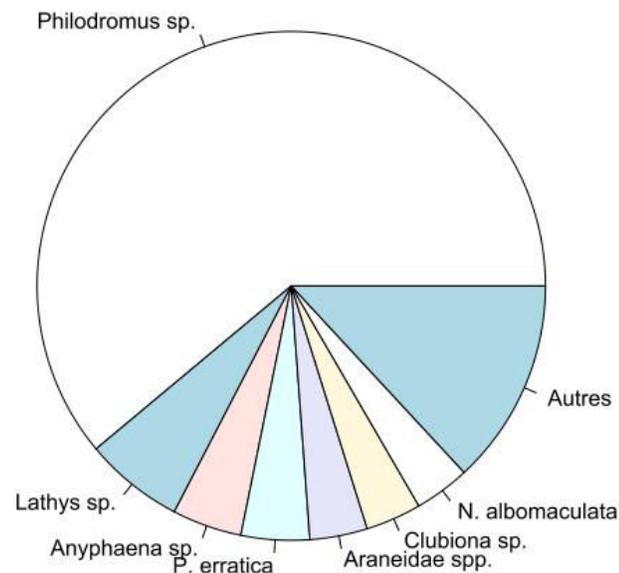


Figure 22. Représentation en pourcentage de l'effectif total des différents taxons d'araignées capturés à l'hiver 2016 dans les bandes pièges (total sur 39 vergers).

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Contrairement à l'automne, la dominance (très souvent due aux *Philodromus sp.*) n'est pas différente entre les vergers PFI et les vergers AB avec une valeur moyenne de 53%.

Si on se focalise maintenant sur les effectifs moyens des 4 taxons dominants, on constate des différences entre les vergers PFI et les vergers AB. Ainsi, *Philodromus sp.* et *Anyphaena sp.* semblent être plus abondants dans les vergers AB (Figure 23), ces différences sont significatives ($p=0.049$ et $p=0.036$ respectivement).

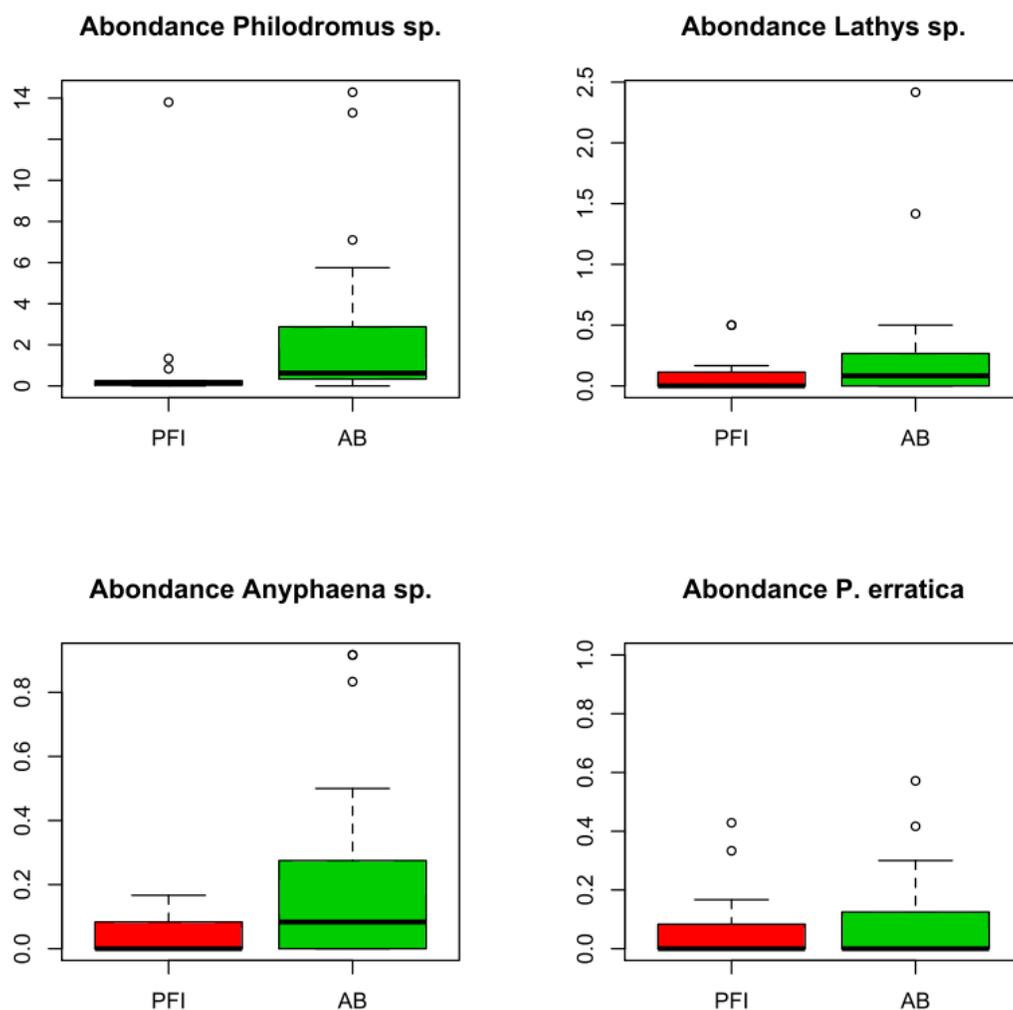


Figure 23. Abondances moyennes des 4 taxons les plus fréquents en fonction du mode de protection phytosanitaire des vergers.

3.2.2 Composition en taxons des communautés et leurs caractéristiques

Les résultats de l'ACP (Figure 24), après une transformation de Hellinger pour réduire l'influence des doubles zéros, ne montrent pas de distinction claire entre les 2 modes de protection phytosanitaires en hiver.

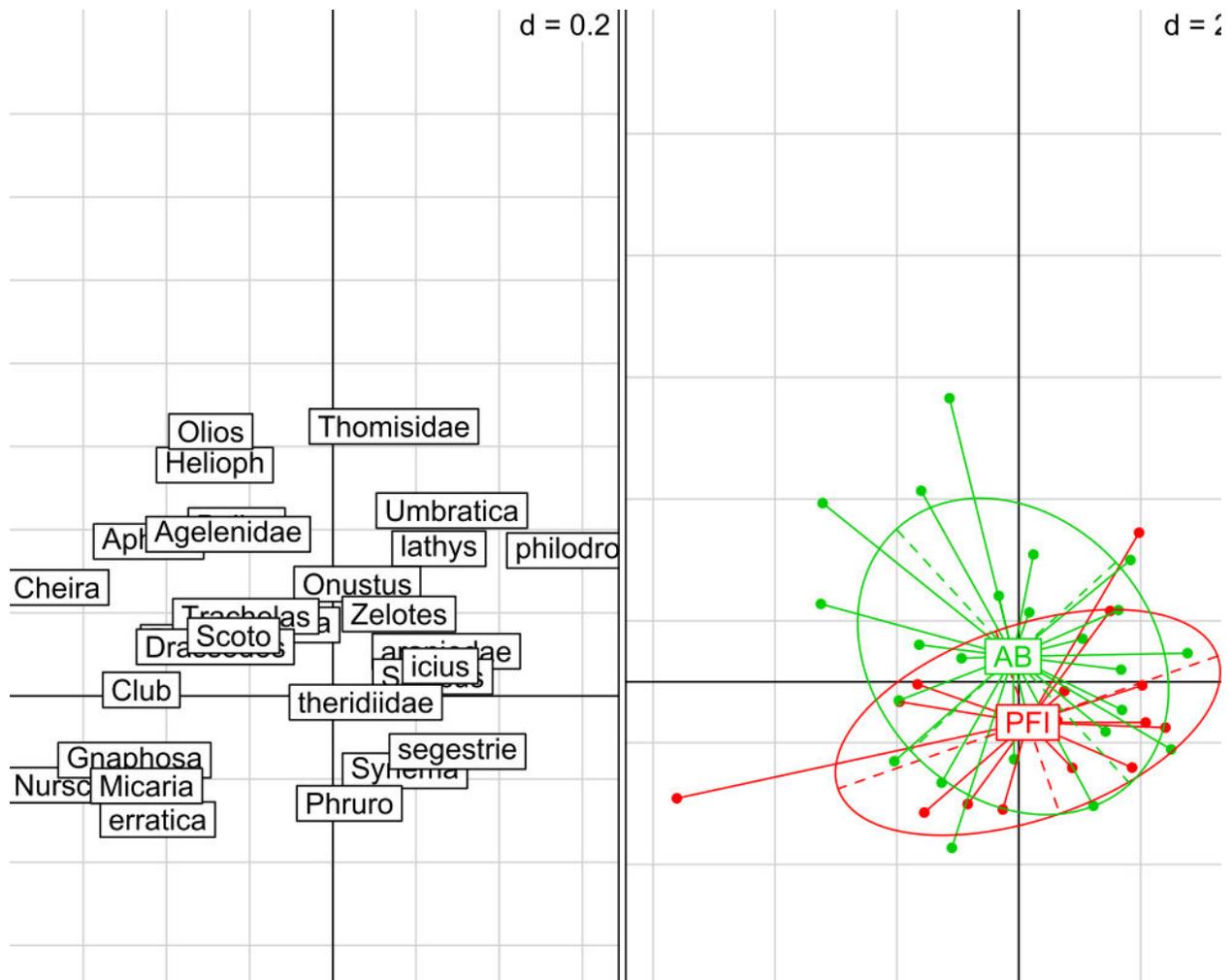


Figure 24. projection sur les 2 premiers axes (représentant xx% de la variabilité) des taxons (panel de gauche), des vergers regroupés en 2 groupes de protection phytosanitaire (droite).

Les caractéristiques principales des communautés seront donc étudiées en considérant 2 groupes: pommiers AB et pommiers PFI. Nous n'observons pas de différence significative en matière de diversité de Shannon ni pour l'équitabilité (Figure 25). Par contre, l'abondance

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

moyenne et la richesse taxinomique sont significativement différente entre les pommiers PFI et les pommiers AB ($p=0.003$ et $p=0.006$ respectivement).

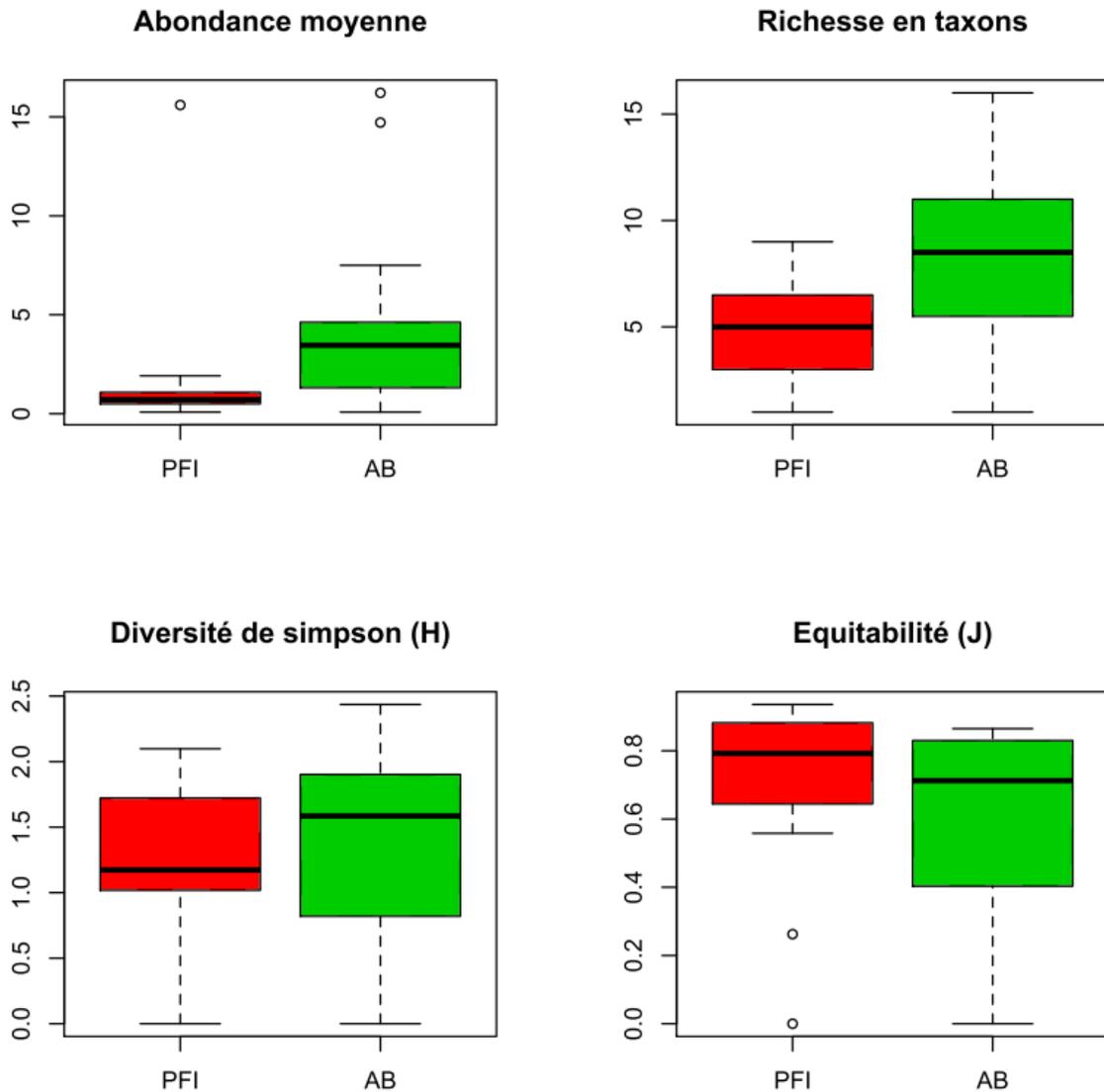


Figure 25. Principales caractéristiques des communautés d'araignées cap-turées dans les vergers regroupés par protection phytosanitaire.

3.2.3 Effets de l'environnement proche

Si on regarde en premier lieu comment se distribuent ces 2 valeurs pour l'ensemble des 39 vergers, on note d'abord qu'il n'y a pas de différence pour les paramètres étudiés pour les 2

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

groupes de phytoprotection (Figure 26). Nous avons donc créé 2 variables catégorielles binaires. Le pourcentage de verger autour a donné lieu à 2 modalités avec une valeur seuil de pourcentage de 75%. L'indice de qualité des haies a été séparé en 2 catégories (avec un seuil positionné à 1).

L'effet de la qualité des haies et du pourcentage de vergers n'a pas eu d'effet significatif sur les abondances et les différents indices de diversité (résultats non montrés).

Contrairement à l'automne 2015, nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet ni de la qualité des haies ni du pourcentage de verger bordant les vergers sur la composition des communautés d'araignées en hiver (résultats non montrés).

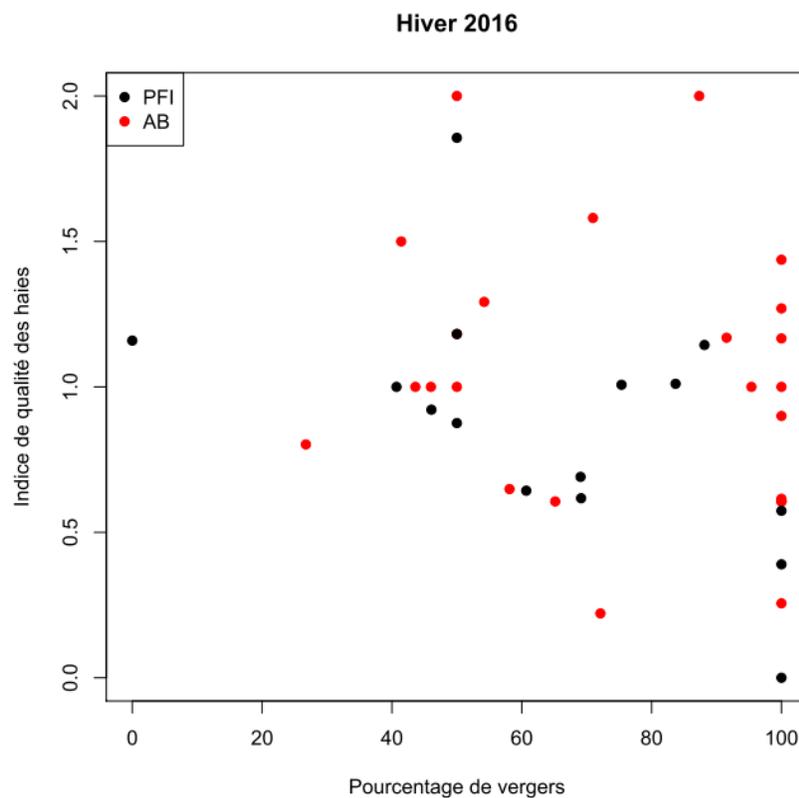


Figure 26. Visualisation des caractéristiques de l'environnement proche (indice de qualité des haies et pourcentage de vergers bordant les vergers cibles) pour l'ensemble des vergers.

4 Discussion

4.1 La méthode des bandes pièges

Deux méthodes de piégeage sont classiquement utilisées pour évaluer les populations d'araignées dans les vergers (Marc et al., 1999): des pièges en carton ondulé et les frappages (de branches sous laquelle on place soit un plateau, prélèvement non destructif, soit un entonnoir et un récipient avec de l'alcool, cas du prélèvement destructif). À première vue, les frappages semblent être les plus efficaces pour évaluer les araignées actives par opposition au carton pouvant favoriser la capture d'araignées au repos. Cependant, le fait de battre les branches a plusieurs inconvénients : seules les araignées ayant une activité diurne sur les branches des arbres peuvent être échantillonnées efficacement et cette efficacité peut dépendre du temps ou de l'heure de la journée (Marc et Canard, 1999). De plus, une seule branche par arbre peut être échantillonnée en raison de la perturbation causée par le frappe, ce qui entraîne une faible abondance (au mieux une ou deux araignées et très souvent aucune) (Simon et al., 2010). Les pièges en carton présentent également certains inconvénients : **(i)** les araignées avec une activité diurne peuvent être omises (car on prélève les bandes lorsque les araignées se promènent dans la canopée), **(ii)** toutes les araignées n'ont pas besoin d'un abri, ceci dépend de leur écologie et de leur phénologie. Par exemple, les araignées Araneidae ne sont pas bien évaluées à l'aide de cette technique, à l'exception notable de *Nuctenea umbratica* (ou épeire des fissures en langue vernaculaire) qui a besoin spécifiquement d'un abri proche de sa toile pour s'y cacher. Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé les bandes pièges cartonnées en période hivernale donc ces inconvénients associés au carton sont probablement minimes (toutes les feuilles sont tombées et le carton est donc devenu un abri efficace) ou peuvent être minimisés (échantillonnage effectué tôt le matin en supposant que les araignées diurnes ne sont pas déjà sorties). Les pièges en carton sont des pièges intégratifs qui échantillonnent les araignées pendant de plus longues périodes. Ils permettent donc d'observer des abondances plus importantes. En effet, les bandes vides étaient très rares dans les vergers de pommiers.

Nous faisons donc l'hypothèse qu'une grande majorité des araignées qui vivent dans l'arbre (et certaines vivant au sol) viennent hiverner dans les abris à la fin de l'automne.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Lorsque nous utilisons les bandes pièges au cœur de l'hiver, nous ne sélectionnons parmi celles-ci que celles qui sont actives en hiver (i.e. de décembre à février).

4.2 Des communautés d'araignées dominées par quelques taxons

Pour les 2 dates étudiées, nous observons qu'un ou 2 taxons représentent déjà plus de 50% des effectifs. Il est cependant difficile de dire que cette dominance de quelques espèces est le reflet des effectifs durant la saison. La plupart des taxons capturés en automne sont soit des juveniles (cas de *N. albumaculata*) ou des subadultes (cas de *C. mildei*) et il y a donc un possible effet de la phénologie (la date de ponte notamment). Il est également difficile d'assurer que la dominance sera le reflet des effectifs qui émergeront au printemps car le filtre du climat et celui de la prédation vont opérer.

Il est également intéressant de noter que le pourcentage de dominance de l'espèce majoritaire dans chaque verger en 2015 est plus élevé dans les vergers PFI.

4.3 Effet des modes de protection sur les communautés d'araignées

Nous pouvons faire l'hypothèse que la protection phytosanitaire PFI, même si en moyenne a le même nombre d'IFT (nombre de traitement pleine dose appliqué par an) que l'AB, génère une pression moins forte, quantitativement (c'est vrai pour le nombre d'insecticides utilisés, les producteurs AB ayant plus recours à la carpovirusine, c'est moins vrai pour les fongicides), et qualitativement (certains pesticides à toxicité notable vis à vis des organismes utiles restent utilisés en PFI).

Les effets des pesticides sur les araignées peuvent être directs (toxicité liée à la contamination de l'habitat ou des proies) pouvant affecter leur survie ou leur capacité de chasse ou indirects (diminution de la ressource trophique) (Peng et al., 2010; Pekar 2012).

Des expérimentations ont étudiées l'effet de la protection phytosanitaires en verger en comparant des vergers AB et des vergers PFI (Pekar, 1999 ; Lefebvre et al., 2017) mais toutes avec un nombre de vergers très limité (de 2 à 6 !) ce qui en limite la portée. Puisque chaque mode de protection cache une grande diversité de pratiques (même l'AB, Marliac et al., 2016), nous avons choisi un grand nombre de vergers de chaque catégorie.

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

Les effets que nous avons observés sont de plusieurs natures, ils touchent à :

- la dominance exercée par l'espèce majoritaire
- la composition taxinomique des communautés
- la diversité et l'équitabilité de ces communautés

L'application de pesticides de synthèse ou naturels, et en particulier les insecticides, concourt à la disparition des espèces les plus sensibles aux traitements phytosanitaires. Cet effet serait donc plus fort dans les vergers PFI. En conséquence, la diversité, mesurée par l'indice de Shannon, serait plus élevée dans les vergers AB et ils auraient une composition taxinomique supérieure car laissant une place plus grande aux espèces sensibles. Dans les vergers PFI, il est probable que les « niches » ainsi libérées soient occupées par certaines espèces tolérantes dont l'abondance pourrait augmenter en proportion dans la communauté. Cela pourrait expliquer la différence de dominance entre verger AB et verger PFI et également la plus forte équitabilité observée dans les vergers AB.

Cette hypothèse est renforcée par la constatation que les vergers de poiriers, en matière de composition taxinomique et d'abondance moyenne, sont très proches des vergers AB. Or ces vergers se caractérisent par un moindre usage des pesticides (et des insecticides) et également par une date d'arrêt des traitements plus précoce. Cela indiquerait que l'effet observé, sur la composition taxinomique, serait plus imputable à une intensité de traitements plus qu'à la nature des pesticides utilisés (naturels ou de synthèse).

4.4 Effet de l'environnement proche des vergers

S'il est bien connu que l'environnement proche ou plus lointain (paysage) des parcelles peut jouer un rôle non négligeable sur la densité de certains ennemis naturels en cultures annuelles, ce rôle est moins facile à mettre en évidence en cultures pérennes car ces systèmes ne subissent pas de rotation et peuvent donc héberger les ennemis naturels en dehors de la saison de production. Néanmoins, les besoins en matière de site d'hivernation des araignées sont assez mal connus, et il est possible qu'une partie de celles-ci hivernent dans la haie ou dans des parcelles avoisinantes en hiver puis recolonisent les vergers au printemps (Öberg et al., 2007; Levert et al., 2016). En outre, certaines études ont montré que certaines caractéristiques du paysage, telles que

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

l'hétérogénéité ou la présence de haies, influencent les communautés d'araignées dans les parcelles agricoles même en dehors de ces périodes d'hibernation et de recolonisation (Schmidt et al., 2008; Garratt et al., 2011).

Même avec un effectif de vergers importants, il n'est pas aisé de mettre en évidence les effets de certains facteurs de l'environnement car le plus souvent, ces facteurs ne sont pas croisés entre eux. C'est le problème rencontré dans cette étude pour tester l'effet de la haie (estimée par un indice synthétique mêlant qualité et quantité). Sur la sélection de vergers opérés à l'automne 2015, on a en effet constaté que les vergers AB avait en moyenne des haies de meilleure qualité ce qui n'est pas en soi surprenant, la gestion des aménagements ou espaces naturels proches des vergers font partie prenante de ce type de stratégie de lutte (Wyss et al., 2005). Cela a deux conséquences. La première est qu'une partie de l'effet observé sur la composition taxinomique des communautés d'araignées peut donc être due à ces différences. La seconde est qu'il n'est pas possible de mettre en évidence un effet des haies sans séparer vergers AB et vergers PFI. Pour des raisons d'échantillonnage, nous n'avons pas retrouvé cette différence sur le plus faible effectif de vergers sélectionnés à l'hiver 2016.

Quoiqu'il en soit, les haies ont eu des effets faibles (et aucun en hiver 2016). Le principal effet détecté a été observé sur la composition taxinomique qui semble différente selon que les vergers aient un indice de qualité de haie faible ou fort mais uniquement pour les vergers PFI. Cela peut être expliqué par 2 phénomènes non exclusifs. Soit cela vient du seuil choisi qui différait entre vergers AB et vergers PFI, les différences seraient alors observées lorsqu'on passe d'un indice faible à un indice moyen plus que lorsqu'on passe d'un indice moyen à un indice fort. La seconde explication possible est liée à l'effet des pesticides : dans un agro-système intensivement traité (un verger PFI), les effets d'aménagement seraient plus forts que dans un agro-système moins intensivement traité (un verger AB) où la communauté serait moins facilement colonisée par de nouvelles espèces liées aux haies. Cela indiquerait que les aménagements ont plus d'effet quand les communautés sont déjà appauvries. (Tschardtke, 2008 ; Rusch, 2016).

4.5 Différences entre les saisons

Vues les différences entre les 2 saisons en matière de vergers sélectionnés, il était impossible d'étudier un effet date. De fait, le prélèvement effectué à la seconde date a été improvisé à la vue de certains résultats de la thèse et n'a pas pu être réalisée avec la même intensité.

Nous avons formulé l'hypothèse qu'au cœur de l'hiver les effets des modes de protection phytosanitaires seraient moins importants (les derniers traitements ont en été effectué 5-6 mois avant ce prélèvement) et que les effets de l'environnement proches sur les communautés d'araignées seraient alors plus faciles à mettre en évidence. Cela ne s'est pas révélé exact.

De fait, au cœur de l'hiver, il reste des différences fortes entre vergers AB et vergers PFI en matière d'abondance et de richesse spécifique. A priori, pour cette date, il ne s'agit pas d'un effet de la haie (elles sont en moyenne de même qualité entre les 2 types de vergers). L'explication peut venir à nouveau de mode de phytoprotection et donc du type de pesticides utilisés. La plupart des araignées sont semelpares (i.e. ne se reproduisent qu'une fois) et il est donc possible que les atteintes dues aux pesticides soit sur les femelles soit sur des juvéniles plus tôt en saison aient des répercussions sur les populations observées en train d'hiverner dans le verger. Si cela est vérifié, cela indiquerait également que les mouvements de colonisation des vergers sont limités.

5 Conclusions

Les vergers de pommiers sont des cultures pérennes pluri-stratifiés (sol, strate herbacé et strate arborée) dans lesquels la gestion de l'habitat peut avoir des effets importants et durables (Landis et al., 2000; Simon et al., 2010). Néanmoins, nos résultats de notre étude sur l'effet de l'environnement sur les vergers de pommiers au Sud de la France ont démontré que la qualité de l'environnement autour du verger ne joue pas un rôle important sur la communauté des araignées ni à l'automne, ni en hiver.

Les différences observées entre vergers AB et vergers PFI semblent donc plus dépendre directement ou indirectement du mode de protection phytosanitaire. Il faut cependant ne pas avoir une vision trop naïve et si l'on pense à l'effet des prédateurs généralistes en saison, on s'aperçoit

Chapitre 1: Effets de la protection phytosanitaire et de l'environnement proche sur les communautés d'araignées présentes en verger de pommiers en Provence

que le nombre d'araignées n'est pas significativement moins élevé dans les vergers PFI. Deux visions s'opposent ici si on essaye de penser à l'efficacité en matière de lutte biologique : **(i)** soit on pense que la biodiversité (et sa redondance fonctionnelle) permet d'assurer un service malgré les perturbations, alors les vergers AB ont cette qualité ou **(ii)** on pense qu'en matière de lutte biologique, le service est rendu majoritairement par quelques espèces (Straub et al., 2008) et alors l'avantage des vergers AB n'est pas garanti. Il faut cependant également préciser que la seconde vision est souvent avancée dans le cas d'une réflexion axée sur un ravageur principal.

Chapitre 2 : Activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous climat méditerranéen

(Ce chapitre a fait l'objet d'un article publié dans la revue Biocontrol Science and Technology en 2018)

Plusieurs publications ont fait état du rôle possible des araignées soit en tout début de saison en verger de pommiers (Boreau de Roince et al., 2013) soit pendant l'hiver en verger de poiriers (Korenko et al., 2010). Le second cas d'étude était intéressant car il détaillait le fait que certains genres d'araignées (*Anypheana* et *Philodromus*) présents en Provence étaient capables d'exercer une prédation même lorsque les températures sont proches de zéro dans des vergers en Tchéquie. Cela nous a donné envie d'aller étudier la situation dans nos vergers méditerranéens caractérisés par des températures hivernales moins froides mais aussi par des journées hivernales très ensoleillées où les températures peuvent dépasser les 10°C au cœur de l'hiver (en absence de vent).

Pour cela, nous avons imaginé un dispositif de piégeage en hiver à l'aide de bande de carton ondulés et suivi la dynamique d'activité des araignées du mois d'octobre au mois d'avril dans un verger expérimental.

Résumé

Il est bien connu que les araignées sont présentes en grand nombre dans les vergers et peuvent contribuer à la lutte biologique. Certaines études récentes en Europe centrale ont également montré que certaines araignées sont actives toute l'année et consomment des insectes nuisibles, même en hiver. À l'aide de pièges en carton posés toutes les deux semaines, nous avons mené une enquête pour déterminer les espèces d'araignées et de forficule actives de septembre à mai dans un verger expérimental exempt de pesticides sous un climat méditerranéen. Nous avons observé que l'activité des araignées n'était jamais complètement absente. La structure des

Chapitre 2 : Activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous climat méditerranéen

communautés d'araignées a présenté une saisonnalité marquée sur trois périodes («automne», «hiver» et «printemps»). Seuls deux genres d'araignées, *Philodromus* et *Trachelas*, étaient très actifs en hiver (plus de 40% des captures au cours de cette saison) et six autres (*Lathys*, *Clubiona*, *Gnaphosa*, *Theridion*, *Phrurolithus*) présentaient une activité modérée (entre 20 et 40%). Les deux espèces de forficulae avaient des patrons d'activité hivernale différents, *Forficula auricularia* étant presque absent, tandis que *F. pubescens* était modérément actif sur les arbres. L'abondance, la diversité et la régularité des communautés d'araignées ont considérablement diminué entre l'automne et l'hiver et sont restées faibles le printemps suivant, probablement parce que les pièges sont beaucoup moins attractifs à cette période de l'année en raison des températures clémentes et de la présence de feuilles sur les arbres. Les araignées hivernales pourraient contribuer à la lutte biologique contre les ravageurs pendant la saison froide et nous préconisons que l'utilisation de pesticides à large spectre à la fin de l'hiver, telle qu'elle est classiquement appliquée dans les vergers, puisse être contre-productive pour la lutte contre les ravageurs.

Temporal activity of spiders and earwigs during winter in apple trees under a Mediterranean climate

Alzubik Belkair Sadeq¹, Mazzia Christophe², Pasquet Alain³, Capowiez Yvan¹

Article publié en ligne le 19 Jul 2018 par Biocontrol Science and Technolog.

Abstract

It is well known that spiders are present in high numbers in orchards and may contribute to biocontrol. Some recent studies in central Europe further showed that some spiders are active year-round and consume pests even in winter. Using cardboard traps laid every two weeks, we carried out a survey to determine which spider and earwig species are active from September to May in an experimental, pesticide-free, apple orchard under a Mediterranean climate. We observed that spider activity was never completely absent. The structure of the spider communities showed a marked seasonality in three periods (so-called 'autumn', 'winter' and 'spring'). Only two spider genera, *Philodromus* and *Trachelas*, were highly active in winter (percentage of catches during this season above 40%) and six others (*Lathys*, *Clubiona*, *Gnaphosa*, *Theridion*, *Phrurolithus*) had moderate activity (between 20 and 40%). The two earwig species had different patterns of winter activity with *Forficula auricularia* almost absent whereas *F. pubescens* was moderately active on trees. Spider community abundance, diversity and evenness significantly decreased between autumn and winter and remained low in the following spring probably because the attractiveness of the traps is much lower at this time of year due to mild temperatures and the presence of leaves on the trees. Winter-active spiders could contribute to pest biocontrol during the cold season and we advocate that the use of broad-

¹ INRA, UMR 1114 Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes, INRA/UAPV, Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 09, France

² UAPV, UMR 7263, IMBE, UAPV/CNRS/IRD, 301 rue Baruch de Spinoza, BP 21239, 84916 Avignon cedex 09.

³ CNRS, UR AFPA, Faculté des Sciences et Technologies, University of Lorraine, BP 239, 54504 Vandoeuvre les Nancy cedex.

spectrum pesticides at the end of winter, as classically applied in orchards, may be counter-productive for pest control.

Keywords: orchard – overwintering – biocontrol – generalist predator - Philodromidae

1 Introduction

Today, there is general agreement among the public and, growers that crop protection should rely less on the use of synthetic pesticides and more on agro-ecology principles (Marliac et al., 2015a; Jones et al., 2016). Among these principles, biological control through the promotion of natural enemies and with limited use of pesticides is of prime importance (Beers et al., 2016).

In apple orchards, the rosy apple aphid (*Disaphys plantaginea*) is one of the main pests (Dib et al., 2016). It is particularly difficult to control due to its rapid growth rate and early presence in spring even at low temperatures, i.e. when natural enemies are not yet present in abundance (Minarro et al., 2005; Dib et al., 2010b). However, this aphid is also present on apple trees throughout the entire winter in a quiescent stage (eggs) and thus the promotion of generalist predators in autumn or winter may limit pest outbreaks in spring (Wyss et al., 2004).

Schaefer (1977) pointed out that a surprisingly high proportion of spiders were found in a quiescent (not diapause) stage in winter in Germany. The possible implications of the winter activity of generalist predators, and particularly spiders, for biological control were however only recently recognized in pear or apple orchards. In central Europe, Pekar et al., (2015) demonstrated the role of spider predation against psyllids under laboratory and field conditions. Winter-active spiders, such as *Philodromus* and *Anyphaena*, can feed even at below freezing temperatures (Korenko et al., 2010; Boreau de Roince et al., 2013) used gut content analysis to detect early predation of aphids by spiders in apple orchards and determined the frequency of this phenomena. It is noteworthy that spiders were the main predators within the apple orchards when the first colony fundatrices (aphids emerging from winter eggs) were present, indicating their importance in the early control of aphids (Isaia, 2008 ; Petrakova et al.,2016) also used gut content analysis to detect psyllid predation by *Philodromus* and *Anyphaena* in winter and early spring in a pear orchard. They observed a high percentage of spiders with psyllid in their gut contents varying from 10 to 90% for *Philodromus* and from 40 to 100% for *Anyphaena* during

the first year of their survey. These results suggest a greater role for spiders in agro-ecosystems and their contribution to biological control of key pests.

Once the possible roles for spiders in pest biocontrol in winter are recognized, then the species that are active during this period and in early spring need to be determined. A seminal study by Horton et al., (2001) showed that in the state of Washington (US) spiders were mobile until the end of November in apple and pear orchards. (Pekar et al., 2015) provided further evidence for central Europe and suggested that *Philodromus* sp. and *Anyphaena accentuata* were the dominant spiders active in winter. However, no information is available for the Mediterranean climate where winters are known to be warmer promoting greater arthropod activity.

In this study, we used cardboard traps around tree trunks in an apple orchard to address two objectives. First, we determined the abundance of active and inactive spiders in an apple orchard from autumn to spring. Secondly, we differentiated spider species depending on their winter or early spring activity. This study provides information on the activity of generalist predators in a European orchard during winter/spring, but with a Mediterranean climate. Located in southeastern France, the study is a first step towards understanding the possible role of these predators in the biological control of pests inhabiting these orchards during winter or early spring for this region.

2 Material and Methods

2.1 The study orchard

The study was conducted at Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Avignon (south-eastern France) in an experimental apple orchard (N 43.917137 E 4.880482) from the 28th of August 2015 to the 30th of May 2016 with one or two sampling dates per month. The orchard had been pesticide-free for 5 years. It is surrounded by a double hedge-row (approximately 10 m high and 2 m wide) in the north, a single hedge-row in the south, arable land to the west and a small road and buildings to the east. The 0.25 ha orchard was planted in 2005 with 10 rows of Golden Delicious apples. The rows were oriented in an east-west direction and spaced 3 m apart. The planting distance between trees was 2 m within rows and average tree height was 1.70 m (SD = 0.17 ; n = 30). The inter-row is made up of resident grasses mowed three times a year.

The climatic conditions (minimum, mean and maximum daily temperatures) were recorded by a weather station located 500 m from the orchard.

2.2 Sampling strategy

It is always difficult to comprehensively sample the spiders or arthropods inhabiting orchards since collection depends on their preferred strata and diurnal activity. In this study, we focused on spiders that are able to feed on winter stages of rosy apple aphids (eggs and emerging females). Thus spiders present in the trees (trunk and canopy) between the return of winged aphids on apple trees in autumn (October) and the development of aphid colonies in spring (April) were targeted. Following the protocol of Horton et al., (2001), we used corrugated cardboard traps (single-fluted) but with two sampling strategies. Traps (10 cm wide and 50 cm long) completely encircled the trunk of each tree in the orchard at the end of August using adhesive tape at a height of about 50 cm height. The first strategy used 'static' traps and focused on the cumulative number of spiders found on each date (some spiders entered and others possibly left). Every two weeks until the end of December and once a month in January, February and March (because a lower activity was then expected) and then again every two weeks in April and May, 20 bands (2 per row) were randomly chosen and individually placed into plastic bags and numbered according to tree identity (row and n° of tree in this row). Care was taken not to lay traps on the same tree during the experiment. The second strategy used 'dynamic' traps and aimed to trap spiders that entered a temporary (2-week) trap, thus the so-called active spiders. This was simply achieved by replacing, at each date, the previously removed cardboard traps with new ones and by harvesting them two weeks later. The two sampling strategies provided different and complementary information on spiders and their activity, static and dynamic traps, respectively. However this information should not be regarded as a comprehensive view of all the spiders present at every date in the trees (some species or individuals do not need such shelters). Moreover for each species, the efficiency of these traps may vary with time (species can seek shelter for overwintering or nesting or diurnal/nocturnal sites).

The bags were opened in the laboratory and all the arthropods found inside were stored in 70% ethanol for subsequent identification. As a great majority of the spiders caught were immature, especially in winter, individuals were mainly identified at the genus level using the

reference website (<https://araneae.unibe.ch/>) for identification keys; only adults were identified to the species level.

2.3 Statistical analysis

The mean abundance (and SE) of spiders caught per trap was computed for each date in each sampling strategy (recent and cumulative traps).

The structure of the spider communities in dynamic traps and its variation with time were analyzed using a principle component analysis (PCA). The resulting 2D projections were analyzed with a Hierarchical Ascending Classification to determine different groups (Hill, 1973). We estimated the percentage of winter activity for each taxon as the total abundance caught in dynamic traps during this season relative to the total caught throughout the entire experiment in the same traps.

We computed the characteristics of the spider communities caught in the dynamic traps at each sampling date, i.e. abundance, Shannon index of diversity and Pielou index of evenness (using the genus level). The proportion of adults was also computed. To compare these characteristics between seasons, we applied a nested ANOVA (proportion of adults were arcsine square root transformed) with sampling dates nested within the season factor.

All computations were done using the R software and the ‘vegan’ package.

3 Results

3.1 Total arthropod abundance over time

Only two groups of arthropods were found in large abundance (Dermaptera and Arachnida), representing more than 90% of the total arthropods caught. Other minor arthropods were Coccinellidae (*Scymnus* genus), Carabidae and Staphylinidae. Dermaptera was represented by two species (*Forficula auricularia* and *F. pubescens*).

We found 3744 spiders in the 579 traps (2743 and 1001 in static and dynamic traps respectively). The temporal dynamics was clear in the cumulative traps with a gradual increase from 4.0 in September to 19.4 spiders per trap and thus per tree in mid-December. Then the mean

abundance decreased in a non-linear manner to reach a minimal value of 1.2 individuals per tree at the end of May (Figure 27). The dynamics of dynamic traps was different with high values (above 4 spiders per trap) from September to the end of mid-November, after which the mean abundance of active spiders remained low (between 1.0 and 3.4 individuals per trap) until the end of May with the noticeable exception at the beginning of April with a peak of 5.7 active spiders per tree. Two genera were highly dominant when static and dynamic traps were grouped together: *Heliophanus* sp and *Nurisia* sp with respectively, 23.1 and 18.6% of the spiders sampled. The remaining taxa then ranked in the following order *Phrurolithus* sp., *Lathys* sp., *Micaria* sp., *Theridion* sp., *Zelotes* sp., *Gnaphosa* sp., *Aphantaulax* sp., *Icius* sp., *Scotophaeus* sp., *Clubiona* sp. and *Philodromus* sp. with values between 6.7 and 2.6%.

The two species of earwigs recorded showed marked differences in their seasonal activity. *F. auricularia* was only active from September to mid-November whereas *F. pubescens* was active from September to the end of December (Figure 29).

Mean daily temperatures gradually decreased from 25 to 7.5°C between September and mid-November (Figure 28). They further decreased, despite a marked increase at the end of November, to 2.5°C at the end of January. At this date, a pronounced increase was observed (to reach 10°C at the very beginning of February) followed by a gradual increase, at least until the end of April (up to 16°C).

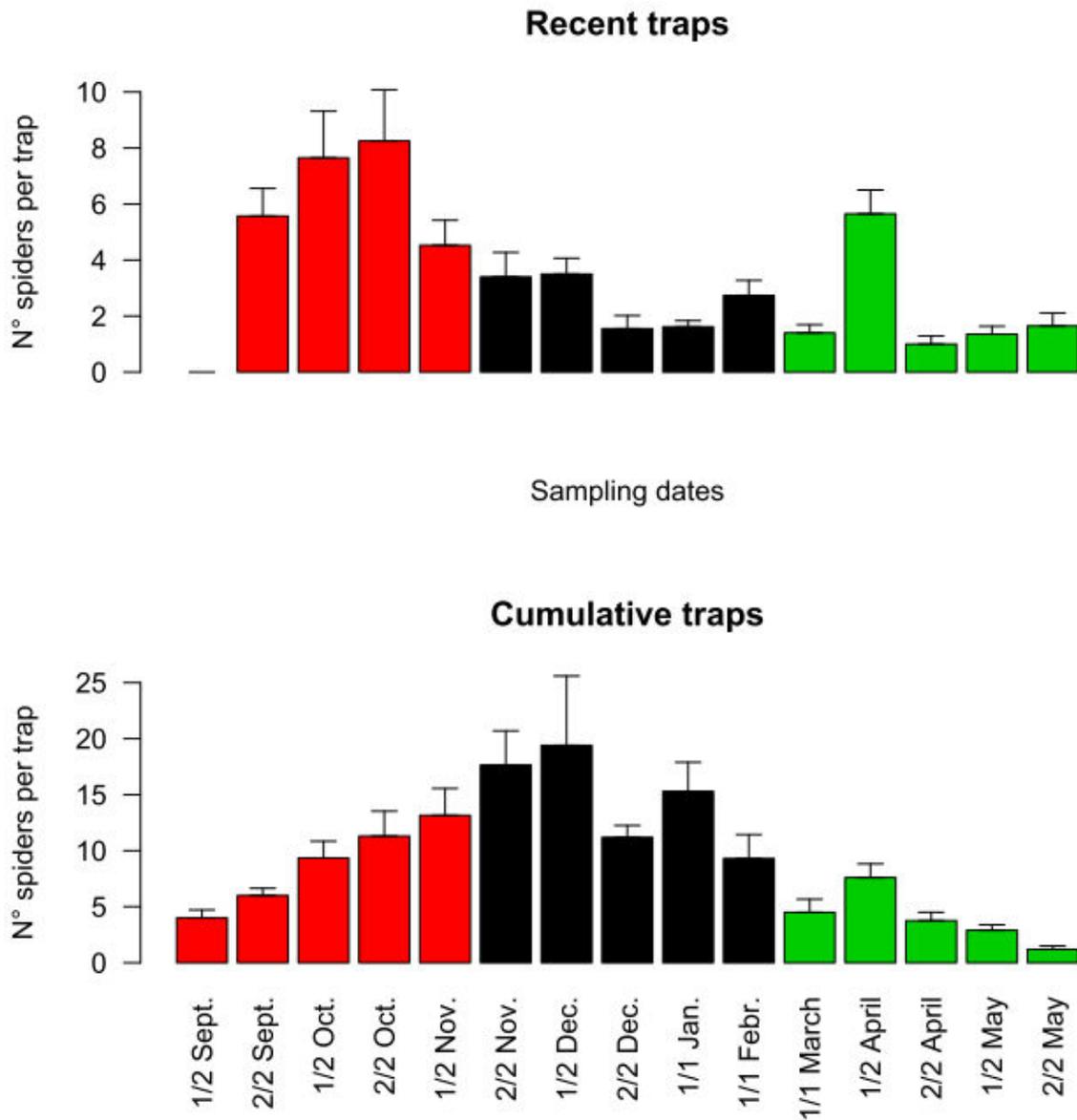


Figure 27. Mean (andSE) abundance of spider in dynamic (temporary) or static (entire sampling period) cardboard traps in the experimental orchard free of pesticides ($n = 20$). Colours separated the three seasons defined by the Hierarchical Ascending Classification

3.2 Seasonal dynamics of spider communities

The ascending hierarchical classification applied to the abundance of active spiders found at each date in dynamic traps clearly differentiated three groups (Figure 30A): from date 2 to date 5 (September to mid-November), date 6 to date 10 (end of November to February) and date 11 to date 15 (March to May). Even if these groups did not strictly follow the definition of the seasons we will herein refer to them as 'autumn', 'winter' and 'spring' groups.

The PCA analysis further showed the ordination of the dates around a circle (from date 2 bottom-left to date 15 bottom-right; Figure 30B). The first two axes of this PCA explained 47% of the variability. The three so-called seasons were well separated in the PCA with the first axis separating autumn from the two others seasons and the second axis separating mainly winter from spring (Figure 30D). Some taxa appeared to be clearly associated with each season, for example *Heliophanus* in spring, *Nurscia* in autumn and *Philodromus* in winter (Figure 30C).

3.3 Classification of spiders according to their winter activity

For each taxon, winter activity was defined as the total abundance caught in dynamic traps during this season relative to the total caught throughout the entire experiment in the same traps.

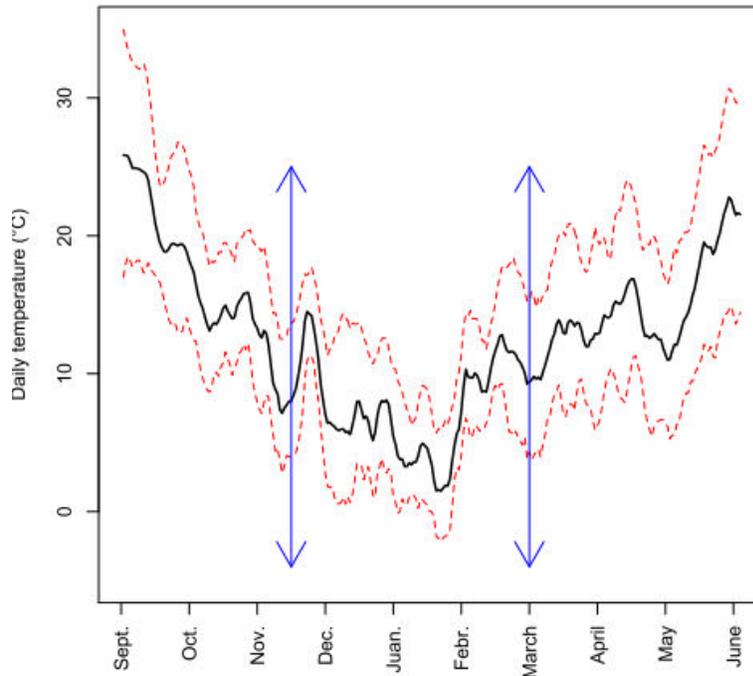


Figure 28. Mean, minimum and maximal values for daily temperatures (°C) recorded close to the orchard from the 1th of September to the 1th of June. Vertical arrows indicate the separation between the seasons as defined by the Hierarchical Ascending Classification.

This percentage of winter activity was very different for each taxon and ranged from 3% for *Micaria* sp. to 69% for *Philodromus* sp. (Figure 31). Only two taxa had a percentage of winter activity higher than 45% (*Philodromus* and *Trachelas* sp.) and were classified as having a high winter activity. Six taxa had intermediate percentages, between 25 and 40% of winter activity and were classified as spiders with moderate winter activity. The last eight taxa had percentages lower than 20% and were classified as spiders with low winter activity. The threshold values of 25 and 45% were arbitrarily chosen. If the difference (about 10%) between moderate and low winter activity was significant, *Trachelas* sp. could have been classified into the second category.

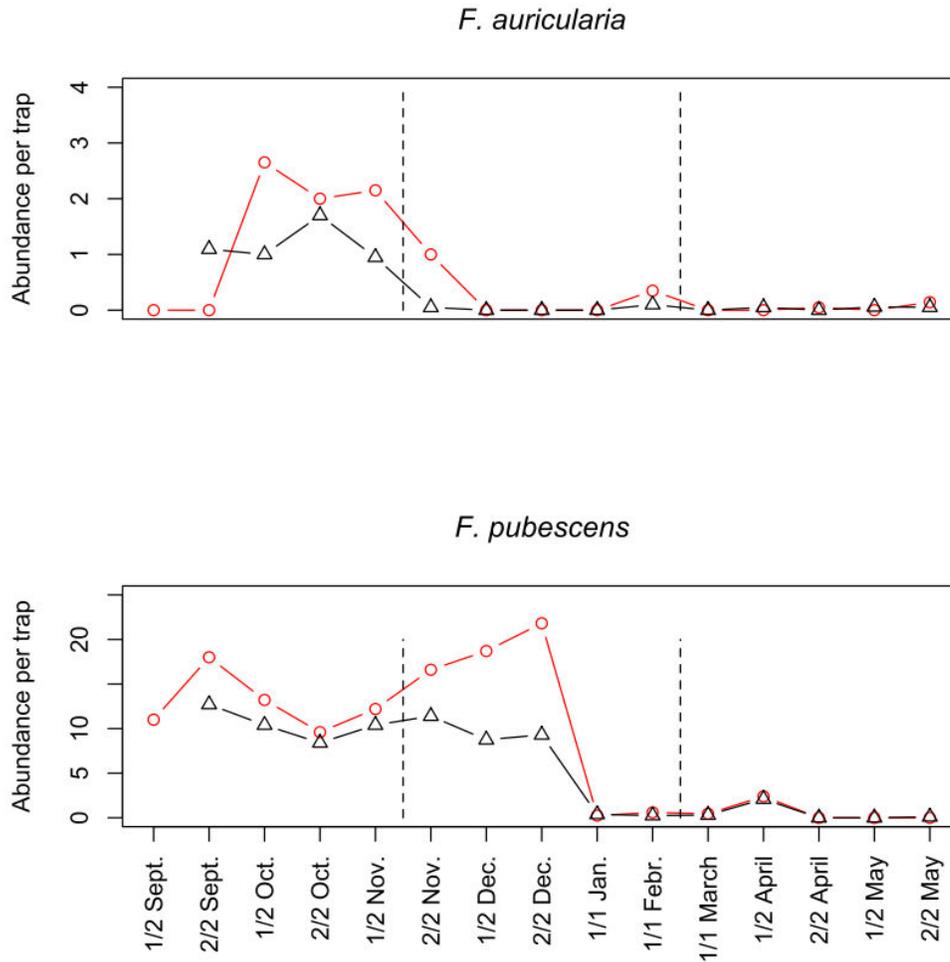


Figure 29. mean abundance caught in dynamic and static traps (grey circle) of both earwig species caught in the experimental orchard free of pesticides. Dynamic traps were repeatedly attached to trees whereas static traps were attached once in August.

Instead of presenting all the taxa, we chose to show two typical and abundant taxa in each category. All the curves had roughly the same shape with generally one peak or a plateau for static or dynamic traps. For spiders with a high winter activity, the highest abundance in the **static** traps occurred late (at date 9 for both species) whereas the peak or plateau in the dynamic traps lasted until date 6 or 7 (Figure 32). For spiders with moderate winter activity, the peak of abundance in static traps could occur late (date 9 for Clubiona) but the peak for dynamic traps occurred sooner (date 5). Low winter activity was characterized by a peak occurring sooner: at date 6 or before for static traps and at date 2 to 3 for dynamic traps.

The two earwig species had quite different winter activity with only 5.4% for *F. auricularia* and 37.3% for *F. pubescens*. Following the same classification ranking according to their winter activity as for the spiders, *F. auricularia* has low winter activity as expected. *F. pubescens*, however, had moderate winter activity.

3.4 Characteristics of the spider communities depending on the seasons

A significantly higher abundance, species richness, diversity and evenness were observed in autumn (Table 1). In winter, the spider abundance decreased significantly but still had a significantly higher species richness, diversity and equitability than in spring. The percentage of adults within the spider community remained very low in autumn and winter (around 10%) but then greatly increased in spring.

4 Discussion

4.1 Many spiders are active during the Mediterranean winter

In the past, arthropod winter activity was thought to be very limited in orchards especially after leaves had fallen. This was associated with low temperatures, the scarcity of prey and the decrease in shelter or hunting sites when no leaves are present. However, since the studies of Korenko et al., (2010) and Korenko and Pekar (2010), it is now recognized that some spider species (*Anyphaena accentuata* and *Philodromus cespitus*) are active in winter, even at negative temperatures for *A. accentuata*, in pear orchards in the Czech republic. In apple orchards under Mediterranean climate, Boreau de Roince et al., (2012) further showed, using gut content analysis, that early in the season

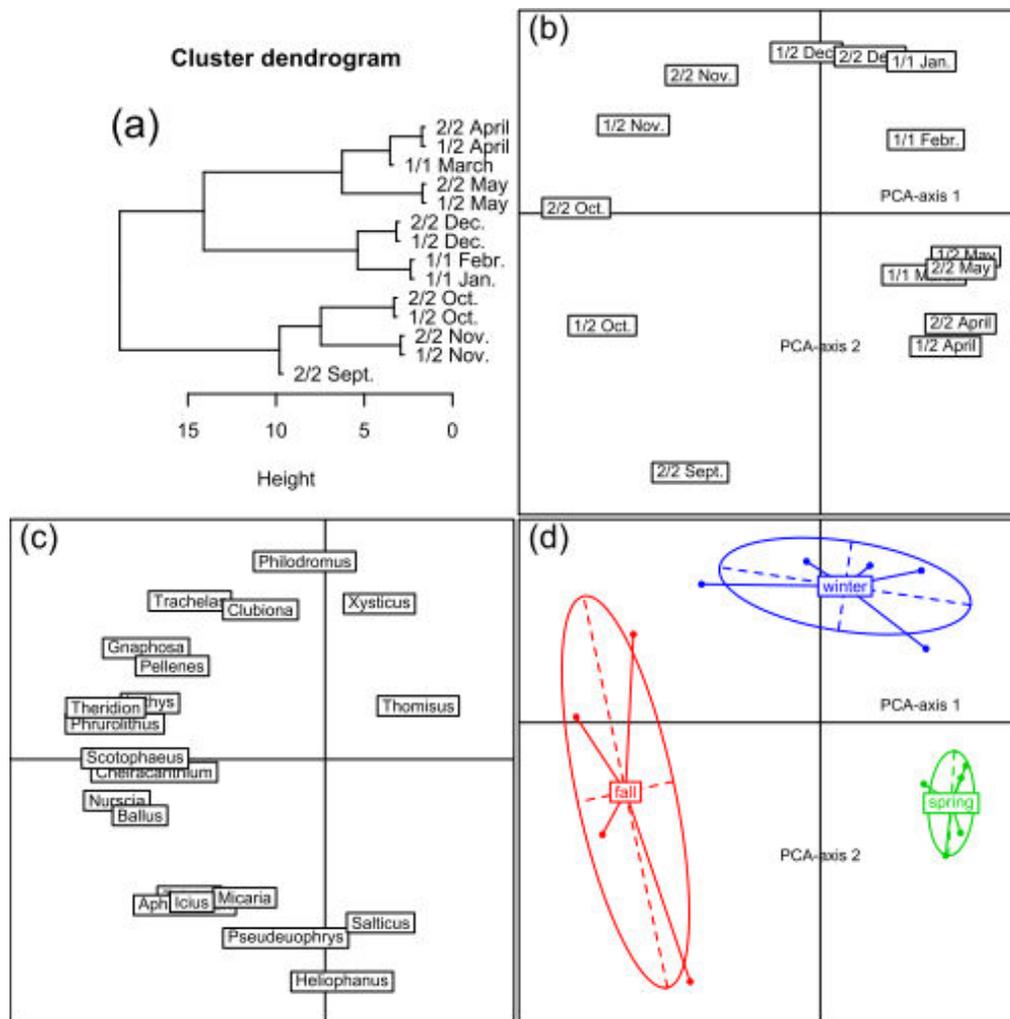


Figure 30. Analysis of the structure of the active spider communities found in dynamic traps (repeatedly attached) as a function of sampling date: (a) Hierarchical Ascending Classification applied to the results of the PCA ; (b) projections of the sampling date (note that there are no temporary, repeatedly attached traps in the beginning of September) in the first two axes of the PCA; (c) projections of the spider genus in the first two axes of the PCA; (d) 80%-CI ellipses for each season as defined by the HAC.

(from the end of March to end of April), some spiders were found to have eaten aphid emerging females. These were *Clubiona* sp., *A. accentuata* and *Philodromus* sp. with 29.2, 18.8 and 3.7% of them being positive respectively, from recent predation of aphids. However, rosy apple aphids are present during the entire winter, first as eggs and then as fundatrices in apple orchards (Dib et al., 2010). In a similar way, the psyllid *Cacopsylla piri* is present in pear orchards all winter long (Michalko et al., 2017). It is thus crucial to determine which spiders may be active in late-autumn, winter and early spring (periods generally without pesticide applications) in order to evaluate their possible role in the biological control of pests inhabiting orchards at these times. Cardboard traps are classically used to assess spider communities overwintering in orchards

(Pekar, 1999; Bogya et al., 1999a; Milliczky et al., 2008) but do not provide information on which spiders are active during winter. Only the removal of temporary (dynamic) cardboard traps can provide this information (Horton et al., 2001).

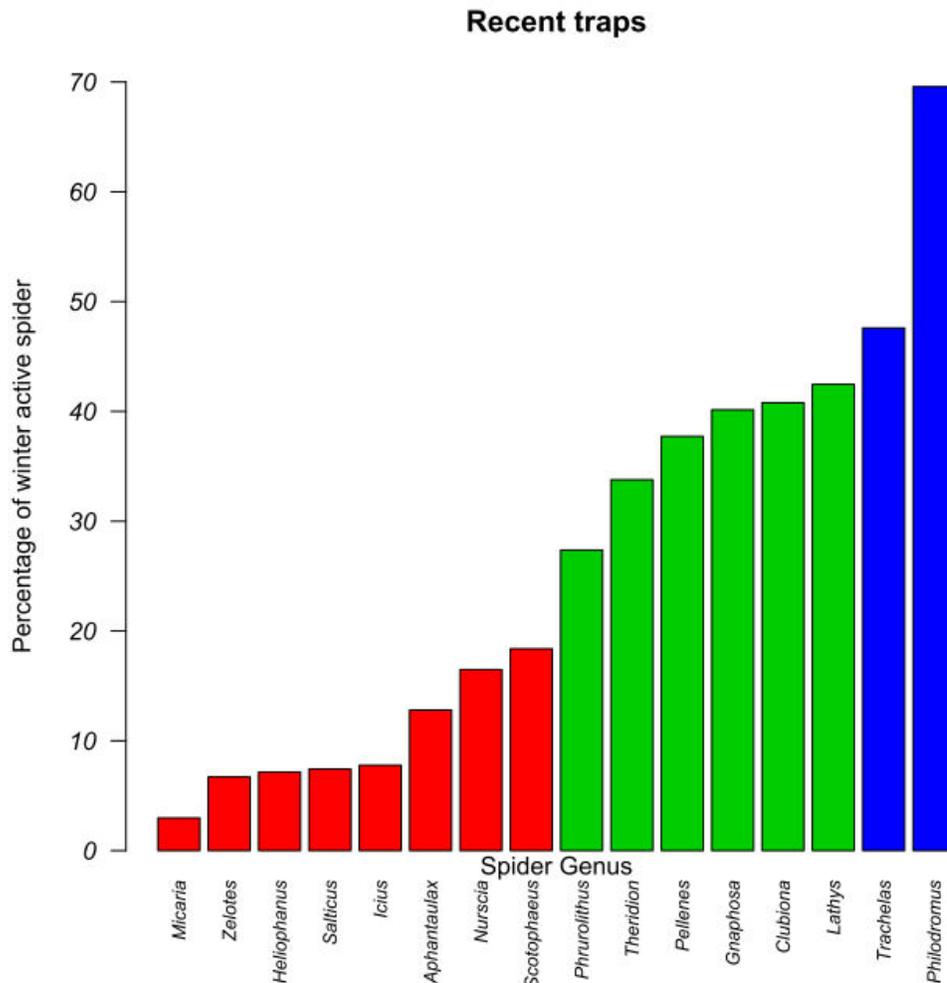


Figure 31. Bar plot of the percentage of winter-activity for the main spider genera. Winter activity was defined as the abundance caught in dynamic traps laid in winter divided by the total caught in the three seasons (colours separated spider genera with low (dark grey), moderate (soft grey) or high (black) winter activity).

Hierarchical ascending classification applied to the PCA projections of the spiders found in our traps showed that spider communities changed through time but was limited to the dominant species from September to May. This resulted in a clear distinction of three temporal groups (with mid-November and March as thresholds), hereafter called seasons. The first threshold value was concomitant with a marked decrease in the mean daily temperature up to 7.5°C. The second threshold value did not correlate to a clear increase in the temperature but to the period where the

Chapitre 2 : Activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous climat méditerranéen

mean daily temperatures become consistently above 10°C. We did not expect clear-cut threshold values since not all spider species have the same tolerance for cold temperatures (Schaefer, 1977; Korenko et al., 2010).

A significant finding from our study is that spider activity was recorded throughout the entire winter. The percentage of dynamic traps where no spiders were sampled was very low (about 15%).

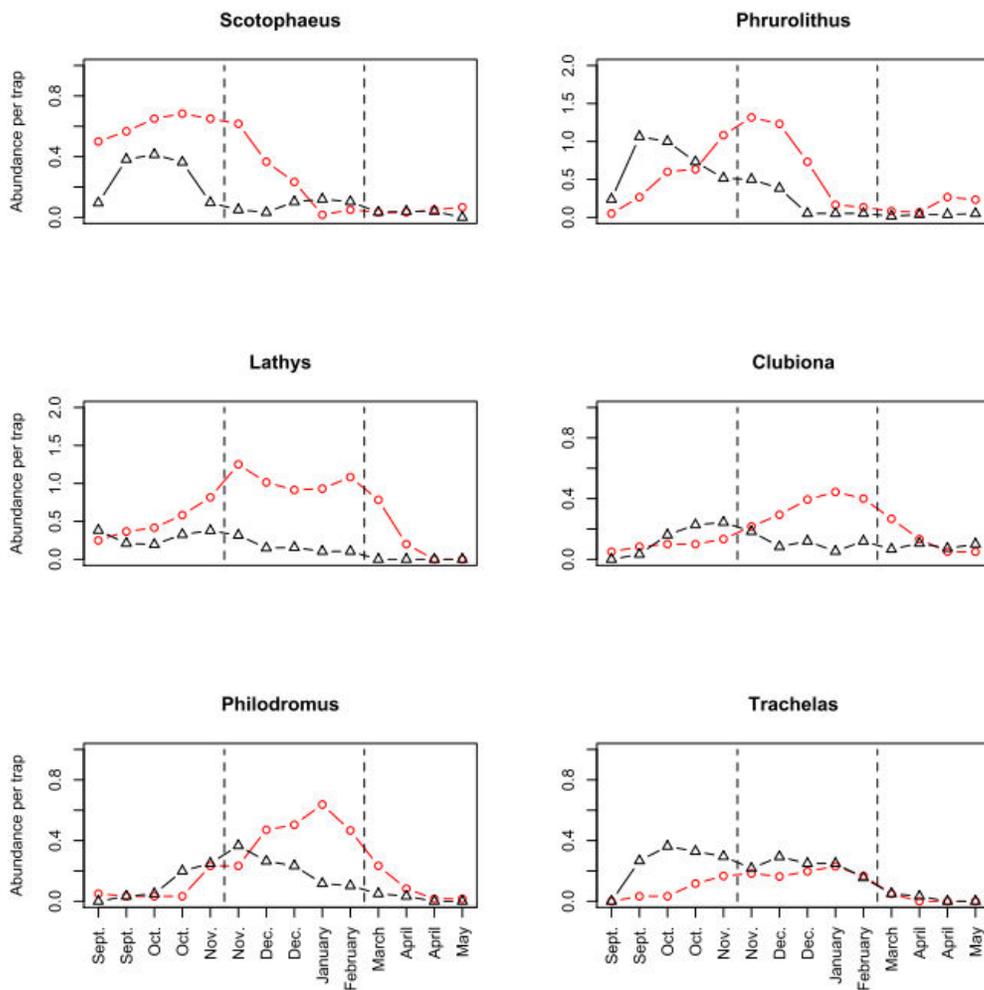


Figure 32. Mean abundance caught in dynamic (black triangle) and static traps (grey circle) for six chosen genera corresponding to spiders with a low (first row) moderate (second row) or high (third row) winter activity. Dynamic traps were repeatedly attached whereas static traps were attached once in August

During the coldest periods in January, with average daily temperatures between 2 and 5°C, the mean number of spiders was still 1.62 individuals per tree in dynamic traps. It is worth noting

Chapitre 2 : Activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous climat méditerranéen

that at this time, the spider community was still rather diversified with 16 taxa, and for three the abundance was above 10% (*Trachelas*, *Nurscia* and *Philodromidus*) and three others made up between 10 and 5% (*Lathys*, *Clubiona* and *Scotophaeus*) of total spider abundance. The overall winter abundance was much lower than in autumn with a decrease of 60% (from 6.50 to 2.56 spiders per tree) and then remained low in spring (2.21 spider per tree). During the same period, the Shannon index of diversity also decreased from 1.18 to 0.70. This contrasts sharply with the results obtained by Korenko and Pekar (2010) in central Europe where the spider community was highly dominated by three genera (*Anypaena*, *Theridion* and *Philodromus*) representing 89% of the total spider abundance. Indeed, in our study the three most abundant genera (*Philodromus*, *Phrurolithus* and *Trachelas*) accounted for only 36% of the community in winter.

Season	Abundance (per trap)	Species richness	H' [*]	J' [§]	Percentage of adults
Autumn (Sept. → mid Nov.)	6.46a (0.62)	3.97a (0.78)	1.18a (0.05)	0.73a (0.01)	11.88b (1.22)
Winter (mid Nov. → February)	2.55b (0.33)	2.43b (0.46)	0.70b (0.06)	0.51b (0.03)	11.14b (2.96)
Spring (March → May)	2.25b (0.27)	1.85c (0.21)	0.45c (0.04)	0.36c (0.02)	58.36a (16.77)

Table 1: Mean (and SE) values for the characteristics of the spider communities caught for each season in recent traps in the experimental orchard free of pesticides. Values bearing a different letters are significantly different.

* diversity index of Simpson

§ evenness index of Pielou

Horton et al., (2001) previously observed sharp declines in abundance between November and December in northwestern United States. However the abundance of active spiders was low at the end of December and these authors stopped their survey, possibly because winters are more extreme in this region. The static traps further corroborated these results and showed a regular increase in spider density from September to mid-December. Horton et al., (2001) did not provide information on the temperature in their orchards, but we can compare our observations with those from Korenko et al. in Czech Republic (2010; Figure 30) and it is clear that winter temperatures in Avignon in 2015 were much milder with a mean difference of about +7°C in December and January. These authors also determined temperature thresholds for activity of *A. accentuata* and *Philodromus* sp. They showed that these thresholds were about 1 and 4°C respectively for these two species. If these same thresholds were applied to our orchard, this would mean that at least these two species could be active throughout the entire winter.

Spiders may not be the only arthropods active in winter in orchards and indeed we observed that one of the predominant earwig species (*F. pubescens*) had a moderate winter activity (i.e. more than 25% of the catches in winter) whereas the other (*F. auricularia*) had none. These observations of the marked difference between these two species are in agreement with those made by Lordan et al. (2015) in Spanish apple orchards. The implications of this finding are not easy to determine since *F. pubescens* is known to have a more diversified feeding regime (Romeu-Dalmau et al., 2011).

4.2 Ecological significance of cardboard bands

Cardboards traps are the dominate measure for spider and earwigs activity in orchards in autumn or winter (Tamaki and Halfhill, 1968; Fye, 1985; Bogya et al., 1999). These traps allow high abundances to be observed due to the fact that they can actually act as shelters for most of the arboreal spiders that are assumed to be wintering there. However, not all spider species spend the whole winter in a resting state as recently demonstrated by Korenko and Pekar (2010) and Pekar et al., (2015). Using the protocol of Horton et al., (2001), i.e. traps sampled every two weeks, we were able to determine which spider genera were predominantly active in the trees in winter. The exact ecological significance of this trap is not easy to define since spiders may use them for different reasons: nocturnal or diurnal shelters or overwintering sites. Even in the latter case, there is evidence that some spiders use them only when the conditions become extreme

(Korenko & Pekar, 2010) and then leave them during milder days or nights. Our results cannot determine why spiders entered cardboard traps, they only prove that the spiders caught were active, even for a few hours, during the last two weeks and then moved again to find a new shelter. Nevertheless, this suggests that the abundance of spiders in late spring decreased because leaves are once again present and temperatures are mild, thus the shelters become less and less and attractive.

Some authors observed that the abundance of spiders, assessed using cardboard traps, decreased between autumn and spring and assumed that this was due to winter mortality and/or intra-guild predation (Pekar, 1999). At first glance, we also observed a great decline in spider abundance in the static traps during winter when the mean air temperatures dropped from 5 to 1°C, with on average 19.4 at the beginning of December to 9.3 spiders per trap in January (the spring decrease cannot be easily interpreted as explained above). This decrease was pronounced for spiders with no winter activity (see *Scotophaeus* and *Phrurolithus* in Figure 31). These species may have died or been subjected to intra-guild predation by spiders with intermediate or high winter activity.

Our findings also suggest that, apart from intra-guild predation, prey abundance on apple trunks may be enough to sustain spider and earwig populations during winter, although some spiders are able to starve for long periods of time. These two observations - high presence of winter-active spiders and likely presence of prey (some being apple pests such as aphid eggs) - lead us to think that the first pesticides applied in apple orchards, very often mineral oils with low selectivity (Biondi et al., 2015), should be reconsidered, especially if the sensitivities of spiders or earwigs is similar or higher than those of pests.

5 Conclusions

We believe it is time for a paradigm shift in biocontrol based on generalist predators in perennial crops (orchards, vineyards). Historically, it has been considered that during fall and winter months, when leaves are no longer present on trees, natural enemies remain inactive in a resting stage. In contrast, we demonstrated that during winter months, under a Mediterranean climate, some generalist predators, and especially spiders, are indeed mobile and active. These results complement similar studies from central Europe. Even if not directly assessed in our

study, these predators may be able to feed on the quiescent stages of some pests (aphids or psyllids for example). Moreover, some spiders with low winter-activity overwintered in remarkable quantities in the provided shelters around tree trunks. We also assume that these spiders will play an active role in biocontrol in early spring as soon as the temperatures increase or in winter if they become milder because of climate change. Our results suggest that **(i)** habitat manipulation, using cardboard shelters around tree trunks, could be an interesting way to increase biocontrol of pests overwintering in the trees and **(ii)** the systematic use of broad spectrum pesticides in early spring could prevent these generalist predators from controlling pests that are not yet in an outbreak phase. Further studies are thus required to evaluate the winter or early-spring efficiency of these natural enemies compared to pesticide application.

Acknowledgments

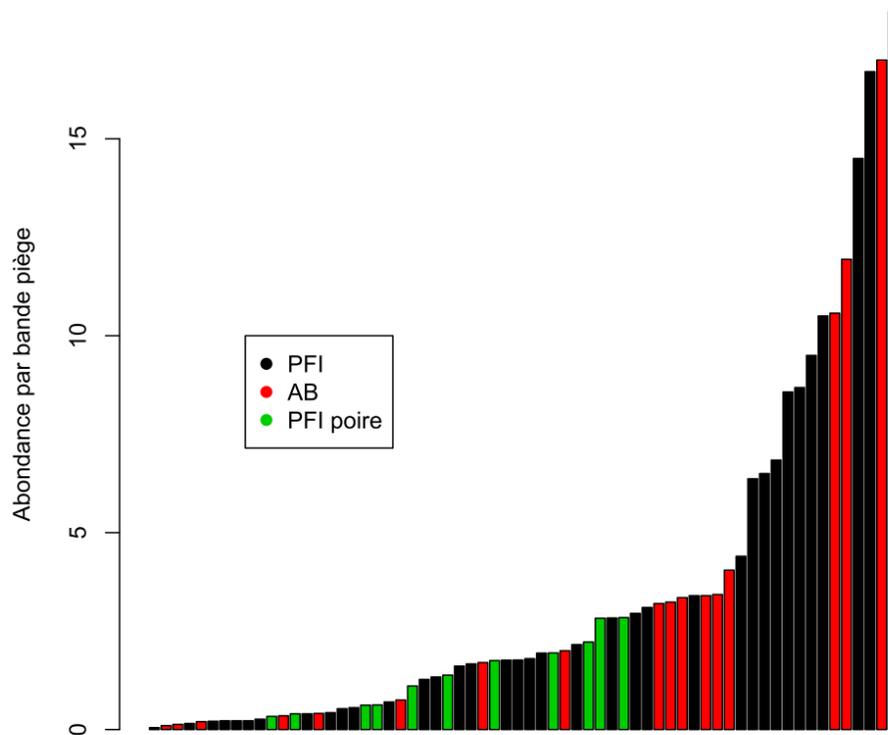
AS was supported by a scholarship from the Libyan embassy.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

(Ce chapitre est au stade des dernières relectures avant soumission à la revue *BioControl* en 2019)

Dans le cas des araignées présentes dans la canopée des vergers et qui ont un fort potentiel de régulation vis à vis des lépidoptères ravageurs, le plus connu depuis les années 80 est *C. mildei* (Mansour,1983). Il est alors intéressant de regarder la distribution de l'abondance de cette araignée dans les vergers à l'automne (en hi-ver elle n'est pas active).

Abondance de *C. mildei* en fonction de la protection phytosanitaire



Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

A la vue de ces résultats, deux constats s'imposent :

(i) cette araignée à une abondance extrêmement variable en fonction des vergers mais son abondance n'est jamais nulle ;

(ii) son abondance ne dépend pas du mode de protection phytosanitaire.

Ces constats nous ont guidés pour construire le dispositif expérimental du présent chapitre. Il est difficile, à ce stade, de comprendre quel facteurs limitent l'abondance des *C. mildei* dans certains vergers (a priori pas le mode de protection phytosanitaire et nous n'avons rien identifié parmi les caractéristiques de l'environnement proche des vergers). Notre idée est donc de tenter de transférer cette araignée d'intérêt d'un verger riche vers un verger pauvre. Le but est double : **(i)** mieux cerner les exigences écologiques de cette araignée (va-t-elle s'installer durablement dans le verger ?) et **(ii)** mettre évidences sont possible rôle dans la lutte biologique contre le ravageur lépidoptère du verger de pommiers, le carpocapse.

Résumé

Malgré le rôle de plus en plus reconnu du biocontrôle dans les cultures pérennes, il existe peu d'études sur les araignées afin d'améliorer la prédation des parasites. Dans cette étude, nous avons transféré et relâché des araignées hivernales, principalement *Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*, connues pour chasser le carpocapse, dans un verger de pommiers où leur densité était très faible. Les araignées et les carpocapses étaient ensuite évalués deux fois par an à l'aide de pièges en carton. Nous avons observé une multiplication par deux et par trois des densités de *C. mildei* et *C. leucapsis* respectivement au printemps suivant, mais les densités ont diminué à leur niveau précédent un an après la dissémination. De plus, en utilisant des abris transparents, nous avons pu suivre la dynamique des deux espèces sur une échelle de temps. Nous avons observé une dynamique bien marquée de trois (ou deux) pics pour *C. mildei* (et *C. leucapsis* respectivement). Cependant, la deuxième année après la libération, les densités des deux espèces ont significativement diminué de 57 et 39% contrairement à celles d'*Olios argelasius* et les forficules sont restés constants pendant les deux années. Les relations entre l'abondance du carpocapse et ceux des principaux ennemis naturels ont été testées au niveau de l'arbre au cours des deux années suivant la libération et ont révélé des relations significatives et négatives uniquement pour *C. mildei* uniquement et en 2016. Tous ces résultats ont montré que certaines araignées agrobiontes peuvent être transférées et relâchées dans les vergers de pommiers, mais de manière transitoire et que *C. mildei* est susceptible de réduire l'abondance du carpocaps.

Can the release of spiders in apple orchards increase the biocontrol of codling moth? An experimental study with *Cheiracanthium mildei* and *Clubiona leucapsis*

Alzubik Belkair Sadeq^{1 2}, Mazzia Christophe², Pasquet Alain³, Capowiez Yvan¹

Abstract

Despite their increasingly recognized role for biocontrol in perennial crops is, there is a scarcity of studies dealing with release spiders in order to improve the predation of pests. In this study, we transferred and released in winter spiders, predominantly *Cheiracanthium mildei* and *Clubiona leucapsis* known to prey on codling moth, in an apple orchard where their densities was very low. Spiders and codling moths were then assessed twice a year using cardboard traps. We observed a two-fold and three-fold increase of the densities of *C. mildei* and *C. leucapsis* respectively the following spring, however the densities decreased to their previous level one year after the release. Moreover, using transparent shelters we were able to follow the settlement of both species on a fine time scale. We observed a well marked three (or two) peaks dynamics for *C. mildei* (and *C. leucapsis* respectively). However the second year after the release the densities of both species significantly decreased by 57 and 39% contrarily to those of *Olios argelasius* and earwigs with remained constant during the two years. The relationships between the abundance of codling moth and those of the main natural enemies was tested at the tree level the two years following the release and revealed a significant and negative relationship only for

¹ INRA, UMR 1114 Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes, INRA/UAPV, Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 09, France

² UAPV, UMR 7263, IMBE, UAPV/CNRS/IRD, 301 rue Baruch de Spinoza, BP 21239, 84916 Avignon cedex 09.

³ CNRS, UR AFPA, Faculté des Sciences et Technologies, University of Lorraine, BP 239, 54504 Vandoeuvre les Nancy cedex.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

C. mildei only and only in 2016. All these results showed that some agrobiont spiders can be transferred and released in apple orchard but transiently and that *C. mildei* has the potential to decrease the abundance of codling moth.

Keywords: Conservation biocontrol; *Cydia pomonella*; Shelters; Earwig; Phenology; Predation.

Key messages

- Two cursorial and arboreal spiders were transferred and released using cardboard traps in an orchard where they were found at low density
- Transparent shelters were used to follow their settlement and population dynamics in the apple orchard
- An increase of their density was observed the first year after the release
- The first year, a negative and significant relationship was found between codling moth and *C. mildei* density

1 Introduction

In recent years, the use of pesticides is less and less accepted by consumers due to environmental pollution and possible harmful health effects (Droby et al., 2009). To limit pesticide use, there are different kinds of control (biological, chemical, cultural and mechanical) that can be used as tactics to achieve a sustainable production system (Karina et al., 2016) in organic or conventional production. Among these tactics, conservation biological control has gained popularity in agriculture and can be achieved through habitat manipulation within or around crops such as flower or grassy strips, hedges ... (Gurr et al., 2017).

Conservation biocontrol often implies generalist predatory arthropods (and/or parasites) that can play an important role in the suppression of pests in different crops (Landis et al., 2000). Their ability to use a variety of prey often allows them to remain in crop systems when pest numbers are low or absent (Symondson et al., 2002). Among them, spiders are common predators

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

and have been proved to be effective natural enemies of herbivorous pests in different crop systems (Riechert and Lockley, 1984; Nyffeler and Sunderland, 2003). Yet, the use of spiders in biological control dates back to 2000 years in China (Marc et al., 1999), where empirical methods yielded positive results. Indeed, the use of pesticides in rice fields has been reduced from 50% to 60% (Riechert and Lockley, 1984). Spiders are also of great importance as predators of arthropod pests in orchards for at least 60 years (Miliczky et al., 2008). The great majority of spiders feed principally on insects (Marc et al., 1999). Spiders are characterized by their ability to transfer over large distances in one generation (Burel and Baudry, 1995). Moreover, spiders are usually one of the first predators to arrive in crop fields (Weyman et al., 1995; Suter, 1999). In perennial crops (orchards but also possibly vineyards), some spiders species remained in the crops during winter and are efficient predator against pests that overwintered in the crops (Korenko et al., 2010; Alzubik et al., 2018), for example *Dysaphis plantaginea* (Boreau de Roince et al., 2013) or *Cacopsylla pyricola* (Michalko et al., 2017). In such a way, spiders may prevent pest outbreaks early in the season before the arrival of specialized natural enemies (Landis and van der Werf 1997; Wissinger, 1997). For all these reasons, spiders have been often presented as one of the best candidates to play a critical role in pest suppression (Hogg et al., 2010; Cahenzi et al., 2017).

Codling moth is the main pest in apple orchard in SE of France (Marliac et al., 2015b). There are new tools to decrease its presence, such as mating disruption, viruses, nematodes or netting systems (Simon et al., 2011; Jones et al., 2016). Some generalist predators are known to be able to feed on codling moth. In particular eggs and larvae can be predated by earwigs, predatory bugs and some cursorial spiders (Simon et al., 2007). These cursorial spiders are *Anyphaena accentuata*, *Cheiracanthium mildei* and some *Clubiona* sp (Marc et al., 1997; Unruh et al., 2016). They belong respectively to the following families: Anyphaenidae, Eutichuridae and Clubionidae. In SE of France, only the two last taxa are found in large abundance but their mean abundance is highly variable depending on the orchard. *C. mildei* is well known since the 70's to be one of the dominant arboreal spiders in mediterranean orchards (Mansour et al., 1983). In the US, this species is invasive and very abundant in orchards (Bajwa and Aliniazee, 1994; Miliczky and Calkins, 2002) or vineyards (Hogg et al., 2010). A close species is as well present in cotton crops where it was shown to predate lepidopteran eggs and larvae (Pfannenstiel, 2008a; Perez-Guerrero et al., 2013). *Clubiona leucapsis* is also an arboreal spider that is able to prey on aphid

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

and or lepidoptera larvae (Marc and Canard, 1997). These authors suggested that its abundance and potential role in biocontrol may be underestimated because they are not easy to sample since hidden in their silk refuges during the day. Marc (1993) released *Clubiona corticalis*, another *Clubiona* species current in trees, sampled in a forest in an apple orchard and observed a 25% in the damages induced by *Cydia pomonella* a few months later.

In conservation biocontrol, habitat management has to be applied to promote natural enemies (Gurr et al., 2017). A classical example is the provision of shelters that are often viewed as vegetation area (field margins, banks and hedges) in the case of annual crops that faced recurrent disturbances (rotations). However accurate knowledge of the effects of these different managements for every predator remains scarce, partly because these effects are not only local but also entangled with effects occurring at higher spatial scales (landscape) and also because there are a great number of possible natural enemies that can interact through for example Intra Guild Predation. An alternative is to directly release the desired natural enemies, based on an a priori knowledge of their efficiency against the main pests, and then to tailor specific managements, if known to increase their settlement, survival and reproduction.

In this study, we use cardboard traps around the trunk of trees in an apple orchard to transfer spiders from a orchard, rich in spiders known to feed on lepidoptera to another poor in spiders. We had two main objectives in mind: **(i)** assessing the feasibility and efficiency of the release (will transferred spiders survive and settle in the orchard?) and **(ii)** assessing the effects of the increase in spiders on the abundance of *Cydia pomonella* and the duration of these effects. For this, we use transparent shelters, which allow us to observe the activity of spiders (and earwigs) within the orchard. Moreover, this study will provide information on the temporal activity of generalist predators and on the possible role of spiders as biocontrol agents.

2 Material and Methods

In a preliminary survey of 68 organic or conventional apple orchards in fall of 2015 around Avignon, we computed, on 20 corrugated cardboard traps per orchard, mean (+/- SE) abundances of 3.32 (+/- 0.58) *C. mildei* and 0.64 (+/- 0.21) *C. leucapsis* per tree compared to only 0.018 (+/- 0.009) *A. accentuata*. Interestingly, we found no orchard without *C. mildei* and only 6 orchards on 68 without *C. leucapsis*. However, their abundances were very variable over

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

the orchards. For example, the mean abundance of *C. mildei* ranged from 0.05 to 18.22 individuals per tree with 26 orchards with abundance below 1 individual per tree.

2.1 The source orchard

The source orchard is an old Gala orchard under organic rules for more than 15 years located in Mollèges 20 km South of Avignon and was chosen due to its great abundances of spiders in general and particularly of *C. mildei*. In this orchard, corrugated cardboard band were installed at the beginning of September to provide shelters to overwintering spiders (Marc ou Horton) on 80 apple trees. The first of December 2015, the traps were gently removed, making care not to disrupt the silk shelters, and stored in plastic bags. Sixty-three of them were randomly chosen and installed in the target orchard around the trunks of 63 apple trees. The last seventeen ones were transferred and open in the laboratory to estimate the abundance and diversity of the released spiders. All the spiders found in these traps were conserved in 70° ethanol and identified at the genus level (except for the some rare adult ones) using the keys of araneae Version 08.2018 website (<https://araneae.nmbe.ch/>). *C. mildei* is the only arboreal species of the genus present in the region. However, there are several species of *Clubiona* that can be found in orchards in South of France. Since 100% of the adults found in the source and target orchards (during the present study but also in other studies) were *C. leucapsis*, there is reasonable evidence to assume that most if not all the *Clubiona* found in the present study were from this species.

2.2 The target orchard

The target orchard is located at INRA of Avignon (South-East of France) and is an experimental apple orchard (Golden cultivar) free of pesticides for more than 5 years. The abundances of spiders in this orchard were surveyed using cardboard traps twice a year (in March and in November) since 2014. We already known that the abundance of *Cheiracanthium mildei* in this orchard was low to very low (with less than 0.2 individuals per tree) compared to the regional level.

The 0.25 ha orchard has 10 rows and around 160 trees. The orchard was divided in 4 quarters and the release occurred in two opposite quarters excluding the 5th and 6th rows. In these 2 quarters, the corrugated cardboards bands from the source orchard were gently wrapped

and secured using adhesive tape around the trunks of every tree at a height of 30-40 cm above ground level. The orchard is surrounded by a *Cypressus* hedge-row (of approximately 10 m high and 2 m wide) in the North and in the South, arable land in the West and a small road and buildings in the East. The inter-row is in spontaneous grass and was mowed twice a year.

2.3 Monitorings of arthropods

It is well known that, depending on their ecology, not all traps managed to catch the spiders inhabiting an orchard (Miliczky et al., 2008). In brief, corrugated cardboards bands are efficient to catch nocturnal or overwintering arthropods whereas beating trays preferentially catch active and diurnal ones (Marc et al., 1999). Regarding *C. mildei*, this nocturnal spider is regularly found in cardboards traps during winter (i.e. from November to March) and also but in lower abundance in spring or summer (personal observation). Moreover, beating trays is not very efficient in spring and summer since this spider shelters in silk refuges protected in rolled leaves during the days (pers. obs.). We thus decided to use another kind of tool to be able to follow this spider (and other arthropods) in the orchard. In its PhD, Marc (1993) used shelters made of pieces of bamboo stem to provide shelters to *Clubiona corticalis* to successfully survey populations in an apple orchard. We designed a similar kind of shelter but modified to make it possible to look at the presence of arthropods without disturbing them. We used transparent plastic tubes (diameter = 1 cm; length = 5 cm) around which we wrapped corrugated cardboards fixed with adhesive tape. These tubes were then fasten to large apple branch using wire taking care that no rain could enter the traps (downward opening).

We thus used two trapping devices to survey the populations of spiders and arthropods within the target orchard: **(i)** classical corrugated cardboard traps around the tree trunks and sampled twice a year (March and November) and **(ii)** home-made transparent shelters observed every week (spring, summer and fall) or every two weeks (winter). It should be noticed that only the first kind of traps enables the comparisons of spider abundance before and after the release. When cardboard traps were used, these traps were sealed in a plastic bag on which the tree number was noted; they were opened in the laboratory, the spiders and earwigs were counted, identified alive using a binocular and later released on the ground at the bottom of the corresponding tree in the orchard.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

Corrugated cardboard traps were exposed one month (March) or two months (November) before being sampled. At each sampling date, 40 trees were randomly chosen (4 in each row). In February 2016, if the chosen tree had received a cardboard trap in December 2015 (i.e. during the release), a new cardboard trap was added to ensure that only active spiders will be sampled in March 2016. The cardboard traps used for the release were retrieved later in summer.

Three transparent shelters per tree were installed in early spring of 2016 in the whole target orchard (n= 540) and observations in shelters were carried out from 6th of April 2016 to the 30th of November 2017. At every observation date, the inhabitants of each shelter were recorded by gently removing the surrogated cardboard around the shelter. At very rare exceptions, only earwigs and spiders were observed inside the traps. It was possible to identify spider to the genus level by naked eye (without perturbation even in presence of a silk refuge) but some of them were sampled in the field and observed under a binocular under laboratory conditions to validate the identification (especially for spiders of the Araneidae family).

2.4 Codling moth abundance

Codling moth abundance per tree was classically surveyed using corrugated cardboard traps around the tree trunks of every apple tree of the target orchard. Traps were let for one (June) or two months (Novembre). These samplings were carried out at the end of June to estimate the first generation and in November to estimate the third generation of codling moth. The second date enabled the sampling of spider and codling moth at the same time. Abundances of *C. mildei* and *C. leucapsis* in cardboard traps were very low in June. Spiders and insects found in the traps were released on the ground at the bottom of the corresponding tree in the orchard.

2.5 Statistical analysis

We used generalized linear models (GLM) to assess differences in *C. mildei* or *C. leucapsis*, abundances in cardboard traps before and after the release. The analysis was done separately on spring and autumn abundances. Due to overdispersion of the data, we used a negative binomial as a error distribution and not Poisson. This provided the best model as assessed by computing AIK and graphical inspection of the residuals.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

We also used GLM to compare the abundance of the main natural enemies observed in the transparent shelters (*C. mildei*, *C. leucapsis*, *O. argelasius* and earwigs) between 2015 and 2016. For this, we selected one date every year corresponding to each abundance peak. For the same reasons, a negative binomial was used as error distribution in the GLM, except for earwigs whose abundance and frequency were higher.

To study the link between codling moth abundance (in cardboard traps) and the abundance of the main natural enemies (*C. mildei*, *C. leucapsis* and earwigs), we used a GLM with negative binomial error distribution. To increase the range of possible values for spiders (that are rarely several in one shelter), and to limit the temporal effects (one spider observed on a tree may have been there only on transit), we considered two corresponding dates before the sampling of cardboard traps and summed the occurrences for each tree. It means that even if there were only 3 shelters per tree, the abundance of each spider species ranged from 0 to 6 (since two dates were summed up). We also summed the abundance observed in the shelters to the one observed in the cardboard traps, this had minor influence for spiders but greatly increased the abundances of earwigs per tree. (Figure 33), *O. argelasius* was removed from the model due to too low abundances. We fitted separated models for (2016 and 2017). Each year, data for each season were merged.

All computations were done using R software.

3 Results

3.1 Spiders within the transferred traps

The mean abundances for the main spider species found in the traps sampled in the source orchard can be found in the Tableau 5. Two species were found at high density: *C. mildei* and *C. leucapsis*, with more than 10 spiders per trap. Then *Pseudeuphrys erratica* and *Phrurolithus festivus* was found at a medium density (between 5 and 10) and other species were found at low density, i.e. below one ind. per trap. No *Olios argelasius* was found in this orchard. The mean (and SE) abundance of earwigs were 0.32 (0.41) individuals per tree.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

Species	Family	Mean abundance (SE)
<i>Cheiracanthium mildei</i>	Eutichuridae	17.12 (3.67)
<i>Clubiona leucapsis</i>	Clubionidae	12.10 (1.75)
<i>Pseudeuophrys erratica</i>	Salticidae	7.42 (1.76)
<i>Phrurolithus festivus</i>	Phrurolithidae	8.10 (1.79)
<i>Philodromus</i> sp.	Philodromidae	1.23 (0.28)
<i>Aphantaulax</i> sp.	Gnaphosidae	0.74 (0.15)
<i>Zelotes</i> sp.	Gnaphosidae	0.55 (0.22)
<i>Heliophanus</i> sp.	Salticidae	0.61 (0.18)
<i>Scotophaeus</i> sp.	Gnaphosidae	0.35 (0.17)
<i>Dictyna</i> sp.	Dictynidae	0.21 (0.09)
<i>Ozyptila</i> sp.	Thomisidae	0.45 (0.23)
<i>Nurscia</i> sp.	Titanocisae	0.29 (0.12)
<i>Ballus</i> sp.	Salticidae	0.23 (0.12)

Tableau 5: Mean abundance (+SE) of the main spider species present in the organic source orchard trapped using corrugated cardboards (n= 17) in November 2015.

3.2 Abundance of *C. mildei* and *C. leucapsis*. in the target orchard before and after the release (carboard traps)

The mean abundances of *C. mildei* was close to or below 0.1 individual per tree in spring and below 0.2 ind. per tree in fall at the noticeable exception of spring 2016, the first sampling after the release (Figure 34). At this date, the abundance peaks to about 0.3 ind. per tree and was significantly three times higher than the abundances observed in spring of 2014, 2015 and 2017 ($p < 0.05$). No significant difference was observed in fall.

Regarding *C. leucapsis*, we observed very low abundances in spring before the release and then a huge and significant increase in spring 2016 four months just after the release with a peak at 0.45 ind. per tree ($p < 0.05$). In spring 2017, the abundance of *C. leucapsis*, was significantly reduced (to 0.1 ind. per tree) compared to spring 2016 but the abundance remained higher than before the release albeit not significantly. The trends were not as marked in fall since we did not observe a significant increase between fall 2015 and fall 2016 even if values of fall 2015 were significantly higher than fall 2014 and 2017 with on average, about 0.1 ind. per tree.

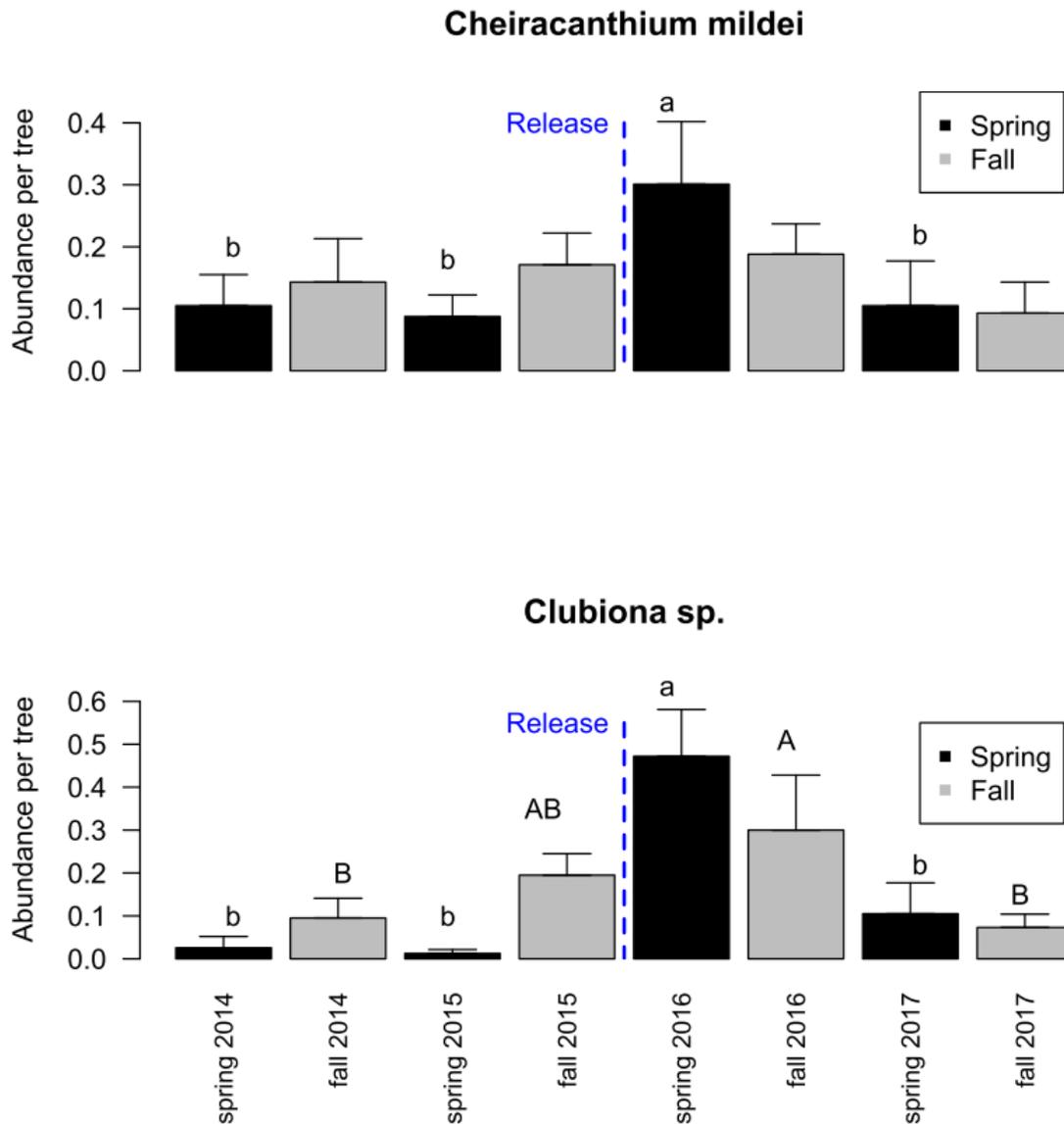


Figure 34. Spring (red) and fall (green) mean (and SE) abundance of *Cheiracanthium mildei* and *C. leucapsis*. per tree in the experimental orchard from 2014 to 2017 (n= 40).The release occurred in December 2015. Bars bearing sharing a letter are not significantly different (each season was tested separately).

3.3 Abundance of spiders and earwigs after the release (transparent shelters)

The abundance of *C. mildei* showed three well separated peaks both in 2016 and in 2017 (Figure 35) in April, June and September/October. In 2017, the three peaks occurred one to three weeks earlier than in 2016. For the second peak, in more than 30% of the cases, a *C. mildei*

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

female was inhabiting the shelter with eggs or juveniles. The intensities of the three peaks was significantly lower in 2017 compared to 2016 with respectively 1.35 vs 0.58, 0.61 vs 0.37 and 0.35 vs 0.13 in. per tree respectively, i.e. a significant decrease of 57, 39 and 53%. (Tableau 6).

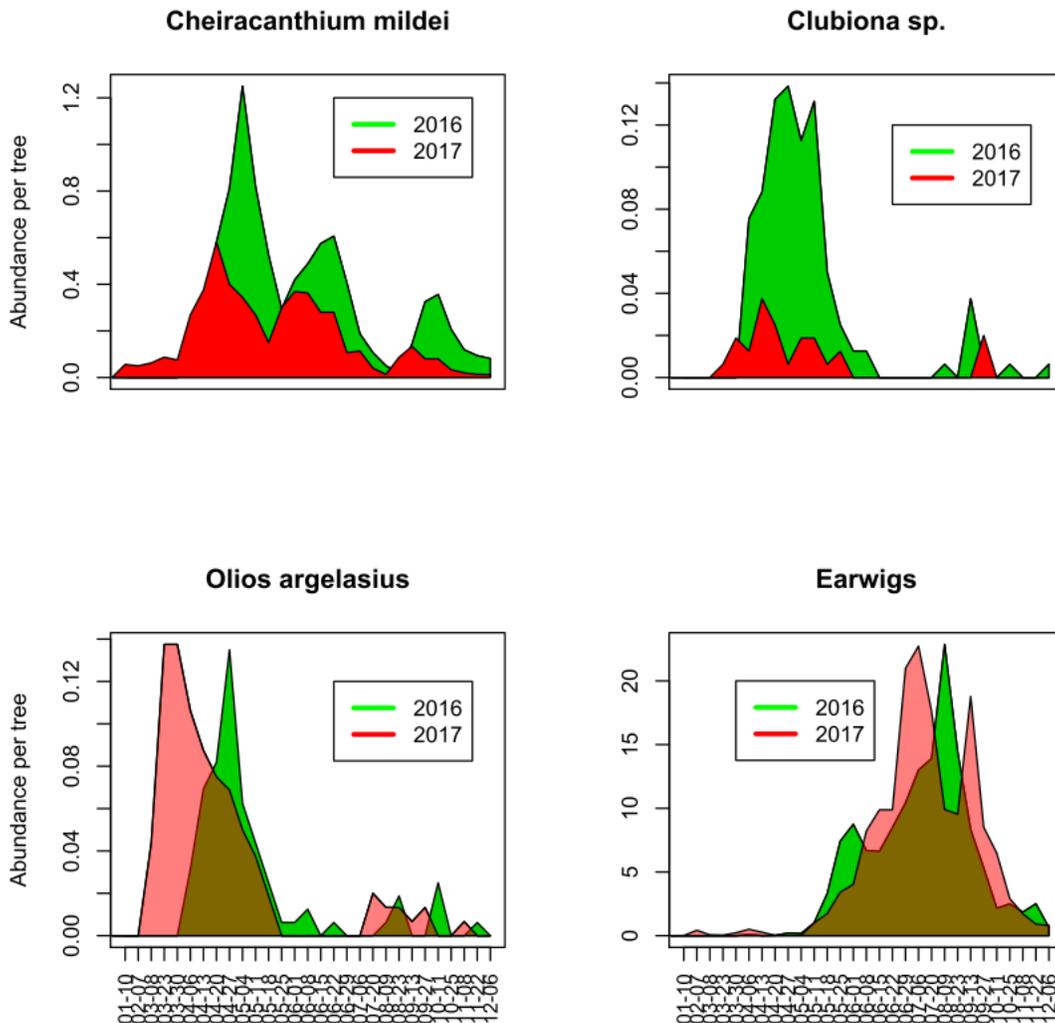


Figure 35. Mean abundance per tree of *Cheiracanthium mildei*, *C. leucapsis*., *Olios argelasius* and earwigs ($n = 160$) observed in plastic shelters in 2016 (red) and 2017 .

It should be noticed that in some cases, two *C. mildei* were indeed observed together in one shelter but in clearly separated silk refuges. The phenomena was observed in the three 3 peaks, in 7.1, 2.7 and 1.5% of the traps in 2016 and in only in 1.9, 1.0 and 0.2% of the traps in 2017.

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

Taxon	Peak number	Date	P-value	Error distribution
<i>Cheiracanthium mildei</i>	1	April	0.030 *	Negative binomial
	2	June	0.0028 **	Negative binomial
	3	Sept./Octobre	<0.001 ***	Negative binomial
<i>Clubiona</i> sp.	1	April	0.0021 **	Negative binomial
	2	Septembre	0.41	Negative binomial
<i>Olios argelasius</i>	1	March/April	0.13	Negative binomial
	2	July/August	0.93	Negative binomial
Earwigs	1	July/August	0.95	Gauss

Tableau 6: Results of the GLM comparing maximum abundances in the transparent shelters for each main taxon and each peak between 2016 and 2017 (the two years following the release).

We observed qualitatively the same trends for *C. leucapsis*, but with only two peaks with very different intensities: one large in April and a small one in August (Figure 35). The difference between the two years was highly significant for the first peak with a decrease from 0.23 to 0.04 ind. per tree.

For *Olios argelasius*, we observed the same pattern than *C. leucapsis* with two very different peaks, one large in March/April and a small one in August/September. However the striking difference with *C. leucapsis* and *C. mildei* lies in the fact that the peaks were not significantly different in 2016 and in 2017.

Earwigs exhibited with a large and wide peak, albeit not unimodal in 2017, from May to December. The maximum abundance was very high (about 20 earwigs per tree) and much higher than spider abundance. In the same way than *O. argelasius*, the peaks for earwigs not significantly different in 2016 and in 2017.

Even if the abundances observed in the shelters were relatively high, one should notice that the maximal number (peak 1 of 2016) of *C. mildei* and *C. leucapsis* observed in the shelters

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

were 208 and 38 individuals respectively. This is higher than the estimation given using the cardboard traps after the release in spring of 2016 (about 50 *C. mildei* and 75 *C. leucapsis*). This is however much lower than the total number of spiders introduced in December of 2015, i.e. 1071 *C. mildei* and 756 *C. leucapsis*. This is also much higher than the computed maximal number of these species observed in the orchard before the release using the cardboard traps (about 15 *C. mildei* and 8 *C. leucapsis*).

3.4 Relationships between arthropods in shelters and codling moth

The GLM applied to study the relationship between codling moth abundance and natural enemies abundance at the tree level indicated that only *C. mildei* had a significant and negative influence on codling moth in 2016 (Tableau 7). Even if the estimate was low (-0.25), the more *C. mildei* were found on a tree, the less codling moth was found on the same tree. In 2017, no significant relationships was found.

Year	Variable (abundances per tree)	Estimate	SE	z-value	P
2016	<i>C. mildei</i>	- 0.247	0.165	- 3.648	<0.001
	<i>Clubiona</i> sp.	9.281	0.067	0.083	0.40
	Earwigs	0.006	11.125	1.774	0.07
2017	<i>C. mildei</i>	0.084	0.111	0.755	0.45
	<i>Clubiona</i> sp.	- 0.024	0.0006	-0.004	0.99
	Earwigs	0.059	0.039	1.486	0.14

Tableau 7: Summary of the GLM model (negative binomial) linking codling moth abundance to the abundances of main natural enemies observed at the tree level. Abundances of natural enemies in the shelters (2 dates considered) and in the cardboard traps were summed. Data for each year of observations (2016 and 2017) were analysed separately.

4 Discussion

4.1 Enhancing spider populations in crops

Despite their increasing recognized role in biocontrol of some pests, examples of releases of spiders in crops remain scarce. This could be due to the fact their rearing under laboratory conditions is notoriously difficult (Nyffeler et al., 1987) and for example some authors suggested to gather egg sacs of selected spiders in natural places and to transfer them to agricultural lands (Kayashima, 1967). We only found a few studies where spider were released or transferred. Carter and Rypstra (1995) manually enhanced spider abundance in soybean, at least 2 years during the 3-year survey, and analyzed the damages in control, depletion or enhanced plots. Another example can be found in the PhD of Marc (1993) where the authors transferred *Clubiona corticalis* from forests to apple orchards in order to control lepidopteran pests. They used bamboo stems drilled with holes where *C. corticalis* can shelter and observed a 25% decrease in the damage made to apples. The last example is a non-replicated study (Kayashima, 1961) who released 45 000 *Oxyopes sertatus* in a forest and observed a 50% decrease in the damages due to a leaf-fly. Other attempts to increase spider abundance were based on habitat manipulation (Gurr et al. 2017) to enhance spider abundance with for example, the presence of mulches (Riechert and Bishop, 1990), flower strips (Marko and Keresztes, 2014) or corrugated cardboards located around the tree trunks in orchard (Miliczky et Horton, 2005; Isaia et al. 2010).

4.2 Survey and temporal dynamics of the released spiders

Because, to our knowledge, this is the first time spiders were released, we had no a priori idea on their survival or their escape behavior (especially because they were released in a orchard where they were, before the release, in low abundance). It was thus of importance to find a way to observe their settlement and to be able to assess their abundance on a short time scale. This task is even harder in the case of *C. mildei* and *C. leucapsis* since both these spiders are nocturnal and are hidden in silk refuges during the day making them difficult to catch with D-Vac or beating trays. Corrugated cardboards traps are more effective to sample these spiders assuming they build their refuges within the traps (Alzubik et al., 2018). However, the efficiency of this traps vary according to seasons for *C. mildei* and *C. leucapsis* probably in link with their

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

phenology and the phenology of apple trees. We had high capture rates in early spring and in late autumn (pers. obs.) and this may be due to the fact that no big leaves are present in March in the orchards and that in late fall, spiders are looking for hibernation shelters. In late spring and summer, *C. mildei* is often found in rolled apple leaves whereas *Clubiona* species are often hidden under the bark (Marc et al., 1999). Another disadvantage of cardboard traps is that their opening represent a stress for spiders whose refuges are then repeatedly broken.

Taking up the idea of Marc (1993) who showed that *C. corticalis* was able to colonise pieces of bamboo stems, we used tubes but transparent ones in order to be able to survey their occupancy without destroying silk refuges. These tubes were wrapped with small pieces of corrugated cardboard in order to keep them in the dark. We could not determine the proportion of the released (or naturally present) spiders that were attracted in our traps. We have seen, but rarely, some *C. mildei* in rolled leaves whereas all the three traps of a tree were not occupied. Our survey technic enabled a good assessment of the spider dynamics but perhaps not of the genuine abundances within the orchard. This idea is further reinforced by the fact that the patterns of trap occupancy were vary variable with time during the season with well marked peaks, three for *C. mildei* and two for *C. leucapsis*. First we have to notice that these spiders are semelparous (Costello and Daane, 1995). The largest peaks occurred at the same time for both species (end of April and beginning of May in 2016 and a bit sooner in 2017). This occurred at the end of the flowering periods when apple leaves are still small and not well developed. We thus assumed that, at least for *C. mildei*, it was more easy to colonize our shelters that to find a large leaf. The second peak of *C. mildei* (end of June in 2016 and beginning of June in 2017) is easier to interpret since most of the observed *C. mildei* were in the shelters with eggs and then spiderlings at these dates (data not shown). This means that the shelters were specifically colonized by mothers that were looking for good conditions (climatic or defense). It is noteworthy that the second peak represents 45% of the first peak, even if the initial sex-ratio of this species is unknown, most of the males were or dead or not looking for shelters in June. We did not observe *Clubiona* with eggs or spiderlings in the shelters. The last peaks of both species (in October for *C. mildei* in 2016 and end of September in 2017 or September for *C. leucapsis* in both years) occurred when air temperatures greatly dropped in fall in South-East of France. This may be the beginning of the hibernation process. If true, this also means that the shelters represented good

conditions in fall but not anymore in winter since the abundance of both species greatly dropped in the shelters in December. The second peak of *Clubiona* is very small compared to the first one whereas for *C. mildei*, it represents 26% of the first peak. The information of the both the phenology and the abundance of some spider species is scarce, however Costello and Daane (1995) noticed two peaks (in May and July) of adults for *Cheiracanthium inclusum* in vineyards in the USA, a species closely related to *C. mildei*.

The two released spider species were not the only inhabitants of the shelters but were the main spider taxa found here with 81.3% of the catches. *Olios argelasius* was also found in the shelters but at much lower density and more rarely some Salticidae and Araneidae were also observed. Compared to the whole spider community inhabiting this orchards (Alzubik et al., in press), this is a low number of taxa. This means that this kind of shelters is not adapted for all spiders and indeed only the largest ones were observed in link with the relativey large opening of the shelter.

One question remained unanswered: where the transparent plastic tubes only a tool to observe the spiders or did they enable a better spider survival by providing ad-hoc shelters? The role of the traps is always a bit ambiguous since for example, corrugated cardboard traps located around the shelters to assess hibernating spider communities can also locally increase the abundance of spiders (Isaia et al., 2010).

4.3 Efficiency of the release of spiders and their effects against *C. pomonella*

We had observed significant increase in *C. mildei* and *C. leucapsis* abundance just after the release, i.e. in spring of 2016. However, no difference was then observed at the following dates and thus in 2017. At best, it means that we manage to double and triple the populations of *C. mildei* and *C. leucapsis* respectively for 6 months in the target orchard. This is further corroborated by the temporal dynamics of the inhabitants of the transparent plastic shelters. The abundance of earwigs and *Olios argelasius* remained the same in 2016 and 2017, only the dates of the peaks were gently shifted. In contrast, we observed sharp decline in the maximal

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

abundances of *C. mildei* and *C. leucapsis*, between 2016 and 2017. The quantitative effects of the release lasted between 6 months and one year. This means that if this method is being adopted for orchards that are poor in codling moth-effective spiders, this release is not an inoculation biocontrol but rather a biocontrol by augmentation that should then be repeated over time. Since no rearing of these spiders is yet available, the easier procedure is to carry out a release every year in autumn when the spiders are hibernating in large numbers in cardboard traps (Alzubik et al., 2018).

This method will cumulate two positive effects on spider abundance. First, it is simply a release method useful to transfer spiders from an orchard to another like it is already done for earwigs between soft fruit orchards, where earwigs can be pests at the end of the season, to pome fruits orchards where they are good generalist natural enemies (Laget et al., 2015). The idea behind the method is that the origin orchard is already full of spiders and that there is no risk of diminishing their densities. This assumption can be done for *C. mildei* which produce a large number of hibernating subadults in many orchards, presumably much more than the carrying capacity of these orchards indicating that not all of them survive and reproduce there. Secondly, this method is at the same time a simple habitat manipulation since the presence of cardboard traps offer some refuges for a lot of spiders and among them *C. mildei* and *C. leucapsis*. There is no proof that the survival or fitness of these spiders is increased but experimental manipulation indicated that the presence of these traps has the potential to increase the predation of some orchards pests, such as *C. pomonella* as proven by Issaia et al (2010) in an Italian apple orchards or *Cacopsylla pyricola* as observed by Michalko et al., (2017) in Czech pear orchards.

The relationships between *C. pomonella* abundance in each tree and the abundance of the generalist predators assessed both with cardboard traps and plastic shelters indicated a significant and negative relationships between *C. mildei* and this pest only in 2016, i.e; the first year after the release. No significant relationship was detected anymore in 2017. None of the other main predators (*C. leucapsis* and earwigs) had a significant effect in 2016 and 2017.

However these results were obtained in an experimental orchard free of pesticides and thus hosting great number of codling moths. These results are thus to be validated in a commercial orchards where codling moth densities will be much lower (this may not be a problem for such

Chapitre 3 : Lâcher et suivi de deux espèces d'araignée (*Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucapsis*) dans un verger de pommiers et étude des effets sur l'abondance du carpocapse

polyphagous predators) and where a lot of pesticides are applied every year. The sensitivity of *C. leucapsis* and *C. mildei* to modern pesticides is not well known but there are some points that make us optimistic about their tolerance to pesticide use. First of all these species are nocturnal and shelter in silk refuges during the day, they are then not immediately exposed to pesticides. Then, we have observed great abundances (i.e. >10 individuals per tree) of *C. mildei* in conventional orchards in South-East of France and Costello and Daane (1995) did the same observation in Californian vineyards in the US. Mansour (1984) observed that a population of *C. mildei* became resistant to Malathion in citrus orchards.

Discussion générale

Dans un contexte global d'une forte demande sociale pour la mise en place de modes de production plus respectueux de l'environnement et de la santé humaine, il est primordial de trouver des solutions menant à une baisse de l'usage global des pesticides. Cette demande sociétale est très grande en ce qui concerne les produits frais et en particulier les fruits. La prise de conscience de la problématique de certains ravageurs étant croissante, la mise au point de solutions alternatives devient nécessaire. En effet, pour réduire les traitements phytosanitaires et leurs impacts il faut développer des moyens de lutte alternatifs contre les ravageurs ou améliorer les moyens déjà existants. La lutte biologique présente un intérêt réel comme moyen de lutte alternatif contre les ravageurs. Cette méthode consiste en l'utilisation des organismes vivants qualifiés de prédateurs/auxiliaires pour lutter contre des pestes/ravageurs des cultures. La lutte biologique a fait ses preuves pour certaines cultures. Cependant, des questions critiques restent d'actualité comme par exemple la capacité de maintien des populations introduites au moyen d'aménagement du paysage. Au cours de cette thèse, nous avons tenté d'apporter quelques éléments de réponse en menant des expériences dans le cadre de la lutte biologique en vergers de pommiers dans le sud-est de la France. Les pommiers très présents dans cette région possède un indice de fréquence de traitement élevé (environ 25 IFT par an) et constitue donc un modèle d'expérimentation idéal dans le cadre du plan national Ecophyto.

La lutte biologique par conservation a principalement été étudiée dans des systèmes de culture céréalière (Letourneau et al., 2009). Or le fonctionnement de ces agro-écosystèmes, hébergeant des réseaux trophiques simples est radicalement différent de celui de notre modèle d'étude, le verger de pommier. En effet, il s'agit d'un milieu pérenne qui présente plusieurs strates de végétation, la strate herbacée plurispécifique et la strate arborée mono-spécifique composée de pommiers. Cette culture se caractérise aussi par un temps de production avant récolte très long car d'au moins 6 mois entre la floraison et la récolte. Les ravageurs de ces cultures doivent donc être régulés au sein d'un réseau complexe d'espèces associées au verger et sur plusieurs saisons.

Nous nous sommes intéressés aux araignées en tant que prédateurs auxiliaires généralistes de ravageurs du pommier comme le carpocapse ou puceron cendré. Notre objectif était de savoir

si en manipulant des populations d'araignées par transfert d'une parcelle à une autre, nous pourrions les maintenir dans le temps d'une année sur l'autre et ensuite d'évaluer, dans ces conditions, le service rendu par les araignées dans le cadre de la lutte biologique par conservation. Nous considérons l'usage d'abris, au delà d'un outil permettant l'observation, comme un aménagement technique permettant de sédentariser les araignées sur les arbres, même si cet aspect n'a pas pu être formellement démontré dans cette thèse.

Cette thèse a permis d'apporter quelques éléments de réponse en relation avec cette problématique en abordant trois axes principaux :

- 1) Mise en évidence de l'effet des pratiques et de l'environnement proche des vergers de pommiers dans les Sud de la France sur la composition des espèces d'araignées, et ce durant deux périodes clés de l'année, à savoir l'automne et l'hiver.

Ainsi, dans le premier chapitre, nous avons étudié les effets des facteurs locaux et de l'environnement sur les araignées dans les vergers de pommiers. Nous avons considéré comme facteurs locaux les types d'habitats semi-naturels autour des champs échantillonnés. Nous avons notamment étudié l'importance relative des variables environnementales pouvant influencer les araignées dans la canopée de pommiers dont l'influence des pesticides.

- 2) Analyse de l'activité temporelle des araignées en hiver pour les pommiers sous un climat méditerranéen au sein d'un verger expérimental.
- 3) Caractérisation de l'efficacité du transfert et du lâcher de *Cheiracanthium mildei* et *Clubiona leucaspis* dans un verger expérimental et observation de l'effet de ce lâcher sur la présence du carpocapse.

1 Facteurs expliquant la présence et l'abondance d'araignées

1.1 Effet des pesticides

Les araignées sont considérées comme très sensibles aux pesticides non spécifiques (Cárdenas et al., 2006). Les effets des pesticides sur la communauté des araignées sont déjà connus dans d'autres cultures (Bostanian et al., 1984; Pekár, 2012). Ceci peut être expliqué par le fait que les pesticides entraînent une réduction de la capacité de capture des proies chez les araignées (Peng et al., 2010). Les araignées, en tant que consommateurs secondaires, sont

particulièrement exposées à un niveau élevé de toxines environnementales et leur capacité de détoxification dépend de la stratégie de chasse (Babczynska et al., 2006) et de la manière dont les araignées entrent en contact avec des substances chimiques (Pekár et Haddad, 2005). Les vergers biologiques commerciaux du sud-est de la France sont une culture fortement traitée avec, en moyenne, 25 pesticides appliqués chaque année (Sauphanor et al., 2009; Marliac et al., 2015a). Des analyses au genre ont montré que certaines araignées n'étaient pas sensibles aux pesticides. En effet, les abondances étaient plus élevées en vergers PFI qu'en vergers AB pour *P. erratica* (Salticidae), *N. albomaculata* (Titanoeidae) et *C. mildei* (Eutichuridae). Ceci pourrait s'expliquer par une certaine tolérance aux pesticides de ces trois espèces d'araignées. D'autres espèces telles que *Trachelas* sp (Trachelidae), *Clubiona leucaspis* (Clubionidae) et *Scotophaeus* sp (Gnaphosidae) étaient au contraire plus abondantes en vergers AB qu'en PFI.

1.2 Effet de l'environnement proche (haies, parcelles avoisinants,...)

Les araignées peuvent utiliser des zones adjacentes non cultivées comme sites d'hivernage (Öberg et al., 2007) et donc les marges des champs pourraient accroître l'abondance et la diversité des ennemis naturels dans les vergers de pommiers (Levert et al., 2016). Dans les vergers, on sait que les communautés d'araignées épigées sont sensibles aux pesticides (Pekar, 2012) et à la fréquence de tonte (Horton et al., 2003). En outre, un nombre croissant de publications ont montré que certaines caractéristiques du paysage, telles que l'hétérogénéité du paysage ou la présence de haies, influencent les communautés d'araignées (Schmidt et al., 2008; Garratt et al., 2011). Dans cette étude, nous avons montré que l'effet de l'environnement proche reste faible dans les vergers de pommiers du Sud-Est de la France.

Les vergers de pommiers sont connus pour avoir un statut pérenne et pluristratifié (surface du sol, herbe et arbres) dans lequel la gestion de l'habitat est considéré comme pouvant avoir des effets importants (Landis et al., 2000; Simon et al., 2010). Plus généralement, dans les vergers, les communautés d'araignées épigées sont principalement influencées par les applications de pesticides (Pekar, 2012; Mazzia et al., 2015) et par la gestion de l'habitat dans les vergers (couvre-sol) ou autour (haies) (Horton et al., 2002; Minarro. et al., 2009; Marko et Keresztes, 2014). En utilisant une approche de méta-analyse, Garratt et al., (2011) ont montré que les agrosystèmes en AB avaient un effet globalement positif significatif sur l'abondance des

araignées, même si la plupart des études dans ce contexte ont montré un effet neutre semblable à notre résultat. On pense que ces effets positifs globaux sont associés à une diminution de l'utilisation des pesticides synthétiques mais aussi à d'autres pratiques culturelles (engrais, gestion de l'habitat). En effet, pour les araignées épigées ou terrestres, plusieurs études ont montré que les communautés d'araignées étaient plus abondantes (Pfiffner et Luka, 2003; Cardenas et al., 2006; Prieto-Benitez et Mendez, 2011) ou plus riches en espèces dans les cultures en agriculture biologique (Pekar et Koucourek, 2004). Dans une expérience transplantant des cerisiers dans différents contextes paysagers, Stutz et Entling (2011) ont constaté que l'isolement des arbres réduisait la prédation des pucerons, mais ni la présence de pucerons ni celle d'ennemis naturels n'étaient affectées par la quantité des habitats semi-naturels dans le paysage. Dans les vignobles australiens, Alberto et al., (2012) ont constaté un effet de paysage faible sur les araignées par la quantité de surface non cultivée (bois et pâturage), tandis que Thomson et Hoffmann (2010) ont constaté un effet positif des bois adjacents sur les ennemis naturels, notamment les araignées. Cela suggère que l'abondance des araignées dans les cultures pérennes telles que les pommiers dépend moins de la végétation au niveau du paysage, car les araignées peuvent trouver suffisamment de nourriture et d'abris dans la culture (i.e. le verger lui-même). Hogg et Daane (2010, 2011a) ont avancé une autre explication concernant les araignées dans les vignobles de la Napa Valley. Selon eux, les araignées peuvent être présentes dans les vignobles seulement une partie de l'année et ainsi ne pas atteindre une abondance élevée avant juillet à août.

Nous avons aussi remarqué que les vergers AB ont tendance à avoir des haies de meilleure qualité que les vergers PFI. Il est donc finalement souvent difficile de séparer les différents facteurs et leurs possibles interactions.

2 Dynamique hivernale

2.1 Plusieurs genres d'araignées sont actifs pendant l'hiver méditerranéen

Il était crucial de déterminer quelles araignées peuvent être actives à la fin de l'automne, en hiver et au début du printemps afin d'évaluer leur rôle éventuel dans la lutte biologique contre les ravageurs vivant dans les vergers à ces moments.

Les pièges en carton ondulé constituent la principale mesure de l'activité des araignées et des forficules dans les vergers en automne et en hiver (Tamaki et Halfhill, 1968; Fye, 1985; Bogya et al., 1999). Ces pièges permettent d'observer de grandes abondances car ils peuvent servir de refuge à la plupart des araignées arboricoles supposées y hiverner. Cependant, toutes les espèces d'araignées ne passent pas tout l'hiver au repos, comme l'ont récemment montré Korenko et Pekar (2010) et Pekar et al., (2015). En adaptant le protocole de Horton et al (2001), c'est-à-dire des pièges échantillonnés toutes les deux semaines, nous avons pu déterminer quels genres d'araignées étaient principalement actifs dans les arbres en hiver.

Nous avons montré une séquence temporelle marquée dans l'activité des araignées et pu définir 3 « saisons ». La première « saison » dite automne était concomitante d'une diminution marquée de la température moyenne journalière jusqu'à 7,5°C. La deuxième « saison » (ou hiver) correspond plutôt à la période où les températures moyennes quotidiennes deviennent constamment inférieures à 10°C. Nous ne nous attendions pas à des valeurs de seuil précises car toutes les espèces d'araignées n'ont pas la même tolérance au froid (Schaefer, 1977; Korenko et al., 2010).

Dans nos conditions d'étude (climat méditerranéen) beaucoup de genres d'araignées sont actifs en hiver. Durant les périodes les plus froides de janvier, avec des températures moyennes comprises entre 2 et 5°C, le nombre moyen d'araignées était encore de 1,62 individu par arbre dans des pièges dynamiques. La communauté des araignées était encore assez diversifiée avec 16 taxons. L'abondance de *Trachelas*, *Nurscia* et *Philodromidus* était supérieure à 10% tandis que celle de *Lathys*, *Clubiona* et *Scotophaeus* variait entre 10 et 5% de l'abondance totale des araignées. L'abondance hivernale globale était bien inférieure à celle de l'automne avec une diminution de 60%, puis restait faible au printemps. Korenko et Pekar (2010) en Europe centrale ont observé des communautés des araignées simplifiées fortement dominée par trois genres (*Anyphaena*, *Theridion* et *Philodromus*) représentant 89% de l'abondance totale des araignées. Dans notre étude, les trois genres les plus abondants (*Philodromus*, *Phrurolithus* et *Trachelas*) ne représentaient que 36% de la communauté en hiver. Il est clair que les températures hivernales à Avignon en 2015 ont été beaucoup plus clémentes avec une différence moyenne d'environ 7°C en décembre et en janvier. Ces auteurs ont également déterminé les seuils de température d'activité d'*A. Accentuata* et de *Philodromus* sp. Ils ont montré que ces seuils étaient

respectivement d'environ 1 et 4°C pour ces deux espèces. Si ces mêmes seuils étaient appliqués à notre verger, cela signifierait qu'au moins ces deux espèces pourraient être actives pendant tout l'hiver.

Les araignées ne sont peut-être pas les seuls arthropodes actifs en hiver dans les vergers. Nous avons, en effet, observé qu'une espèce prédominante de forficules (*F. pubescens*) avait une activité hivernale modérée, tandis que une autre (*F. auricularia*) n'en avait pas. Ces observations de la différence marquée entre ces deux espèces sont en accord avec celles de Lordan et al., (2015) dans les vergers de pommiers espagnols. Les implications de cette observation ne sont pas faciles à déterminer car il est connu que *F. pubescens* a un régime alimentaire plus diversifié (Romeu-Dalmau et al., 2011).

2.2 Les bandes pièges et leur signification écologique

La méthode des bandes pièges a été utilisée au cours de la thèse car elle peut être mise en place sur plusieurs jours et permet ainsi d'éviter des biais de piégeage liés à l'heure d'échantillonnage ou aux conditions climatiques (Pekar, 1999; Bogya et al., 1999; Miliczky et al., 2008). De plus, cette méthode est peu impactée par le manipulateur contrairement à la méthode de frappage, une des méthodes souvent utilisées dans les études en verger (Horton et al., 2003; Miliczky et Horton, 2005; Simon et al., 2007). Celle-ci consiste à frapper des rameaux de l'arbre au-dessus d'un entonnoir afin de récupérer les arthropodes (Fauvel et al., 1981). Cette technique est fortement dépendante de l'heure de la journée à laquelle elle est mise en place, du manipulateur (force des coups), et de l'arbre (taux de ramification). Cependant, avec la méthode des bandes pièges, un biais d'estimation des prédateurs peut être observé pour certains taxons : le forficule est surestimé puisqu'il possède une phéromone d'agrégation (Sauphanor et al., 1993 ; Lordan et al., 2014), les organismes volants ne sont pas capturés de manière efficace de cette façon.

La signification écologique exacte des bandes pièges n'est pas facile à définir, car les araignées peuvent l'utiliser pour différentes raisons : abris nocturnes ou diurnes ou sites d'hivernage. Même dans ce dernier cas, il est prouvé que certaines araignées ne les utilisent que lorsque les conditions deviennent extrêmes (Korenko et Pekar, 2010) et les laissent ensuite pendant des jours ou des nuits plus cléments. Nos résultats ne permettent pas de déterminer

pourquoi les araignées sont entrées dans des pièges en carton. Ils prouvent seulement que les araignées capturées étaient actives, ne serait-ce que quelques heures, au cours des deux dernières semaines, puis ont de nouveau déménagé pour trouver un nouvel abri. Néanmoins, cela suggère que l'abondance des araignées à la fin du printemps a diminué parce que les feuilles sont à nouveau présentes et que les températures sont douces, de sorte que les abris deviennent de moins en moins attrayants.

Certains auteurs ont observé que l'abondance des araignées, évaluée à l'aide de pièges en carton, diminuait entre l'automne et le printemps et supposaient que cela était dû à la mortalité hivernale et/ou à la prédation intra-gilde (Pekar, 1999). À première vue, nous avons également observé une forte baisse de l'abondance des araignées dans les pièges statiques en hiver, lorsque la température moyenne de l'air est tombée de 5 à 1°C. La chute au printemps ne peut pas être facilement interprétée comme expliqué ci-dessus. Cette diminution a été prononcée chez les araignées sans activité hivernale (*Scotophaeus* et *Phrurolithus*). Ces espèces peuvent être mortes ou avoir été sujettes à la prédation intra-gilde par des araignées ayant une activité hivernale intermédiaire ou intense.

Nos résultats suggèrent également que, mis à part la prédation au sein d'une gilde, l'abondance des proies sur les troncs de pommiers pourrait suffire à maintenir les populations d'araignées et des forficules en hiver, bien que certaines araignées sont capables de jeûner pendant de longues périodes. Ces deux observations - forte présence d'araignées actives en hiver et présence probable de proies (certains étant des ravageurs des pommes comme les œufs de pucerons) - laissent penser que les premiers pesticides appliqués dans les vergers de pommiers, très souvent des huiles minérales faiblement sélectives (Biondi et al., 2015), devraient être réexaminés, en particulier si la sensibilité des araignées ou des forficules est similaire ou supérieure à celle des ravageurs.

3 Peut-on manipuler la communauté d'araignées ?

3.1 Augmenter l'abondance de la communauté d'araignées dans les cultures

Malgré leur rôle de plus en plus reconnu dans la lutte biologique contre certains ravageurs, les exemples d'études rapportant des lâchers d'araignées dans les cultures restent rares. Cela pourrait être dû au fait que leur élevage dans des conditions de laboratoire est notoirement difficile (Nyffeler et al., 1987) à tel point que certains auteurs ont suggéré de collecter des sacs d'œufs d'araignées sélectionnées dans des endroits naturels et de les transférer sur des terres agricoles (Kayashima, 1967). Ainsi, nous n'avons trouvé que quelques études où des araignées ont été relâchées ou transférées et toutes sont assez anciennes (Kayashima, 1961 ; Marc, 1993; Carter et Rypstra, 1995). Des tentatives plus récentes ont plutôt opté pour le levier des « aménagements » (paillis, bandes fleuries ou cartons ondulés) visant à augmenter l'abondance des araignées reposaient donc sur la « manipulation de l'habitat » (Gurr et al., 2017) pour accroître l'abondance des araignées, avec par exemple la présence de paillis (Riechert et Bishop, 1990), de bandes fleuries (Marko et Keresztes, 2014) ou de cartons ondulés situés autour des troncs d'arbres dans les vergers (Isaia et al., 2010; Michalko, 2017).

Les raisons de l'absence récente de transfert/lâcher d'araignées peuvent être : (i) la difficulté à obtenir de grandes quantités d'araignées (leur élevage n'est pas évident) (ii) la peur d'effets en cascade non maîtrisés (que se passe-t-il si les araignées relâchées préfèrent s'attaquer à d'autres auxiliaires ?) et (iii) le fait que beaucoup de lâchers en verger, qui sont des milieux ouverts, n'ont pas donné de franches réussites comme ce fut le cas pour les syrphes ou les forficules (Dib et al., 2010a, Dib et al., 2016). Mais les araignées, au moins aux stades non juvéniles sont beaucoup moins mobiles que les syrphes ou les forficules et sont, par définition, plus susceptibles d'adopter un nouvel habitat. Pour autant, les effets du lâcher sont ils durables ?

3.2 Dynamique temporelle d'araignées lâchées

Comme c'est la première fois, à notre connaissance, qu'un tel lâcher d'araignées a été réalisé, nous n'avions aucun a priori sur leur survie ou leur comportement de fuite (en particulier parce qu'elles ont été relâchées dans un verger où elles étaient, avant la libération, en faible abondance). Nous avons donc du imaginer un moyen d'observer leur peuplement et de pouvoir évaluer leur abondance dans un laps de temps court. Cette tâche est encore plus difficile dans le cas de *C. mildei* et *C. leucaspis* car ces deux araignées sont nocturnes et sont cachées dans des refuges de soie pendant la journée, ce qui rend leurs captures très difficiles. Les pièges en carton ont des efficacités variables selon les saisons pour *C. mildei* et *C. leucaspis* probablement en lien avec leur phénologie et la phénologie du pommier. Nous avons des taux de capture élevés au début du printemps et à la fin de l'automne. Ce qui s'explique peut-être par le fait qu'il n'y avait pas de grandes feuilles en mars dans les vergers et que les araignées cherchaient des abris d'hivernation à la fin de l'automne. À la fin du printemps et en été, *C. mildei* se trouve souvent dans des feuilles de pommier roulées, tandis que les espèces de *Clubiona* sont souvent cachées sous l'écorce (Marc et al., 1999). Un autre inconvénient des pièges en carton est que leur ouverture représente un stress pour les araignées dont les refuges sont ensuite cassés à plusieurs reprises.

Reprenant l'idée de Marc (1993) qui avait montré que *C. corticalis* était capable de coloniser des bouts de tiges de bambou, nous avons utilisé des tubes transparents afin de pouvoir surveiller leur occupation sans détruire les refuges en soie. Ces tubes ont été enveloppés avec de petits morceaux de carton ondulé afin de les maintenir dans le noir. Nous n'avons pas pu déterminer la proportion d'araignées relâchées (ou naturellement présentes) attirées par nos pièges. Nous avons vu, mais rarement, quelques *C. mildei* dans des feuilles roulées alors que les trois pièges d'un arbre n'étaient pas occupés. Cette technique d'observation a permis une bonne évaluation de la dynamique des araignées mais peut-être pas aussi bonne évaluation des véritables abondances dans le verger. Nous avons observé au cours de la saison, avec des pics bien marqués, trois pour *C. mildei* et deux pour *C. leucaspis*. Ces araignées sont sémelpares (Costello et Daane, 1995). Les pics les plus importants ont été observés au même moment pour les deux espèces (fin avril et début mai

2016 et un peu plus tôt en 2017) et correspond une période où les feuilles des pommiers sont encore petites et peu développées. Nous avons donc supposé que, du moins pour *C. mildei*, il était plus facile de coloniser nos abris que de trouver une grande feuille. C'est donc la rareté des abris naturels qui expliquent le succès de nos abris au printemps. Le deuxième pic de *C. mildei* (fin juin 2016 et début juin 2017) est plus facile à interpréter car la plupart des *C. mildei* observés se trouvaient dans des abris avec des œufs et avaient des pontes à ces dates. Cela signifie que les abris ont été spécifiquement colonisés par des mères qui recherchaient de bonnes conditions pour la reproduction (climat ou défense). Même si la sex-ratio initiale de cette espèce est inconnue, la plupart des mâles étaient morts ou ne cherchaient pas d'abris en juin, ce qui explique les baisses observées de l'ordre de 50% pour *C. mildei*. Nous n'avons pas observé *Clubiona* avec des œufs ou des araignées dans les abris. Les derniers pics des deux espèces (en octobre 2016 et fin septembre 2017 pour *C. mildei* ou en septembre 2016 et 2017 pour *C. leucaspis*) se sont produits lorsque la température de l'air a fortement chuté dans le sud-est de la France. Cela marque le début du processus d'hivernation. Néanmoins ces abris sont ensuite abandonnés en hiver, car plus assez efficaces contre le froid ? , car l'abondance des deux espèces a fortement chuté dans les abris en décembre. Le deuxième pic de *Clubiona* est très petit par rapport au premier alors que pour *C. mildei* la différence est moins prononcée. Les informations relatives à la phénologie et à l'abondance de certaines espèces d'araignées sont rares. Costello et Daane (1995) ont toutefois noté deux pics (en mai et juillet) d'adultes pour *Cheiracanthium inclusum* dans des vignobles aux États-Unis, une espèce étroitement apparentée à *C. mildei*.

Les deux espèces d'araignées lâchées ne sont pas les seuls habitants des abris mais sont les principaux taxons d'araignées trouvés (81% des captures). *Olios argelasius* a également été trouvé dans les abris, mais à une densité beaucoup plus faible et plus rarement, des Salticidae et Araneidae ont également été observés. Comparé à l'ensemble de la communauté d'araignées vivant dans ces vergers, il s'agit d'un faible nombre de taxons (Alzubik et al., Sous presse). Cela signifie que ce type d'abris n'est pas adapté à toutes les araignées et que seuls les plus grands ont été observés en lien avec l'ouverture relativement importante de l'abri.

3.3 Efficacité et durabilité des lâchers d'araignées et leur effet contre le carpocapse

Notre lâcher a eu une efficacité sur les populations de *C. mildei* ou de *C. leucapsis* inférieure à un an. Cela n'est peut être pas si étonnant quand on pense que nous avons choisi un verger pauvre pour ces espèces. La raison de cette faible abondance initiale n'est pas malheureusement pas connue et empêche toute réflexion approfondie. Néanmoins, nous pouvons imaginer que cela serait dû (i) à des interactions négatives avec la faune du verger ou (ii) qu'une condition importante de leur survie manque dans ce verger (site d'hibernation efficace ? ...). En conséquence si ce type de lâcher doit être appliqué en parcelles commerciales, il est probable qu'il faille le renouveler tous les ans (sauf s'il s'avère que les conditions sont plus propices dans le verger cible que dans notre verger expérimental). L'utilisation de pesticides risque également de renforcer cette option.

Il reste une question ouverte à propos du lâcher effectué : un simple lâcher aurait-il eu le même effet ou la présence des abris, nécessaires scientifiquement pour observer le phénomène biologique, a également joué un rôle important dans l'établissement des populations de *C. mildei* et *C. leucapsis* ? Les conséquences pratiques, notamment en ce qui concerne la main d'œuvre nécessaire pour la pose des bandes pièges puis des abris, ne sont pas les mêmes.

En ce qui concerne le succès vis à vis du ravageur visé (le carpocapse), il est difficile d'être trop affirmatif, notre étude comportant beaucoup de limites : (i) le verger cible était un verger expérimental sans pesticide, (ii) nous avons certes observé une relation de corrélation négative entre *C. mildei* et le carpocapse mais le seuil agronomique pour ce ravageur est vraiment très bas (quasiment nul en verger PFI) surtout pour la première génération. Cette action de *C. mildei* ne peut donc n'être qu'un appoint (ce qui est presque toujours le cas de la lutte biologique par conservation en verger). Par contre le danger usuel de la corrélation peut être raisonnablement levé dans notre cas : *C. mildei* est connu de longue date pour être consommateur de larves et d'oeufs de lépidoptères et il est donc probable que la corrélation carpocapse-*Cheiracanthium* soit due à une autre composante biologique.

Perspectives

Pendant plusieurs décennies, les auxiliaires généralistes ont été sous-estimés par rapport aux prédateurs spécialistes ou aux parasitoïdes en ce qui concerne la lutte biologique introductive ou inondative. C'est donc assez légitimement qu'il en fut de même pour les araignées. Même le long plaidoyer sous forme de livre de Wise en 1999 n'a pas eu d'effet et on a retenu que les limites de ce type d'auxiliaire (pas de réponse numérique, effets gênant des proies alternatives ...). Pourtant, des tentatives intéressantes avaient été publiées dans les années 80 ou 90 : c'est le cas des nombreux travaux de Mansour en Israël qui a étudié le rôle des *Cheiracanthium mildei* contre les lépidoptères ravageurs en verger de citrons. Ce fut également le cas du travail de thèse de Marc (1997) qui avait réalisé un lâcher de *Clubiona corticalis* dans les vergers de pommiers en Bretagne contre le carpocapse. Notons que ce type d'expérience visait un prédateur unique et principal dont on suppose l'action forte ; et en ce sens on est bien dans le type de lutte biologique préconisé à l'époque (mono-ravageur et mono-auxiliaire). Mais l'époque n'était pas prête et ces résultats n'ont pas été repris. Depuis 2009 et le plan Ecophyto, les choses ont changé en France et également en Europe. La société civile fait peser un poids de plus en plus fort et des conditions de culture qui ne compteraient que sur les pesticides ne sont plus tolérées. La lutte biologique doit être développée même (surtout?) dans le cas de cultures très consommatrices en pesticides (fruits) et de cultures pérennes (où la rotation ne peut pas être utilisée comme un levier à part entière). De fait, on observe de plus en plus d'articles publiés sur les araignées dans un contexte agricole, le plus souvent dans un objectif de bio-indication et quand, ce n'est pas le cas, la majeure partie des articles utilisent l'écologie du paysage pour comparer des modes de protection (AB vs conventionnel) ou les effets des espaces semi-naturels autour des parcelles d'intérêt (Picchi et al., 2016, Lefebvre et al., 2016). Les exemples cités concernent des cultures pérennes (oliviers ou pommiers) et il semble donc que le levier le plus marquant reste ce qu'il se passe autour (généralement dans un rayon de 500 m) de la parcelle ce qui est une démarche très influencée par les approches développées en cultures annuelles par l'équipe de Teja Tscharnke. Or cette situation est caractérisée par (i) le fait que les cultures sont courtes avec des périodes d'inter-culture possiblement négatives pour les auxiliaires (sol nu) et (ii) le fait que de grandes voire très grandes surfaces soient concernées avec le plus souvent une absence d'espaces naturels ou semi-naturels dans la région de production intensive (Beauce, centre de l'Allemagne). Cependant, rien

ne dit qu'en cultures pérennes, le paysage ait un rôle aussi important qu'en cultures annuelles. En outre, la situation des vergers dans le Sud-est de la France est également à prendre en compte : l'omniprésence du mistral fait qu'un dense réseau de haies a été installé et que les vergers font très souvent moins d'un hectare en surface. Si certains auxiliaires ont besoin d'une zone refuge pour certains de leur besoin (reproduction, proies alternatives, site d'hibernation ...) et si la haie, même peu diversifiée, peut jouer ce rôle, alors le paysage au sens strict aura une influence limitée. Notre approche a été développée en opposition à cette 'mode' de l'écologie du paysage. Nous faisons l'hypothèse que, dans les conditions du verger de pommiers du Sud-est de la France, l'effet des pratiques locales est primordial, complété en second lieu par l'environnement proche des parcelles. Cette hypothèse est également supportée par le fait que nous avons été dans l'impossibilité de reproduire les conclusions portant sur la fréquence de *C. mildei* des vergers de la région (avec des vergers en commun) (Lefebvre et al., 2016). Nous pensons que ces approches globales (i.e. à l'échelle du paysage) peuvent être intéressantes dans certains contextes mais qu'en définitive, ils offrent peu de leviers aux producteurs qui, en général, ne sont pas maîtres du paysage autour de leurs vergers. Nous pensons plutôt qu'en matière de lutte biologique, il est primordial d'investir du temps et des moyens dans la meilleure connaissance de l'écologie des espèces d'intérêt.

Qu'a-t-on appris ? Quelles directions s'ouvrent à nous suite à ces travaux ?

Que reste-t-il à découvrir ?

1 Apprendre à considérer l'hiver comme une période où il se passe des choses dans les cultures pérennes

En verger de pommiers, et en ce qui concerne des ravageurs très précoces comme le puceron cendré, il était déjà connu qu'un bon niveau de prédation au début du printemps était intéressant (Boreau de Roince, 2013) et que cette prédation était notamment le fait de certaines araignées (des genres *Anyphaena* et *Philodromus*). Suivant les travaux précurseurs de l'équipe de Pekar qui avaient démontré que ces deux genres pouvaient être actifs à des températures nulles voire négatives, nous sommes allés plus loin pour démontrer une intense activité des araignées tout l'hiver en conditions méditerranéennes, c'est à dire des hivers bien plus doux qu'en Tchèque

(climat continental). Cela ouvre des perspectives assez pratiques puisqu'il existe des ravageurs qui passent l'hiver à un stade dormant (œufs) dans les vergers, c'est le cas du puceron cendré et du psylle du poirier. Il est donc utile d'aider ces araignées actives en hiver à procéder à un « nettoyage » du verger. La première idée qui vient en tête, c'est de proposer des abris à ces araignées dans 2 buts : **i)** les aider à passer cette période difficile (nuits fraîches) et **ii)** les sédentariser sur les pommiers dans le cas où des abris naturels manquent (cas de la plupart des variétés récentes de pommiers qui ont des écorces lisses). Le type d'abri le plus naturel serait la bande piège cartonnée (parfois dénommée écorce artificielle !). Nos premiers résultats consistant à placer ces bandes tout l'hiver dans deux quarts d'un verger expérimental ont montré que l'infestation par le puceron cendré était retardée en moyenne de 7 jours au printemps suivant sur les deux quarts dont les arbres étaient munis de bandes cartonnées. Cette différence peut sembler faible mais la durée de présence de ce ravageur n'est pas si longue (moins de 2 mois) et la pratique actuelle est de traiter de façon systématique avant fleur (début avril) et en fonction des observations une seconde fois après fleur (fin avril). Les produits appliqués, huile de Neem en AB et aphicide néonicotinoïdes (Suprem), sont tous les deux sur la sellette : le premier n'est autorisé que sous dérogation depuis 3 ans et le second est menacé par l'interdiction des insecticides de cette famille. Il est donc très intéressant de pouvoir tester des alternatives non chimiques qui ne vont pas remplacer le traitement avant fleur mais peut être rendre moins fréquent le traitement après fleur. Néanmoins, cela veut aussi dire qu'on protège les auxiliaires généralistes dans les vergers au début du printemps et peut remettre en cause les traitements systématiques de fin d'hiver (comme les argiles) qu'on applique car on pense qu'aucune activité de prédation existe si tôt en saison.

Un point important pour nous, c'est l'accueil des producteurs. Les résultats préliminaires ont été présentés trois fois à des assemblées de producteurs (Brive puis Lunel) ou de conseillers Ecophyto (Narbonne) et l'accueil fut à chaque fois positif. Même les limites de cette pratique, notamment celles relatives au temps de pose, n'ont pas semblé rédhibitoires à notre grande surprise. Ce fut plutôt vu comme un aspect à améliorer, par exemple en positionnant des abris plus massifs directement dans la canopée et non plus des bandes cartonnées à scotcher sur les troncs, ce qui est un travail plus pénible. Notons enfin que la période hivernale est traditionnellement celle où l'activité chez les producteurs est la plus faible et que donc la pose

d'abris hivernaux est rendue possible en terme de charge raisonnable de travail des ouvriers agricoles.

2 Transférer ou lâcher des araignées est possible : de la lutte biologique à « l'ingénierie écologique »

L'ingénierie écologique est un concept né dans les années 60 aux Etats-Unis, aujourd'hui en plein essor dans de nombreux pays et en particulier en France. Son principe : utiliser le vivant, animal et végétal, pour gérer, restaurer, créer ou préserver les écosystèmes de manière efficace et économique, tout en respectant l'environnement. Cette thématique incite/invite les chercheurs à utiliser les principes de l'écologie, la connaissance du vivant et de ses fonctions pour atteindre leurs objectifs.

Nous ne pensons pas que les vergers commerciaux soient des écosystèmes dégradés à tel point qu'il faille « restaurer » mais nous pensons que cette thématique, et la vision qu'elle propose, pourrait irriguer la lutte biologique surtout dans ses aspects pratiques. En effet, si on exclut de notre champ, la lutte biologique sous abri, les recherches actuelles utilisant des prédateurs généralistes, se focalisent sur des aspects large échelle du type « gestion des territoires » puisque l'écologie du paysage est 'à la mode'. Or il apparait que l'écologie des auxiliaires y devient finalement accessoire : bien souvent on ignore tout de ces auxiliaires généralistes, leur niche, leur dispersion, leur diète ... Or nous pensons que d'augmenter nos connaissances sur l'écologie de ces prédateurs est un travail ; peut être ingrat ; mais nécessaire.

Concrètement, si on regarde ce qu'il se passe pour un prédateur comme *C. mildei*, connu de longue date pour son efficacité potentielle contre certains lépidoptères ravageurs, les études le concernant n'ont fait qu'effleurer son écologie (sans parler du problème de taxinomie) en décrivant seulement sa phénologie (Costello et Daane, 1999 ; Lefevbre et al., 2016). Notre approche, sans être parfaite, s'est attachée à améliorer notre connaissance du besoin en termes d'abri de cette espèce. Reprenant les travaux non publiés de Marc, nous avons imaginé et amélioré un abri pour ce prédateur. Initialement, nous avons prévu de faire varier certaines caractéristiques (diamètre, nature du matériau, densité par arbre), mais, devant le succès imprévu, de notre premier abri, nous n'avons pas ressenti le besoin de le faire. Cette optimisation reste à faire (sur les traces de l'ingénierie écologique) et par exemple, deux pistes sont à explorer :

(i) le diamètre de l'abri : certaines araignées ont besoin d'un abri (naturel) ou s'en constitue un de soie mais dans un endroit adapté (sous une pierre, dans les anfractuosités de l'écorce). C'est un paramètre à considérer. Les bandes pièges cartonnées en mimant une écorce permettent d'estimer certaines populations d'araignées mais il est clair également que le diamètre des ondulations du carton en limite l'accès aux plus grosses (*Amaurobius*, certaines *Gnaphosa*). Il est également important de noter que, plus tard en saison, ces abris ont une attractivité bien plus faible, notamment pour les *C. mildei*. Comme nous les voyons alors dans des abris de soie dans des feuilles de pommiers repliées, nous pensons que le diamètre des cannelures est devenu trop faible pour des araignées adultes ou pré-adultes et donc de taille plus importante qu'à l'automne. En outre, il existe une autre araignée très présente dans les vergers de pommiers et qui a un type de chasse différent, ce sont les *Nuctenea umbratica* (ou épeire des fissures justement) qui font des toiles géométriques, très souvent au niveau des départs de charpentières. Leur fournir un abri adapté (notamment avec un diamètre centimétrique) pourrait augmenter le nombre de toiles dans le verger, ce qui apparaît comme un paramètre crucial pour le vol de retour du puceron cendré à la fin de l'été (Wyss, 1995 ; Cahenzli et al., 2017).

(ii) la densité d'abri par arbre est-il un facteur limitant ? Là aussi, nous avons été dépassés par le succès des premiers abris et sommes restés sur notre densité initiale, trois abris par arbres, c'est à dire un par départ de charpentièrre et ce, pour des arbres de volume plutôt modestes. D'un certain point de vue, nous n'avons pas observé de preuves objectives de « saturation » de nos pièges : on a parfois observé une cohabitions entre deux araignées *C. mildei* au sein du même abri et tous les abris ne furent pas occupés sur tous les arbres. Néanmoins, il serait intéressant de savoir si la pose de plus de pièges, aurait amené à voir plus d'araignées et surtout si elle aurait permis d'augmenter leur survie ou limiter leur départ (sédentarisation). Pour des raisons de simplification technique, il serait également intéressant de savoir si la pose unique de pièges multiples (style « barillet ») par arbre aurait été possible sans générer de trop fortes interactions négatives entre *C. mildei*. Bref, nous avons ouvert une voie mais les optimisations qu'elles soient écologiques et/ou techniques restent à faire.

Enfin, il convient également de revenir sur le transfert et le lâcher d'auxiliaires généralistes. L'idée originale vient des producteurs en AB qui ont à la fois des vergers de

pommes ou poires et de pêchers ou abricotiers. Le forficule qui est un auxiliaire en vergers de pommiers et de poiriers peu devenir un problème en pêchers ou abricotiers en s'attaquant, lorsqu'il pullule, aux fruits murs en fin de saison. Nous avons adapté ce protocole au cas des araignées, ce qui nous « épargne » le dur labeur d'un élevage et l'optimisation de ses conditions. Il est cependant un point important qu'il nous faudra vérifier : si une araignée comme *C. mildei* est fortement présente dans un verger (avec des abondances supérieures à 15 individus par arbre à l'automne), le ponctionnement d'un infime pourcentage de cette population ne serait pas lourd de conséquences (au moins sur les arbres où ont été prélevés les bandes pièges). Nous sommes assez confiants que c'est bien le cas car nous avons observé expérimentalement dans un verger commercial que *C. mildei* était capable en hiver de se déplacer sur des arbres contigus ce qui laisse penser que la densité par arbre va vite être rétablie. Existe-t-il d'autres araignées dont on pourrait expérimenter le transfert ? Assez naturellement, on pense aux *Clubiona* (plus qu'aux *Anyphaena* dont l'abondance en Provence reste faible comparée à celle observée plus au Nord de la France), cependant leur densité n'atteint jamais celle des *C. mildei* dans les vergers avignonnais. Par contre, en hiver, il est notable que l'abondance des *Philodromus* peut être importante, or son rôle hivernal contre les stades hivernants de ravageurs est maintenant reconnu si ce n'est prouvé. En utilisant la même technique (les bandes cartonnées), il est théoriquement possible de transférer des *Philodromus* dans des vergers où leur abondance est nulle ou faible. Reste à étudier que (i) cela n'ait pas d'impact sur le contrôle du puceron cendré dans le verger d'origine, (ii) que l'installation des *Philodromus* soit effective (i.e. que leur absence dans les vergers cibles était contingente) et (iii) que cela ait une action mesurable sur le puceron cendré dans le verger cible.

Enfin, si nous sommes juchés sur les épaules des géants, il ne faut pas être trop naïf (il y a une différence entre reconnaître ce que nous ont amené nos prédécesseurs et donner à nos concurrents une confortable avance en leur confiant toutes nos observations non encore publiées). Il y a donc, comme dans tout travail de recherches, des observations et des expériences préliminaires qui ont été faites sur d'autres aspects de l'écologie de *C. mildei* et que nous ne pouvons évoquer ici. Cela concerne principalement, mais pas uniquement, leur distribution spatiale au sein du verger, mais nous n'en dirons pas plus. Nous invitons nos concurrents à, eux aussi, améliorer les connaissances sur l'écologie des auxiliaires d'intérêt plutôt que de regarder les choses trop rapidement à large échelle en suivant les effets de mode.

3 L'usage actuel des pesticides n'est pas (si) rédhibitoire ...

C'est un point important, raison pour laquelle nous l'évoquons en dernier, mais traditionnellement tu par les chercheurs en agronomie. Il est indéniable qu'il faille, dans la mesure du possible, réduire l'usage des pesticides, par contre il est contre-productif, à notre avis, d'être contre leur usage et de croire qu'on peut à l'heure actuelle produire commercialement des pommes sans pesticides (sachant que de nombreux pesticides sont utilisés en AB comme le Neem ou le Spinosad). Or même ces produits utilisés en AB ont une toxicité reconnue pour les auxiliaires (Biondi et al., 2012 ; Pasquet et al., 2016).

Si on aborde cet aspect avec un regard rétrospectif sur une dizaine d'années, il est évident que d'énormes progrès ont été réalisés par les producteurs de pommes, parfois sous la contrainte (avec des interdictions successives de matières actives ou le non re-dépôt d'AMM par certains groupes producteurs de produits phytosanitaires). Sans rentrer dans le détail, ce qui serait indigeste, les calendriers de traitement sont maintenant presque exempts d'insecticides organo-phosphorés (il en comptait en moyenne environ 3 par an il y a 10 ans) et comportent de plus en plus de produits à la toxicité faible ou nulle pour les auxiliaires comme ceux venant des vergers AB (nous pensons prioritairement au virus de la granulose).

Nous avons bien conscience que la toxicité des pesticides utilisés en PFI, et dans une moindre mesure ceux appliqués en AB, exercent une pression directe (toxicité) et indirecte (diminution des proies) sur les araignées des vergers. Nous avons clairement montré que la diversité des communautés d'araignées était significativement impactée (en comparant PFI et AB). Le fait que les communautés des vergers de poiriers PFI se rapprochent des vergers de pommiers en AB soutient également cette vision. Cependant, il convient, a contrario, de relever deux choses importantes : (i) les densités d'araignées hivernant dans les vergers restent importantes malgré des IFT autour de 25 et (ii) il n'y a pas de différence en terme d'abondance moyenne entre vergers PFI et vergers AB. En outre, si nous mettons la focale sur le cas de *C. mildei* en saison (mais c'est ne pas le cas de de *Philodromus* en hiver), nous n'avons pas, là non plus, observé de différences d'abondance entre vergers PFI et vergers AB (en accord avec Lefebvre et al., 2016). Quelqu'en soit la raison (tolérance au pesticide ?), nous pouvons juste nous borner à dire qu'il est, à ce stade, impossible de dire que le service rendu par la communauté

d'araignées dans les vergers PFI est moindre que dans les vergers AB. Monteiro et al., (2013) ont certes pu mesurer des consommations d'œufs sentinelles de carpocapse supérieures dans les vergers AB par rapport aux vergers PFI mais, par définition, les auxiliaires concernés ne sont pas connus. Comme les modèles statistiques ultérieurs semblent indiquer que cette prédation est significativement corrélée aux abondances de forficules et de *C. mildei* (Marliac et al., 2015b) et que nous avons montré précédemment que les forficules étaient significativement plus abondants dans les vergers AB que les vergers dits à l'époque « conventionnels » (Malagnoux et al., 2015), nous n'avons à nouveau pas de preuves que les communautés d'araignées des vergers PFI, pourtant moins diverses et moins équilibrées, seraient fonctionnellement moins efficaces en terme de lutte contre les ravageurs.

Par ailleurs, et même si cela concerne la strate du sol et non la canopée, il s'avère que nous avons récemment découverts deux araignées nouvelles pour la France (Gaymard et al., 2018 ; Mazzia et al., 2018) et qu'elles furent présentes dans des vergers PFI. Ceci démontre que les vergers de pommiers PFI ne sont pas des déserts faunistiques et qu'ils peuvent même constituer des refuges pour des espèces peu fréquentes.

Il sera néanmoins difficile de développer une écotoxicologie dirigée vers les araignées comme potentiels auxiliaires. Nous pensons plus modestement qu'il faut maintenant dépasser la simple comparaison PFI-AB pour tenter de mieux prendre en compte les impacts de l'usage des pesticides. Nous l'avons fait pour les vergers AB qui derrière la même appellation et le même cahier des charges, cache une grande diversité de pratiques (Marliac et al., 2015a). Ce travail doit maintenant être entrepris dans les vergers PFI en tentant de mettre en évidence des gradients d'usage. La façon dont les communautés d'araignées réagissent à ces gradients (dans les deux types de vergers) est un pré-requis pour essayer de manipuler ces communautés à notre profit en augmentant leur rôle dans la régulation naturelle des ravageurs.

Références

- Aghdam, H. R., Fathipour, Y., Radjabi, G., & Rezapanah, M. (2009). Temperature-Dependent Development and Temperature Thresholds of Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Iran. *Environmental Entomology*, 38(3), 885-895. doi.org/10.1603/022.038.034
- Agreste (2014) <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- Alberto, C. F., Hoffmann, A. A., & Thomson, L. J. (2012). Limited benefits of non-crop vegetation on spiders in Australian vineyards: regional or crop differences? *BioControl*, 57(4), 541-552. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9435-x>.
- Alderweireldt, M. (1994). Prey selection and prey capture strategies of Linyphiid spiders in high-input agricultural fields. *Bulletin of the British Arachnological Society*, 9, 300-308.
- Alston, D., & Murray, M. (2007). Pear Psylla (*Cacopsylla Pyricola*), 4. State University extension and Utah Plant Pest Diagnostic Laboratory, Logan, UT. doi .utahpests.usu.edu/ipm/agricultural/fruit/pear-psylla .
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00089-8).
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In M, *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes* (p. 19-31). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4>.
- Alzubik Belkair, S., Mazzia, C., Pasquet, A., & Capowiez, Y. (2018). Temporal activity of spiders and earwigs during winter in apple trees under a Mediterranean climate. *Biocontrol Science and Technology*, 28(9), 823 - 836. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1499870>.
- Alzubik Belkair, S., Mazzia, C., Pasquet, A., & Capowiez, Y. (dt). Can the release of spiders in apple orchards increase the biocontrol of codling moth? An experimental study with *Cheiracanthium mildei* and *Clubiona leucapsis*. (soumission à la revue *Bio Control* en 2019)
- Amalin, D. M., Peña, J. E., & McSorley, R. (2001). Predation by Hunting Spiders on Citrus

- Leafminer, *Phyllocnistis citrella* Stainton (Lepidoptera: Gracillariidae). *Journal of Entomological Science*, 36(2), 199–207. doi.org/10.18474/0749-8004-36.2.199.
- Anderson, J. F. (1970). Metabolic rates of spiders. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 33(1), 51–72. doi.org/10.1016/0010
- Hogg, B. N., Gillespie, R. G., & Daane, K. M. (2010). Regional patterns in the invasion success of Cheiracanthium spiders (Miturgidae) in vineyard ecosystems. *Biological Invasions*, 12(8), 2499–2508. [http://doi.org/10.1007/s10530-009-9659-1.-406X\(70\)90483-4](http://doi.org/10.1007/s10530-009-9659-1.-406X(70)90483-4).
- Andreev, R., Kutinkova, H., (2004). Resistance to aphids and scale insects in nine apple cultivars. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* 12, 215–221.
- Aprifel,(2008). Site internet de l'agence des fruits et des légumes frais. Fiches nutritionnelles par produits : la pomme. <http://www.aprifel.com/fiches,produits>.
- Audemard (1991).Population dynamics of the codling moth. In: Van der Guest LPS EHWORLD Crop Pests: Tortricid Pest, their Biologie, Natural Enemies and Control. Editors (1st).V5. pp 329-33. - 978-0-444-88000-0.
- Babczyńska, A., Wilczek, G., & Migula, P. (2006). Effects of dimethoate on spiders from metal pollution gradient. *The Science of the Total Environment*, 370(2 - 3), 352 - 359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.024>.
- Bajwa, W. I., & AliNiasee, M. T. (2001). Spider Fauna in Apple Ecosystem of Western Oregon and its Field Susceptibility to Chemical and Microbial Insecticides. *Journal of Economic Entomology*, 94(1), 68-75. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.1.68>.
- Balachowsky, A.S., et P. Bovey. 1966. « Super Famille des Tortricoidea ». In *Traité Entomologie appliquée à l'agriculture*, Masson & Cie, 456-893.
- Barbosa, P. (1998). Chapter 3 - Agroecosystems and conservation biological control. *Conservation Biological Control* (p. 39 - 54). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012078147-8/50049-9>.
- Barbosa, P., & Wratten, S. D. (1998). Chapter 5 - Influence of plants on invertebrate predators:

- Implications to conservation biological control. *Conservation Biological Control* (p. 83-100). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012078147-8/50051-7>.
- Barnes, M. M. (1991). Codling moth occurrence, host race formation, and damage, pp. 313-328. In L.P.S van der Geest and H. H. Evenhuis [eds.], *Tortricid pests: their biology*,
- Beers, E. H., Mills, N. J., Shearer, P. W., Horton, D. R., Milickzy, E. R., Amarasekare, K. G. & Gontijo, L. M. (2016). Nontarget effects of orchard pesticides on natural enemies: Lessons from the field and laboratory. *Biological Control*, 102, 44–52.
- Beers EH, Stuckling DM, Prokopy RJ, Avila J. (2003). Ecology and management of apple arthropod pests. In: Ferree DC, Warrington IJ (Eds.), *Apples: botany, production and uses*, CABI Publishing, Wallingford, UK 489-514.
- Beers, E. H., J. F. Brunner, M. J. Willett, and G. M. Warner.(1993). *Orchard pest management*. Good fruit Grower, Yakima, WA.jenny.tfrec.wsu.edu/opm/toc.php?h=2.
- Begg, G., M. Cook, S., Dye, R., Ferrante, M., Franck, P., Lavigne, C., ... Birch, A. (2017). A functional overview of conservation biological control. *Crop Protection*, 97, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.008>.
- Bilising, S. W. (1920). Quantitative Studies in the Food of Spiders. *The Ohio Journal of Science*, 20(7), 215–260. <http://hdl.handle.net/1811/2094>.
- Biondi, A., Campolo, O., Desneux, N., Siscaro, G., Palmeri, V. & Zappalà, L. (2015). Life stage-dependent susceptibility of *Aphytis melinus* DeBach (Hymenoptera: Aphelinidae) to two pesticides commonly used in citrus orchards. *Chemosphere*, 128, 142–147.
- Biondi, A., Mommaerts, V., Smagghe, G., Viñuela, E., Zappalà, L., & Desneux, N. (2012). The non-target impact of spinosyns on beneficial arthropods. *Pest Management Science*, 68(12), 1523-1536. <https://doi.org/10.1002/ps.3396>.
- Birkhofer, K., Gavish-Regev, E., Endlweber, K., Lubin, Y. D., Berg, K. von, Wise, D. H., & Scheu, S. (2008). Cursorial spiders retard initial aphid population growth at low densities in winter wheat. *Bulletin of Entomological Research*, 98(3), 249 - 255.

<https://doi.org/10.1017/S0007485308006019>.

- Blandenier, G., Bruggisser, O. T., Rohr, R. P., & Bersier, L.-F. (2013). Are phenological patterns of ballooning spiders linked to habitat characteristics? *Journal of Arachnology*, 41(2), 126 - 132. <https://doi.org/10.1636/P12-48>.
- Blommers, L. H. M., Helsen, H. H. M., & Vaal, F. W. N. M. (2004). Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and as migrant to apple. *Journal of Pest Science*, 77(3), 155 - 163. <https://doi.org/10.1007/s10340-004-0046-5>.
- Blommers, L. H. M. (1994). Integrated Pest Management in European Apple Orchards. *Annual Review of Entomology*, 39(1), 213–241. doi.org/10.1146/annurev.en.39.010194.001241.
- Bogya, S., Lenteren, J. C. van, & Mols, P. J. . (1999). Spiders (Araneae) as polyphagous natural enemies in orchards. edepot.wur.nl/195442.
- Bogya, S., Szinetar, C. S. & Marko, V. (1999). Species composition of spider (Araneae) assemblages in apple and pear orchards in the Carpathian Basin. *Acta Phytopathol. Entomol. Hungarica*, 34, 99-121.
- Boivin, G. (2001). Parasitoïdes et lutte biologique: paradigme ou panacée ? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Volume 2 Numéro 2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.4096>.
- Boller, E. F. (2004). *Ecological Infrastructures: Ideabook on Functional Biodiversity at the Farm Level; Temperate Zones of Europe - Ökologische Infrastrukturen; Ideenbuch zur funktionalen Biodiversität auf Betriebsebene; Gemässigte*.
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>.
- Bonny, S. (2010). Ecological intensification of agriculture: pathways and challenges. *Proceedings of a symposium on Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food, Montpellier*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113168642>.

- Bonnet ,P.,(1961).Bibliographia araneorum, 3, p. 1-591. Toulouse: Imprimerie Frères Douladoure.
- Bonnet,P.,(1960).Bibliographia araneorum, 2 (5),p. 4231-5058. Toulouse: Imprimerie Frères Douladoure.
- Bonnemaison, L., 1959. Le puceron cendré du pommier(*Dysaphis plantaginea* Pass.) – Morphologie et biologie – Méthodes de lutte. Annales de l’Institut National de la Recherche Agronomique, Série C, Epiphyties II, 257–322.
- Bonte, D., Baert, L., Lens, L., & Maelfait, J.-P. (2004). Effects of aerial dispersal, habitat specialisation, and landscape structure on spider distribution across fragmented grey dunes. *Ecography*, 27(3), 343-349. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03844.x>.
- Boreau de Roince, C., Lavigne, C., Mandrin, J.-F., Rollard, C., & Symondson, W. O. C. (2013). Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bulletin of Entomological Research*, 103(02), 148–154. doi.org/10.1017/S0007485312000636.
- Boreau de Roince, C. (2012). Biodiversité et aménagements fonctionnels en verger de pommiers: Implication des prédateurs généralistes vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs. (PhD Thesis). AgroParisTech.
- Bostanian, N. J., Dondale, C. D., Binns, M. R., & Pitre, D. (1984). Effects of pesticide use on spiders (Araneae) in Quebec apple orchards. *The Canadian Entomologist*, 116(5), 663-675. <https://doi.org/10.4039/Ent116663-5>.
- Boutin, S., 2001. Analyse de la gestion des interventions phytosanitaires et de leurs effets non intentionnels en verger de pommiers. Mémoire de DAA Protection des plantes et Environnement, INA-PG, ENSAM, ENSAR.
- Brown, M. W., & Mathews, C. R. (2007). Conservation Biological Control of Rosy Apple Aphid, *Dysaphis plantaginea*. (Passerini), in Eastern North America. *Environmental Entomology*, 36(5), 1131–1139. [doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[1131:CBCORA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[1131:CBCORA]2.0.CO;2).
- Brown, J. K. (2004). Tracing the Origin of Cryptic Insect Pests and Vectors, and their Natural

- Enemies. CAB International, pp. 113–134.
- Butler, J., Garratt, M. P. D., & Leather, S. R. (2012). Fertilisers and insect herbivores: a meta-analysis. *Annals of Applied Biology*, 161(3), 223–233. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2012.00567.x>.
- Burel, F., & Baudry, J. (1995). Species biodiversity in changing agricultural landscapes: A case study in the Pays d’Auge, France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 55(3), 193–200. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00614-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00614-X).
- Butault, J.P., Delame, N., Jacquet, F., Zardet, G., (2011). L’utilisation des pesticides en France: état des lieux et perspectives de réduction. *Notes et Études Socio-Économiques* 35, 1–24.
- Cahenzli, F., Pfiffner, L., & Daniel, C. (2017). Reduced crop damage by self-regulation of aphids in an ecologically enriched, insecticide-free apple orchard. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(6), 65. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0476-0>.
- Cárdenas, M., Ruano, F., García, P., Pascual, F., & Campos, M. (2006). Impact of agricultural management on spider populations in the canopy of olive trees. *Biological Control*, 38(2), 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.02.004>.
- Cardinale, B. J., Harvey, C. T., Gross, K., & Ives, A. R. (2003). Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi-enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 6(9), 857–865. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00508.x>.
- Carter, P. E., & Rypstra, A. L. (1995). Top-Down Effects in Soybean Agroecosystems: Spider Density Affects Herbivore Damage. *Oikos*, 72(3), 433 – 439. <https://doi.org/10.2307/3546129>.
- Carroll, D. P., & Hoyt, S. C. (1984). Natural Enemies and Their Effects on Apple Aphid, *Aphis pomi* DeGeer (Homoptera: Aphididae), Colonies on Young Apple Trees in Central Washington. *Environmental Entomology*, 13(2), 469–481. doi.org/10.1093/ee/13.2.469.
- Causton, C. E., Lincango, M. P., & Poulson, T. G. A. (2004). Feeding range studies of *Rodolia*

- cardinalis (Mulsant), a candidate biological control agent of *Icerya purchasi* Maskell in the Galápagos islands. *Biological Control*, 29(3), 315 - 325. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2003.07.002>.
- Chang, G. C. (1996). Comparison of Single Versus Multiple Species of Generalist Predators for Biological Control. *Environmental Entomology*, 25(1), 207–212. <https://doi.org/10.1093/ee/25.1.207>.
- Charmillot, P. J. (1976). Contribution a l'étude de la localisation des sites d'hibernation et de la mortalité hivernale du carpocapse (*Laspeyresia pomonella* L.) en vergers de pommiers et d'abricotiers. *Mitteilungen*. doi.org/10.5169/seals-401814.
- Ciglar I. (1998). Integrirana zaštita voćaka i vinove loze. *Zrinski, Čakovec*.
- Cloutier ,C. (1992). Les solutions biologiques de lutte pour la répression des insectes et acariens ravageurs des cultures.
- Cock, M. J. W., Murphy, S. T., Kairo, M. T. K., Thompson, E., Murphy, R. J., & Francis, A. W. (2016). Trends in the classical biological control of insect pests by insects: an update of the BIOCAT database. *BioControl*, 61(4), 349–363. <https://doi.org/10.1007/s10526-016-9726-3>.
- Colin-Henrion, M., Mehinagic, E., Renard, C. M. G. C., Richomme, P., & Jourjon, F. (2008). From apple to applesauce: Processing effects on dietary fibres and cell wall polysaccharides. *Food Chemistry*, 117(2), 254–260. doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.109.
- Cormier D, Pelletier F, Vanoosthuyse F, Chouinard G, Bellerose S, Aubry O .(2015). Lutter contre le carpocapse de la pomme par l'utilisation de nouveaux moyens à risqué réduit. *Journéepomicoleprovinciale. Mont-Saint Grégoire*.
- Corrigan, J. E., & Bennett, R. G. (1987). Predation by *Cheiracanthium Mildei* (Araneae, Clubionidae) on Larval *Phyllonorycter Blancardella* (Lepidoptera, Gracillariidae) in a Greenhouse. *The Journal of Arachnology*, 15(1), 132–134.
- Costello, M. J., & Daane, K. M. (1999). Abundance of Spiders and Insect Predators on Grapes in

- Central California. *The Journal of Arachnology*, 27(2), 531-538.
- Costello, M. J., & Daane, K. M. (1995). Spider (Araneae) Species Composition and Seasonal Abundance in San Joaquin Valley Grape Vineyards. *Environmental Entomology*, 24(4), 823-831. <https://doi.org/10.1093/ee/24.4.823>.
- Dajoz, Roger. (2000). *Précis d'écologie* (Vol. 600). Paris. Retrieved from <https://www.dunod.com/sciences-techniques/precis-d-ecologie>.
- De Bach, P. 1974. *Biological Control by natural enemies*. Cambridge University Press. London. 323 p.
- De Berardinis, E., Baronio, P., & Baumgärtner, J. (1994). The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* pass., Hom., Aphididae) feeding on apple fruit growth. *Ecological Modelling*, 72(1), 115-127. [doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90147-3](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90147-3).
- Deevey, G. B. (1949). The Developmental History of *Latrodectus Mactans* (Fabr.) at Different Rates of Feeding . The University of Notre Dame. *The American Midland Naturalist* .V. 42, No. 1 , pp. 189-219 .[doi.jstor.org/stable/2421795](https://doi.org/10.1086/jstor/stable/2421795).
- Dib, H., Jamont, M., Sauphanor, B. & Capowiez, Y. (2016). The feasibility and efficacy of early-season releases of a generalist predator (*Forficula auricularia* L.) to control populations of the RAA (*Dysaphis plantaginea* Passerini) in Southeastern France. *Bulletin of Entomological Research*, 106, 233–241.
- Dib, H., Sauphanor, B., & Capowiez, Y. (2010a). Effect of codling moth exclusion nets on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, and its control by natural enemies. *Crop Protection*, 29(12), 1502–1513. doi.org/10.1016/j.cropro.2010.08.012.
- Dib, H., Simon, S., Sauphanor, B. & Capowiez, Y. (2010b). 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*, 55, 97–109.

- Dib, H. (2010). Rôle des ennemis naturels dans la lutte biologique contre le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera aphididae) en vergers de pommiers (phd thesis). Université d'Avignon. tel.archives-ouvertes.fr/tel-00665080.
- Diehl, E., Sereda, E., Wolters, V., Birkhofer, K. (2013). Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 50(1), 262–270. doi.org/10.1111/1365-2664.12032.
- Dondale, Charles D., and James H. Redner. (1982). *The Insects and Arachnids of Canada. Part 9. The Sac Spiders of Canada and Alaska (Araneae: Clubionidae and Anyphaenidae)*. Agric. Can. Publ. No. 1724. 194 pp
- Droby, S., Wisniewski, M., Macarasin, D., & Wilson, C. (2009). Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? *Postharvest Biology and Technology*, 52(2), 137-145. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.11.009.
- Duffey, E. (1956). Aerial Dispersal in a Known Spider Population. *Journal of Animal Ecology*, 25(1), 85–111. doi.org/10.2307/1852.
- Eberhardt, M. V., Lee, C. Y., & Liu, R. H. (2000). Nutrition: Antioxidant activity of fresh apples. *Nature*, 405(6789), 903–904. doi.org/10.1038/35016151.
- Edwards, C. A., Sunderland, K. D., & George, K. S. (1979). Studies on Polyphagous Predators of Cereal Aphids. *Journal of Applied Ecology*, 16(3), 811 - 823. https://doi.org/10.2307/2402855.
- Edwards, R. J. (1958). The spider subfamily Clubioninae of the United States, Canada and Alaska [Araneae: Clubioninae].- *Bull. Mus. Comp. Zool Harvard Univ.*, 118, 365-436.
- Eggleton, P., & Gaston, K. J. (1990). “Parasitoid” Species and Assemblages: Convenient Definitions or Misleading Compromises? *Oikos*, 59(3), 417–421. https://doi.org/10.2307/3545155.
- Eggleton, P., & Belshaw, R. (1992). Insect parasitoids: an evolutionary overview. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 337(1279), 1–20. https://doi.org/10.1098/rstb.1992.0079.

- Ehler, L. E. (2006). Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, 62(9), 787–789. <https://doi.org/10.1002/ps.1247>.
- Eilenberg, J., Hajek, A., & Lomer, C. (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 46(4), 387–400.
- Entling, W., Schmidt, M. H., Bacher, S., Brandl, R., & Nentwig, W. (2007). Niche properties of Central European spiders: shading, moisture and the evolution of the habitat niche. *Global Ecology and Biogeography*, 16(4), 440 - 448. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2006.00305.x>.
- Erickson, K. S., & Morse, D. H. (1997). Predator size and the suitability of a common prey. *Oecologia*, 109(4), 608-614. <https://doi.org/10.1007/s004420050123>.
- Fagan, W. F., & Hurd, L. E. (1994). Hatch Density Variation of a Generalist Arthropod Predator: Population Consequences and Community Impact. *Ecology*, 75(7), 2022 - 2032. <https://doi.org/10.2307/1941607>.
- Fauvel, G., Rambier, A., & Balduque-Martin, R. (1981). La technique du battage pour la surveillance des ravageurs en cultures fruitière et florale. I. Étude de l'influence de quelques facteurs sur l'efficacité du battage. *Agronomie*, 1(2), 105 - 111. <https://doi.org/10.1051/agro:19810207>.
- Feener Jr, D. H., & Brown, B. V. (1997). Diptera as Parasitoids. *Annual Review of Entomology*, 42(1), 73–97. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.42.1.73>.
- Ferro, D. N., & Harwood, R. F. (1973). Intraspecific Larval Competition by the Codling Moth, *Laspeyresia pomonella*. *Environmental Entomology*, 2(5), 783-790. doi.org/10.1093/ee/2.5.783.
- Fernández, D., Bosch, D., Cichón, L., & Avilla, J. (2012). *Cydia pomonella* (L.) (LEPIDOPTERA: TORTRICIDAE). Aspectos de su taxonomía, comportamiento y monitoreo aplicados a programas de control en grandes áreas.

hdl.handle.net/10803/94521.

- Filajdic, N. (North C. S. U., Sutton, T. B., Walgenbach, J. F., & Unrath, C. R. (1995). The influence of the apple aphid/spirea aphid complex on intensity of *Alternaria* blotch of apple and fruit quality characteristics and yield. *Plant Disease (USA)*. Consulté à l'adresse agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9555906.
- Finke, D. L., & Denno, R. F. (2005). Predator diversity and the functioning of ecosystems: the role of intraguild predation in dampening trophic cascades. *Ecology Letters*, 8(12), 1299-1306. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00832.x>.
- Fincke, O. M. (1994). Population regulation of a tropical damselfly in the larval stage by food limitation, cannibalism, intraguild predation and habitat drying. *Oecologia*, 100(1–2), 118–127.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570 - 574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Forrest, J. M. S., & Dixon, A. F. G. (1975). The induction of leaf-roll galls by the apple aphids *Dysaphis devectora* and *D. plantaginea*. *Annals of Applied Biology*, 81(3), 281–288. doi.org/10.1111/j.1744-7348.1975.tb01643.x.
- Frandon, J. & Kabiri, F. (1999) La lutte biologique contre la Pyrale du maïs avec les trichogrammes., Vol. 19: Les dossiers de l'environnement de l'INRA. ed., pp. 107-112.
- Fréchette, B., Rojo, S., Alomar, O., & Lucas, É. (2006). Intraguild predation between syrphids and mirids: who is the prey? Who is the predator? *BioControl*, 52(2), 175. doi.org/10.1007/s10526-006-9028-2.
- Fye, R. E. (1985). Corrugated fiberboard traps for predators overwintering in orchards. *Journal of*

- Economical Entomology, 78, 1511–1514.
- Garratt, M. P. D., Wright, D. J., & Leather, S. R. (2011). The effects of farming system and fertilisers on pests and natural enemies: A synthesis of current research. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(3), 261 - 270. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.014>.
- Gaymard, M., Mazzia, C., Danflous, S., Capowiez, Y., Cornic, J.-F. & Lecigne, S. (2018). Découverte en France de *Zodarium styliferum* (Simon, 1870) (Araneae, Zodariidae). *Revue Arachnologique* 2 5: 18-21. <http://asfra.fr/Site/revue-arachno-S2-N5.html>.
- Gehring, R. D., & Madsen, H. F. (1963). Some Aspects of the Mating and Oviposition Behavior of the Codling Moth, *Carpocapsa pomonella* | *Journal of Economic Entomology* | Oxford Academic. academic.oup.com/jee/article-abstract/56/2/140/2207435.
- Geiger, F., Wäckers, F. L., & Bianchi, F. J. J. A. (2009). Hibernation of predatory arthropods in semi-natural habitats. *BioControl*, 54(4), 529 - 535. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9206-5>.
- Giordanengo, P., Febvay, G., & Rahbé, Y. (2007). Comment les pucerons manipulent les plantes. *Biofutur*, 279, 35–38.
- Godfray, H. C. J. (1994). *Parasitoids: Behavioral and Evolutionary Ecology* (Vols. 6-25). Princeton University Press.
- Goggin, F. L. (2007). Plant-aphid interactions: molecular and ecological perspectives. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(4), 399-408. doi.org/10.1016/j.pbi.2007.06.004.
- Griffon, M. (2007). Intensive agriculture must know unavoidable changes *Cah Agric* 16:85-86.
- Griffen, B. D. (2006). Detecting emergent effects of multiple predator species. *Oecologia*, 148(4), 702–709. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0414-3>.
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., Landis, D. A., & You, M. (2017). Habitat Management to Suppress Pest Populations: Progress and Prospects. *Annual Review of Entomology*, 62(1), 91–109. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-035050>.

- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Luna, J. M. (2003). Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, 4(2), 107–116.
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Barbosa, P. (2000). Success in Conservation Biological Control of Arthropods. In *Biological Control: Measures of Success* (pp. 105–132). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4014-0_4.
- Hallenbeck, W.H., Cunningham-Burns, K.M., 2012. Pesticides and human health. Springer Science . Business Media.
- Hamilton, G. C., Swift, F. C., & Marini, R. (1986). Effect of *Aphis pomi* (Homoptera: Aphididae) Density on Apples. *Journal of Economic Entomology*, 79(2), 471 - 478. doi.org/10.1093/jee/79.2.471.
- Hatt, S., Boeraeve, F., Artru, S., Dufrêne, M., & Francis, F. (2018). Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: An agroecological perspective. *Science of The Total Environment*, 621, 600–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.296>.
- Hill, M. O. (1973) Reciprocal averaging: an eigenvector method of ordination. *Ecology*, 61, 237–249.
- Hochman Adler, V., Lubin, Y., & Coll, M. (2014). Spillover of crop herbivores into adjacent desert habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 193, 117 - 124. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.029>.
- Hodge, M. A. (1999). The Implications of Intraguild Predation for the Role of Spiders in Biological Control. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 351-362.
- Hoffmann, J. H., Moran, V. C., & Zimmermann, H. G. (1999). Integrated management of *Opuntia stricta* (Haworth) Haworth (Cactaceae) in South Africa: an enhanced role for two, renowned, insect agents. 15–20.
- Hogg Brian N., & Daane Kent M. (2014). The roles of top and intermediate predators in herbivore suppression: contrasting results from the field and laboratory. *Ecological Entomology*, 39(2), 149–158. doi.org/10.1111/een.12079.

- Hogg, B. N., Gillespie, R. G., & Daane, K. M. (2010). Regional patterns in the invasion success of *Cheiracanthium* spiders (Miturgidae) in vineyard ecosystems. *Biological Invasions*, 12(8), 2499–2508. doi.org/10.1007/s10530-009-9659-1.
- Hogg, B. N., & Daane, K. M. (2010). The role of dispersal from natural habitat in determining spider abundance and diversity in California vineyards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4), 260–267. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.004.
- Holland, J. M., Bianchi, F. J., Entling, M. H., Moonen, A.-C., Smith, B. M., & Jeanneret, P. (2016). Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Management Science*, 72(9), 1638–1651. https://doi.org/10.1002/ps.4318.
- Holzschuh, A., Dainese, M., González-Varo, J. P., Mudri-Stojnić, S., Riedinger, V., Rundlöf, M., Steffan-Dewenter, I. (2016). Mass-flowering crops dilute pollinator abundance in agricultural landscapes across Europe. *Ecology Letters*, 19(10), 1228 - 1236. <https://doi.org/10.1111/ele.12657>.
- Horton, D. R., Broers, D. A., Lewis, R. R., Granatstein, D., Zack, R. S., Unruh, T. R., ... Brown, J. J. (2003). Effects of mowing frequency on densities of natural enemies in three Pacific Northwest pear orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 106(2), 135 - 145. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2003.00018.x>.
- Horton, D. R., Miliczky, E. R., Broers, D. A., Lewis, R. R., & Calkins, C. O. (2001). Numbers, Diversity, and Phenology of Spiders (Araneae) Overwintering in Cardboard Bands Placed in Pear and Apple Orchards of Central Washington. *Annals of the Entomological Society of America*, 94(3), 405–414. doi.org/10.1603/0013-8746-094 [0405. 2.0.CO;2.
- Howell, F.J.(1991). Reproductive biology. In: Tortricid pests their biology, natural enemies and control Van de Geest L.p.s.&H H. Evenhuis (eds). New York. Elsevier. Pp 157-174.
- IOBC, 2012. Statutes and by-laws of the international organization for biological control (IOBC global).
- IOBC, 2006. Internet Book of Biological Control, Internet Book of Biological Control.

- Isaia, M., Beikes, S., Paschetta, M., Surya Narayanan, S., & Badino, G. (2010). Spiders as potential biological controllers in apple orchards infested by *Cydia* spp. (Lepidoptera: Tortricidae). *Eur. Arachnol.* 79–88.
- Isaia M., Beikes S., Paschetta M., Sarvajayakesavalu S. & Badin G. (2008). Spiders as potential biological controllers in apple orchards infested by *Cydia* spp. (Lepidoptera: Tortricidae), Proceedings of the 24th European Congress of Arachnology, Bern.
- Janick, J., Moore, J.N., (1996). Fruit breeding, vol. 1, tree and tropical fruits. John Wiley and Sons Inc.
- Jarošík, V., Honěk, A., Magarey, R. D., & Skuhrovec, J. (2011). Developmental Database for Phenology Models: Related Insect and Mite Species Have Similar Thermal Requirements. *Journal of Economic Entomology*, 104(6), 1870-1876. <https://doi.org/10.1603/EC11247>.
- Jones, V. P., Mills, M. J., Brunner, J. F., Horton, D. R., Beers, E. H., Unruh, T.R., ... Jones, W. E. (2016). From planning to execution to the future: An overview of a concerted effort to enhance biological control in apple, pear, and walnut orchards in the western US. *Biological Control*, 102, 1–6.
- Jones, V. P., Hagler, J. R., Brunner, J. F., Baker, C. C., & Wilburn, T. D. (2006). An Inexpensive Immunomarking Technique for Studying Movement Patterns of Naturally Occurring Insect Populations. *Environmental Entomology*, 35(4), 827–836. doi.org/10.1603/0046-225X-35.4.827.
- Jourdheuil, P., Grison, P., & Fraval, A.(1991). La lutte biologique: un aperçu historique. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), Laboratoire de Zoologie, *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* n°15, 37-60.
- Kaakeh, W., Pfeiffer, D. G., & Marini, R. P. (1992). Combined Effects of Spirea Aphid (Homoptera: Aphididae) and Nitrogen Fertilization on Net Photosynthesis, Total Chlorophyll Content, and Greenness of Apple Leaves. *Journal of Economic Entomology*, 85(3), 939-946. doi.org/10.1093/jee/85.3.939.
- Karina, R. G., Brunner, J. F., & Castagnoli, S. (2016). Capturing the economic value of

- biological control in western tree fruit. *Biological Control*, 102, 93 - 100.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.05.013>.
- Kayashima, I. (1967). Study on spiders (particularly referring to grass-spiders) to prey upon fall-web worms (*Hyphantria cunea* Drury. *Acta Arachnologica*, 21(1), 1-30_1.
<https://doi.org/10.2476/asjaa.21.1>.
- Kayashima I (1961) Study on the lynx-spider *Oxyopes sertatus* L. Koch for biological control of Cryptomerian leaf-fly *Contarinia inouyei* Mani. *Rev Appl Ent* 51:413.
- Kehrli, P., & Wyss, E. (2001). Effects of augmentative releases of the coccinellid, *Adalia bipunctata*, and of insecticide treatments in autumn on the spring population of aphids of the genus *Dysaphis* in apple orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 99(2), 245-252. doi.org/10.1046/j.1570-7458.2001.00823.x.
- Knight, A. L. (2007). Adjusting the Phenology Model of Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Washington State Apple Orchards. *Environmental Entomology*, 36(6), 1485-1493. [doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[1485:ATPMOC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[1485:ATPMOC]2.0.CO;2).
- Kogan, M. (1998). Integrated Pest Management: Historical Perspectives and Contemporary Developments. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 243–270.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.243>.
- Korban, S. S., & Skirvin, R. M. (1984). Nomenclature of the cultivated apple. *HortScience*, 19(2), 177–180.
- Korenko, S. & Pekar, S. (2010). Is there intraguild predation between winter-active spiders (Araneae) on apple tree bark? *Biological Control*, 54, 206–212.
- Korenko, S., Pekar, S. & Honek, A. (2010). Predation activity of two winter-active spiders (Araneae: Anyphaenidae, Philodromidae). *Journal of Thermal Biology*, 35, 112–116.
- Köhler, H.-R., & Triebkorn, R. (2013). Wildlife ecotoxicology of pesticides: can we track effects to the population level and beyond? *Science (New York, N.Y.)*, 341(6147), 759–765. doi.org/10.1126/science.1237591.

- Lacey, L. A., & Shapiro-Ilan, D. I. (2008). Microbial Control of Insect Pests in Temperate Orchard Systems: Potential for Incorporation into IPM. *Annual Review of Entomology*, 53(1), 121-144. doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093419.
- Laget E, Guadagnini M, Plénet D et al. (2015) Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques. GIS Fruits et Ministère de l'agriculture, Paris 264 p.
- Lambeets, K., Hendrickx, F., Vanacker, S., Van Looy, K., Maelfait, J.-P., & Bonte, D. (2008). Assemblage structure and conservation value of spiders and carabid beetles from restored lowland river banks. *Biodiversity and Conservation*, 17(13), 3133. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9313-0>.
- Lamichhane, J. R., Aubertot, J.-N., Begg, G., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., ... Messéan, A. (2016). Networking of integrated pest management: A powerful approach to address common challenges in agriculture. *Crop Protection*, 89, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.011>.
- Landis, D. A., Wratten, S. D., & Gurr, G. M. (2000). Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45, 175-201. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.45.1.175>.
- Landis, D. A., & Werf, W. (1997). Early-season predation impacts the establishment of aphids and spread of beet yellows virus in sugar beet. *Entomophaga*, 42(4), 499–516. doi.org/10.1007/BF02769810.
- Landolt, P. J., Brumley, J. A., Smithhisler, C. L., Biddick, L. L., & Hofstetter, R. W. (2000). Apple Fruit Infested with Codling Moth are More Attractive to Neonate Codling Moth Larvae and Possess Increased Amounts of (E,E)- α -Farnesene. *Journal of Chemical Ecology*, 26(7), 1685-1699. doi.org/10.1023/A:1005595014589.
- Landolt, P. J., Hofstetter, R. W., & Chapman, P. S. (1998). Neonate codling moth larvae (Lepidoptera: Tortricidae) orient anemotactically to odor of immature apple fruit. *Pan-Pacific Entomologist*, 74(3), 140-149.

- Lathrop, F. H. (1928). The Biology of Apple Aphids. . The Ohio Journal of Science , 177–204 (4), 28.
- Lecaillon, A., (1905). Nouvelles recherches sur la biologie et la psychologie des Chiracanthion. Bull. Soc. Philom. 7 (9), 224– 252.
- Lefebvre, M., Franck, P., Toubon, J.-F., Bouvier, J.-C., & Lavigne, C. (2016). The impact of landscape composition on the occurrence of a canopy dwelling spider depends on orchard management. Agriculture, Ecosystems & Environment, 215, 20 - 29. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.003>.
- Lefebvre, M. (2016). Régulation des ravageurs par les araignées en verger .(Thèse de doctorat, INRA, UR 1115 PSH Unité de recherche Plantes et Systèmes de Culture Horticoles. Centre de recherche Provence-Alpes-Côte d'Azur, Avignon, France . Ecole doctorale Agrosociences et sciences (ED536), 284. <https://prodinra.inra.fr/record/382909>.
- Legner, E. F., & Oatman, E. R. (1964). Spiders on Apple in Wisconsin and Their Abundance in a Natural and Two Artificial Environments¹. The Canadian Entomologist, 96(9), 1202-1207. doi.org/10.4039/Ent961202-9.
- Letourneau, D. K., Jedlicka, J. A., Bothwell, S. G., & Moreno, C. R. (2009). Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 40(1), 573-592. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120320>.
- Lomborg, J. P., & Toft, S. (2009). Nutritional enrichment increases courtship intensity and improves mating success in male spiders. Behavioral Ecology, 20(4), 700–708. doi.org/10.1093/beheco/arp044.
- Lordan, J., Alegre, S., Moerkens, R., Sarasua, M. J. & Alins, G. (2015) Phenology and interspecific association of *Forficula auricularia* and *Forficula pubescens* in apple orchards. Spanish Journal of Agricultural Research, 13, [doi: 10.5424/sjar/2015131-6814](https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6814).
- Losey, J. E., & Denno, R. F. (1998). Positive Predator–Predator Interactions: Enhanced Predation Rates and Synergistic Suppression of Aphid Populations. Ecology, 79(6), 2143–2152.

[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1998\)079\[2143:PPPIEP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1998)079[2143:PPPIEP]2.0.CO;2).

Luczak, (1979). Spiders in agrocoenoses Pol. Ecol. Stud., 51. 151-200.
eurekamag.com/research/000/752/000752387.php.

Malagnoux, L., Marliac, G., Simon, S., Rault, M., & Capowiez, Y. (2015). Management strategies in apple orchards influence earwig community. *Chemosphere*, 124, 156-162.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.024>.

Mansour, F. (1987). Spiders in sprayed and unsprayed cotton fields in Israel, their interactions with cotton pests and their importance as predators of the Egyptian cotton leaf worm, *Spodoptera littoralis*. *Phytoparasitica*, 15(1), 31–41. doi.org/10.1007/BF02980517.

Mansour, F. (1984). A malathion-tolerant strain of the spider *Chiracanthium mildei* and its response to chlorpyrifos. *Phytoparasitica*, 12(3–4), 163–166.
doi.org/10.1007/BF02981168.

Mansour, F., Richman, D. B., & Whitcomb, W. H. (1984). Spider management in agroecosystems: Habitat manipulation. *Environmental Management*, 7(1), 43 - 49.
<https://doi.org/10.1007/BF01867040>.

Mansour, F., Rosen, D., & Shulov, A. (1981). Disturbing effect of a spider on larval aggregations of *Spodoptera littoralis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 29(2), 234–237.
doi.org/10.1111/j.1570-7458.1981.tb03063.x.

Mansour, F., Rosen, D., & Shulov, A. (1980). Biology of the spider *Chiracanthium mildei* [Arachnida: Clubionidae]. *Entomophaga*, 25(3), 237–248. doi.org/10.1007/BF02371923.

Mansour, F., Rosen, D., & Shulov, A. (1980a). A survey of spider populations (Araneae) in sprayed and unsprayed apple orchards in Israel and their ability to feed on larvae of *Spodoptera littoralis* (Boisd.). *Acta Oecologica, Oecologia Applicata*, 1(2), 189–197.

Mansour, F., Rosen, D., Shulov, A., & Plaut, H. N. (1980b). Evaluation of spiders as biological control agents of *Spodoptera littoralis* larvae on apple in Israel. *Acta Oecologica, Oecologia Applicata*, 1(3), 225–232.

- Marc, P., Canard, A., & Ysnel, F. (1999). Spiders (Araneae) useful for pest limitation and bioindication. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 229–273. doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00038-9.
- Marc, P., & Canard, A. (1997). Maintaining spider biodiversity in agroecosystems as a tool in pest control. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 62(2), 229–235. doi.org/10.1016/S0167-8809(96)01133-4.
- Marc, P. (1993). Analyse de facteurs eco-etho-physiologiques impliqués dans les capacités prédatrices des aranéides : application à la lutte contre des ravageurs en milieu arbustif d'intérêt agronomique (thesis). Rennes 1. <http://www.theses.fr/1993REN10188>.
- Margaritopoulos John T., Voudouris Costas Ch., Olivares Jérôme, Sauphanor Benoit, Mamuris Zissis, Tsitsipis John A., & Franck Pierre. (2012). Dispersal ability in codling moth: mark–release–recapture experiments and kinship analysis. *Agricultural and Forest Entomology*, 14(4), 399–407. doi.org/10.1111/j.1461-9563.2012.00582.x.
- Markó, V., & Keresztes, B. (2014). Flowers for better pest control? Ground cover plants enhance apple orchard spiders (Araneae), but not necessarily their impact on pests. *Biocontrol Science and Technology*, 24(5), 574 - 596. <https://doi.org/10.1080/09583157.2014.881981>.
- Markó, V., Keresztes, B., Fountain, M. T., & Cross, J. V. (2009). Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities. *Biological Control*, 48(2), 115 - 124. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.10.002>.
- Marliac, G., Mazzia, C., Pasquet, A., Cornic, J.-F., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2016). Management diversity within organic production influences epigeal spider communities in apple orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 73 - 81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.026>.
- Marliac G., Penvern S., Barbier J.-M., Lescourret F. & Capowiez Y. (2015a). Impact of crop protection strategies on natural enemies in organic apple production. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 803–813.

- Marliac, G., Simon, S., Mazzia, C., Penvern, S., Lescourret, F., & Capowiez, Y. (2015b). Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol. *BioControl*, 60(6), 805–815. <https://doi.org/10.1007/s10526-015-9687-y>.
- Marliac, G. (2014). Intensification de l'agriculture biologique: conséquences sur la régulation des phytophages en vergers de pommiers (PhD Thèses). Université d'Avignon.
- Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G., & Swift, M. J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science (New York, N.Y.)*, 277(5325), 504–509.
- Martignoni, M. E., & Iwai, P. J. (1986). A catalog of viral diseases of insects, mites, and ticks. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-195. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station; 1986. 57 P, 195. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-195>.
- Mathews, C. R., Bottrell, D. G., & 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*, 30(2), 265–273. doi.org/10.1016/j.biocontrol.2003.11.006.
- Mazzia, C., Cornic, J.-F., Capowiez, Y. & Bounias-Delacour, A. (2018). *Zelotes metellus* Roewer, 1928, nouvelle espèce pour la faune de France. *Revue Arachnologique* 2 5: 14-17.
- Mazzia, C., Pasquet, A., Caro, G., Thénard, J., Cornic, J.-F., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2015). The impact of management strategies in apple orchards on the structural and functional diversity of epigeal spiders. *Ecotoxicology (London, England)*, 24(3), 616 - 625. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1409-1>.
- McGuffin, G.K., Scott, I. M., Bellerose, S., Chouinard, G., Cormier, D., & Scott-Dupree, C. (2014). Susceptibility in field populations of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), in Ontario and Quebec apple orchards to a selection of insecticides. *Pest Management Science*, 71(2), 234–242. doi.org/10.1002/ps.3787.

- Michalko, R., Petráková, L., Sentenská, L., & Pekár, S. (2017). The effect of increased habitat complexity and density-dependent non-consumptive interference on pest suppression by winter-active spiders. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 26 - 33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.025>.
- Michalko, R., & Pekár, S. (2015). The biocontrol potential of *Philodromus* (Araneae, Philodromidae) spiders for the suppression of pome fruit orchard pests. *Biological Control*, 82, 13–20. doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.12.001.
- Miliczky, E. R., Horton, D. R., & Calkins, C. O. (2008). Observations on phenology and overwintering of spiders associated with apple and pear orchards in south-central Washington. *Journal of Arachnology*, 36(3), 565–573. doi.org/10.1636/T07-29.1.
- Miliczky, E. R., & Horton, D. R. (2005). Densities of beneficial arthropods within pear and apple orchards affected by distance from adjacent native habitat and association of natural enemies with extra-orchard host plants. *Biological Control*, 33(3), 249 - 259. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.03.002>.
- Miliczky, E. R., & Calkins, C. O. (2002). Spiders (Araneae) as potential predators of leafroller larvae and egg masses (Lepidoptera: Tortricidae) in central Washington apple and pear orchards. *Pan-Pacific Entomologist*, 78, 140–150.
- Miñarro, M., Fernández-Mata, G., & Medina, P. (2010). Role of ants in structuring the aphid community on apple. *Ecological Entomology*, 35(2), 206-215. doi.org/10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x.
- Miñarro, M., Espadaler, X., Melero, V. X., & Suárez-Álvarez, V. (2009). Organic versus conventional management in an apple orchard: effects of fertilization and tree-row management on ground-dwelling predaceous arthropods. *Agricultural and Forest Entomology*, 11(2), 133-142. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2008.00403.x>.
- Miñarro, M., Hemptinne, J.-L., & Dapena, E. (2005). Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea*: sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl*, 50(3), 403-414. doi.org/10.1007/s10526-004-5527-1.

- Monteiro, Lino B., Claire Lavigne, Benoît Ricci, Pierre Franck, Jean-François Toubon, et Benoît Sauphanor. 2013. « Predation of codling moth eggs is affected by pest management practices at orchard and landscape levels ». *Landscape ecology and biodiversity in agricultural landscapes* 166 (0): 86 -93. doi:10.1016/j.agee.2011.10.012.
- Morano ,E. Carrillo, J. Cardoso, P (2014) Iberian spider catalogue (v 3.1). www.ennor.org/iberia [access date 02.2016].
- Morano ,E ,& Bonal R. (2016). *Cheiracanthium ilicis* sp. n. (Araneae, Eutichuridae), a novel spider species associated with Holm Oaks (*Quercus ilex*). *ZooKeys*, (601), 21–39. doi.org/10.3897/zookeys.601.8241.
- Murdoch, W. W., Chesson, J., & Chesson, P. L. (1985). Biological Control in Theory and Practice. *The American Naturalist*, 125(3), 344- 366. <https://doi.org/10.1086/284347>.
- Nentwig W, Blick T, Gloor D, Hänggi A, Kropf C (2018). *Spinnen Europas*. <https://www.araneae.nmbe.ch>. Version 10. 2018.
- Nentwig, W., & Wissel, C. (1986). A comparison of prey lengths among spiders. *Oecologia*, 68(4), 595 -600. <https://doi.org/10.1007/BF00378777>.
- Nicholls, A. H., Spooner-Hart, R. N., & Vickers, R. A. (2005). Abundance and natural control of the woolly aphid *Eriosoma lanigerum* in an Australian apple orchard IPM program. *BioControl*, 50(2), 271 -291. <https://doi.org/10.1007/s10526-004-0334-2>.
- Nicholls, C., & Altieri, M. (2002). Biodiversidad y diseño agroecológico: un estudio de caso de manejo de plagas en viñedos. Retrieved from <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:8080/handle/11554/5827>.
- Nyffeler, M., & Sunderland, K. D. (2003). Composition, abundance and pest control potential of spider communities in agroecosystems: a comparison of European and US studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95(2), 579–612. doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00181-0.
- Nyffeler, M., & Benz, G. (1987). Spiders in natural pest control: A review1. *Journal of Applied*

- Entomology, 103(1-5), 321-339. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1987.tb00992.x>.
- Nyffeler, M. (1982). Field studies on the ecological role of the spiders as insect predators in agroecosystems (abandoned grassland, meadows, and cereal fields) (Doctoral Thesis). ETH Zurich.doi.org/10.3929/ethz-a-000287826.
- Öberg, S., Ekbom, B., & Bommarco, R. (2007). Influence of habitat type and surrounding landscape on spider diversity in Swedish agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(2), 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.034>.
- Öberg, S., & Ekbom, B. (2006). Recolonisation and distribution of spiders and carabids in cereal fields after spring sowing. *Annals of Applied Biology*, 149(2), 203 - 211. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00088.x>.
- Ohlendorf, B.L.P., 1999. Integrated pest management for apples and pears, second edition. Statewide Integrated Pest Management Program, Agriculture and Natural Resources, University of California.
- Östman, Ö., Ekbom, B., & Bengtsson, J. (2001). Landscape heterogeneity and farming practice influence biological control. *Basic and Applied Ecology*, 2(4), 365 - 371. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00072>.
- Pajač, I., Pejić, I., & Barić, B. (2011). Codling Moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) – Major Pest in Apple Production: an Overview of its Biology, Resistance, Genetic Structure and Control Strategies. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 76(2), 87–92.
- Park, Y.-C., Yoo, J.-S., & Kim, J.-P. (2007). Diversity of Spider Communities in a Pesticide-treated Pine (*Pinus densiflora*) Forest. *Journal of Ecology and Environment*, 30(2), 179-186. <https://doi.org/10.5141/JEFB.2007.30.2.179>.
- Pascal, M. (1993). Perspectives de lutte biologique contre les Rongeurs champêtres. *Le Courrier de L'environnement de l'INRA*, 19(19), 45–52.
- Pasquet, A., Tupinier, N., Mazzia, C., & Capowiez, Y. (2016). Exposure to spinosad affects orb-web spider (*Agalenatea redii*) survival, web construction and prey capture under

- laboratory conditions. *Journal of Pest Science*, 89(2), 507 - 515. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0691-x>.
- Peck, W. B. & Whitcomb, W. (1970). Studies on the biology of a spider. *Chiracanthium inclusum* (HENTZ). *Bull. Ark. Exp. Stn.*, 753.
- Pekár, S., & Toft, S. (2015). Trophic specialisation in a predatory group: the case of prey-specialised spiders (Araneae). *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 90(3), 744–761. doi.org/10.1111/brv.12133.
- Pekár, S., Michalko, R., Loverre, P., Líznarová, E., & Černecká, L. (2015). Biological control in winter: novel evidence for the importance of generalist predators. *Journal of Applied Ecology*, 52(1), 270–279. doi.org/10.1111/1365-2664.12363.
- Pekár, S. (2012). Spiders (Araneae) in the pesticide world: an ecotoxicological review. *Pest Management Science*, 68(11), 1438-1446. <https://doi.org/10.1002/ps.3397>.
- Pekár, S., & Haddad, C. R. (2005). Can agrobiont spiders (Araneae) avoid a surface with pesticide residues? *Pest Management Science*, 61(12), 1179 - 1185. <https://doi.org/10.1002/ps.1110>.
- Pekár, S., & Kocourek, F. (2004). Spiders (Araneae) in the biological and integrated pest management of apple in the Czech Republic. *Journal of Applied Entomology*, 128(8), 561 -566. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2004.00884.x>.
- Pekár, S. (1999). Effect of IPM practices and conventional spraying on spider population dynamics in an apple orchard. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 73(2), 155–166. [doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00024-9).
- Pekar, S. (1999). Some observations on overwintering of spiders (Araneae) in two contrasting orchards in Czech Republic. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 73, 205–210.
- Peng, H.-S., Huang, S.-H., & Wolfbeis, O. S. (2010). Ratiometric fluorescent nanoparticles for sensing temperature. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(8), 2729 - 2733. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0046-8>.

- Pérez-Guerrero, S., Gelan-Begna, A., Tamajón, R., & Vargas-Osuna, E. (2013). Potential predation of non-webbuilding spider assemblage on cotton pests *Helicoverpa armigera* and *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuidae). *Biocontrol Science and Technology*, 23(3), 335-347. <https://doi.org/10.1080/09583157.2012.758237>.
- Petráková, L., Michalko, R., Loverre, P., Sentenská, L., Korenko, S., & Pekár, S. (2016). Intraguild predation among spiders and their effect on the pear psylla during winter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 67 - 74. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.008>.
- Picchi, M. S., Bocci, -->Gionata, Petacchi, R., & Entling, M. H. (2016). Effects of local and landscape factors on spiders and olive fruit flies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 222, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.045>.
- Picchi, M. S., Bocci, -Gionata, Petacchi, R., & Entling, M. H. (2016). Effects of local and landscape factors on spiders and olive fruit flies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 222, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.045>.
- Pickett, C. H., & Bugg, R. L. (1998). *Enhancing Biological Control: Habitat Management to Promote Natural Enemies of Agricultural Pests*. University of California Press.
- Pimentel, D., Acquay, H., Biltonen, M., Rice, P., Silva, M., Nelson, J., ... D'Amore, M. (1992). Environmental and Economic Costs of Pesticide Use. *BioScience*, 42(10), 750 - 760. <https://doi.org/10.2307/1311994>.
- Pitcairn, M.J., C. Pickel, L. Falcon, F. Zalom. (1991). Development and survivorship of *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) at ten constant temperatures. *Pan-Pacific Entomol.* 67: 198-194.09583157.2013.855167.
- Pfannenstiel, R. S. (2008a). Development of the Cursorial Spider, *Cheiracanthium inclusum* (Araneae: Miturgidae), on Eggs of *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Entomological Science*, 43(4), 418-422. <https://doi.org/10.18474/0749-8004-43.4.418>.
- Pfiffner, L., & Luka, H. (2003). Effects of low-input farming systems on carabids and epigeal spiders - A paired farm approach | Request PDF. Consulté 24 septembre 2018, à l'adresse

<https://www.researchgate.net/publication/222512735>.

Pfiffner, L., & Luka, H. (2000). Overwintering of arthropods in soils of arable fields and adjacent semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 78(3), 215 - 222.

[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00130-9).

Pfister, S. C., Schäfer, R. B., Schirmel, J., & Entling, M. H. (2015). Effects of hedgerows and riparian margins on aerial web-building spiders in cereal fields. *The Journal of Arachnology*, 43(3), 400-405.

planetoscope.com.(2017).

Polis, G. A., & Holt, R. D. (1992). Intraguild predation: the dynamics of complex trophic interactions. *Trends in Ecology & Evolution*, 7(5), 151–154.

Polis, G. A., C A Myers, & Holt, and R. D. (1989). The Ecology and Evolution of Intraguild Predation: Potential Competitors That Eat Each Other. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 297–330. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.001501>.

Polis, G. A., & McCormick, S. J. (1987). Intraguild Predation and Competition Among Desert Scorpions. *Ecology*, 68(2), 332–343. <https://doi.org/10.2307/1939264>.

Pottinger, R. P., & LeRoux, E. J. (1971). The Biology and dynamics of lithocolletis Blancardella (Lepidoptera: Gracillariidae) ON Apple in Quebe*. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 103(S77), 1-437. <https://doi.org/10.4039/entm10377fv>.

Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2959 - 2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>.

Prieto-Benítez, S., & Méndez, M. (2011). Effects of land management on the abundance and richness of spiders (Araneae): A meta-analysis. *Biological Conservation*, 144, 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.11.024>.

Pywell, R. F., James, K. L., Herbert, I., Meek, W. R., Carvell, C., Bell, D., & Sparks, T. H. (2005). Determinants of overwintering habitat quality for beetles and spiders on arable

- farmland. *Biological Conservation*, 123(1), 79 - 90.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.10.010>.
- Qian, G.-Z., Liu, L.-F., & Tang, G.-G. (2010). (1933) Proposal to conserve the name *Malus domestica* against *M. pumila*, *M. communis*, *M. frutescens*, and *Pyrus dioica* (Rosaceae). *Taxon*, 59, 650–652. doi.org/10.2307/25677631.
- Qubbaj, T., Reineke, A., & Zebitz, C. P. W. (2005). Molecular interactions between rosy apple aphids, *Dysaphis plantaginea*, and resistant and susceptible cultivars of its primary host *Malus domestica*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 115(1), 145 - 152. doi.org/10.1111/j.1570-7458.2005.00255.x.
- Quaglietti, B., Tamisier, L., Groussier, G., Fleisch, A., Le Goff, I., Ris, N., ... Malausa, T. (2017). No inbreeding depression in laboratory-reared individuals of the parasitoid wasp *Allotropa burrelli*. *Ecology and Evolution*, 7(3), 964–973. doi.org/10.1002/ece3.2643.
- Ramírez, M. J., Ramírez, M. J., Bonaldo, A. B., & Brescovit, A. D. (1997). Revisión del género *Macerio* y comentarios sobre la ubicación de *Cheiracanthium*, *Tecution* y *Helebiona* (Araneae, Miturgidae, Eutichurinae). *Iheringia.*, 82, 43–66.
- Ramírez, M. J. (2014). The Morphology And Phylogeny Of Dionychan Spiders (Araneae: Araneomorphae). *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 1–374. doi.org/10.1206/821.1.
- Rat-Morris, E., 1994. Analyse des relations entre *Dysaphis plantaginea* Passerini (Insecta, Auchenorrhyncha) et sa plante hôte *Malus x domestica* Borkh: étude de la résistance du cultivar Florina. Thèse de Doctorat, Université François Rabelais, Tours.
- Reyes, M., Barros-Parada, W., Ramírez, C. C., & Fuentes-Contreras, E. (2015). Organophosphate Resistance and Its Main Mechanism in Populations of Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) from Central Chile. *Journal of Economic Entomology*, 108(1), 277–285. doi.org/10.1093/jee/tou001.
- Ricci, B., Franck, P., Bouvier, J.-C., Casado, D., & Lavigne, C. (2011). Effects of hedgerow characteristics on intra-orchard distribution of larval codling moth. *Agriculture*,

- Ecosystems & Environment, 140(3), 395 - 400.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.001>.
- Riedl, H., & A. Croft, B. (1978). The effects of photoperiod and effective temperatures on the seasonal phenology of the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Canadian Entomologist - CAN ENTOMOL*, 110, 455-470. doi.org/10.4039/Ent110455-5.
- Riechert, S. E. (1999). The Hows and Whys of Successful Pest Suppression by Spiders: Insights from Case Studies. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 387-396.
- Riechert, S. E., & Bishop, L. (1990). Prey Control by an Assemblage of Generalist Predators: Spiders in Garden Test Systems. *Ecology*, 71(4), 1441 - 1450.
<https://doi.org/10.2307/1938281>.
- Riechert, S. E. & Lockley, T. (1984). Spiders as Biological Control Agents. *Annual Review of Entomology*, 29(1), 299-320. doi.org/10.1146/annurev.en.29.010184.001503.
- Rieux, R., Cayrol, R., Lyoussoufi, A. & Faivre D'Arcier, F. (1994). Evolution de la diapause du psylle du poirier *Cacopsylla pyri* dans les conditions naturelles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 70(2), 193 - 199. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1994.tb00747.x>.
- Roberts, M.J., (2009). *Guide des araignées de France et d'Europe*.
- Romet, L. (2004) a. Le point sur la stratégie de lutte automnale contre le puceron cendré du pommier. *Alter Agri*. 67, 14-18.
- Romet, L. (2004)b. The position of the autumnal control strategy for apple ash aphid. *Le Fruit Belge* 72, 124-129.
- Rosenheim, J. A., Wilhoit, L. R., & Armer, C. A. (1993). Influence of intraguild predation among generalist insect predators on the suppression of an herbivore population. *Oecologia*, 96(3), 439-449. <https://doi.org/10.1007/BF00317517>.
- Romeu-Dalmau, C., Espadaler, X. & Pinol, J. (2011). Abundance, interannual variation and potential pest predator role of two co-occurring earwig species in citrus canopies. *Journal*

- of Applied Entomology, 136, 501–509.
- Rypstra, A. L., Carter, P. E., Balfour, R. A., & Marshall, S. D. (1999). Architectural Features of Agricultural Habitats and Their Impact on the Spider Inhabitants. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 371–377.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M.M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., Thies, C., Tschardtke, T., Weisser, W.W., Winqvist, C., Woltz, M., Bommarco, R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis - *Agric. Ecosyst. Environ.* 221, 198–204.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916300512>.
- Santos, S. A. P., Pereira, J. A., Torres, L. M., & Nogueira, A. J. A. (2007). Evaluation of the effects, on canopy arthropods, of two agricultural management systems to control pests in olive groves from north-east of Portugal. *Chemosphere*, 67(1), 131 - 139.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.014>.
- Sauphanor B, Dirwimmer C, Boutin S, Chaussabel AL, Dupont N, Fauriel J, Gallia V, Lambert N, Navarro E, Parisi L, Plenet D, Ricaud V, Sagnes JL, Sauvaitre D, Simon S, Speich P, Zavagli F (2009) Analyse comparatives de différents systèmes en arboriculture fruitière. In: INRA, Ecophyto R&D: vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires Rapport d'expertise, Tome IV, INRA, Paris. agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR2014012913.
- Sauphanor, B., Chabrol, L., Faivre d'Arcier, F., Sureau, F., & Lenfant, C. (1993). Side effects of diflubenzuron on a pear psylla predator: *Forficula auricularia*. *Entomophaga*, 38(2), 163-174. <https://doi.org/10.1007/BF02372550>.
- Schaefer, M., (1977). Winter ecology of spiders. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 83, 113-134.
- Schmidt, M. H., Thies, C., Nentwig, W., & Tschardtke, T. (2008). Contrasting responses of arable spiders to the landscape matrix at different spatial scales. *Journal of Biogeography*, 35(1), 157-166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01774.x>.

- Schmidt, M. H., & Tschardtke, T. (2005). The role of perennial habitats for Central European farmland spiders. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105(1), 235 - 242. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.03.009>.
- Schumacher, P., WEyENETH, A., Weber, D. C., & Dorn, S. (1997). Long flights in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) measured by a flight mill: influence of sex, mated status and age. *Physiological Entomology*, 22(2), 149-160. doi.org/10.1111/j.1365-3032.1997.tb01152.x.
- Shel'Deshova, G.G., 1967. Ecological factors determining distribution of the codling moth *Lapspeyresia pomonella* L. in the northern and southern hemispheres. *Ento-mol. Rev.* 46, 349–361.
- Sigsgaard, L. (2007). Early season natural control of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*: the contribution and interaction of two spider species and a predatory bug. *Bulletin of Entomological Research*, 97(5), 533-544. <https://doi.org/10.1017/S0007485307005196>.
- Sih, A., Englund, G., & Wooster, D. (1998). Emergent impacts of multiple predators on prey. *Trends in Ecology & Evolution*, 13(9), 350–355. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01437-2](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01437-2).
- Simon, S., Brun, L., Guinaudeau, J., & Sauphanor, B. (2011). Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(3), 541-555. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0003-7>.
- Simon, S., Bouvier, J.-C., Debras, J.-F. & Sauphanor, B. (2010). Biodiversity and pest management in orchard systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 139–152.
- Simon, S., Defrance, H., & Sauphanor, B. (2007). Effect of codling moth management on orchard arthropods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(3), 340–348. doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.020.
- SNP, 2018. Site internet de la section nationale pomme. <http://lapomme.org/>.

- Snyder, W. E., Snyder, G. B., Finke, D. L., & Straub, C. S. (2006). Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecology Letters*, 9(7), 789–796. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00922.x>
- Solomon, M. G., Cross, J. V., Fitzgerald, J. D., Campbell, C. A. M., Jolly, R. L., Olszak, R. W., Vogt, H. (2000). Biocontrol of Pests of Apples and Pears in Northern and Central Europe - 3. Predators. *Biocontrol Science and Technology*, 10(2), 91 - 128. <https://doi.org/10.1080/09583150029260>.
- Soluk, D. A. (1993). Multiple Predator Effects: Predicting Combined Functional Response of Stream Fish and Invertebrate Predators. *Ecology*, 74(1), 219–225. <https://doi.org/10.2307/1939516>.
- Starnes, R. L., Liu, C. L., & Marrone, P. G. (1993). History, Use, and Future of Microbial Insecticides. *American Entomologist*, 39(2), 83–91. <https://doi.org/10.1093/ae/39.2.83>.
- Stephenson, G. R. (2003). Pesticide Use and World Food Production: Risks and Benefits. In *Environmental Fate and Effects of Pesticides* (Vol. 853, pp. 261–270). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2003-0853.ch015>.
- Stewart-Jones, A., Dewhurst, S. Y., Durrant, L., Fitzgerald, J. D., Hardie, J., Hooper, A. M., Poppy, G. M. (2007). Structure, ratios and patterns of release in the sex pheromone of an aphid, *Dysaphis plantaginea*. *Journal of Experimental Biology*, 210(24), 4335 - 4344. doi.org/10.1242/jeb.009944.
- Stireman, J. O., O'Hara, J. E., & Wood, D. M. (2006). Tachinidae: Evolution, Behavior, and Ecology. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 525–555. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151133>.
- Straub, C. S., Finke, D. L., & Snyder, W. E. (2008). Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals? *Biological Control*, 45(2), 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.05.013>.
- Stutz, S., & Entling, M. H. (2011). Effects of the landscape context on aphid-ant-predator interactions on cherry trees. *Biological Control*, 57(1), 37 - 43.

- <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2011.01.001>.
- Sunderland, K. D., & Greenstone, M. H. (1999). Afterword: Summary and Future Directions for Research on Spiders in Agroecosystems. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 397–400.
- Sutherland, O. R. W., & Hutchins, R. F. N. (1972). α -Farnesene, a Natural Attractant for Codling Moth Larvae. *Nature*, 239(5368), 170. doi.org/10.1038/239170a0.
- Sunderland, K. D. (1986). Distribution of linyphiid spiders in relation to capture of prey in cereal fields. *Pedobiologia*, 29, 367–375.
- Suter, R. B. (1999). An Aerial Lottery: The Physics of Ballooning in a Chaotic Atmosphere. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 281–293.
- Symondson, W. O. C., Sunderland, K. D., & Greenstone, M. H. (2002). Can Generalist Predators be Effective Biocontrol Agents? *Annual Review of Entomology*, 47(1), 561–594. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.47.091201.145240>.
- Szeinfeld, E. V. (1991). Cannibalism and intraguild predation in clupeoids. *Marine Ecology Progress Series*. Oldendorf, 79(1), 17–26.
- Tamaki, G. & Halfhill, J. E. (1968). Bands on peach trees as shelters for predators of the green peach aphid. *Journal of Economical Entomology*, 61, 707–711.
- Thaler, R., Brandstätter, A., Meraner, A., Chabicovski, M., Parson, W., Zelger, R., ... Dallinger, R. (2008). Molecular phylogeny and population structure of the codling moth (*Cydia pomonella*) in Central Europe: II. AFLP analysis reflects human-aided local adaptation of a global pest species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48(3), 838–849. doi.org/10.1016/j.ympev.2008.05.027.
- Thomas, C. F. G., & Jepson, P. C. (1997). Field-scale effects of farming practices on linyphiid spider populations in grass and cereals. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 84(1), 59–69. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.1997.00198.x>.
- Thomson, L. J., & Hoffmann, A. A. (2010). Natural enemy responses and pest control: Importance of local vegetation. *Biological Control*, 52(2), 160–166.

- <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.10.008>.
- Thorbek, P., & Bilde, T. (2004). Reduced numbers of generalist arthropod predators after crop management. *Journal of Applied Ecology*, 41(3), 526–538. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00913.x>.
- Toft, S. (1999). Prey Choice and Spider Fitness. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 301–307.
- Tscharntke, T., Sekercioglu, C. H., Dietsch, T. V., Sodhi, N. S., Hoehn, P., & Tylianakis, J. M. (2008). Landscape Constraints on Functional Diversity of Birds and Insects in Tropical Agroecosystems. *Ecology*, 89(4), 944–951. <https://doi.org/10.1890/07-0455.1>.
- Tschumi, M., Albrecht, M., Collatz, J., Dubsy, V., Entling, M. H., Najar-Rodriguez, A. J., & Jacot, K. (2016). Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops. *Journal of Applied Ecology*, 53(4), 1169 – 1176. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12653>.
- Traugott, M., Kamenova, S., Ruess, L., Seeber, J., & Plantegenest, M. (2012). Chapter Three - Empirically Characterising Trophic Networks: What Emerging DNA-Based Methods, Stable Isotope and Fatty Acid Analyses Can Offer. In G. Woodward & D. A. Bohan (Éd.), *Advances in Ecological Research* (Vol. 49, p. 177 - 224). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420002-9.00003-2>.
- Trillot M, Masseron A, Mathieu V, Bergougnoux F, Hutin C, Lespinasse Y.(2002). *Le pommier*. CTIFL, Paris, 292p.
- Turnbull, A. L. (1973). Ecology of the True Spiders (Araneomorphae). *Annual Review of Entomology*, 18(1), 305–348. doi.org/10.1146/annurev.en.18.010173.001513..
- Turnbull, A. L. (1962). The prey of the spider *linyphia triangularis* (clerk) (araneae, linyphiidae). *Canadian Journal of Zoology*, 38(5), 859–873. doi.org/10.1139/z60-091.
- Tylianakis, J. M., & Romo, C. M. (2010). Natural enemy diversity and biological control: Making sense of the context-dependency. *Basic and Applied Ecology*, 11(8), 657–668. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.08.005>.

- Uetz, G., Halaj, J., & Cady, A. (1999). Guild structure of spiders in major crops. *Journal of Arachnology*, Volume 27, . 270-280.academia.edu/20993560.
- Unruh, T. R., Miliczky, E. R., Horton, D. R., Thomsen-Archer, K., Rehfield-Ray, L., & Jones, V. P. (2016). Gut content analysis of arthropod predators of *codling moth* in Washington apple orchards. *Biological Control*, 102, 85 - 92. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.05.014>.
- Van Driesche, R. G., Carruthers, R. I., Center, T., Hoddle, M. S., Hough-Goldstein, J., Morin, L., Smith, L., Wagner, D.L., Blossey, B., Brancatini, V., Casagrande, R., Causton, C.E., Coetzee, J.A., Cuda, J., Ding, J., Fowler, S.V., Frank, J.H., Fuester, R., Goolsby, J., Grodowitz, M., Heard, T.A., Hill, M.P., Hoffmann, J.H., Huber, J., Julien, M., Kairo, M.T.K., Kenis, M., Mason, P., Medal, J., Messing, R., Miller, R., Moore, A., Neuenschwander, P., Newman, R., Norambuena, H., Palmer, W.A., Pemberton, R., Panduro, A.P., Pratt, P.D., Rayamajhi, M., Salom, S., Sands, D., Schooler, S., Schwarzlander, M., Sheppard, A., Shaw, R., Tipping, P.W., van Klinken, R. D. (2010). Classical biological control for the protection of natural ecosystems. *Biological Control*, 54, S2–S33. doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.03.003.
- Van Driesche, R. G., Lyon, S., Sanderson, J. P., Bennett, K. C., E. J. Stanek, & Zhang, R. (2008). Greenhouse Trials of *Aphidius Colemani* (Hymenoptera: Braconidae) Banker Plants for Control of Aphids (Hemiptera: Aphididae) in Greenhouse Spring Floral Crops. *Florida Entomologist*, 91(4), 583–591. <https://doi.org/10.1653/0015-4040-91.4.583>.
- Van Driesche, R.G., Hoddle, M., Center, T. D., Ruíz, C. E., Coronada, B. J., & Manuel, A. J. (2007). Control de plagas y malezas por enemigas naturales. US Department of Agriculture, US Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team.
- Van Driesche, R.G., & Bellows, T. S. (1996). Biology of Arthropod Parasitoids and Predators. In *Biological Control* (pp. 309–336). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1157-7_15.
- Van Lenteren, J. C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57(1), 1–20.

- doi.org/10.1007/s10526-011-9395-1.
- Van Lenteren, J. C. (2000). A greenhouse without pesticides: fact or fantasy? *Crop Protection*, 19(6), 375–384. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00038-7).
- Van Lenteren, J. C., Bale, J., Bigler, F., Hokkanen, H. M. T., & Loomans, A. J. M. (2006). Assessing Risks of Releasing Exotic Biological Control Agents of Arthropod Pests. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 609–634. doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151129.
- Vickers, R. A. (1997). Effect of Delayed Mating on Oviposition Pattern, Fecundity and Fertility in Codling Moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Australian Journal of Entomology*, 36(2), 179-182. doi.org/10.1111/j.1440-6055.1997.tb01452.x.
- Villenave-Chasset, J. (2006). Etude de la Bio-écologie des Névroptères dans une perspective de lutte biologique par conservation. (PhD Thesis). Université d'Angers.
- Vincent, C., Panneton, B., & Fleurat-Lessard, F. (1992). La lutte physique en phytoprotection. Editions Quae. Gaëtan Morin, Québec, Canada.
- Virlet, N., Lebourgeois, V., Martinez, S., Costes, E., Labbé, S., & Regnard, J.-L. (2014). Stress indicators based on airborne thermal imagery for field phenotyping a heterogeneous tree population for response to water constraints. *Journal of Experimental Botany*, 65(18), 5429–5442. doi.org/10.1093/jxb/eru309.
- Walling, L. L. (2008). Avoiding Effective Defenses: Strategies Employed by Phloem-Feeding Insects. *Plant Physiology*, 146(3), 859–866. doi.org/10.1104/pp.107.113142.
- Wajnberg, E. (2004). Measuring genetic variation in natural enemies used for biological control: Why and how? In *Genetics, Evolution and Biological Control* (ed. L.E. Ehler, R. Sforza et T. Mateille). CABI Publishing, Oxon (Cromwell Press, Trowbridge, pp. 19–37).
- World Spider Catalog (2018). Version 19.5. Natural History Museum Bern, <http://wsc.nmbe.ch>
- Weyman, G. S., Jepson, P. C., & Sunderland, K. D. (1995). Do seasonal changes in numbers of aerially dispersing spiders reflect population density on the ground or variation in

- ballooning motivation? *Oecologia*, 101(4), 487 - 493.
<https://doi.org/10.1007/BF00329428>.
- Whitcomb, W. (1974). Natural populations of entomophagous arthropods and their effect on the agroecosystem. *Journal of Environment Quality*, 4(4), 150–169.
doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400040028x.
- Whitcomb, W. H., & Bell, K. O. (1964). Predaceous Insects, Spiders, and Mites of Arkansas Cotton Fields. Agricultural Experiment Station, Division of Agriculture, University of Arkansas. 690 (1964), pp. 1-84.
- Whitcomb, W. H., Elink, H., & C. Hunter, R. (1963). Spiders of the Arkansas Cotton Field. *Annals of the Entomological Society of America*, 56, 653–660. doi.org/10.1093/aesa/56.5.653.
- Wilbur, H. M., & Fauth, J. E. (1990). Experimental Aquatic Food Webs: Interactions between Two Predators and Two Prey. *The American Naturalist*, 135(2), 176–204.
doi.org/10.1086/285038.
- Wilder, S. M. (2011). Spider Nutrition: An Integrative Perspective. In J. Casas (Ed.), *Advances in Insect Physiology* (Vol. 40, pp. 87–136). Academic Press. doi.org/10.1016/B978-0-12-387668-3.00002-7.
- Winkler, K. (2005). Assessing the risks and benefits of flowering field edges: strategic use of nectar sources to boost biological control. (PhD Thesis). Wageningen University .
- Wise, D. H., Snyder, W. E., Tuntibunpakul, P., & Halaj, J. (1999). Spiders in Decomposition Food Webs of Agroecosystems: Theory and Evidence. *The Journal of Arachnology*, 27(1), 363–370.
- Wise, D. H., Schaefer, M. (1995) Decomposition of leaf litter in a mull beech forest: comparison between canopy and herbaceous species. *Pedobiologia* 38, 269–288.
- Wise, D., 1993 *Spiders in Ecological Webs*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Wisniewska, J., & Prokopy, R. J. (1997). Pesticide Effect on Faunal Composition, Abundance, and Body Length of Spiders (Araneae) in Apple Orchards. *Environmental Entomology*,

- 26(4), 763–776. doi.org/10.1093/ee/26.4.763.
- Wissinger, S. A. (1997). Cyclic Colonization in Predictably Ephemeral Habitats: A Template for Biological Control in Annual Crop Systems. *Biological Control*, 10(1), 4 - 15. <https://doi.org/10.1006/bcon.1997.0543>.
- Wyss, E., Luka, H., Pfiffner, L., Schlatter, C., Uehlinger, G., & Daniel, C. (2005) Approaches to pest management in organic agriculture: a case study in European apple orchards, Cab International: Organic-Researchcom.
- Wyss, E. & Daniel C. (2004). Effects of autumn kaolin and pyrethrin treatments on the spring populations of *Dysaphis plantaginea* in apple orchards. *Journal of Applied Entomology*, 128, 147–149.
- Wyss, M. (2001). New agency to promote natural hazards risk reduction worldwide. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(40), 456 - 456. <https://doi.org/10.1029/01EO00273>.
- Wyss, E. (1996). The effects of artificial weed strips on diversity and abundance of the arthropod fauna in a Swiss experimental apple orchard. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 60(1), 47–59. doi.org/10.1016/S0167-8809(96)01060-2.
- Wyss, E., Niggli, U., & Nentwig, W. (1995). The impact of spiders on aphid populations in a strip-managed apple orchard. *Journal of Applied Entomology*, 119(1–5), 473–478. doi.org/10.1111/j.1439-0418.1995.tb01320.x.
- Wyss, E. (1995). The effects of weed strips on aphids and aphidophagous predators in an apple orchard. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 75(1), 43 - 49. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1995.tb01908.x>.
- Zhang W, Ricketts TH, Kremen C, Carney K, Swinton SM (2007) Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64 (2):253-260. doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024.

Résumé

Lutte biologique par conservation dans les verges de pommiers : peut-on manipuler les communautés d'araignées pour augmenter leur efficacité contre certains ravageurs ?

Dans le contexte des plans Ecophyto, il est primordial de trouver des alternatives aux traitements phytosanitaires. La lutte biologique par conservation fait partie de ces alternatives et, dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à déterminer les rôles possibles des araignées en tant que prédateurs généralistes dans les verges de pommiers. Pour cela, trois axes de travail ont été définis : **(i)** d'abord étudier les facteurs locaux (protection phytosanitaire et environnement des verges) expliquant l'abondance et la diversité des communautés d'araignées; **(ii)** ensuite déterminer si les araignées sont actives en hiver dans les verges dans le but d'estimer leur rôle sur les stades hivernants de ravageurs; **(iii)** et enfin étudier la faisabilité et l'efficacité d'un lâcher d'araignées contre le carpocapse des pommes. Dans le premier axe, nous avons mis en évidence des effets significatifs (abondance, diversité, composition) entre les communautés d'araignées issues des verges en AB et celles issues des verges PFI, par contre les effets de l'environnement proche des verges (haies et parcelles alentour) ne semblent pas prépondérants. Dans le second axe, nous avons démontré que dans les verges du Sud-est de la France, on trouve des araignées actives même au coeur de l'hiver, les plus abondantes furent les *Philodromus* sp, les *Trachelas* sp. et les *Clubiona* sp. Enfin dans le dernier axe, nous avons montré qu'il était possible de transférer et lâcher des araignées d'intérêt (*C. mildei* et *C. leucapsis*) et que l'abondance du carpocapse diminuait quand celle de *C. mildei* augmentait à l'échelle de l'arbre, au moins la première année après le lâcher. L'ensemble de ces résultats permet de poser les bases d'une gestion active des communautés d'araignée en vue d'augmenter leur contribution à la lutte biologique en verger.

Summary

Biological control by conservation in apple yards: Can we manipulate spider communities to increase their effectiveness against some pests?

It is now crucial to develop new control tools to replace the use of pesticides. Biological control is one of this tool and we thus studied the possible roles of spiders as generalist predators in apple orchards. Three studies were carried out: the first one to determine which local factors (protection management and characteristics of the surroundings) govern spider communities (abundance, diversity) in apple orchards; the second to determine which spiders remain active in winter to control resting stages of some pests; and the last to assess the feasibility of a transfer and release of some spider species into an orchard. We first showed that organic and IPM orchards hosted very different spider community and that, in contrast, local characteristics (hedges and percentage of orchards in the vicinity) had only minor effects. We further demonstrated that some spiders were active winter-long in apple orchards in South-east of France with high abundances for some genus like *Philodromus*, *Trachelas* and *Clubiona*. *Lastly* we showed that transferring and releasing some spider species of interest (*C. mildei* and *C. leucapsis*) is possible and greatly increased the abundance of the released species for one year in the target orchard. We moreover observed a significantly negative relationship between *C. mildei* and codling moth abundance at the tree scale. These results proved that spider populations can be managed to increase their role in the biological control of important pests in pomefruit orchards.