



HAL
open science

Prévoir les régulations naturelles des pucerons par les auxiliaires en grandes cultures : collectes et analyses de données en vue de l'amélioration d'un outil d'évaluation multicritère DEXi

Pilar Otero Sancho

► To cite this version:

Pilar Otero Sancho. Prévoir les régulations naturelles des pucerons par les auxiliaires en grandes cultures : collectes et analyses de données en vue de l'amélioration d'un outil d'évaluation multicritère DEXi. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-02962273

HAL Id: dumas-02962273

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02962273>

Submitted on 9 Nov 2020

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

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



Mémoire de stage
Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, option Inter-Etablissement
Protection des Plantes et Environnement

Sur le thème

**Prévoir les régulations naturelles des pucerons par les auxiliaires
en grandes cultures**
**Collectes et analyses de données en vue de l'amélioration d'un
outil d'évaluation multicritère DEXi.**

Par

Pilar OTERO SANCHO

Ecole de rattachement : Montpellier SupAgro

Stage réalisé à : L'ACTA-les instituts techniques agricoles
ACTA, ICB, VETAGROSUP
1 avenue Bourgelat 69280 Marcy l'étoile

Sous la Direction de : André CHABERT

Soutenu le 26 septembre 2018 à Montpellier, devant le jury composé de :

Président: Manuel PLANTEGENEST
Membres: Ivan SACHE et Cyril PIOU



Résumé

En France, la plus grande partie des surfaces agricoles sont occupées par des grandes cultures qui sont impactées par divers ravageurs causant des dégâts directs et indirects et des pertes économiques importantes. Parmi ceux-ci les pucerons sont les ravageurs les plus redoutés. Concernant les méthodes alternatives aux insecticides vis-à-vis des pucerons, la « régulation naturelle ou le contrôle biologique par conservation » tend à rechercher des solutions pour favoriser les organismes auxiliaires au sein des parcelles agricoles. Les agriculteurs auraient besoin d'outils d'aide à la décision pour faciliter la mise en place de mesures favorables à ces auxiliaires. Dans ce contexte, la problématique de ce stage est de caractériser le service de régulation des pucerons par leur faune auxiliaire, ainsi que d'améliorer les outils d'aide à l'évaluation multicritère DEXi existants. Grâce aux suivis réalisés par trois méthodes différentes (observation visuelle, aspiration et cuvette jaune) en région Rhône-Alpes, il a été constaté que les populations de pucerons évoluent de manières similaires dans les différentes parcelles observées. Des approches statistiques de type ACP et GLM ont permis de mettre en évidence une concordance spatio-temporelle entre la présence des auxiliaires et des pucerons. Néanmoins, l'effet d'autres facteurs comme les conditions climatiques, l'état de la culture et l'environnement proche de la parcelle sont également importants à prendre en compte dans cette régulation et sont encore mal cernés. Des études complémentaires sur ces variables, ainsi que sur le ratio auxiliaire/ravageur, permettraient de mieux comprendre ce processus de régulation naturelle.

Mots clés : pucerons, régulation naturelle, organismes auxiliaires, grandes cultures, outils d'aide à la décision, évaluation multicritère

Abstract

In France, most of the territory occupied by agriculture belongs to arable crops, of which cereals represent the main production with more than 9 million hectares. Aphids are harmful pests in these crops causing direct and indirect damage and significant economic losses. Among alternative insecticide control methods for aphids, "natural regulation or conservational biological control" tends to stimulate the habitats where beneficial organisms are present in order to maintain them in agricultural plots. Farmers would need decision support tools to facilitate the implementation of measures that support these beneficial organisms. In this context, the goal of my internship is to characterize the aphid control service by their natural enemies, as well as to improve the existing DEXi multicriteria assessment tools. Thanks to the monitoring carried out by three different methods (visual observation, aspiration and yellow bowls) in the Rhône-Alpes region, it has been seen that the population dynamic of aphids follows similar trends in the different plots observed. Statistical approaches such as PCA and GLM highlight a spatial-temporal concordance between the presence of natural enemies and aphids. Nevertheless, the effect of other factors like climatic conditions, the state of the crop and the environment close to the plot are also important to take into account in this regulation and are still poorly defined. Further studies on these variables, as well as the auxiliary / pest ratio, would provide a better understanding of this natural regulation process.

Key words: aphids, conservation biological control, beneficial organisms, arable crops, evaluation tools

REMERCIEMENTS

Je remercie grandement André CHABERT, mon maître de stage, pour son aide et ses conseils tout au long de mon stage.

Merci à toute l'équipe du projet ARENA pour leur chaleureux accueil.

Enfin, je remercie l'équipe enseignante de Montpellier SupAgro, Agrocampus Ouest et Agroparistech pour m'avoir accueilli et accompagnée tout au long de la formation de Protection des Plantes et Environnement.

Merci Lyse, Helena, Rafa, Mar, Ilyass, Clotilde, Baptiste, Mariano, Esther et Alicia d'avoir été avec moi lorsque j'en ai eu besoin.

Merci à mes amis de PPE pour leur aide tout au long de l'année et pour chaque mot qu'ils m'ont appris.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. Les pucerons des grandes cultures	3
1.1.1. Qu'est-ce qu'un puceron ?	3
1.1.2. Les principales espèces de pucerons en céréales et leurs cycles biologiques : <i>Metopolophium</i> , <i>Sitobion</i> et <i>Rhopalosiphum</i>	4
1.1.3. Dégâts et importance économique.....	6
1.2. La lutte contre les pucerons : la régulation naturelle	7
1.2.1. Généralités sur la lutte contre les pucerons.....	7
1.2.2. La régulation naturelle de pucerons et leurs organismes auxiliaires	8
1.3. Les modèles et travaux existants sur la régulation naturelle de pucerons en grandes cultures.....	11
1.3.1. Modèles sur la régulation naturelle de pucerons et leur faune auxiliaire	11
1.3.2. Travaux à propos l'influence de la biodiversité et la complexité du paysage agricole sur la régulation naturelle de pucerons	13
1.4. Les outils multicritères d'aide à la décision	14
1.4.1. Intérêt des outils d'aide à la décision.....	14
1.4.2. Le logiciel DEXi	14
1.4.3. DEXi : du projet AUXIMORE au projet ARENA	14
2. MATERIEL ET METHODES	16
2.1. Protocoles des suivis de pucerons et auxiliaires associés	16
2.1.1. Choix des parcelles en Rhône-Alpes	16
2.1.2. Méthodes de suivi : Observation visuelle, Aspiration et Cuvette jaunes.	17
2.1.3. Acquisition des données paysagères et des pratiques agricoles.....	18
2.1.4. Identifications et comptages	19
2.1.5. Base de données d'ARVALIS	19
2.2. Analyse statistiques et choix des variables.....	20
2.2.1. Logiciel XLSTAT : Analyse en composantes principales (ACP)	20
2.2.2. Logiciel R : Modèle linéaire généralisées (GLIM).....	20
2.3. Procès d'amélioration de l'outil d'aide à la décision : DEXi	20
2.3.1. Comparaison des DEXi Auximore	20
2.3.2. Construction d'un DEXi commun : « Potentiel d'actuation d'auxiliaires »	21
3. RESULTATS	23

3.1.	Présence des pucerons et des auxiliaires en grandes cultures	23
3.1.1.	Evolution de la population des pucerons et des auxiliaires à l'automne	23
3.1.2.	Evolution des pucerons et des auxiliaires au printemps.....	24
3.1.3.	Ecart identifiés entre les méthodes d'observation et de piégeage	29
3.1.4.	Identifications précises de quelques espèces d'organismes	30
3.2.	Analyse des composantes principales (ACP)	31
3.3.	Modèle linéaire généralisé (GLM).....	32
3.4.	Arbre commun combinant des différents DEXi issus du projet Auximore.....	36
3.4.1.	DEXi auxiliaires volants ARENA potentiel des auxiliaires régulant les populations de pucerons en grandes cultures.....	36
3.4.2.	Validation du modèle DEXi avec les données observés au terrain.....	37
4.	DISCUSSION.....	40
4.1.	Régulation naturelle des pucerons en grandes cultures ?	40
4.1.1.	Effet méthode de piégeage	40
4.1.2.	Effet saison et conditions climatiques.....	40
4.1.3.	Effet type d'auxiliaire	41
4.1.4.	Effet type de culture.....	42
4.1.5.	Effet du système de culture et du paysage autour de la parcelle	43
4.2.	Potentiel d'actuation des auxiliaires pour chaque parcelle ?.....	43
4.2.1.	Qualité du modèle DEXi « potentiel d'auxiliaires »	43
4.2.2.	Voies d'amélioration de l'outil DEXi.....	44
5.	CONCLUSION.....	45
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47
	ANNEXES	51
I.	Données de température printemps 2018	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les quatre actions du projet ARENA.....	2
Figure 2. Morphologie d'un puceron (Source : ACTA, 2011).	3
Figure 3. Plantes hôtes et cycles de développement des pucerons (Source: ACTA, 2011).	4
Figure 4. Metopolophium dirhodum sur une feuille de maïs.	5
Figure 5. Sitobion avenae sur une feuille de maïs.	5
Figure 6. Rhopalosiphum padi (Source : INRA, Bernard Chaubet).	6
Figure 7. Opilion sur une feuille de maïs.	10
Figure 8. Micro-hyménoptère et momie de puceron sur une feuille de maïs.	10
Figure 9. Effets insecticides sur les pucerons et leurs organismes auxiliaires.....	11
Figure 10. Modèle de simulation de la population de pucerons (Source : Parry et al., 2006).....	12
Figure 11. Cycle de populations de ravageurs (en rouge) et d'auxiliaires (en bleu) selon le modèle lapins et renards, utilisé en dynamique de populations (ACTA, 2017).....	12
Figure 12. Méta-analyse sur la comparaison des polycultures et des monocultures (Source: Letourneau et al., 2009).....	13
Figure 13. Transition du projet AuxiMore au projet ARENA.....	15
Figure 14. Localisation des parcelles suivies en Rhône-Alpes à Pusignan et à Thil.	16
Figure 15. Parcelles suivies à Pusignan et à Thil.	17
Figure 16. Protocole appliqué par méthode (Observation visuelle, Aspiration et Cuvette jaune).	17
Figure 17. Procédé d'analyse du paysage dans un rayon de 500 m autour du point de prélèvement à Pusignan avec le logiciel Google Earth Pro.	18
Figure 18. Base de données du projet ARENA.	19
Figure 19. Comparaison des DEXi AuxiMore.	21
Figure 20. Etapes de la construction du nouveau DEXi.....	21
Figure 21. L'évolution de pucerons à Pusignan et à Thil suite aux données de la méthode d'observation visuelle.	23
Figure 22. Moyenne de pucerons et d'auxiliaires piégés aux cuvettes jaunes à Pusignan et données des températures maximale et minimale.	24
Figure 23. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les cultures de blé labouré et sans labour à Pusignan.....	25
Figure 24. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les cultures de maïs (parcelle labourée et sans labour) à Pusignan.	25
Figure 25. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les deux cultures d'orge à Thil.	26
Figure 26. Population de pucerons, de micro-hyménoptères et de pucerons momifiés dans la culture de blé non labouré.	27
Figure 27. Evolution des différents auxiliaires observés dans la culture du maïs labouré.	27

Figure 28. Population de pucerons et d'auxiliaires dans la culture de luzerne capturés par la méthode d'aspiration.....	28
Figure 29. Comparaison des méthodes dans la parcelle de blé au printemps 2018. (Moyenne de pucerons et d'auxiliaires de toutes les dates par méthode).	29
Figure 30. Proportion de pucerons et d'auxiliaires sur l'ensemble de données (Thil et Pusignan) par méthode à l'automne et au printemps.	29
Figure 31. Pourcentage de chaque auxiliaire par méthode sur l'ensemble des auxiliaires à l'automne et au printemps en agriculture conventionnelle (Pusignan) et en agriculture biologique (Thil).	30
Figure 32. Des analyses des composantes principales (ACP) avec les données d'observation visuelle et les données d'aspiration.	32
Figure 33. Distribution de la variable puceron pour chaque méthode.	33
Figure 34. Représentation de la qualité prédictive du modèle.	35
Figure 35. Distribution des résidus des modèles.	35
Figure 36. Structure de l'arbre DEXi « Potentiel d'auxiliaires volants » ARENA.	36
Figure 37. Evaluation du potentiel d'auxiliaires pour les parcelles suivies au printemps 2018.	37
Figure 38. Evaluation des attributs de la parcelle de l'orge 2.	38
Figure 39. Moyenne de pucerons et d'auxiliaires collectés par jour et par culture au printemps 2018.	38
Figure 40. Comparaison de la variabilité d'auxiliaires par type d'agriculture au printemps 2018.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Nombre d'organismes renseignés dans la base du projet pour la région Rhône-Alpes.	20
Tableau 2. Déterminations précises d'insectes réalisées au laboratoire.	31
Tableau 3. Résultats de l'Anova pour chaque modèle. (***) : p-value<0,001)	33
Tableau 4. Sorties des modèles. (***) : p-value<0,001).....	34

INTRODUCTION

Aujourd'hui, le monde fait face à un changement global qui modifie les écosystèmes et la biodiversité qui les compose. Le changement intègre l'évolution de la société elle-même, l'augmentation des échanges sur la planète, le changement climatique et la modification des systèmes de production agricole.

Par rapport à ce dernier domaine, l'intensification des systèmes de production agricole des dernières années a entraîné une perte de biodiversité, de services écosystémiques et une simplification des paysages agricoles. En outre, de profondes modifications sont, aujourd'hui, nécessaires dans les systèmes agricoles et alimentaires afin de se conformer aux engagements de l'Accord de Paris (2015), concernant l'adaptation et l'atténuation du changement climatique.

D'après la FAO (2016) un changement durable n'est possible que s'il est soutenu par des politiques adéquates, des cadres institutionnels et des mécanismes de financement. En conséquence, l'évolution des politiques publiques, dans le domaine agricole en France et dans d'autres pays, tend à favoriser une approche agro-écologique dans les systèmes de production agricole ainsi qu'une réduction des produits phytopharmaceutiques.

Un exemple de ces politiques est le plan national « Ecophyto ». Son objectif est de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires et les impacts qu'ils génèrent, assurant un haut niveau de production.

En France, la majorité du territoire agricole est couvert par des grandes cultures dont les céréales représentent la principale production avec plus de 9 millions d'hectares (Agreste, 2017). Ces cultures sont impactées par divers ravageurs causant des dégâts directs et indirects et des pertes économiques importantes. Les pucerons constituent un des ravageurs les plus nuisibles. L'une des méthodes de lutte alternatives les plus utilisées est de favoriser les habitats des organismes auxiliaires présents afin de les maintenir dans les parcelles agricoles pour que la présence des ravageurs reste sous les seuils de nuisibilité. Cette méthode est connue comme « régulation naturelle ou contrôle biologique par conservation » (ACTA, 2017).

Dans ce cadre, le projet « CasDAR¹ ARENA² » (2017-2019), à la suite du projet « CasDAR AuxiMore³ » (2012-2014), vise à mettre à disposition des agriculteurs des outils simples pour évaluer, favoriser et prévoir les régulations naturelles des ravageurs par les auxiliaires en grandes cultures et définir quelles sont les meilleures méthodes utilisables sur le terrain pour observer cette régulation naturelle. Pour atteindre les objectifs du projet, un partenariat associant enseignement, recherche et développement agricole a été constitué.

L'ACTA-Les instituts techniques agricoles est un de ces partenaires et participe aux deux premières actions du projet (*Figure 1*). La première action vise à construire des méthodes et références sur la base d'observations en parcelles à l'automne et au printemps et, la deuxième action, vise à évaluer/prévoir l'impact des auxiliaires dans la régulation des ravageurs avec la construction des modèles et d'outils d'aide à la décision.

¹ Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural

² Anticiper les Régulations Naturelles des ravageurs en grandes cultures

³ Optimiser le contrôle biologique des ravageurs en grandes cultures

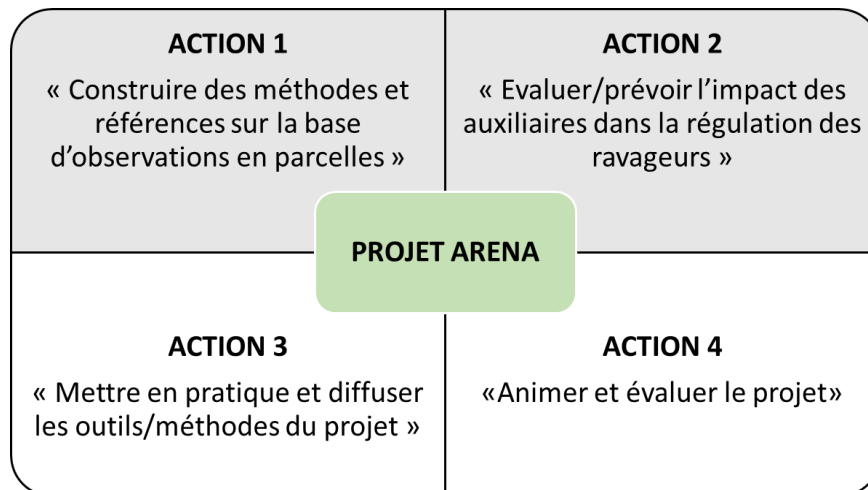


Figure 1. Les quatre actions du projet ARENA.

Dans ce contexte, **l'objectif principal de mon stage** est la collecte et l'analyse de nouvelles données de terrain afin de caractériser le service de régulation des pucerons par leur faune auxiliaire (coccinelles, syrphes, micro-hyménoptères, opilions, araignées et chrysopes) en grandes cultures, ainsi que l'amélioration des outils d'évaluation multicritère DEXi existants. L'objet de ces outils est d'aider les agriculteurs à adapter leurs pratiques afin de bénéficier au maximum de la régulation naturelle.

En premier lieu, une analyse bibliographique permettra de comprendre l'impact des pucerons et des auxiliaires sur les grandes cultures et réalisera l'état des lieux des modèles et travaux existants sur la régulation naturelle. Dans un second temps, le protocole expérimental et les méthodes d'analyses statistiques suivies durant l'étude seront décrites. Enfin, les résultats dérivés de l'étude seront présentés, puis discutés.

1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Les pucerons des grandes cultures

1.1.1. Qu'est-ce qu'un puceron ?

Les pucerons sont des insectes appartenant à l'ordre des hémiptères et constituent la super-famille des Aphidoidea. Cette dernière se divise en 3 familles : les Adelgidae, les Aphididae et les Phylloxeridae. Le corps du puceron est allongé et partagé en trois régions : la tête, le thorax et l'abdomen. Comme d'autres insectes, les pucerons ont une paire d'antennes, trois paires de pattes et parfois une paire d'ailes. Ces dernières leur permettent de migrer de parcelles en parcelles afin de trouver de nouvelles ressources. Une caractéristique morphologique de leur abdomen est d'avoir une paire de cornicules et une cauda qui peuvent adopter différentes formes et tailles selon les espèces (voir *Figure 2*). Grâce aux cornicules, les pucerons peuvent sécréter un liquide sucré et collant, appelé « miellat », pour se défendre de leurs prédateurs. La cauda permet d'empêcher le miellat de s'écouler sur leur corps (INRA 2018).

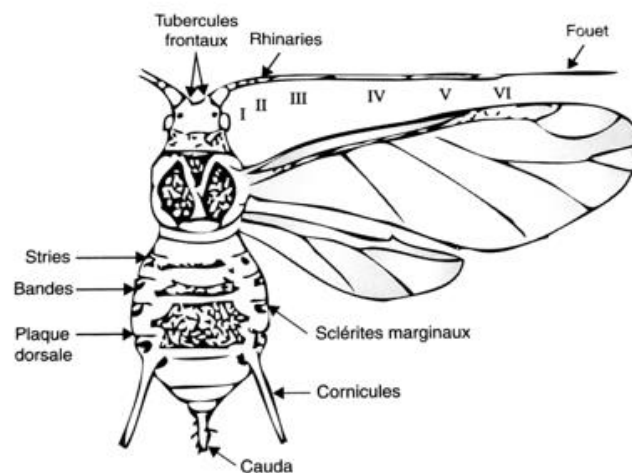


Figure 2. Morphologie d'un puceron (Source : ACTA, 2011).

Il existe différents modes de reproduction des pucerons. La parthénogenèse est cyclique (« holocyclie ») si les pucerons ont une alternance entre une phase de multiplication asexuée et une phase sexuée. Dans ce cas, plusieurs générations de femelles parthénogénétiques au printemps et en été sont suivies par une génération sexuelle unique en automne qui implique des mâles et des femelles sexuelles en raison de leur capacité exclusive à produire des œufs résistants au gel (Frantz, Plantegenest, & Simon, 2006; Simon & Peccoud, 2018). En revanche, la parthénogenèse est obligatoire (« anholocyclie ») si les espèces ont abandonné la phase sexuée. Ce dernier mode de reproduction est typique dans les régions les plus chaudes (ACTA, 2011).

En grandes cultures, divers modes de reproduction peuvent coexister à une échelle locale où l'influence du climat est contrecarrée par des facteurs micro-géographiques (Frantz, Plantegenest, & Simon, 2006). Il a été montré que l'équilibre entre ces modes de reproduction correspond à une stratégie évolutive stable (Rispe & Orsay, 1998). Cependant, les lignées de parthénogenèse obligatoire pourraient voir leur aire de répartition augmentée par le réchauffement de la planète, provoquant des épidémies de pucerons plus tôt dans la saison (Simon et al., 2018).

Par rapport au choix de la plante hôte, les espèces « monoeciques » (Figure 3 à gauche) restent durant tout leur cycle de développement sur un seul type de plante. Au contraire, les espèces « dioeciques » (Figure 3 à droite) changent de type de plante au cours des saisons (10% de la population) et leur comportement est généralement lié à leur sexualité (ACTA, 2011).

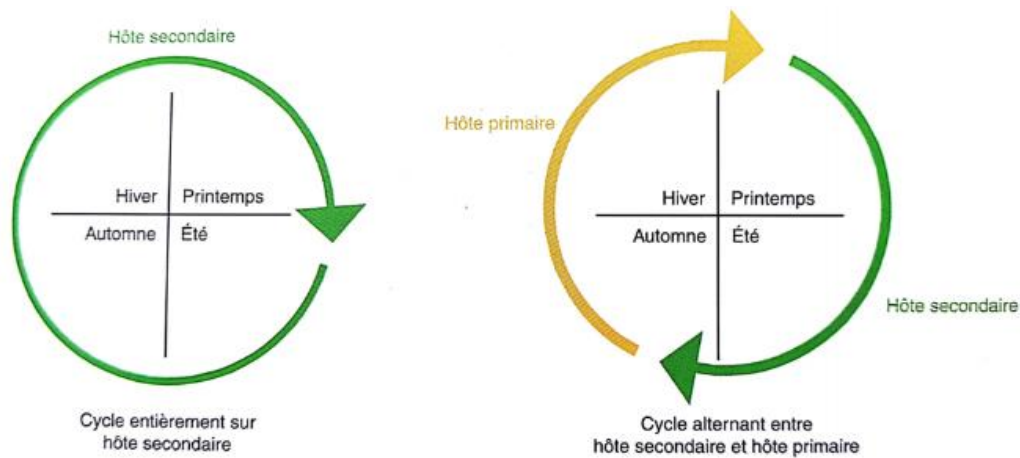


Figure 3. Plantes hôtes et cycles de développement des pucerons (Source: ACTA, 2011).

Parmi les 5000 espèces de pucerons connues, environ 450 se développent sur les plantes cultivées et une centaine causent des pertes économiques importantes pour l'agriculture mondiale (Simon & Peccoud, 2018). Ces espèces vivent principalement dans les régions tempérées (Sigsgaard, 2002; ACTA, 2011) où elles colonisent 25% des espèces végétales existantes (Dedryver & Ralec, 2010).

1.1.2. Les principales espèces de pucerons en céréales et leurs cycles biologiques : *Metopolophium*, *Sitobion* et *Rhopalosiphum*.

Un tiers des surfaces cultivées en France est occupé par les grandes cultures (Agreste, 2017), générant d'immenses étendues où les pucerons peuvent se développer. Il existe plusieurs espèces de pucerons qui peuvent affecter les grandes cultures, parmi lesquelles *Sitobion avenae*, *Metopolophium dirhodum* et *Rhopalosiphum padi*. Ces trois espèces représentent l'un des groupes de pucerons de céréales les plus importants en Europe occidentale (Bianchi, 2004). Elles connaissent des variations fortes d'une année et d'une région à l'autre (ACTA, 2011).

Le projet ARENA s'intéresse à ces trois espèces et à leur faune auxiliaire comme d'autres auteurs l'ont déjà fait (Gosselke et al., 2001 ; Bianchi, 2004 ; Larsson, 2005 ; Dedryver & Ralec, 2010 ; Dean, 1974 ; Caballero-Lopez et al. 2012).

1.1.2.1. *Metopolophium dirhodum* : puceron des céréales et du rosier

Cette espèce est surtout présente au nord de la Loire. Le corps de *Metopolophium dirhodum* est allongé, vert clair avec une bande longitudinale plus foncée sur le dos et des cornicules longues et claires. La cauda est deux fois moins longue que les cornicules (Figure 4). Normalement, il est holocyclique dioecique. Il hiverne dans les *Rosa sp*, puis les individus ailés assurent la migration vers les poacées (orge, blé, maïs,...). En revanche, dans les zones tempérées, cette espèce est principalement anholocyclique et les individus restent continuellement sur les poacées avec une reproduction majoritairement asexuée (ACTA, 2011 ; INRA 2018).

Les infestations de cette espèce sont faibles car elle semble bien régulée par ses prédateurs naturels. Cependant, sur certaines variétés de maïs, le puceron produit des dommages visibles tels que des rayures. Les vols plus importants sont au printemps et en été. Les captures tardives

de juin à début août correspondent à la contamination des cultures de maïs à partir de populations développées sur l'orge ou le blé (ACTA, 2011).



Figure 4. *Metopolophium dirhodum* sur une feuille de maïs.

1.1.2.2. *Sitobion avenae* : puceron des épis des céréales

Le corps de *Sitobion avenae* est principalement vert mais peut changer en brun-vert ou brun-rose en fonction du génotype et des conditions météorologiques. Ses cornicules sont noires, la cauda est de couleur claire et les antennes sont aussi longues que le corps (Figure 5). Il est holocyclique monoecique. En revanche, certaines populations sont anholocycliques dans les régions plus chaudes ou pendant les hivers doux (ACTA, 2011 ; INRA 2018).

Cette espèce est surtout présente dans la moitié nord de la France. Son hôte principal est le blé où il peut développer des densités et des impacts économiques élevés pendant le stade de maturation et le stade laiteux. La période de vol la plus importante est celle de début mai à fin juillet. L'hivernage des pucerons est holocyclique chez les céréales d'hiver (blé d'hiver, orge d'hiver) et les graminées sauvages. Dans les régions plus chaudes, certains clones sont capables d'avoir un hivernage anholocyclique (ACTA, 2011).



Figure 5. *Sitobion avenae* sur une feuille de maïs.

1.1.2.3. *Rhopalosiphum padi* : puceron des céréales et du merisier à grappes

Rhopalosiphum padi est vert foncé avec des taches rouges autour des cornicules. Son corps est globuleux, ses antennes sont plus courtes que son corps et ses cornicules et sa cauda sont

pigmentées (Figure 6). Son cycle de vie est holocyclique diœcique sauf dans les zones à climat doux (ACTA, 2011 ; INRA 2018).

Il est présent dans toute la France. L'hôte primaire de *Rhopalosiphum padi* est le merisier à grappes et les hôtes secondaires sont les poacées cultivées et sauvages. Il a trois périodes de vol. La plus importante est celle de l'automne, lorsque les individus ailés colonisent les jeunes semis d'orge et de blé. Le vol de mai leur permet de migrer vers l'ensemble des poacées et les vols de juin et juillet vers le maïs (ACTA, 2011).

En outre, selon Gosselke et al. (2001), cette espèce a tendance à mieux résister à la pluie car elle se cache de façon plus efficace dans les feuilles.



Figure 6. *Rhopalosiphum padi* (Source : INRA, Bernard Chaubet).

1.1.3. Dégâts et importance économique

Grâce à leur potentiel de reproduction élevé, leurs capacités de dispersion et leur adaptabilité à la survie locale, les pucerons peuvent entraîner des pertes importantes de rendement directement, ou indirectement par la transmission de maladies. Ces ravageurs peuvent endommager les plantes hôtes de différentes façons. Premièrement, la mélasse qu'ils excrètent peut attirer d'autres espèces telles que les fourmis ou les champignons ascomycètes saprophytes. Ces interactions peuvent affecter l'activité photosynthétique de la plante. Par ailleurs, lorsque les pucerons se nourrissent du phloème, ils détournent les nutriments nécessaires à la croissance et à la reproduction des plantes pour leur propre bénéfice. Enfin, pendant la phase d'alimentation, les pucerons peuvent transmettre de nombreux virus (Dedryver et al., 2010).

Près de 50% des virus transmis par les insectes sont inoculés par les pucerons (Chapin et al., 2001). Ces virus peuvent être transmis selon un mode non persistant (quand le puceron est infectieux après l'acquisition du virus, sans qu'il passe à l'intérieur du puceron) ou un mode persistant (quand il conserve son pouvoir infectieux très longtemps).

En grandes cultures, plusieurs virus sont transmis par les pucerons tels que : le BYDV (virus de la jaunisse nanisante de l'orge), le CYDV (virus de la jaunisse nanisante des céréales) ou le MDMV (virus de la mosaïque nanisante du maïs). En ce qui concerne les pucerons de céréales, *Metopolophium dirhodum* est vecteur du virus BYDV, *Sitobion avenae* est un vecteur important du BYDV-PAV et du CYDV-MAV et *Rhopalosiphum padi* est le principal vecteur des souches BYDV RPV et PAV (ACTA, 2011).

D'autres symptômes peuvent être provoqués par les pucerons tels que la décoloration, la déformation et la nécrose des feuilles et/ou des fruits. Ces symptômes sont dépendants du

moment et de la gravité de l'infection. Ils peuvent également provoquer la réduction du nombre et de la taille des grains. Par exemple, les feuilles des poacées s'enroulent en spirale à cause de des piqûres de *Rhopalosiphum padi* (ACTA, 2016).

Il est très difficile de donner une évaluation précise des pertes économiques potentielles dues aux pucerons en raison de l'importance des variations interannuelles de leur population (Station, 1989 ; Gosselke et al., 2001 ; Dixon et al., 2005), de la diversité des cultures concernées et des pratiques agricoles (Parry et al., 2006). Cependant, les modèles peuvent simuler ces pertes. Par exemple, Dean (1974) montre avec son modèle que *S. avenae* provoque des pertes de rendement 2,4 fois plus élevées que les deux autres espèces de pucerons céréalières.

En général, les dommages indirects causés par la transmission des virus dépassent très souvent l'impact direct des pucerons sur les cultures. En Europe, les dégâts directs causés par les pucerons seraient responsables des pertes annuelles moyennes de 700 000 t de blé. En France, une étude montre que l'orge semé tôt peut subir des pertes de rendement dues au BYDV entre 0 et 80% avec une moyenne de 20% (Dedryver et al., 2010). Par contre, les seuils de nuisibilités changent pour chaque espèce et sont dépendantes du stat de la culture.

1.2. La lutte contre les pucerons : la régulation naturelle

1.2.1. Généralités sur la lutte contre les pucerons

En tant que principaux ravageurs des cultures, les pucerons sont exposés à des pressions intenses induites par l'homme, telles que l'utilisation d'insecticides depuis la fin des années 1940. Cette exposition a rapidement conduit à l'émergence de multiples formes de résistance aux principales classes de produits chimiques. Jusqu'à présent, 14 espèces de pucerons ont développé une résistance aux insecticides, et plus particulièrement le puceron vert du pêcher, *Myzus persicae* (Simon et al., 2018).

Le développement de systèmes de production agricole basés sur l'agroécologie en vue d'une réduction des intrants de pesticides est largement soutenu par le plan national « Ecophyto ». Ce plan a pour objectif de réduire de 50% l'utilisation de produits phytosanitaires d'ici 2025. Pour accompagner ces actions, une approche plus « systémique » est largement souhaitée en protection des plantes. Elle se propose de mobiliser les multiples stratégies vis à vis des organismes nuisibles, d'étudier leur mise en œuvre et surtout de concevoir des systèmes innovants répondant aux enjeux de la réduction de l'usage des pesticides (Poeydebat et al., 2016). Ces approches « systémiques » sont complémentaires et/ou incluses dans la « protection intégrée des cultures ».

Ainsi, la protection intégrée a été défini dans la Directive Européenne sur l'utilisation durable des pesticides (2009/128) comme « une approche écosystémique de la production et de la protection des cultures qui combine différentes stratégies et pratiques de gestion pour cultiver des cultures saines et minimiser l'utilisation de pesticides » (ACTA, 2016). Son objectif est de maintenir la présence des ravageurs sous les seuils de nuisibilité. Ces stratégies, à part la minimisation de la lutte chimique, incluent (i) l'utilisation des résistances des plantes hôtes ; (ii) le contrôle biologique et les méthodes culturales.

La sélection de cultivars résistants aux pucerons et/ou aux virus est une de ces méthodes de lutte alternative particulièrement intéressante dans le contexte du développement agricole durable. Néanmoins, aucune variété de blé ou d'orge suffisamment résistante aux pucerons des céréales (*Sitobion avenae*, *Metopolophium dirhodum* et *Rhopalosiphum padi*) ne peut être produite en Europe, malgré des recherches intensives (Dedryver et al., 2010).

Le contrôle biologique consiste à utiliser des organismes vivants pour contrôler les populations d'un autre organisme. Il existe différents types de contrôle biologique : (i) Le contrôle biologique par acclimatation qui consiste à introduire dans une région donnée des auxiliaires exotiques. (ii) Le contrôle biologique par augmentation, méthode à court terme qui favorise le développement des auxiliaires dans un endroit (par inoculation ou par inondation). (iii) Le contrôle biologique par conservation, appelé également « régulation naturelle », qui implique la création d'un environnement favorable (implantation de haies, de plantes vivaces, de chemins enherbés, etc.) pour l'actuation des auxiliaires indigènes. Ceci peut être réalisé en fournissant d'autres sources de nourriture, des proies, des hôtes alternatifs ou des habitats améliorés (Redlich et al., 2018).

Dans ce domaine, les outils d'évaluations multicritères se proposent d'aider la mise en œuvre de la protection intégrée via une évaluation de l'ensemble des facteurs agronomiques et paysagers qui peuvent avoir une influence sur les auxiliaires. Ces outils ont pour objet de contribuer à une réflexion stratégique sur les systèmes de cultures pratiqués et ceux à mettre en place pour répondre à l'enjeu de la réduction de l'application des produits phytosanitaire.

Le projet ARENA vise à étudier les régulations naturelles de pucerons en grandes cultures par leurs organismes auxiliaires afin d'utiliser ces connaissances pour construire des outils d'aide à la décision destinées au conseil agricole.

1.2.2. La régulation naturelle de pucerons et leurs organismes auxiliaires

La régulation naturelle comprend donc un large nombre de méthodes de gestion de l'habitat qui améliorent la disponibilité des ressources requises par les ennemis naturels (Bianchi et al., 2004). Selon Zhao et al. (2015), la gestion de cet habitat devrait être menée à plusieurs échelles spatiales, y compris à l'échelle du système de culture et du paysage. Cependant, l'intensification agricole a provoqué une diminution d'habitats semi-naturels et la perte subséquente d'ennemis naturels des ravageurs agricoles (Zhao et al., 2015).

Les arthropodes entomophages qui s'attaquent aux pucerons peuvent être divisés en prédateurs ou parasitoïdes. Les prédateurs sont généralement très mobiles (larves ou adultes) et recherchent activement leurs proies pour les ingérer. Par exemple, les syrphes, les coccinelles, les chrysopes, les araignées ou les opilions sont des prédateurs de pucerons (Caballero-López et al., 2012). D'autre part, les parasitoïdes, au stade larvaire, se développent à l'intérieur des pucerons qu'ils finissent par tuer quand ils deviennent adultes et quittent leur hôte. Les parasitoïdes se divisent entre les espèces endoparasites, lorsque les femelles pondent à l'intérieur des pucerons, et les espèces ectoparasites, lorsque la ponte et le développement larvaire se réalisent à la surface de l'hôte. Plusieurs hyménoptères sont parasitoïdes de pucerons en grandes cultures (Caballero-López et al., 2012).

Les auxiliaires peuvent être généralistes, quand ils s'attaquent à plusieurs hôtes, ou spécialistes si le spectre des hôtes est plus restreint (Lang, 2003). Cependant, le lien entre les ennemis naturels spécialisés et les populations de proies a conduit à porter une attention spéciale aux spécialistes en tant qu'agents de contrôle biologique potentiels (Bianchi et al., 2006; Gurr et al., 2003). Cependant, il existe des exemples où les prédateurs généralistes ont été plus efficaces que les spécialistes pour lutter contre les ravageurs (Murdoch et al., 1985; Symondson et al., 2002).

Le projet ARENA s'intéresse aux organismes auxiliaires des pucerons, tels que les coccinelles, les syrphes, les araignées, les opilions, les chrysopes, les anthocorides-mirides-nabides et les micro-hyménoptères.

1.2.2.1. Coccinelles (Coléoptères)

Les coccinelles sont des auxiliaires prédateurs importants de pucerons en grandes cultures. Il existe 5000 espèces dans le monde et 110 en France. Les principales caractéristiques morphologiques des coccinelles adultes sont : la tête prognathe, les antennes courtes terminées en massue, le pronotum transverse et le scutellum visible. La couleur peut changer selon l'espèce. Les larves sont campodéiforme avec 10 segments portant des tubercules et sont également des auxiliaires prédatrices.

Selon le nombre de générations par an, elles peuvent être univoltines ou multivoltines en fonction de certains facteurs abiotiques (Gosselke et al., 2001) comme la température (activité diurne entre 15-30 °C) ou l'humidité, et des facteurs biotiques comme la nourriture (Bianchi et al., 2004).

L'hibernation a lieu dans des habitats non cultivés, tels que les haies, les lisières de forêts, les touffes d'herbes et les débris. Au début du printemps, les coccinelles émergées dépendent des proies présentes dans les zones d'hibernation lorsque la densité des pucerons dans les champs est encore faible. Étant donné que le niveau d'approvisionnement alimentaire affecte la fécondité et le comportement migratoire des coccinelles, la disponibilité des pucerons dans les éléments non agricoles du paysage aura probablement un impact sur le nombre et la répartition des coccinelles et de la lutte biologique associée (Bianchi et al., 2004).

Les espèces les plus communes en grandes cultures sont *Coccinella septempunctata* et *Harmonia axyridis*. Néanmoins, *Scymnus rubromaculatus*, *Platynaspis luteorubra* et *Tytthaspis sedecimpunctata* sont également présentes (ARVALIS, 2018).

1.2.2.2. Syrphes (Diptères)

Les syrphes sont un groupe d'insectes de l'ordre de Diptères qui présentent des couleurs variées : blanches, jaunes, oranges ou vertes. Il existe 900 espèces en Europe et plus de 500 en France. Il peut y avoir de 1 à 7 générations par an. Par rapport à la morphologie, les syrphes ont deux ailes membraneuses avec la présence d'une « vena spuria ». Les antennes sont courtes et les pièces buccales sont de type suceur-lécheur. Un vol stationnaire et des changements brusques de direction sont caractéristiques de ces insectes. Les syrphes adultes consomment du nectar et du pollen et les larves apodes ont régimes alimentaires variés : prédatrices (aphidiphages majoritairement, 30 pucerons par jour), saprophages ou phytophages (Denis et al., 2009).

On peut observer les adultes dès que les températures sont supérieures à 10-12 °C (mars à novembre, si l'automne reste doux jusqu'à décembre). Les plus intéressants en protection des plantes sont ceux qui sont mimétiques des guêpes. La population des syrphes peut être favorisée par une floraison abondante et étalée sur une année entière. Mais aussi par les haies, l'herbe abondante ou encore les plantes adventices résiduelles.

Les espèces les plus courantes en grandes cultures sont : *Eupeodes corollae*, *Sphaerophoria scripta*, *Paragus sp*, *Syrphus ribesii*, *Cheilosia sp*, *Eristalis sp*, *Episyrphus balteatus*.

1.2.2.3. Araignées et Opilions

Les araignées ont le corps segmenté en 2 parties, contrairement aux opilions qui n'en ont qu'une seule (Figure 7). Araignées et opilions possèdent quatre paires de pattes et ne possèdent ni antennes ni ailes. Ils sont omniprésents dans les agrosystèmes et il existe plus de 1600 espèces en France. Ils ont de 6 à 12 stades larvaires et n'ont en général qu'une génération par an.

Grâce à leur vitesse et leurs toiles, ils peuvent chasser les insectes. Les familles les plus actives sur les cultures en France sont les *Lycosidae* et les *Linyphiidae* ainsi que les *Salticidae*, les *Miturgidae* et les *Aranidae* (ACTA, 2017).



Figure 7. *Opilion* sur une feuille de maïs.

1.2.2.4. Anthocorides-Mirides-Nabides (Hétéroptères)

Ces trois insectes sont également prédateurs de pucerons en grandes cultures. Les anthocorides ont le corps noirâtre et les ailes brunes, claires et tachées. En général, il y a deux générations par an. Par exemple, *Anthocoris nemorum* est un prédateur de pucerons. Les mirides sont de couleurs vives ou sombres. *Miris striatus* et *Deraeocoris ruber* sont exemples de mirides prédateurs de pucerons. Les nabides ont un rostre suceur fin et recourbé, leurs larves ressemblent à une fourmi et un exemple d'espèce prédateur de pucerons est *Himacerus mirmecoides* (Bellmann, 2014).

1.2.2.5. Hyménoptères parasitoïdes

Le nombre exact d'espèces d'hyménoptères parasitoïdes est inconnu en France. Ils possèdent deux paires d'ailes membraneuses et leurs pièces buccales sont de type broyeur-lécheur. Les adultes se nourrissent de nectar. Les femelles partent à la recherche d'un puceron hôte et une fois qu'elles l'ont trouvé pondent un ou plusieurs œufs à la surface ou à l'intérieur de celui-ci. Les larves se développent à l'intérieur de l'hôte en mangeant ses tissus de réserve puis ses organes vitaux. Tout cela entraîne finalement la mort du puceron et sa momification (*Figure 8*) (ACTA, 2017).

La plupart du temps, les hyménoptères parasitoïdes sont spécialisés sur quelques espèces de pucerons dès leur apparition et contribuent à limiter les pullulations sur les cultures de céréales. Ils sont considérés comme un ennemi naturel important des pucerons (Vollhardt et al., 2008).



Figure 8. Micro-hyménoptère et momie de puceron sur une feuille de maïs.

1.3. Les modèles et travaux existants sur la régulation naturelle de pucerons en grandes cultures

1.3.1. Modèles sur la régulation naturelle de pucerons et leur faune auxiliaire

Les modèles de simulation pour les ravageurs et leurs interactions avec les ennemis naturels ont été développés pour la première fois au milieu des années soixante-dix (Gosselke et al., 2001). Cependant, ces modèles ont évolué jusqu'à aujourd'hui et plusieurs auteurs ont publié à ce sujet (Skirvin et al., 1997 ; Elliott et al., 2000 ; Landis et al., 2000 ; Morgan et al., 2000 ; Gosselke et al., 2001 ; Elliott et al., 2002 ; Schmidt et al., 2003 ; Bianchi et al., 2004 ; Dixon et al., 2005 ; Larsson et al., 2005 ; Parry et al., 2006 ; Dedryver et al., 2010 ; Caballero-López et al., 2011 ; Chaplin-Kramer et al., 2011 ; Banfield-Zanin et al., 2012 ; Woltz et al., 2012 ; Zhao et al., 2015). Dans la plupart des modèles, toutes les populations de pucerons observées décrivent des tendances similaires. La population augmente régulièrement, atteint un pic, puis diminue en abondance. En revanche, cette densité de pucerons connaît des variations fortes d'une année à l'autre (Morgan et al., 2000). Pour valider les modèles, il faut les comparer avec les données du terrain, autres que celles qui ont servi à construire le modèle, puis faire des tests de sensibilité (Parry et al., 2006).

Des variables météorologiques telles que la température et le pourcentage d'humidité relative sont connues pour affecter l'activité de certains organismes auxiliaires (Dean, 1974 ; Skirvin et al., 1997 ; Elliott et al., 2002 ; Dixon et al., 2005 et 2009) et apparaissent comme variables dans plusieurs modèles. Chaque arthropode a sa propre température optimale et l'interaction entre les ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels peut changer avec l'augmentation des températures mondiales moyennes (Simon et al., 2018). Dans le cas des pucerons des céréales, Dean (1974) signale que *M. dirhodum* semble mieux adapté à des températures plus basses (20 °C) et *R. padi* à des températures plus élevées. Gosselke et al. en 2001 ont montré que la survie de *R. padi* suite aux fortes pluies est 30% plus élevée que pour les deux autres espèces car *R. padi* vit davantage caché dans les feuilles.

Par rapport aux auxiliaires, Gosselke et al. (2001) ont montré une augmentation visible de l'infestation des pucerons sans la présence de prédateurs. Chabert et al. (2002) ont évalué en grandes parcelles, l'effet à moyen terme d'insecticides sur les prédateurs et les parasitoïdes de pucerons des épis. Il a été constaté, une augmentation exponentielle des pucerons suite à la destruction des auxiliaires via à l'application d'insecticides toxiques vis-à-vis des auxiliaires (Figure 9).

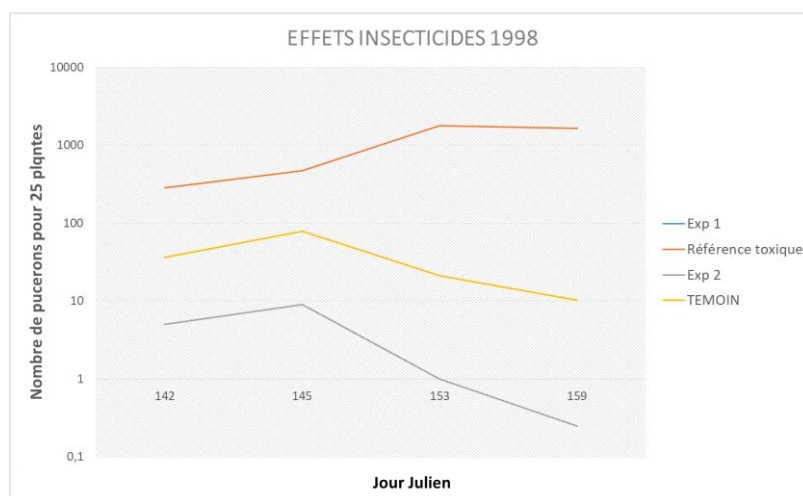


Figure 9. Effets insecticides sur les pucerons et leurs organismes auxiliaires.

Puis, Morgan et al. (2000) et Parry et al. (2006) ont montré, avec des modèles de simulation, les variations de la population de *R. padi* en changeant les paramètres de température et de mortalité. Les résultats montrent une forte diminution du nombre de pucerons quand le paramètre de la mortalité augmente seulement de 5 %. De la même façon, ils ont montré une évolution de la population de pucerons quand la température augmente ou diminue 1 degré. Ces effets sont plus marqués quand la température augmente (*Figure 10*). Les auteurs ont donc montré que d'autres facteurs peuvent affecter la régulation naturelle de pucerons.

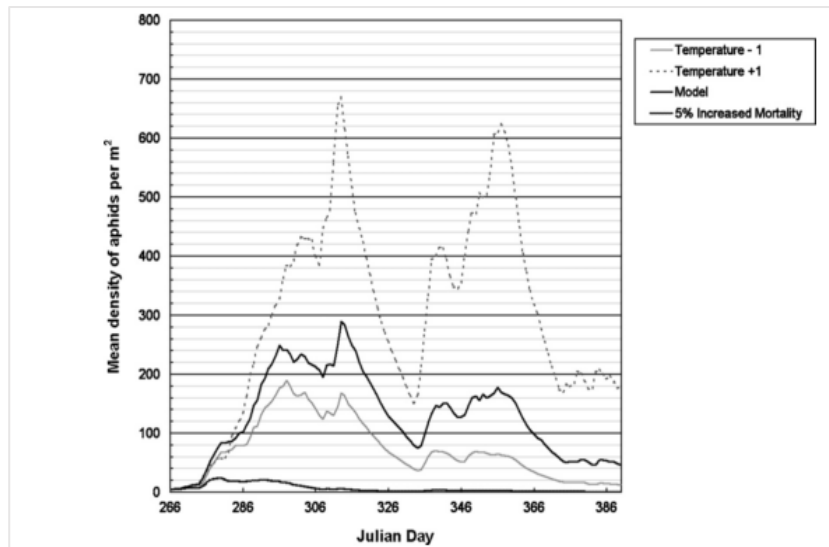


Figure 10. Modèle de simulation de la population de pucerons (Source : Parry et al., 2006)

Le modèle de Lotka et Volterra (1925), connu comme « modèle proie-prédateur » a comme hypothèse que la croissance de la population de proies est de type exponentiel mais qu'elle diminue en fonction du nombre de rencontres avec les prédateurs (*Figure 11*).

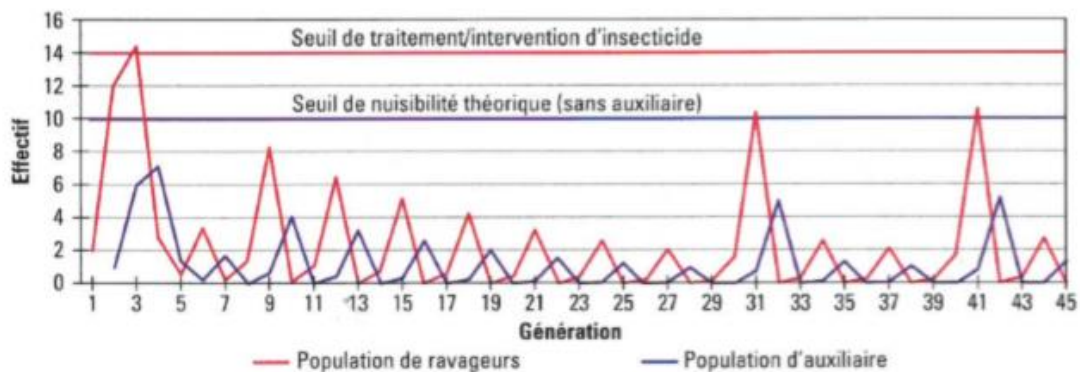


Figure 11. Cycle de populations de ravageurs (en rouge) et d'auxiliaires (en bleu) selon le modèle lapins et renards, utilisé en dynamique de populations (ACTA, 2017).

En revanche, ce modèle a été critiqué car les proies sont limitées par la quantité de ressources disponibles, les prédateurs peuvent changer de proies et l'environnement biotique et abiotique a lui aussi des effets sur la dynamique de population des proies et de prédateurs.

Cependant, le développement de modèles n'est pas si évident. Selon Gosselke et al (2001), la description du déroulement de l'infestation initiale et l'estimation des taux de mortalité sont les problèmes les plus importants dans la modélisation de la dynamique des populations des pucerons et des auxiliaires.

1.3.2. Travaux à propos l'influence de la biodiversité et la complexité du paysage agricole sur la régulation naturelle de pucerons

Plusieurs auteurs ont étudié les relations entre la régulation naturelle, la biodiversité et la complexité du paysage agricole (Landis et al., 2000 ; Bianchi et al., 2004 ; Parry et al., 2006 ; Letourneau et al., 2009 ; Caballero-López et al., 2011 ; Chaplin-Kramer et al., 2011 ; Woltz et al., 2012 ; Banfield-Zanin et al., 2012 ; Zhao et al., 2015 ; Bøsem Baillod et al., 2017)

Caballero-López et al. (2011) soulignent que les pertes actuelles de biodiversité à grande échelle dans les paysages agricoles de l'hémisphère nord peuvent avoir un impact négatif sur le flux des services écosystémiques tels que la régulation naturelle. Pour cette raison, ils ont étudié l'influence de la complexité du paysage sur l'abondance et la composition des communautés d'ennemis naturels des pucerons et sur les populations de pucerons.

Une méta-analyse de Letourneau et al. (2009) montre l'effet moyen des schémas de diversification des cultures sur les insectes phytophages, leurs ennemis naturels, les dommages aux cultures et le rendement des cultures pour déterminer s'ils apportent des avantages globaux aux systèmes agricoles. Une abondance des ennemis naturels 44% supérieure et une mortalité des herbivores de 54% plus élevée dans ces systèmes de culture ont été mises en évidence par la méta-analyse. De plus, les dommages aux cultures étaient inférieurs de 23% dans le cas des assemblages de plantes. En revanche, le rendement avait diminué un 14% dans ce type de systèmes (Figure 12).

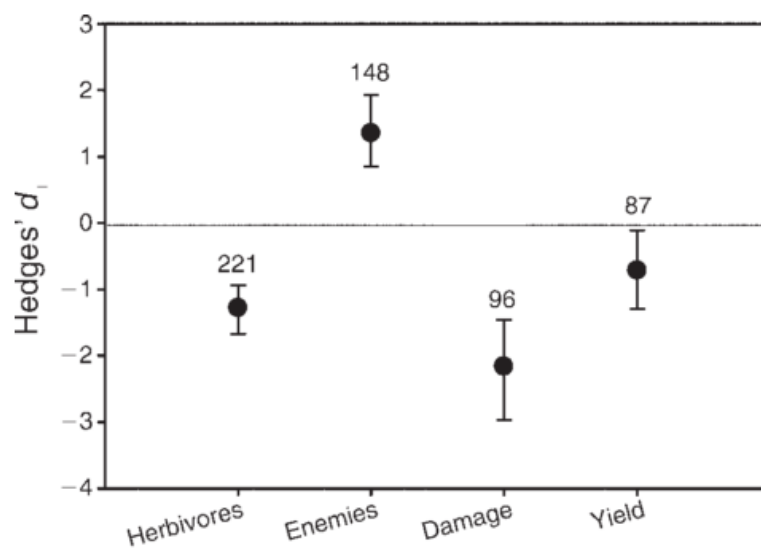


Figure 12. Méta-analyse sur la comparaison des polycultures et des monocultures (Source: Letourneau et al., 2009).

Cette amélioration due à la diversité des cultures et aux cultures mixtes (Landis et al., 2000) a également été prouvée par Redlich et al. (2018).

Une autre méta-analyse sur les agroécosystèmes a montré des relations positives entre la quantité d'habitat naturel ou non cultivé dans le paysage et l'abondance et la diversité des ennemis naturels, la prédation et le parasitisme (Chaplin-Kramer et al., 2011).

1.4. Les outils multicritères d'aide à la décision

1.4.1. Intérêt des outils d'aide à la décision

Il existe plus de 140 outils d'aide à la décision par rapport à la protection des plantes (Ministère d'agriculture et alimentation, 2018). Ils peuvent être classés en deux types différents. En première lieu, les outils de diagnostic qui permettent de prévoir ou de simuler le développement du bioagresseurs (pression potentielle de l'année ou la date d'arrivée des bioagresseurs). Les autres sont les outils d'aide à la décision (OAD) qui aident aux agriculteurs dans le choix des pratiques et stratégies de lutte. Normalement, ces types d'outils sont accessibles en ligne mais le plus souvent avec des accès payants et ou réservés (ACTA, 2016).

Ces outils d'aide à la décision permettent de réaliser des scénarios ou des simulations destinés à améliorer le potentiel d'accueil et d'actuation d'auxiliaires en faisant varier différents éléments d'un système de cultures et des aménagements proches de la parcelle. Ainsi, l'agriculteur peut voir l'effet de chaque changement et ensuite prendre les décisions qui lui conviennent le mieux (ARENA, 2018).

1.4.2. Le logiciel DEXi

DEXi est un programme informatique d'aide à la décision. Il vise à développer de manière interactive des modèles multicritères de décision qualitatifs et à évaluer les options. Un modèle multicritère est une structure hiérarchique qui représente la décomposition du problème de décision en sous-problèmes plus petits, moins complexes et plus faciles à résoudre que le problème complet (Bohanec, 2000).

Le logiciel DEXi a été utilisé récemment pour évaluer des problèmes spécifiques dans les systèmes agricoles, tels que l'impact de ces systèmes sur la qualité des sols ou l'impact écologique / économique des cultures génétiquement modifiées (Bohanec et al., 2007).

Cependant, les modèles qualitatifs peuvent présenter certains problèmes. En général, seul un certain nombre d'options peuvent être établies par ces modèles, ce qui peut être insuffisant pour prendre en compte l'ensemble des paramètres impactants. De plus, un modèle qualitatif est incapable de distinguer des options légèrement différentes (Bohanec, 1992).

La structure d'outils de type DEXi est connue comme un « arbre d'attributs ». Un arbre d'attributs représente la structure d'un problème de décision. Les attributs sont structurés en fonction de leur interdépendance : un attribut de niveau supérieur dépend de ses descendants (fils) dans l'arbre. Les feuilles de l'arbre, appelées « attributs de base », dépendent des options. Les nœuds internes dans l'arborescence sont appelés « attributs d'agrégat » et leurs valeurs sont déterminées par des fonctions d'utilité. La racine de l'arbre représente la classification globale des options (Bohanec, 1992).

Plusieurs auteurs ont publié à propos de DEXi (Bohanec et al., 1992 ; Bohanec et al., 2004 ; Bohanec et al., 2007 ; Žnidaršič et al., 2008 ; Bergez et al., 2013).

1.4.3. DEXi : du projet AUXIMORE au projet ARENA

De janvier 2012 à décembre 2014, le projet AuxiMore a été financé par le CASDAR dans le but de « capitaliser les connaissances agroécologiques sur le contrôle biologique des bioagresseurs, à l'échelle des exploitations agricoles et des paysages de grandes cultures, et les traduire en outils appropriables par le développement agricole ».

Dans le cadre du projet AuxiMore, quatre arbres de décision type DEXi (DEXi-syrphes, DEXi-coccinelles, DEXi-chrysopes et DEXi-micro-hyménoptères parasitoïdes de pucerons) ont été

construits pour évaluer le potentiel d'actuation de chaque auxiliaire dans les parcelles agricoles. En 2015, les « Modes d'emploi des Arbres multicritères AuxiMore » ont été publiés. Ils expliquent la composition de chaque arbre et les références bibliographiques correspondantes.

Le projet ARENA (Anticiper les REgulations NATurelles), également financé par le CASDAR (2017-2019), vise à améliorer ces outils existants en réalisant un unique DEXi pour estimer le potentiel des auxiliaires dans les différentes parcelles. L'objectif est d'avoir les mêmes critères de pratiques agricoles et de paysages sur la base de données du projet et sur le DEXi commun. De cette façon, il pourra être possible d'exporter les données directement sur DEXi et d'obtenir une évaluation du potentiel des auxiliaires pour chaque parcelle de la base.

Un schéma a été fait pour mieux comprendre cette transition du projet AUXIMORE au projet ARENA (Figure 13).

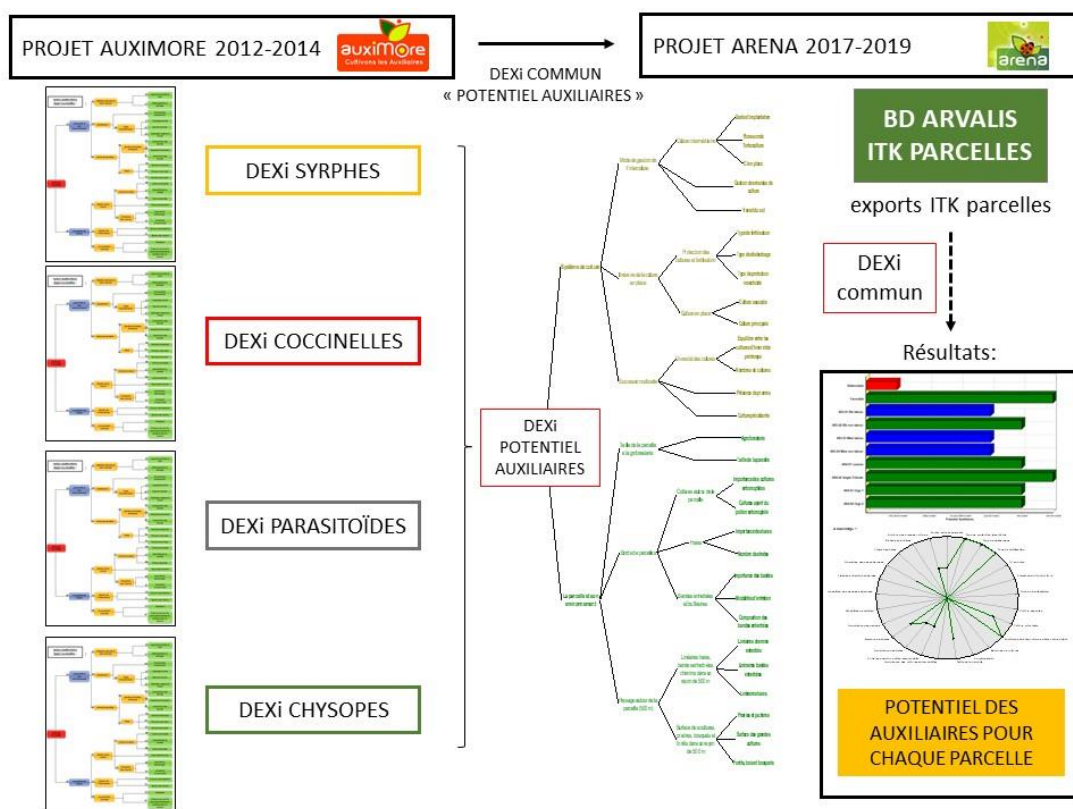


Figure 13. Transition du projet AuxiMore au projet ARENA.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Protocoles des suivis de pucerons et auxiliaires associés

2.1.1. Choix des parcelles en Rhône-Alpes

Les parcelles suivies doivent présenter un risque de pucerons élevé et comporter idéalement une zone non traitée en insecticides. Ainsi, deux sites expérimentaux ont été retenus en région Rhône-Alpes : Pusignan (69) et Thil (01), où différentes parcelles ont été suivies à l'automne 2017 et au printemps 2018 (Figure 14).

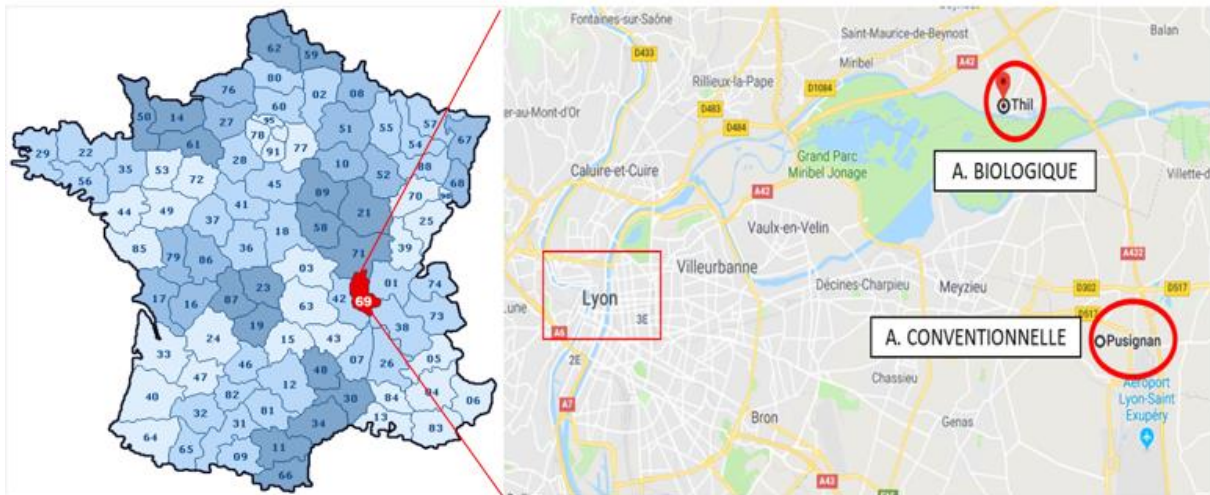


Figure 14. Localisation des parcelles suivies en Rhône-Alpes à Pusignan et à Thil.

Dans le cas de **Pusignan**, l'essai de 8 parcelles d'un demi-hectare est destiné à comparer deux systèmes de culture : labour conventionnel et semis direct sous couverts dans le cadre d'une succession blé-maïs-maïs-soja en agriculture conventionnelle. Ainsi des observations à l'automne 2017 ont été réalisées lorsque les cultures de maïs étaient encore en place, dans l'interculture suite au blé, récolté en 2017 et dans les parcelles de blé semé en octobre. La parcelle labourée avait été semée dix jours avant la parcelle sans labour. Les parcelles en sol nu n'ont pas été suivies dû fait de la quasi absence d'insectes.

Au printemps, les suivis se sont concentrés sur les deux parcelles de blé semées en octobre (labour et non labour) et deux parcelles du maïs (labour et sans labour) semées en avril. Dans la parcelle de maïs non labourée, une culture de féverole était en place depuis l'automne 2017. Des observations ont également été réalisées sur cette parcelle avant l'implantation du maïs. Le maïs de cette parcelle non labourée a toujours été moins développé que celui de la partie labourée.

Les deuxièmes zones d'observations situées à **Thil** sont un ensemble de 7 parcelles d'un agriculteur produisant en biologique. Les successions de cultures sont également blé-maïs-soja et luzerne. Cette dernière culture revient régulièrement dans la succession. Les observations à l'automne ont été réalisées dans différentes parcelles : une parcelle de luzerne, une interculture avant soja et un essai de couvert avec un mélange seigle triticales. Au printemps, les suivis se sont concentrés sur deux parcelles d'orge, la parcelle de luzerne et l'essai de couvert avec un mélange seigle triticales.

La Figure 15 présente un schéma de ces parcelles.

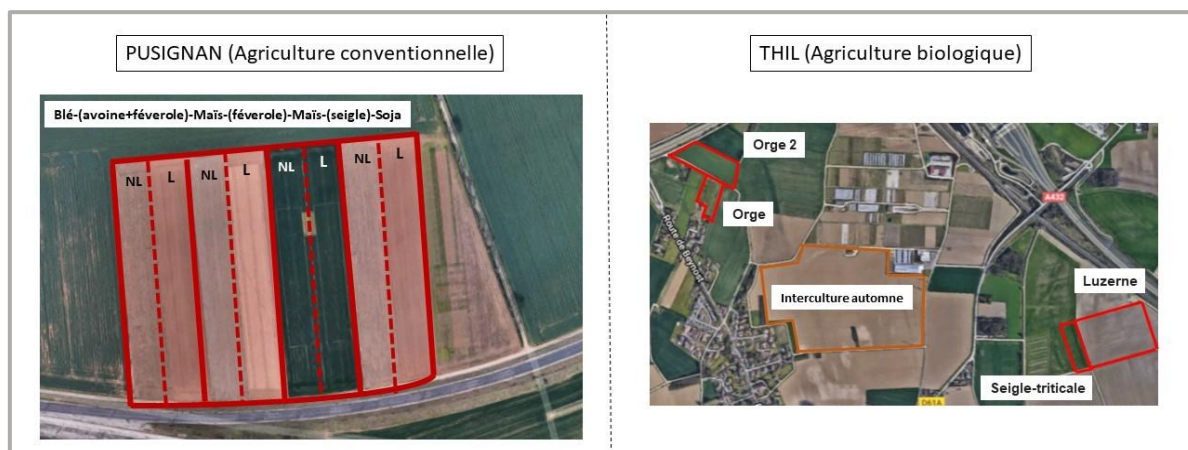


Figure 15. Parcelles suivies à Pusignan et à Thil.

2.1.2. Méthodes de suivi : Observation visuelle, Aspiration et Cuvette jaunes.

Trois protocoles élaborés d'observations des pucerons et des auxiliaires aériens ont été appliqués dans ce réseau de parcelles agricoles pendant la période d'automne et de printemps : (i) observations visuelles (OV) ; (ii) cuvettes jaunes (CU) ; et (iii) aspirations (A). Dans les trois cas, les observations ou les piégeages se sont fait à au moins 10 m de la bordure et dans une zone de 15 x 15 m représentative de l'ensemble de la parcelle.

Avant de commencer les observations ou le piégeage, il est nécessaire de noter les paramètres suivants : le stade de la culture, le pourcentage de recouvrement de la culture, la météo (température de l'air, température du sol à -10 cm, couverture nuageuse et vent), la présence de rosée sur la végétation et l'humidité visible du sol selon l'échelle de Young. Le protocole qui a été appliqué pour chaque méthode est présenté dans la Figure 16.




OBSERVATION VISUELLE	ASPIRATION	CUVETTE JAUNE
		
Matériel : une loupe et feuilles d'annotation	Matériel : un aspirateur (600 m3/h et 25 cm de diamètre extérieur), sacs d'aspiration, sacs en plastique, chronomètre et marqueur.	Matériel : une cuvette jaune, liquide de piégeage, flacons avec alcool, étiquettes, passoire et spatule.
Comptages réalisés sur 10 fois 10 plants consécutifs (soit 100 plants au total) par zone d'observation.	Aspirer pendant 2 min , au dessus des plantes, en parcourant un carré de 15 x 15 m.	Mis en place : au moins 10 m de la bordure de la parcelle et de la zone d'observation et à hauteur du sommet de la végétation
Observations à réaliser à chaque comptage pour les pucerons : Nombre total de pucerons sur les plantes, nombre de plants porteur d'au moins un puceron et nombre de puceron momifiés.	Garder les sacs d'aspiration dans sacs en plastique où il faut écrire la date et la parcelle.	Liquide de piégeage : pour 1L d'eau, dissoudre 200 g de sel + quelques gouttes de liquide vaisselle inodore
Observations à réaliser à chaque comptage pour les auxiliaires : Nombre total de coccinelles, syrphes, chrysopes (œufs, larves et adultes), araignées et opilions.	Conserver les sacs à l'intérieur du congélateur jusqu'au moment du tri.	Relevé : Après une semaine sur la parcelle. Utiliser les flacons avec du alcool pour garder les organismes piégés et écrire sur les étiquettes la date et la parcelle.

Figure 16. Protocole appliqué par méthode (Observation visuelle, Aspiration et Cuvette jaune).

Les suivis ont été réalisés une fois par semaine pour chaque parcelle : 9 semaines à l'automne (du 13/09/2017 au 07/12/2017) et 12 semaines au printemps (du 26/04/2018 au 10/07/2018).

2.1.3. Acquisition des données paysagères et des pratiques agricoles

L'acquisition des données paysagères et des pratiques agricoles s'est divisée en trois tâches.

2.1.3.1. Analyse du paysage dans un rayon de 500 m autour du point de prélèvement

Le logiciel *Google Earth Pro* a été utilisé pour calculer les données paysagères dans un rayon de 500 m autour du point de prélèvement (*Figure 17*). Ainsi, dans cette première tâche, nous avons obtenu le pourcentage de bois, de forêts, de bosquets, de terres arables, de prairies permanentes, de jachères, de surfaces artificialisées, de surfaces hydrographiques, de vergers, de vignes et le nombre de mètres linéaires de haies, de bandes enherbées et de chemins enherbés.

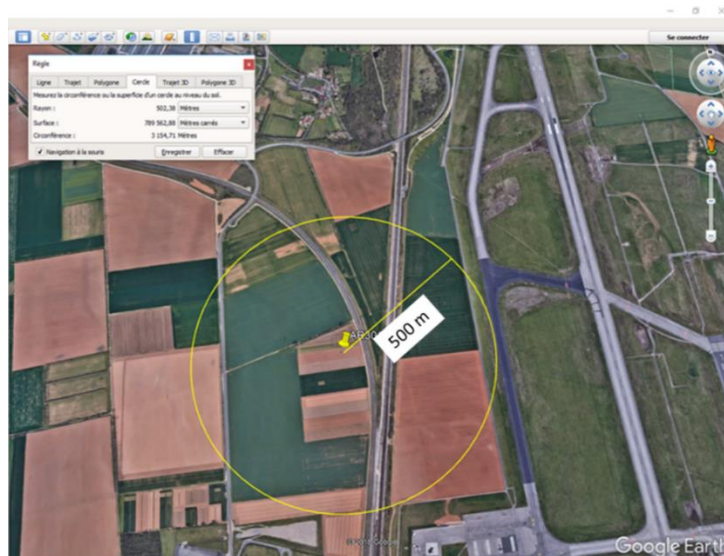


Figure 17. Procédé d'analyse du paysage dans un rayon de 500 m autour du point de prélèvement à Pusignan avec le logiciel Google Earth Pro.

2.1.3.2. Critères à observer dans et autour de la parcelle

Les observations se sont concentrées dans et autour de la parcelle pour obtenir : la taille et la largeur de la parcelle, le nombre de linéaires adjacents (bandes herbacées, haies, chemins enherbés, rivières...), le nombre de haies, le nombre de bandes enherbées, le nombre de cultures autour de la parcelle, la typologie de prairies entourant la parcelle, la pression et la nature d'adventices dans la culture et le type de sol.

2.1.3.3. Questionnaire auprès des agriculteurs sur leur type de conduite du système de culture

La troisième tâche correspond à l'enregistrement du type de conduite du système de culture. Les données collectées sont : l'entretien de la bande enherbée, le type de culture et la durée de retour de la culture en place, la date effective de semis, le nom de la variété, la culture précédente, le type de succession culturale, le type de production, le type de travail du sol, la présence de prairies/jachères/luzerne dans la rotation, le type de fertilisation et le type de désherbage.

2.1.4. Identifications et comptages

Une fois les observations, les aspirations et les piégeages réalisés sur le terrain, la détermination et le dénombrement des insectes collectés restent à effectuer au laboratoire. Les échantillons sont placés sur un support adéquat (par exemple, une boîte de Petri). Ils sont observés au microscope ou à la loupe binoculaire. Ensuite, il faut identifier et compter les pucerons. Nous nous limitons en routine aux 3 espèces les plus importantes des céréales (*Sitobion avenae*, *Metopolophium dirhodum* et *Rhopalosiphum padi*) et à leurs auxiliaires (syrphes, coccinelles, chrysopes, micro-hyménoptères parasitoïdes, anthocorides, mirides, nabides, araignées et opilions).

Ponctuellement, des déterminations précises ont été réalisées. Cependant, afin de pouvoir effectuer les différentes estimations parcellaires dans un temps raisonnable, les espèces ont été assemblées dans différents groupes (de types pucerons, hyménoptères parasitoïdes de pucerons, coccinelles...) lors des observations de routine. D'autant que dans les analyses, seul le nombre total d'insectes de chaque groupe a été pris en compte.

Une fois les identifications terminées, les échantillons sont remis dans l'alcool pour pouvoir rechercher des informations complémentaires *a posteriori*.

2.1.5. Base de données d'ARVALIS

Une fois que les comptages sont réalisés, ils doivent être enregistrés dans la base de données d'Arvalis, qui est commune à tous les partenaires du projet ARENA. Dans cette base, nous pouvons trouver les suivis réalisés dans les différentes régions de France (Auvergne Rhône-Alpes, Pays de la Loire, Hauts de France, Bourgogne Franche Comté, Centre val de Loire et Île-de-France). Fin aout 2018 il y avait plus de 100 espèces différentes (ravageurs et auxiliaires) et un total de plus de 100.000 organismes recensés.

La base des données est divisée en trois parties (Figure 18) : (i) Gestion des pièges ; (ii) Gestion de l'itinéraire technique ; (iii) Saisie des observations et (iv) Exports.

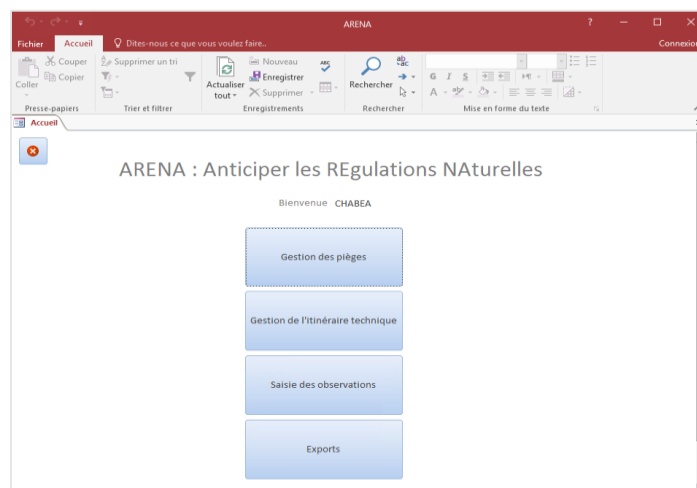


Figure 18. Base de données du projet ARENA.

Cette base de données a une structure « en cascade ». Au début, dans la section « Gestion des pièges » il faut créer un site d'observation (Pusignan et Thil). Pour chaque site, il est nécessaire de renseigner les différentes parcelles suivies et pour chaque parcelle le type de pièges ou les méthodes d'observation réalisées (OV, A ou CU).

Ensuite, dans la section « Gestion de l’itinéraire technique », les informations sur les données paysagères et sur les pratiques agricoles doivent être complétées.

Pour chaque observation, les insectes qui ont été identifiés doivent être renseignés dans la section « Saisie des observations » pour chaque parcelle, chaque date et chaque méthode de piégeage.

Quand tous les résultats sont renseignés dans la base, il est alors possible de les exporter. Dans notre cas, pendant le période d’automne et de printemps nous avons renseignés dans la base de données plus de 18000 organismes (pucerons + auxiliaires) (*Tableau 1*).

Tableau 1. Nombre d'organismes renseignés dans la base du projet pour la région Rhône-Alpes.

	Pusignan	Thil	TOTAL organismes
Automne 2017	8478	1023	9501
Printemps 2018	6729	1865	8594
TOTAL organismes	15207	2888	18095

2.2. Analyse statistiques et choix des variables

Les logiciels XLSTAT (outil d’Excel) et R (version 3.4.1.) ont été utilisés pour traiter les données et réaliser les analyses statistiques.

2.2.1. Logiciel XLSTAT : Analyse en composantes principales (ACP)

Dans le premier cas, avec XLSTAT, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour les données de printemps. L’ACP appartient à la statistique multivariée (notamment, à la famille « d’analyse de données ») et transforme des variables corrélées en de nouvelles variables non-corrélées entre elles, nommées « composantes principales ou axes principaux ». Le but de ce type d’analyse est de trouver un axe autour duquel la variance des données soit maximale (pourcentage d’inertie). L’ACP permet d’obtenir une première analyse des corrélations entre les variables relevées au terrain.

2.2.2. Logiciel R : Modèle linéaire généralisées (GLIM)

Des analyses complémentaires ont été réalisées avec le logiciel R. Elles avaient comme objectif de modéliser les données observées. Dans une première phase, nous avons testé la normalité des données. Voyant qu’ils ne suivaient pas une loi normale, nous nous sommes orientés vers un modèle linéaire généralisé suivant une loi de Poisson. Dans ce cas, la fonction de lien entre les variables expliquées et explicatives est une fonction logarithmique.

Enfin, un modèle linéaire généralisé a été construit pour chaque méthode d’observation et capture puisque si nous prenons en compte les données de l’ensemble des méthodes le modèle était moins robuste.

2.3. Procès d’amélioration de l’outil d’aide à la décision : DEXi

2.3.1. Comparaison des DEXi Auximore

Afin d’améliorer et de simplifier les outils DEXi issus du projet CasDAr Auximore pour différents auxiliaires de grandes cultures (Syrphes, Chrysopes, Microhyménoptères, Coccinelles), une comparaison des attributs de ces quatre DEXi existants a été réalisée. A la suite de cet examen, il a été identifié que les résultats obtenus avec les différents outils étaient

assez semblables entre eux et n'avaient pas beaucoup d'influence sur les évaluations finales (seulement les attributs marqués dans la *Figure 19* en rouge sont différents) Il a donc été décidé de réaliser un seul outil DEXi pour évaluer le potentiel d'accueil de l'ensemble de ces auxiliaires dans les parcelles agricoles.

SYRPHES			COCCINELLES			PARASITOÏDES			CHRYSOPE		
SYRPHES	note max	Ratios	COCCINELLES	note max	Ratios	MICRO INHÉRENTE PARASITOÏDES	note max	Ratios	CHRYSOPE	note max	Ratios
Potentiel syrphes	5		Potentiel Coccinelles	5		Potentiel Micro Hyménoptères Parasitoïdes de pucerons	5		Potentiel Chrysope	5	
La parcelle et son environnement	5		La parcelle et son environnement	4		La parcelle et son environnement	5		La parcelle et son environnement	5	
Habitats naturels et semi naturels	4		Habitats naturels et semi naturels	4		Habitats naturels et semi naturels	4		Habitats naturels et semi naturels	4	
Importance forêts et bois	3		Importance forêts et bois	3		Importance forêts et bois	3		Importance forêts et bois	3	
Hétérogénéité du paysage	3		Hétérogénéité du paysage	3		Hétérogénéité du paysage	3		Hétérogénéité du paysage	3	
Importance des zones ouvertes	3		Importance des zones ouvertes	3		Importance des zones ouvertes	3		Importance des zones ouvertes	3	
Assolement	4		Assolement	4		Assolement	4		Assolement	4	
Diversité des couverts (d'assolement)	3		Diversité des couverts (d'assolement)	3		Diversité des couverts (d'assolement)	3		Diversité des couverts (d'assolement)	3	
Types d'assolements	4		Types d'assolements	3		Types d'assolements	3		Types d'assolements	3	
Typologie prairies	3		Typologie prairies	3		Typologie prairies	3		Typologie prairies	3	
Type cultures	3		Type cultures	3		Type cultures	3		Type cultures	3	
Typologie vergers et vignes	3		Typologie vergers et vignes	3		Typologie vergers et vignes	3		Typologie vergers et vignes	3	
Bords de parcelles	4		Bords de parcelles	4		Bords de parcelles	4		Bords de parcelles	4	
Bandes enherbées et fleuries	4		Bandes enherbées et fleuries	4		Bandes enherbées et fleuries	4		Bandes enherbées et fleuries	4	
Composition des bandes enherbées	3		Composition des bandes enherbées	3		Composition des bandes enherbées	3		Composition des bandes enherbées	3	
Bandes enherbées dantes de fleurs	3		Bandes enherbées dantes de fleurs	3		Bandes enherbées dantes de fleurs	3		Bandes enherbées dantes de fleurs	3	
Modalités d'entretien B.H.	4		Modalités d'entretien B.H.	4		Modalités d'entretien B.H.	4		Modalités d'entretien B.H.	4	
Haies	4		Haies	4		Haies	4		Haies	4	
Floraison des haies	3		Floraison des haies	3		Floraison des haies	3		Floraison des haies	3	
Nombre de strates	4		Nombre de strates	3		Nombre de strates	3		Nombre de strates	3	
Importance des haies	4		Importance des haies	3		Importance des haies	3		Importance des haies	3	
Le nombre de cultures (hors prairie)	3		Le nombre de cultures (hors prairie)	3		Le nombre de cultures (hors prairie)	3		Le nombre de cultures (hors prairie)	3	
Gestion de la culture en place	4		Gestion de la culture en place	4		Gestion de la culture en place	4		Gestion de la culture en place	4	
Protection des cultures	4		Protection des cultures	4		Protection des cultures	4		Protection des cultures	4	
Insecticides	3		Insecticides	3		Insecticides	3		Insecticides	3	
Intensité de désherbage	3		Intensité de désherbage	3		Intensité de désherbage	3		Intensité de désherbage	3	
Type de fertilisation	2		Type de fertilisation	2		Type de fertilisation	2		Type de fertilisation	2	
Cultures en place	2		Cultures en place	2		Cultures en place	2		Cultures en place	2	
Culture principale	2		Culture principale	2		Culture principale	2		Culture principale	2	
Culture associée	2		Culture associée	2		Culture associée	2		Culture associée	2	
Gestion de l'interculture	2		Gestion de l'interculture	2		Gestion de l'interculture	2		Gestion de l'interculture	2	
Travail du sol	2		Travail du sol	2		Travail du sol	2		Travail du sol	2	
Gestion des résidus de culture	2		Gestion des résidus de culture	2		Gestion des résidus de culture	2		Gestion des résidus de culture	2	
Culture intermédiaire	2		Culture intermédiaire	2		Culture intermédiaire	2		Culture intermédiaire	2	
Durée d'implantation de la CI	2		Durée d'implantation de la CI	2		Durée d'implantation de la CI	2		Durée d'implantation de la CI	2	
La succession culturale	3		La succession culturale	3		La succession culturale	3		La succession culturale	3	
Type de succession (succession)	3		Type de succession (succession)	3		Type de succession (succession)	3		Type de succession (succession)	3	
Présence de prairie dans la rotation	2		Présence de prairie dans la rotation	2		Présence de prairie dans la rotation	2		Présence de prairie dans la rotation	2	

Figure 19. Comparaison des DEXi AuxiMore.

2.3.2. Construction d'un DEXi commun : « Potentiel d'actuation d'auxiliaires »

Pour la construction de ce DEXi commun nous avons rassemblé les critères (ou attributs) similaires de ces quatre arbres avec les critères paysagers existants dans la base de données du projet ARENA. Ainsi, à terme, les données de la base pourront s'exporter simplement sur DEXi et permettre d'obtenir une évaluation du potentiel d'accueil des auxiliaires pour chaque parcelle. Une fois que tous ces critères jouant un rôle dans l'évaluation finale ont été rassemblés, il est nécessaire de les organiser entre eux pour créer un modèle DEXi en suivant les étapes de la *Figure 20*.

1 La parcelle et son environnement

- Paysage autour de la parcelle (500 m)
 - Forêts, bois et bosquets
 - Surface des grandes cultures
 - Prairies et jachères
 - Linéaires haies, bandes enherbées, chemins dans un rayon de 500 m
 - Linéaires haies
 - Linéaires bandes enherbées
 - Linéaires chemins enherbés
- Bords de parcelles
 - Bandes enherbées et/ou fleuries
 - Composition des bandes enherbées
 - Modalités d'entretien
 - Importance des bandes
 - Haies
 - Nombre de strates
 - Importance des haies
- Cultures autour de la parcelle
 - Cultures ayant du pollen entomophile
 - Importance des cultures entomophiles
- Taille de la parcelle et agroforesterie
 - Taille de la parcelle
 - Agroforesterie
- Système de culture
 - Succession culturale
 - Culture précédente
 - Présence de prairies
 - Diversité des cultures
 - Nombre de cultures
 - Équilibre entre les cultures d'hiver et de printemps
 - Itinéraire de la culture en place
 - Culture en place
 - Culture principale
 - Culture associée
 - Protection des cultures et fertilisation
 - Type de protection insecticide
 - Type de désherbage
 - Type de fertilisation
 - Mode de gestion de l'interculture
 - Travail du sol
 - Gestion des résidus de culture
 - Culture intermédiaire
 - CI en place
 - Floraison de l'interculture
 - Durée d'implantation

Attribut Potentiel Auxiliaires

Description: Combine le potentiel de l'environnement de la parcelle et celui du systèmes de culture

Scale: 1=très défavorable(-);2=défavorable(-);3=un peu défavorable;4=peu favorable;5=favorable(+);6=très favorable(+)

Utility Function: F = 9/25 (36,00%), déterminé: 100,00% [très défavorable:1,défavorable:1,un peu défavorable:1,peu favorable:13,favorable:3,très favorable:6]

Description: [Red box]

1. MODEL: Construction de l'arbre avec les attributs basés sur la bibliographie.

2. Remplissage échelle* et fonction d'utilité*
***échelle:** favorable/peu favorable/defavorable
***fonction d'utilité:** % de chaque attribut

3. OPTIONS: Remplissage des caractéristiques de chaque parcelle

4. Evaluation pour chaque parcelle (Verte: favorable et Rouge: defavorable)

Figure 20. Etapes de la construction du nouveau DEXi.

En premier lieu, il est nécessaire de renseigner tous les critères dans le modèle. Ceux marqués par un triangle sont les « critères de base ou feuilles de l'arbre » et sont décrits par 3 ou 4 classes plus ou moins favorables au développement des auxiliaires. Les classes défavorables sont décrites en rouge et les classes favorables en vert. Ensuite, les critères en amont marqués par un rectangle sont les « critères agrégés ou nœuds internes de l'arbre » et sont également décrits par 3 à 4 classes de « défavorable » à « très favorable ». Leurs valeurs sont déterminées par des fonctions d'utilité. La fonction d'utilité donne à chaque critère agrégé un poids à partir des 2 ou 3 critères de base associés. Ce poids est souvent relié avec des données bibliographiques ou des expertises. Pour réaliser l'agrégation, une table de contingence est renseignée. Elle détermine la classe de chaque critère agrégé en fonction de la description des critères du niveau inférieur.

Ensuite, il faut remplir le tableau « options » avec les caractéristiques des parcelles à étudier afin d'obtenir une évaluation du potentiel d'accueil des auxiliaires pour chaque parcelle. Sur l'ensemble des critères renseignés et agrégés, le logiciel permet de faire de nombreux graphiques décrivant de manière simple les systèmes de cultures renseignés.

3. RESULTATS

3.1. Présence des pucerons et des auxiliaires en grandes cultures

3.1.1. Evolution de la population des pucerons et des auxiliaires à l'automne

Les populations de pucerons les plus importantes ont été enregistrées sur les parcelles d'interculture de Pusignan et de Thil. Les analyses d'automne se sont donc concentrées sur ces parcelles.

Les données obtenues par observation visuelle (*Figure 21*) permettent de comparer l'évolution des pucerons dans les parcelles d'interculture de Pusignan (labour et non labour) et de Thil.

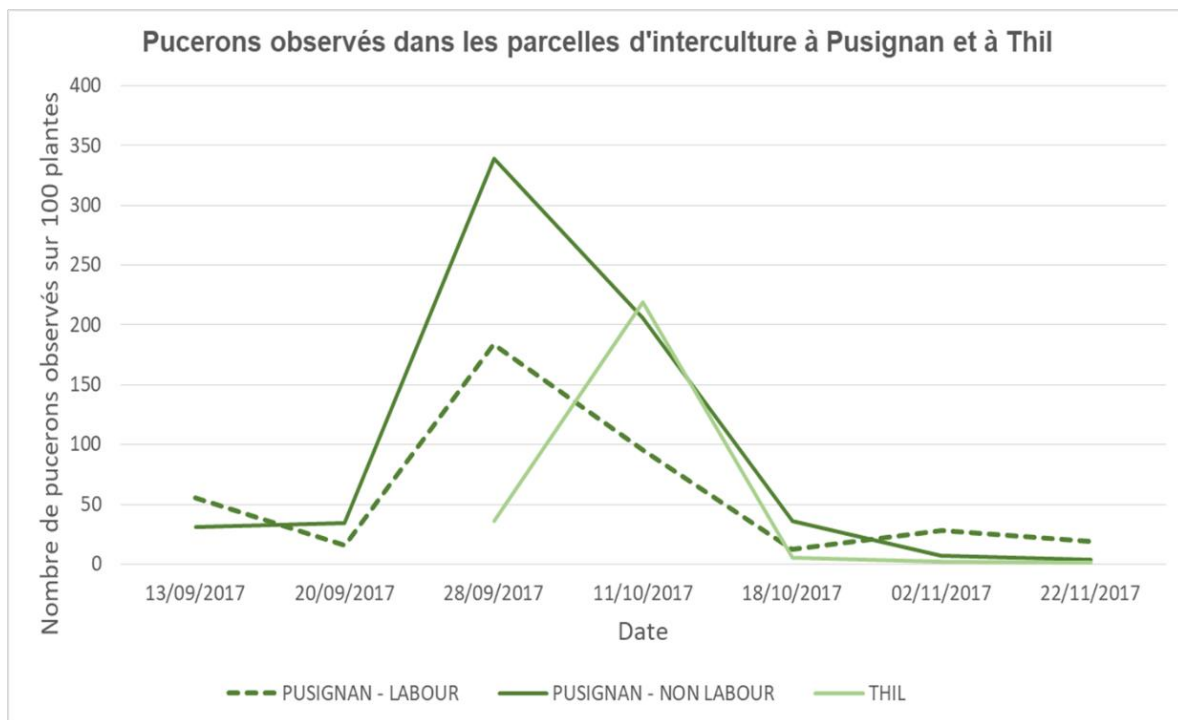


Figure 21. L'évolution de pucerons à Pusignan et à Thil suite aux données de la méthode d'observation visuelle.

Ce graphique indique une croissance et une décroissance similaires des pucerons dans les parcelles de Pusignan et de Thil. Le pic de pucerons est le 28 septembre pour les parcelles de Pusignan et le 11 d'octobre pour la parcelle de Thil. Il est à noter que le pic de puceron est plus élevé dans la parcelle non labourée.

Les niveaux de pucerons et d'auxiliaires issus des captures dans les cuvettes jaunes à Pusignan ont été mis en parallèle avec les données de température maximale et minimale afin de voir si cette diminution de pucerons est due aux auxiliaires ou aux conditions climatiques (*Figure 22*). Dans ce cas, le nombre de pucerons et d'auxiliaires correspond à la moyenne des données de la parcelle labourée et sans labour à Pusignan. En effet, dans ces parcelles, les tendances sont similaires.

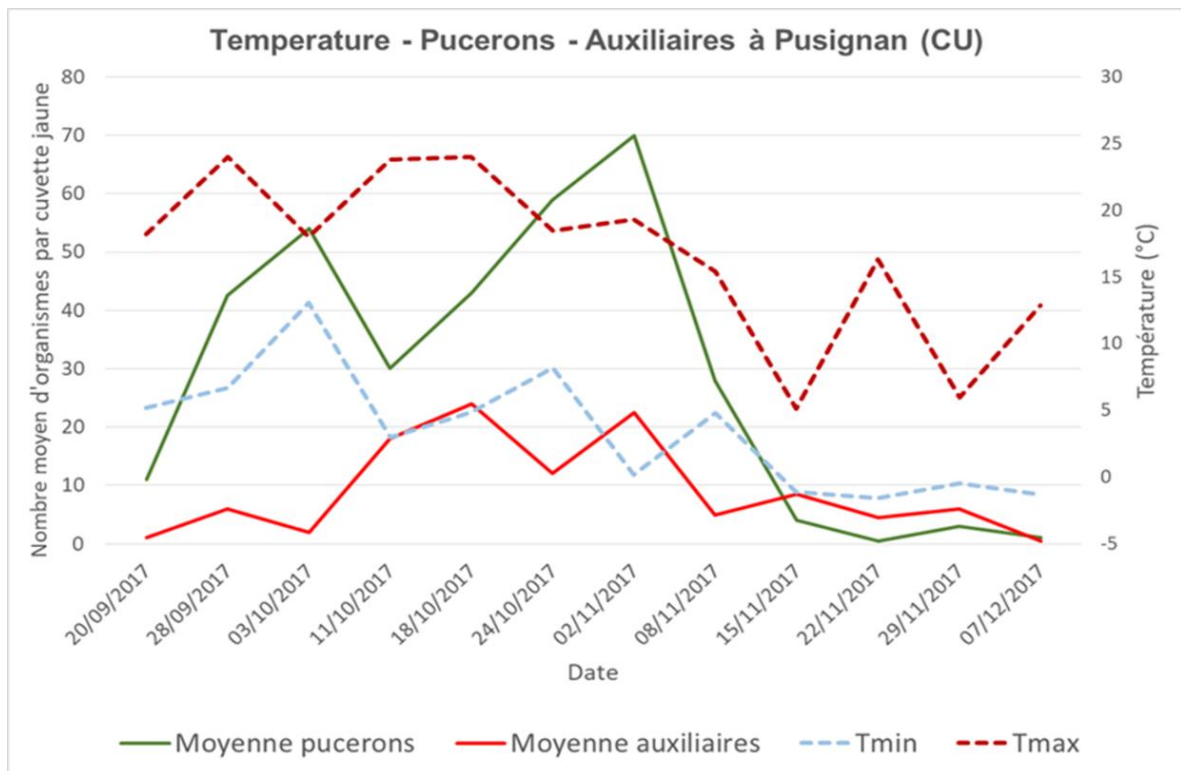


Figure 22. Moyenne de pucerons et d'auxiliaires piégés aux cuvettes jaunes à Pusignan et données des températures maximale et minimale.

Le graphique montre comment les populations des pucerons et des auxiliaires évoluent dans le temps. Le premier pic de pucerons est le 3 octobre, il doit correspondre à l'arrivée des pucerons ailés. Trois semaines après, le 18 octobre, un pic d'auxiliaires est constaté. Parmi ceux-ci les micro-hyménoptères ont été les auxiliaires les plus présents. Dans ce cas, les pics de captures d'auxiliaires sont décalés de 3 semaines par rapport aux pucerons.

Une baisse du nombre de pucerons est constatée le 11 octobre et le 15 novembre, à ces dates elle peut être mise en relation avec la baisse de la température minimale.

Par ailleurs, le nombre d'auxiliaires capturés dans cuvettes jaunes semble être plus important lorsque la température maximale augmente.

Après le 15 novembre, quand la température minimale descend en dessous de 0 °C, nous retrouvons très peu d'insectes dans les pièges.

3.1.2. Evolution des pucerons et des auxiliaires au printemps

Lors du printemps 2018, les populations de pucerons les plus importantes ont été enregistrées sur les parcelles de blé et de maïs à Pusignan. Les analyses se sont donc concentrées sur quatre parcelles : blé labour, blé non labour, maïs labour et maïs non labour.

La Figure 23 décrit l'évolution des pucerons et du total d'auxiliaires dans les parcelles de blé avec la méthode d'observation visuelle. Le blé labouré était plus développé que le blé non labour car il avait été semé plusieurs jours avant.

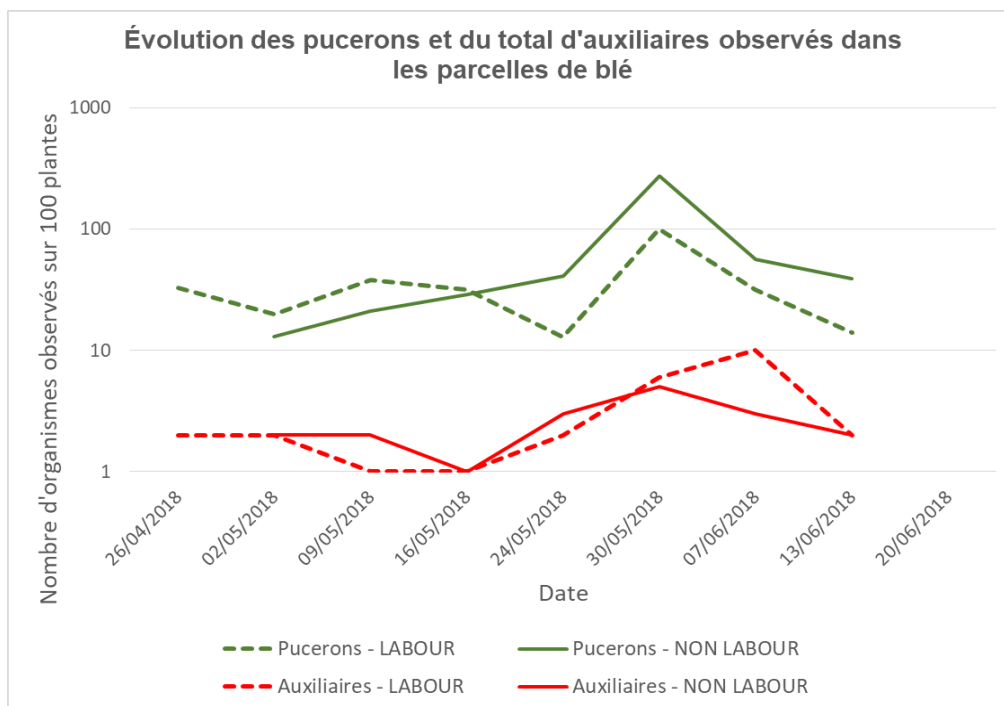


Figure 23. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les cultures de blé labouré et sans labour à Pusignan.

Dans les deux parcelles de blé (labour et non labour), le pic principal de pucerons a été observé le 30 mai. Les pucerons et les auxiliaires ont quitté ces parcelles à partir du 13 juin du fait du dessèchement de la végétation.

La Figure 24 présente le nombre de pucerons et d'auxiliaires dans les parcelles de maïs à proximité du blé, ce qui permet de vérifier si les pucerons ont migré vers le maïs ou non.

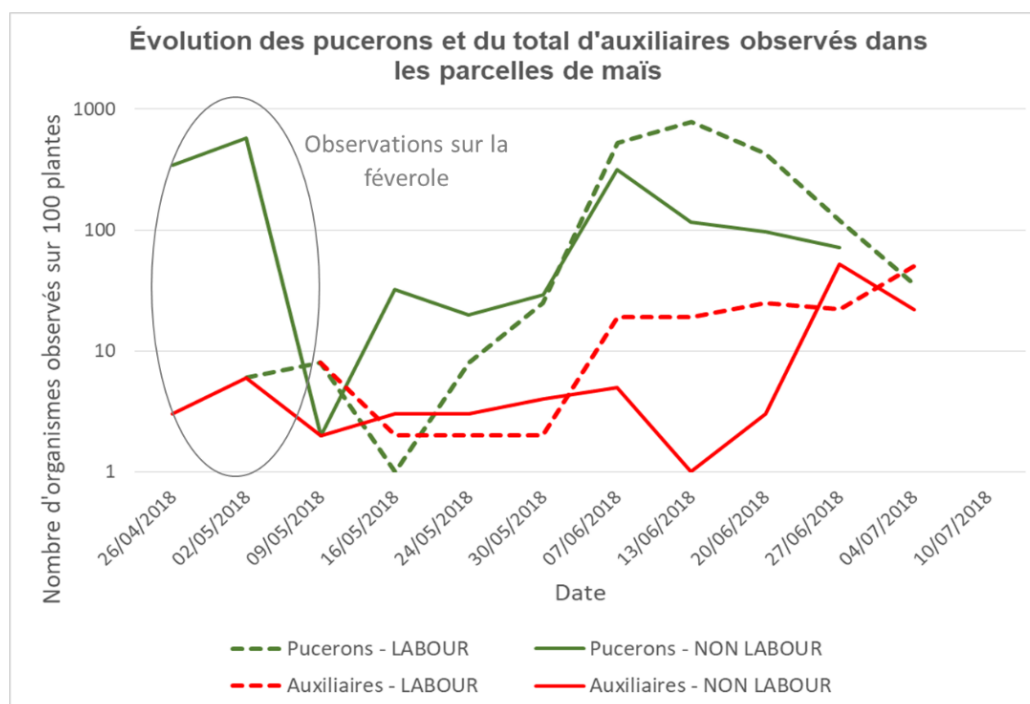


Figure 24. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les cultures de maïs (parcelle labourée et sans labour) à Pusignan.

Dans ce graphique, le premier pic de pucerons et d'auxiliaires a été observé le 2 mai. Cependant, ces observations correspondent également aux insectes trouvés dans la culture de féverole présente jusqu'au 9 mai dans la parcelle de maïs non labourée. Par la suite, une augmentation exponentielle de pucerons et d'auxiliaires a été observée entre le 30 mai et le 7 juin.

Le pic de pucerons a été observé le 7 juin dans le maïs labouré et une semaine plus tard dans le maïs non labouré. Pour les auxiliaires un pic a été observé trois semaines plus tard dans chaque parcelle. Il semblerait donc que la population d'auxiliaires augmente régulièrement au fil du temps et même lorsque la population de pucerons diminue. Néanmoins, il faut noter que dans ce cas, les températures augmentent au fil du temps. A partir du 4 juillet, aucun insecte n'a été observé ni dans le blé ni dans le maïs. Pour cette dernière culture, l'irrigation pourrait jouer un rôle important.

Ensuite, la *Figure 25* montre l'évolution des pucerons et du total d'auxiliaires dans les deux parcelles d'orge. La méthode utilisée dans ce cas est celle d'aspiration.

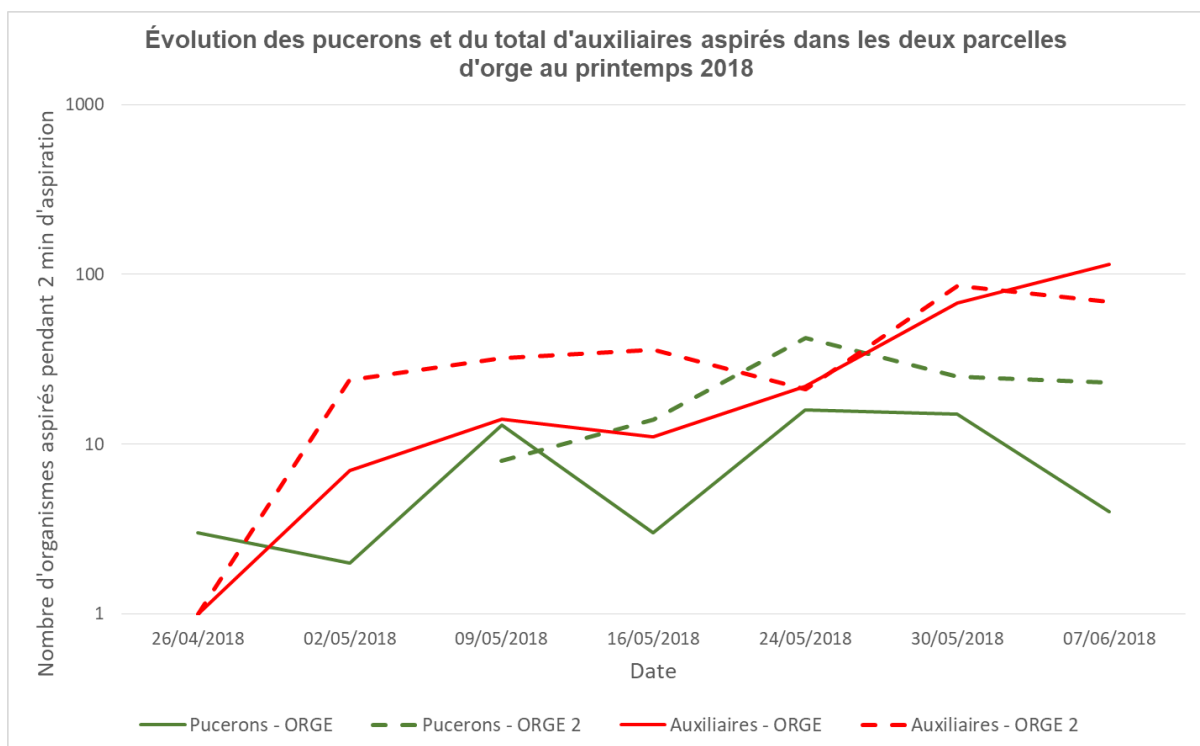


Figure 25. Evolution des pucerons et des auxiliaires observés dans les deux cultures d'orge à Thil.

Le graphique montre comment les populations de pucerons et d'auxiliaires évoluent dans le temps. Les tendances qu'ils suivent sont similaires pour les deux parcelles d'orge. Il semble que la population d'auxiliaires augmente régulièrement au fil du temps et est toujours un peu décalé par rapport à la population des pucerons. La présence des auxiliaires dans ces parcelles d'orge en agriculture biologique a été plus importante que dans les autres cultures en agriculture conventionnelle.

Ensuite, nous avons représenté les données correspondant aux pucerons et aux micro-hyménoptères pris par la méthode d'aspiration et celles correspondant aux pucerons momifiés observés afin de mieux comprendre les différentes évolutions qu'ils suivent (*Figure 26*).

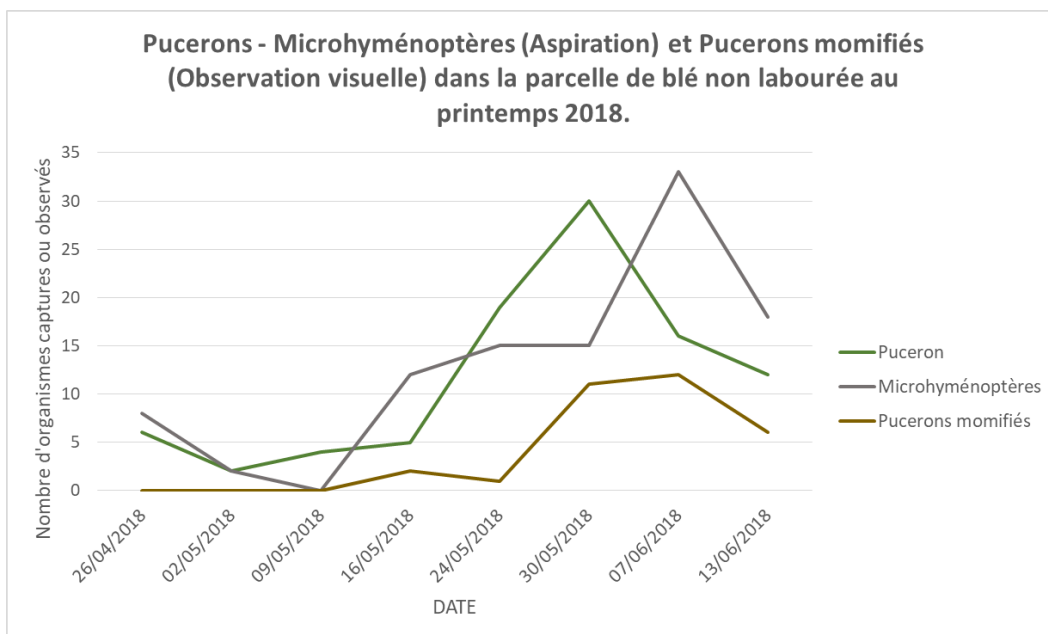


Figure 26. Population de pucerons, de micro-hyménoptères et de pucerons momifiés dans la culture de blé non labouré.

Dans ce graphique, comme sur la *Figure 23*, le pic de pucerons a eu lieu le 30 mai ; une semaine après, un pic de micro-hyménoptères a été observé. Par ailleurs, le pic de pucerons momifiés a eu lieu le même jour que celui des micro-hyménoptères.

La *Figure 27* présente l'évolution des différents auxiliaires en relation avec les pucerons. Ce sont les données observées dans la parcelle labourée de maïs (sauf pour les données des micro-hyménoptères qui sont issues des cuvettes jaunes).

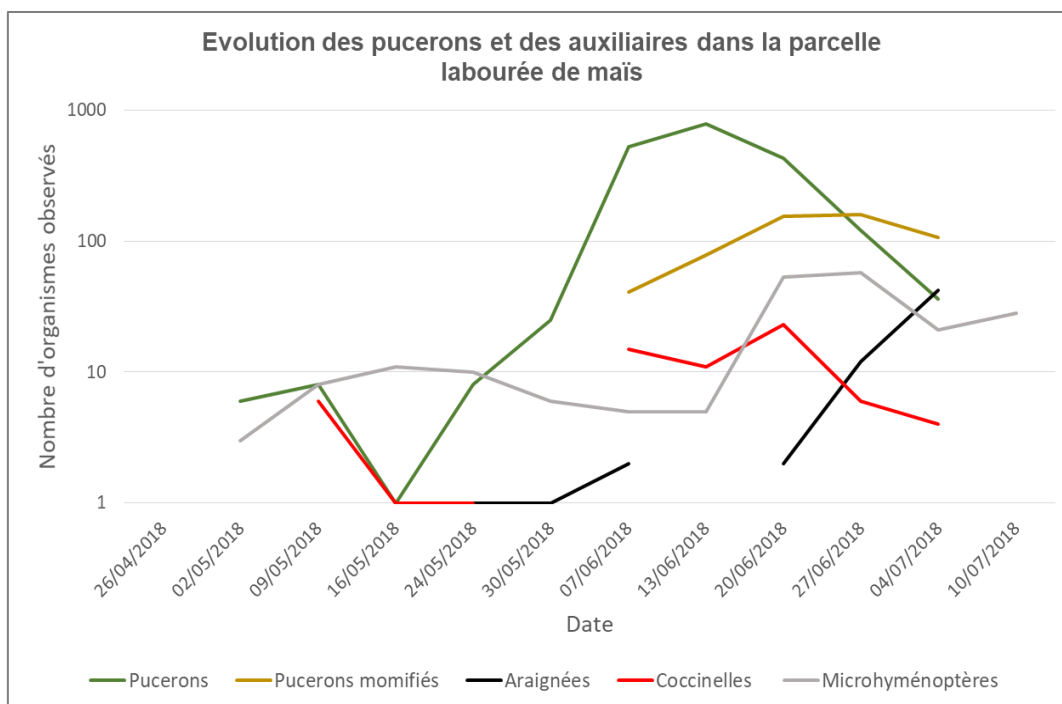


Figure 27. Evolution des différents auxiliaires observés dans la culture du maïs labouré.

Un pic de pucerons momifiés, issu de l'activité des micro-hyménoptères, a été observé deux semaines après le pic de pucerons. La présence de ces auxiliaires pourrait expliquer la décroissance des populations de pucerons totales. Ce graphique montre également un pic de coccinelles le 20 juin, date à partir de laquelle les températures dépassent pour la première fois les 30 degrés (voir *Anexe I*). Les araignées sont arrivées plus tard.

Enfin, la population de pucerons et d'auxiliaires aspirés dans la culture de luzerne a été représentée afin d'observer leur évolution (Figure 28). Cette méthode semble plus efficace que l'observation visuelle pour ce type de culture car les organismes sont bien cachés entre les feuilles.

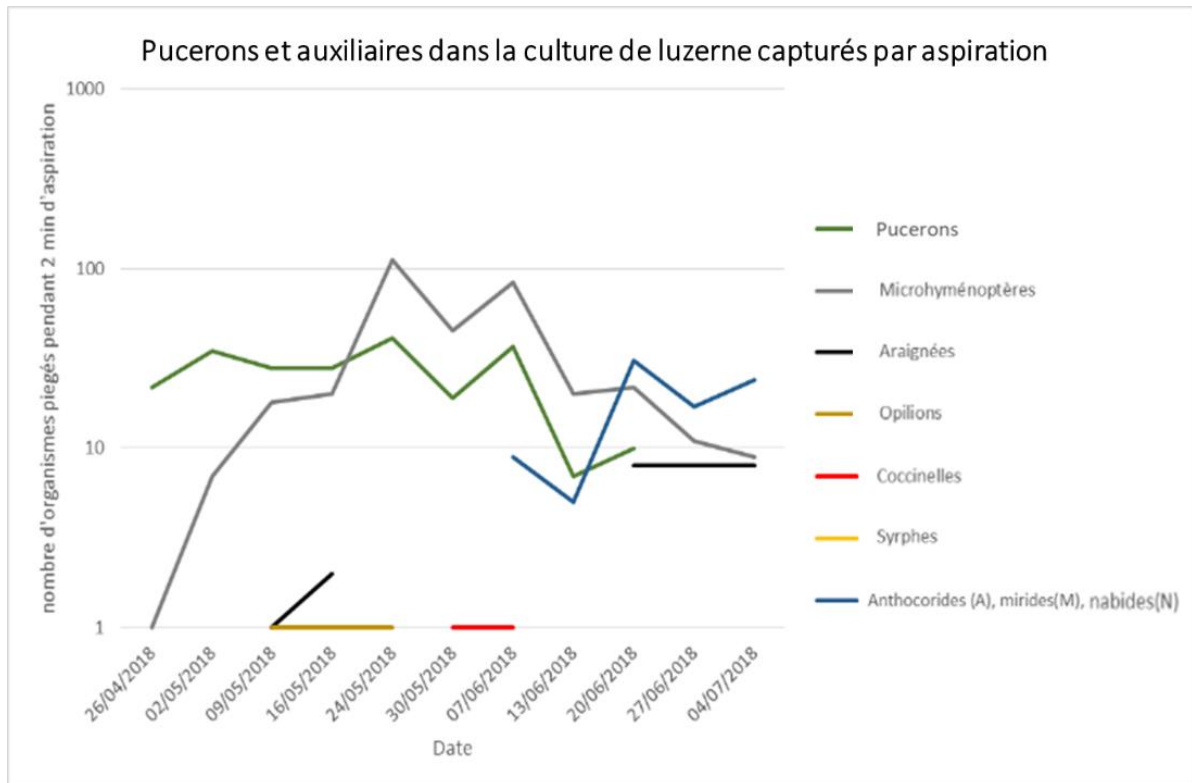


Figure 28. Population de pucerons et d'auxiliaires dans la culture de luzerne capturés par la méthode d'aspiration.

La population de micro-hyménoptères est importante dans la culture de luzerne. Dans ce cas, la population de pucerons suit des tendances similaires à celle des micro-hyménoptères. A partir du 13 juin les populations d'anthocorides, de mirides et de nabides commencent à augmenter jusqu'à leur pic le 20 juin. A partir de ce jour, aucun puceron n'a été capturé et la population de micro-hyménoptères a diminué.

3.1.3. Ecarts identifiés entre les méthodes d'observation et de piégeage

Les moyennes de pucerons et d'auxiliaires toutes dates confondues pour chaque méthode dans la parcelle de blé ont été comparées afin d'observer les potentielles différences entre les méthodes (Figure 29).

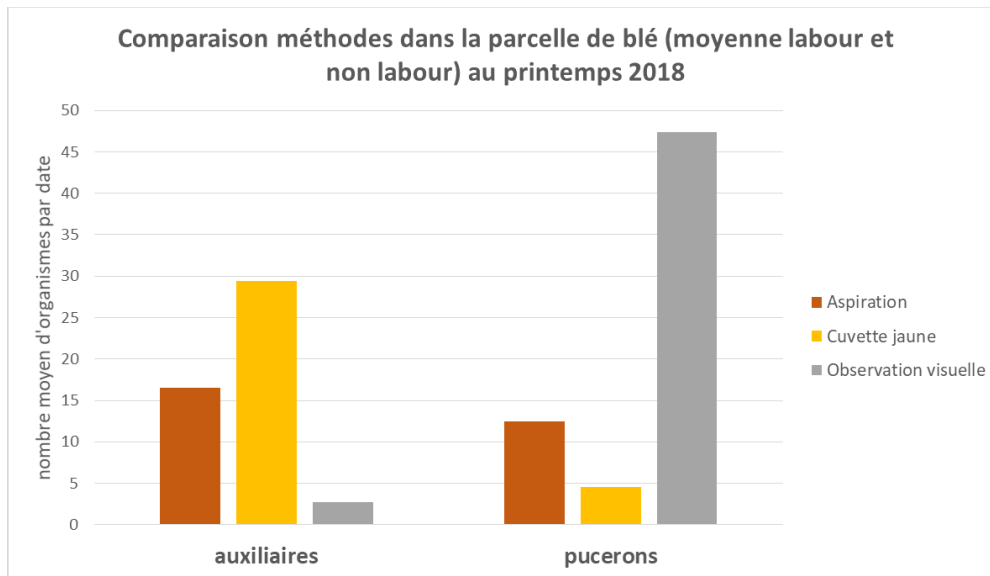


Figure 29. Comparaison des méthodes dans la parcelle de blé au printemps 2018. (Moyenne de pucerons et d'auxiliaires de toutes les dates par méthode).

Le graphique montre que la méthode de cuvette jaune est celle qui capture le plus d'auxiliaires par jour mais également celle qui capture le moins de pucerons. Au contraire, l'observation visuelle est la méthode qui relève le plus de pucerons par jour mais le moins d'auxiliaires. Finalement, l'aspiration est une méthode intermédiaire entre les deux premières.

Sur l'ensemble de données collectées, la proportion de pucerons et d'auxiliaires a été comparée pour chaque méthode à l'automne et au printemps (Figure 30).

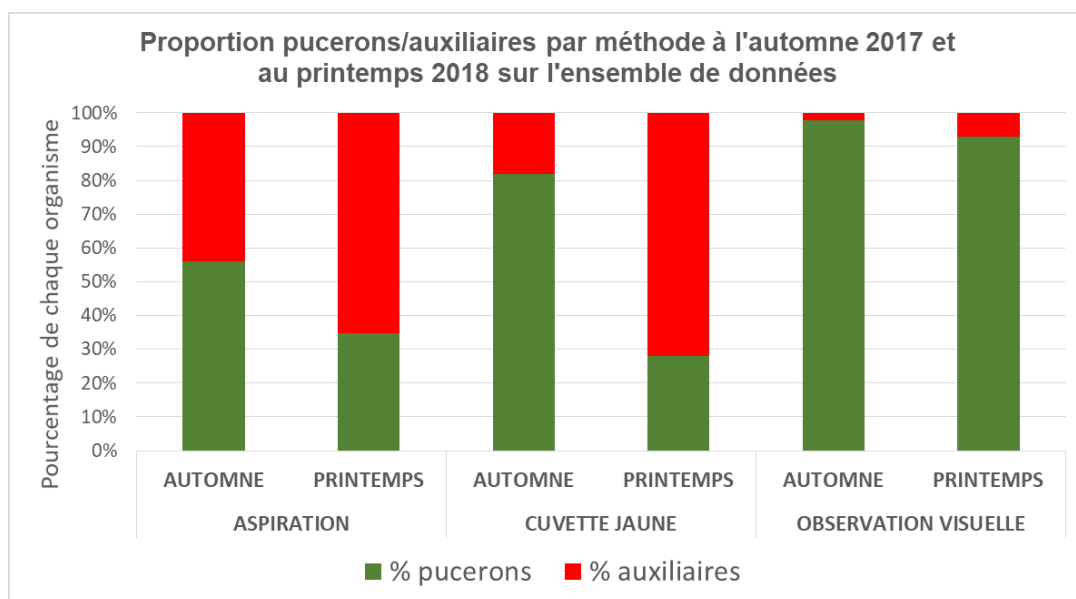


Figure 30. Proportion de pucerons et d'auxiliaires sur l'ensemble de données (Thil et Pusignan) par méthode à l'automne et au printemps.

Pour les trois méthodes (aspiration, cuvette jaune et observation visuelle), cette figure indique que la proportion d'auxiliaires par rapport aux pucerons est plus élevée au printemps qu'à l'automne. L'observation visuelle est la méthode qui renseigne la proportion de pucerons la plus importante par rapport aux auxiliaires. L'utilisation des cuvettes jaunes est la méthode qui a capturé la plus faible proportion de pucerons au printemps.

A l'automne, les aspirations ont relevé 55% de pucerons et 45% d'auxiliaires, les cuvettes jaunes 80% de pucerons et 20% d'auxiliaires et l'observation visuelle 98% de pucerons et 2% d'auxiliaires. Ces pourcentages varient au printemps : pour les aspirations, 35% de pucerons et 65% d'auxiliaires ; pour les cuvettes jaunes, 28% de pucerons et 72% d'auxiliaires ; et pour l'observation visuelle, 92% de pucerons et 8% d'auxiliaires.

L'évolution de ces proportions pourrait indiquer une plus grande activité des auxiliaires au printemps qu'à l'automne. Cela pourrait également être mis en relation avec les températures relevées nettement plus élevées au printemps.

La *Figure 31* suivante a été réalisée pour comparer les différentes méthodes à l'automne et au printemps. Elle indique le pourcentage de chaque groupe d'espèces d'auxiliaires capturé et/ou observé.

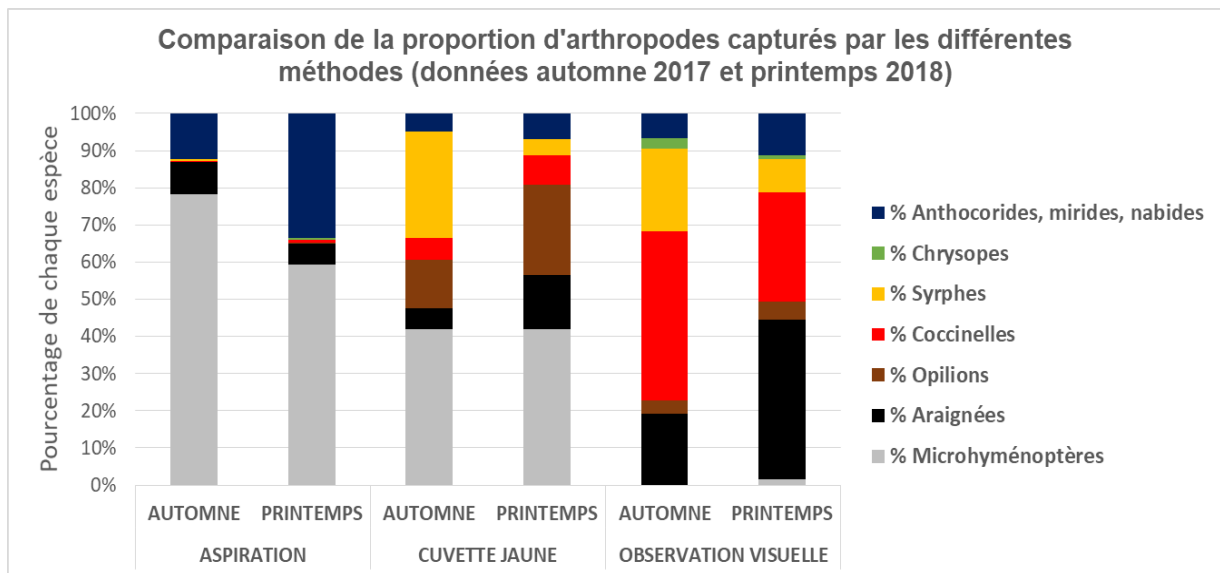


Figure 31. Pourcentage de chaque auxiliaire par méthode sur l'ensemble des auxiliaires à l'automne et au printemps en agriculture conventionnelle (Pusignan) et en agriculture biologique (Thil).

L'aspiration et la cuvette jaune sont les meilleures méthodes pour capturer les microhyménoptères. Par contre, les observations visuelles signalent bien la présence des insectes de grandes tailles comme les coccinelles ou les araignées. Ce graphique montre également une proportion de syrphes plus élevée à l'automne (30% dans les cuvettes jaunes et 20% pour les observations visuelles) et une présence plus élevée d'opilions, d'araignées, d'anthocorides, de mirides et de nabides au printemps.

3.1.4. Identifications précises de quelques espèces d'organismes

Des déterminations précises (*Tableau 2*) sur plus de 100 individus ont été réalisées au laboratoire pour savoir si les espèces présentes dans les parcelles suivies ont bien un potentiel de régulation de pucerons. Puis les espèces déterminées ont été identifiées d'après la bibliographie des espèces auxiliaires des pucerons.

Tableau 2. Déterminations précises d'insectes réalisées au laboratoire.

Coccinelles	<i>Coccinella septempunctata</i> Linnaeus, 1758
	<i>Harmonia axyridis</i> (Pallas, 1773)
	<i>Hippodamia variegata</i> (Goeze, 1777)
	<i>Propylea quatuordecimpunctata</i> (Linnaeus 1758)
Syrphes	<i>Episyrphus balteatus</i> (De Geer, 1776)
	<i>Eristalis tenax</i> (Linnaeus, 1758)
	<i>Eupeodes corollae</i> (Fabricius, 1794)
	<i>Sphaerophoria scripta</i> (Linnaeus 1758)
	<i>Syrphus vitripennis</i> Meigen, 1822
Microhyménoptères parasitoïdes de pucerons	<i>Aphidius avenae</i> Haliday, 1834
	<i>Aphidius ervi</i> Haliday, 1834
	<i>Lysiphlebus fabarum</i> (Marshall, 1896)

Pendant l'automne, les cicadelles ont été aussi très présentes dans les pièges donc plusieurs échantillons ont été envoyés au laboratoire pour leur identification, sachant que certaines espèces sont vecteurs de virus en grandes cultures. Les principales espèces identifiées sont : *Psammotettix sp.*, *Euscelidius variegatus*, *Neoliturus guttulatus*, *Eupteryx atropunctata*, *Emelyanoviana mollicula*, *Zyginidia scutellaris* et *Empoasca pteridis*.

D'autres insectes ont également été trouvés dans les pièges, appartenant aux groupes suivants : cantharides ; charançons ; sitonias ; lemas ; taupins ; cétoines ; cercopes ; criquets ; psylles ; sylphes ; punaises ; méligèthes ; carabes et staphylins.

3.2. Analyse des composantes principales (ACP)

Des analyses des composantes principales (ACP) au printemps ont été faites afin de trouver quelles sont les variables plus corrélées avec les pucerons et les auxiliaires. Ces représentations nous ont permis d'identifier des typologies d'individus et définir des tendances. Les variables qui n'étaient pas bien représentées sur le plan ont été supprimées de l'analyse pour augmenter le pourcentage d'inertie absorbé par chacun des axes. Ces analyses ont été faites avec toutes les données prises sur le terrain pour la méthode d'aspiration et d'observation visuelle.

La méthode de cuvettes jaunes n'a été pas analysée car les données des pucerons de cette méthode ne représentent pas la totalité de la population de pucerons.

Pour la méthode d'observation visuelle l'analyse a comme variables : les pucerons, la température (maximale et minimale), les coccinelles, les syrphes, les araignées et les opilions (Figure 32). En revanche, pour voir si les micro-hyménoptères sont corrélés avec les pucerons l'analyse avec l'aspiration a été faite car avec l'observation visuelle est impossible d'observer des micro-hyménoptères. Les variables dans ce cas sont : les pucerons, les micro-hyménoptères et la température (maximale et minimale).

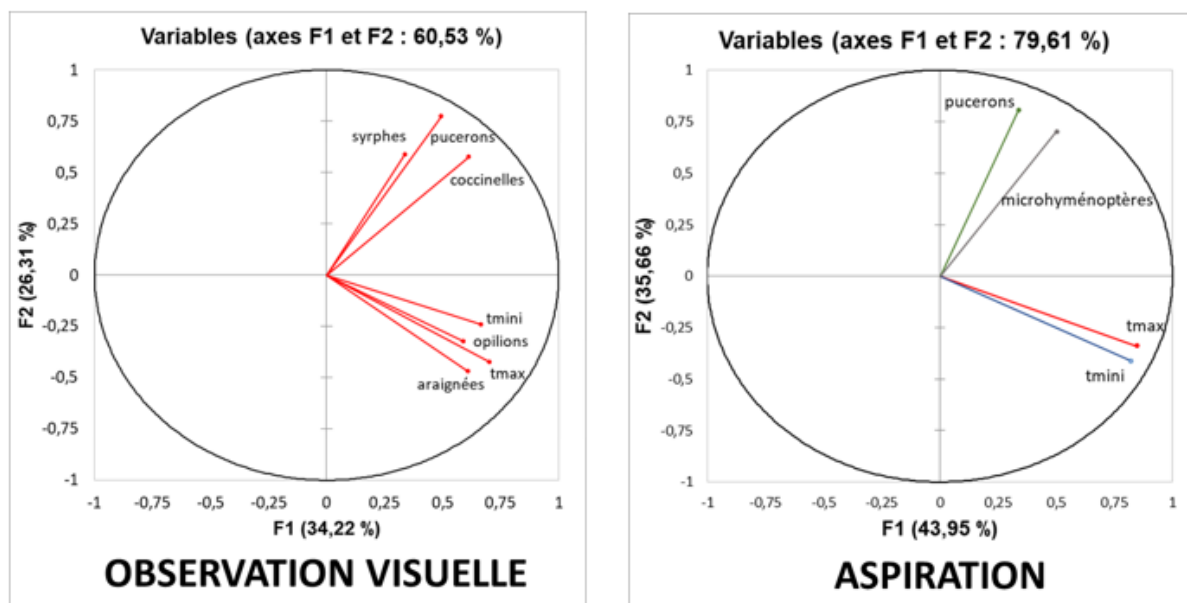


Figure 32. Des analyses des composantes principales (ACP) avec les données d'observation visuelle et les données d'aspiration.

Dans cette première ACP réalisée avec les données d'observation visuelle, nous pouvons identifier différents groupes d'auxiliaires qui sont potentiellement corrélés entre eux. Nous pouvons dire qu'il y a une corrélation entre la présence des pucerons et celles des coccinelles. Les syrphes semblent corrélés avec les pucerons mais ils sont peu représentés car le cosinus (la flèche) n'est pas proche de 1. En outre, les araignées et les opilions semblent plus corrélés avec la température. La somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation est 60,63%.

Dans le deuxième graphique, une corrélation positive entre les pucerons et les microhyménoptères a été observé. Nous pouvons également dire que les températures maximales et minimales ne sont pas corrélées avec les pucerons. La somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation est 79,61%.

3.3. Modèle linéaire généralisé (GLM)

En début d'étude, un modèle linéaire généralisé a été construit avec l'ensemble de données des trois méthodes de capture et observation (aspiration, cuvette jaune et observation visuelle) afin d'étudier la population des pucerons en grandes cultures. En revanche, suite aux écarts en termes de nombre d'organismes piégés par méthode (voir Figure 29), nous avons décidé de développer un modèle pour chaque méthode : « un modèle aspiration », « un modèle cuvette jaune » et « un modèle observation visuelle ».

La variable à expliquer est « l'abondance de pucerons » et les variables explicatives sont « la culture », « la somme d'auxiliaires » et « la température maximale » pour les trois modèles. La procédure qui a été suivie pour construire chacun des modèles est détaillée ci-dessous.

Une représentation graphique de la variable « puceron » a été faite pour vérifier le jeu de données. Ensuite, il est nécessaire d'identifier la distribution de la variable à expliquer afin d'étudier la relation entre la variable à expliquer et les variables explicatives. Il a été observé que la variable puceron ne suit pas une loi normale mais une distribution suivant la loi de Poisson (Figure 33). Ce qui est habituel pour les données de comptage.

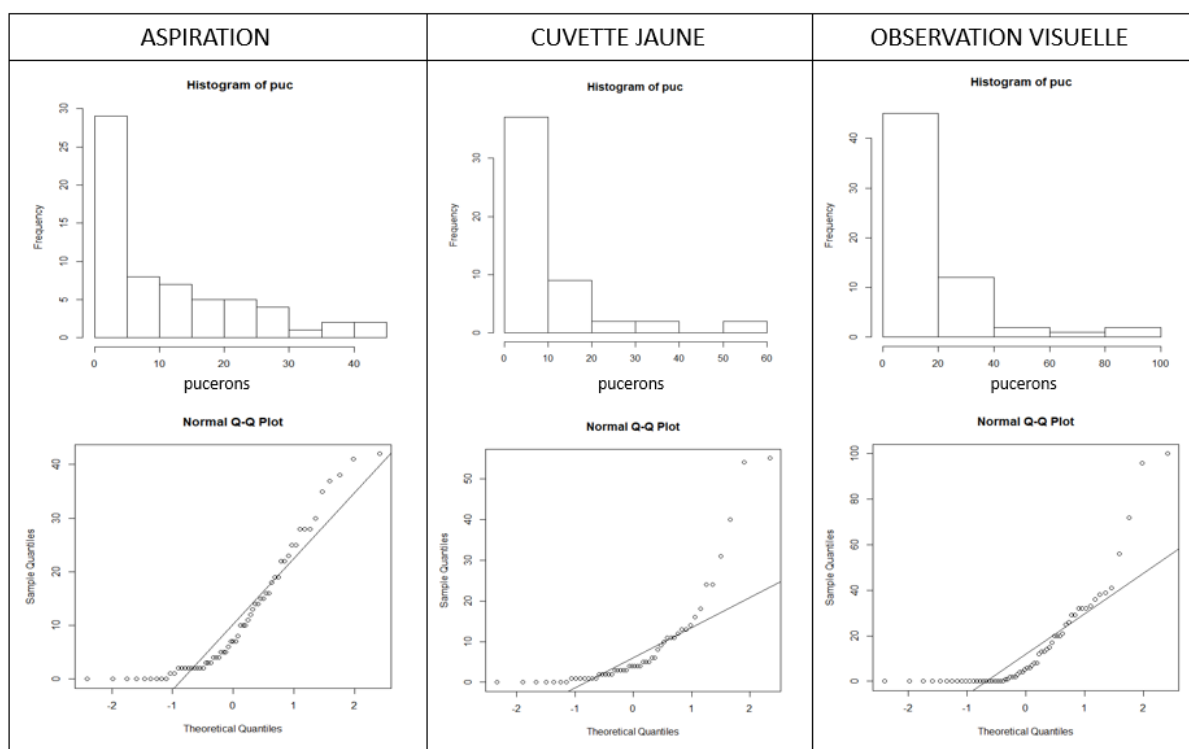


Figure 33. Distribution de la variable puceron pour chaque méthode.

Cette variable étant une variable suivant une loi de Poisson, trois modèles linéaires généralisés ayant pour famille d'erreur, Poisson, et pour fonction de lien, logarithme ont été développés.

Les trois modèles linéaires généralisés finaux sont donc des modèles linéaires de la forme :

Variable à expliquer ~ variable explicative 1 + var. expl. 2 + var. expl. 3

Mod_ASP = glm (pucerons ~ Type culture + Total auxiliaires + T° max)

Mod_CU = glm (pucerons ~ Type culture + Total auxiliaires + T° max)

Mod_OV = glm (pucerons ~ Type culture + Total auxiliaires + T° max)

Ensuite, une Anova a été faite pour estimer si les variables ont des effets significatifs pour chaque modèle et pouvoir les simplifier (Tableau 3).

Tableau 3. Résultats de l'Anova pour chaque modèle. (***) : p -value < 0,001)

Modèle	variable à expliquer	variables explicatives		
		type culture	total d'auxiliaires	temp max
Modèle_ASP	pucerons	***	***	
Modèle_CU	pucerons	***		***
Modèle_OV	pucerons	***	***	***

Les résultats de cette Anova montrent que la variable « type de culture » est significative pour les trois modèles ce qui semble cohérent vu qu'il y a des cultures plus attractives que d'autres pour les pucerons. En plus, dans les cultures suivies il y a quelques-unes en agriculture biologique et d'autres en agriculture conventionnelle donc cela peut affecter également à la population de pucerons.

La variable « total d'auxiliaires » est significative pour le modèle d'aspiration et le modèle d'observation visuelle mais pas pour le modèle de cuvette jaune. Dans les cuvettes jaunes il y avait surtout la présence des insectes volants (donc pucerons ailés) ce qui ne représente pas bien la totalité de population des pucerons. En plus, les cuvettes jaunes ont un effet d'attraction des insectes par la couleur jaune ce qui peut varier d'un insecte à l'autre. Par rapport aux auxiliaires pris par aspiration, il faut dire que l'aspirateur prend les insectes présents au terrain pendant les deux minutes d'aspiration donc il n'y a pas un effet d'attraction comme dans les cuvettes jaunes. Par contre, l'aspirateur ne peut pas prendre les insectes trop lourds.

La température maximale est significative pour le modèle de cuvette jaune et pour le modèle d'observation visuelle.

Puis, les sorties des modèles (*Tableau 4*) donnent le résultat d'un test, avec la F-value associée, et avec des astérisques qui représentent la significativité pour chaque variable explicative introduite dans les modèles, et qui nous donne ainsi une réponse quant à l'effet de cette variable sur notre variable à expliquer.

*Tableau 4. Sorties des modèles. (***: p-value<0,001)*

Modèle	Pr (>Chisq)			AIC
	Type culture	Total d'auxiliaires	Temp max	
Ddl	4	1	1	
Mod_ASP	<2.2e-16 ***	1.78e-06 ***		803,36
Mod_CU	<2.2e-16 ***		6.67e-05 ***	599,81
Mod_OV	<2.2e-16 ***	< 2.2e-16 ***	0.000303 ***	1158

Le critère AIC (Aikake Information Criterion), permettra de choisir le « meilleur » modèle pour chaque méthode, c'est à dire le plus simple tout en expliquant une bonne partie de la variabilité de notre variable à expliquer.

La valeur d'AIC la plus basse correspond au meilleur modèle. En revanche, comme les modèles n'ont pas les mêmes variables, il n'est pas possible de comparer les AIC entre les différentes méthodes.

Les coefficients des facteurs et covariables pour construire les modèles ont été observés sur les sorties des modèles.

Les modèles retenus s'écrivent:

MOD_ASP --> Log(Puceron) : 2,41 + (si Blé : 0 ; si Luzerne : 0,3 ; si Maïs : -0,66 ; si Orge : -0,59 ; si Orge2 : 0,09) + 0,0064*Auxiliaires

MOD_CU --> Log(Puceron) : 2,51 + (si Blé : 0 ; si Maïs : 1,31 ; si Orge : -0,49 ; si Orge2 : -0,49) - 0,04*Tmax

MOD_OV --> Log(Puceron) : 2,59 + (si Blé : 0 ; si Luzerne : -3,49 ; si Maïs : -0,76 ; si Orge : -1,23 ; si Orge2 : -1,38) + 0,02*Auxiliaires + 0,03*Tmax

Une représentation graphique de ces modèles a été faite pour observer la qualité prédictive du modèle (Figure 34).

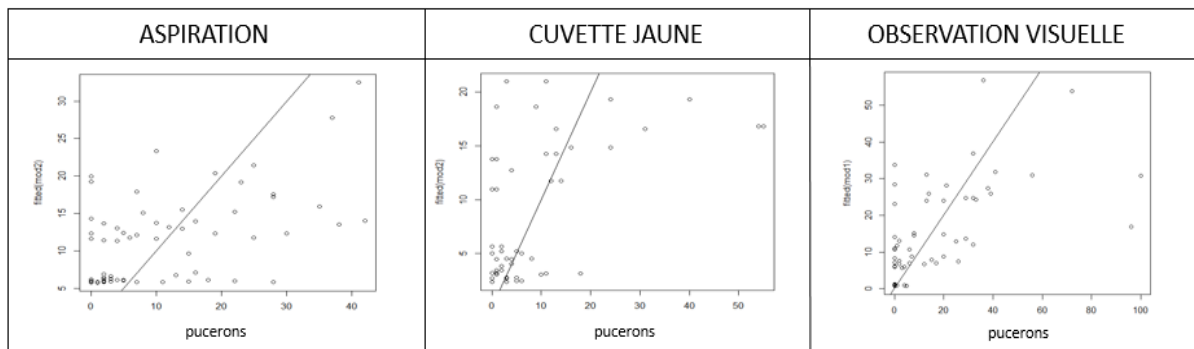


Figure 34. Représentation de la qualité prédictive du modèle.

Les modèles sont moyennement prédictifs. Les valeurs expérimentales suivent la même tendance que le modèle théorique représenté par la droite, cependant il y a tout de même une variabilité.

Afin de valider le modèle nous avons testé la normalité des résidus (Figure 35).

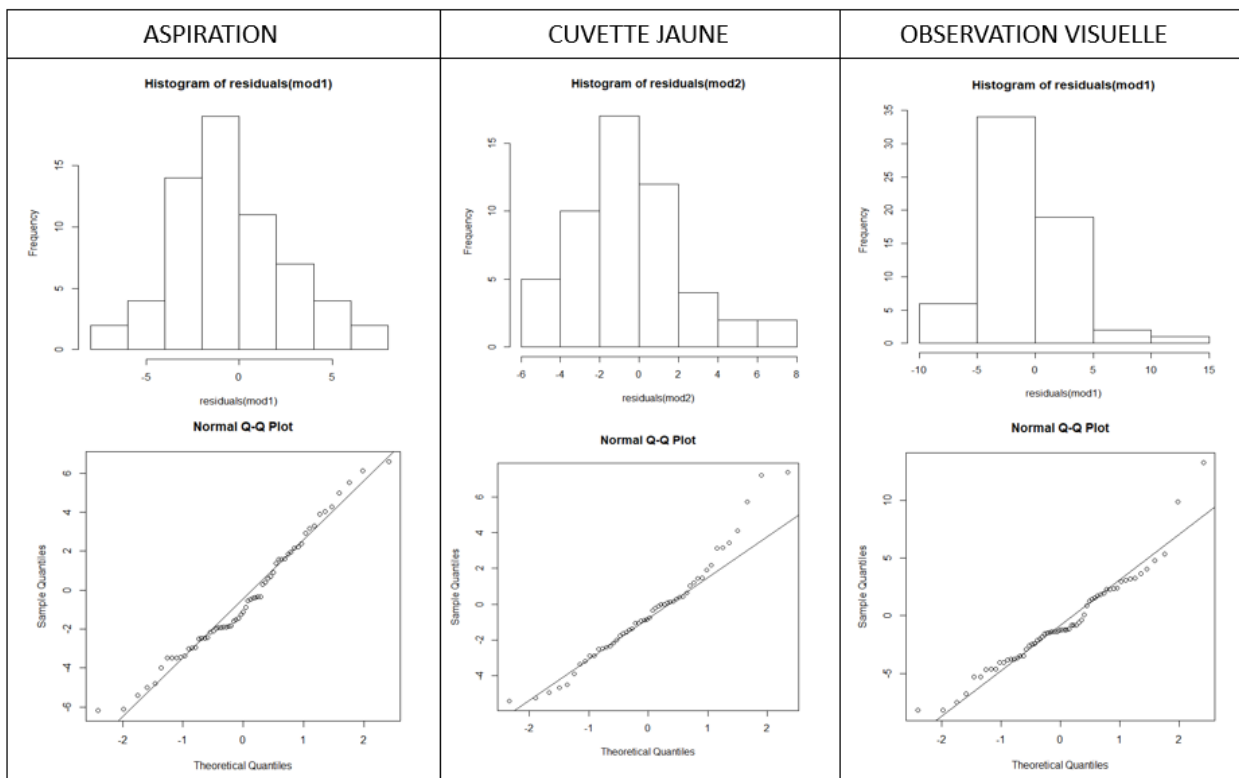


Figure 35. Distribution des résidus des modèles.

Tous les résidus suivent une loi normale d'après les graphes. Cependant, les modèles de cuvette jaune et d'observation visuelle ont des valeurs aberrantes qui s'éloignent un peu de la normalité.

La qualité prédictive du modèle pourrait être améliorée en ajoutant de nouvelles variables explicatives ou en ayant plus de données.

3.4. Arbre commun combinant des différents DEXi issus du projet Auximore

3.4.1. DEXi auxiliaires volants ARENA potentiel des auxiliaires régulant les populations de pucerons en grandes cultures.

Le DEXi auxiliaires volants ARENA pour mesurer le potentiel des auxiliaires régulant les populations de pucerons (*Figure 36*) a été obtenu via la bibliographie, les données paysagères présentes sur la base de données du projet et les travaux précédents du projet AUXIMORE.

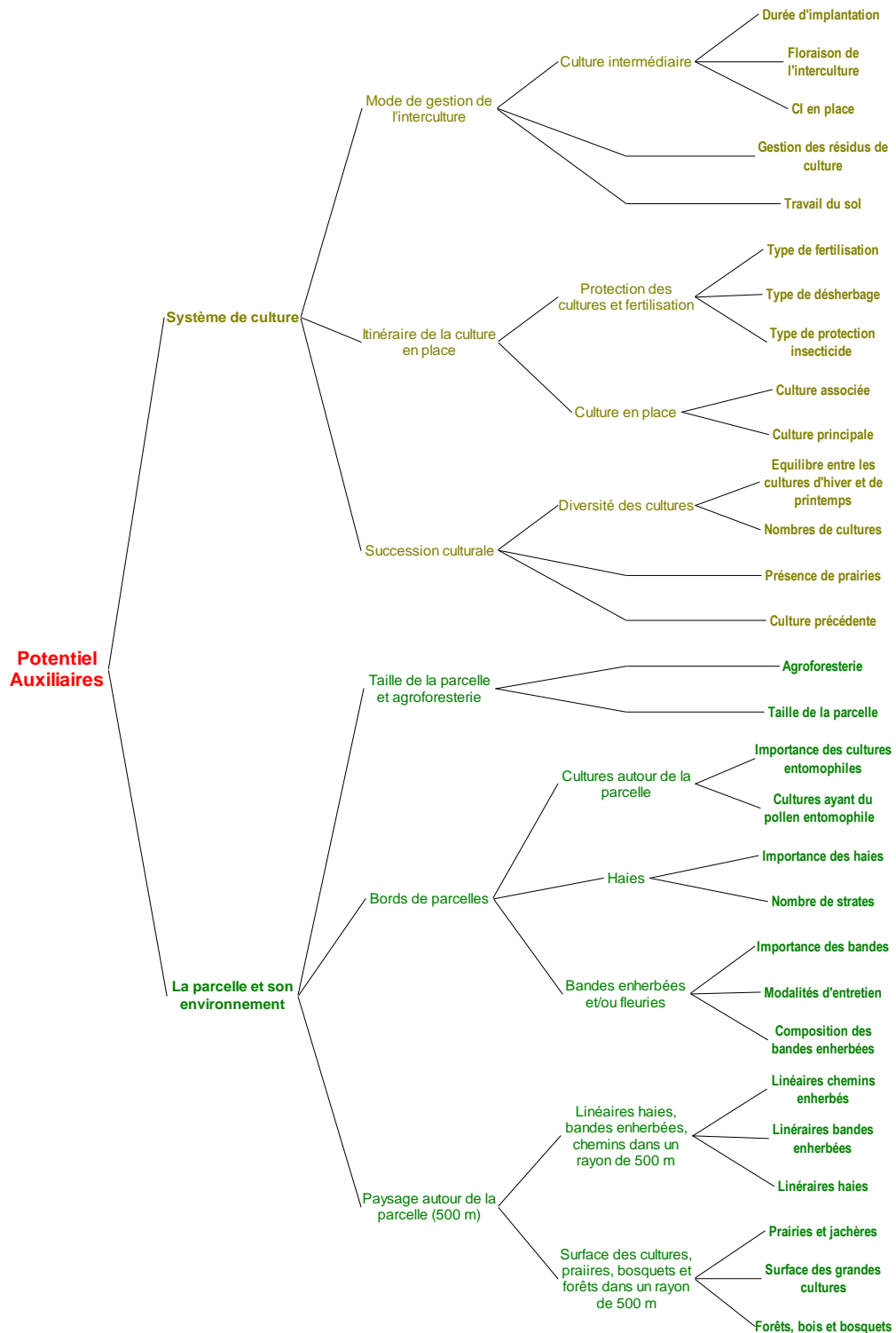


Figure 36. Structure de l'arbre DEXi « Potentiel d'auxiliaires volants » ARENA.

La structure de l'arbre DEXi est la suivante : i) le potentiel d'auxiliaires dépend du système de culture, et de la parcelle et son environnement ii) le système de culture dépend d'autres attributs agrégés comme la gestion de l'interculture, l'itinéraire de la culture en place et la succession culturale iii) la parcelle et son environnement dépendent quant à eux de la taille de la parcelle et agroforesterie, des bords de la parcelle et du paysage autour de la parcelle à 500 m. Tous les attributs plus bas dans l'arbre sont les « feuilles de l'arbre » et chaque feuille a différents options. Par exemple, pour l'attribut « type de fertilisation », il y a trois options possibles : la fertilisation minérale, la fertilisation minérale et organique et la fertilisation organique seule. Une fois que toutes les options ont été renseignées, le logiciel calcule une évaluation du potentiel d'auxiliaires de chaque parcelle.

3.4.2. Validation du modèle DEXi avec les données observés au terrain

Le logiciel DEXi « Potentiel d'auxiliaires » permet d'exporter une évaluation parcelle par parcelle du potentiel des auxiliaires. La couleur verte représente les parcelles avec un haut potentiel d'activité des auxiliaires, la couleur bleue indique un potentiel moyen et la couleur rouge indique un faible potentiel. Dans la *Figure 37*, les deux premières lignes sont les témoins et les autres sont les parcelles suivies au terrain en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique au printemps.

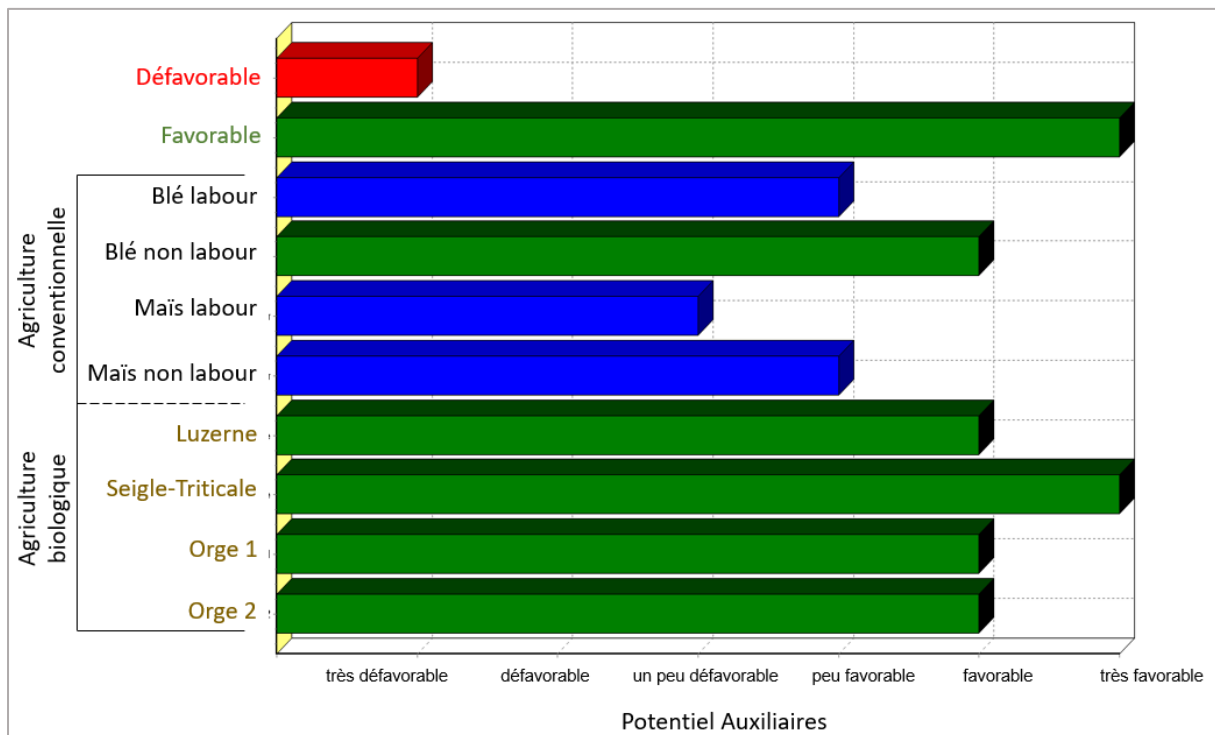


Figure 37. Evaluation du potentiel d'auxiliaires pour les parcelles suivies au printemps 2018.

Les parcelles en agriculture biologique à Thil ont un potentiel d'activité des auxiliaires plus élevé par rapport aux parcelles en agriculture conventionnelle à Pusignan. La parcelle de blé non labourée est la plus favorable pour les auxiliaires de l'ensemble de parcelles de Pusignan. La parcelle cultivée en maïs et non labourée serait plus favorable que celle labourée. Ceci pourrait être dû en plus de l'effet du labour à la présence de féverole durant l'interculture précédent le semis du maïs.

Il est également possible d'identifier quels sont les attributs des parcelles suivies qui favorisent le plus les auxiliaires. A titre d'exemple, l'évaluation de la parcelle d'orge 2 est représentée dans la *Figure 38*.

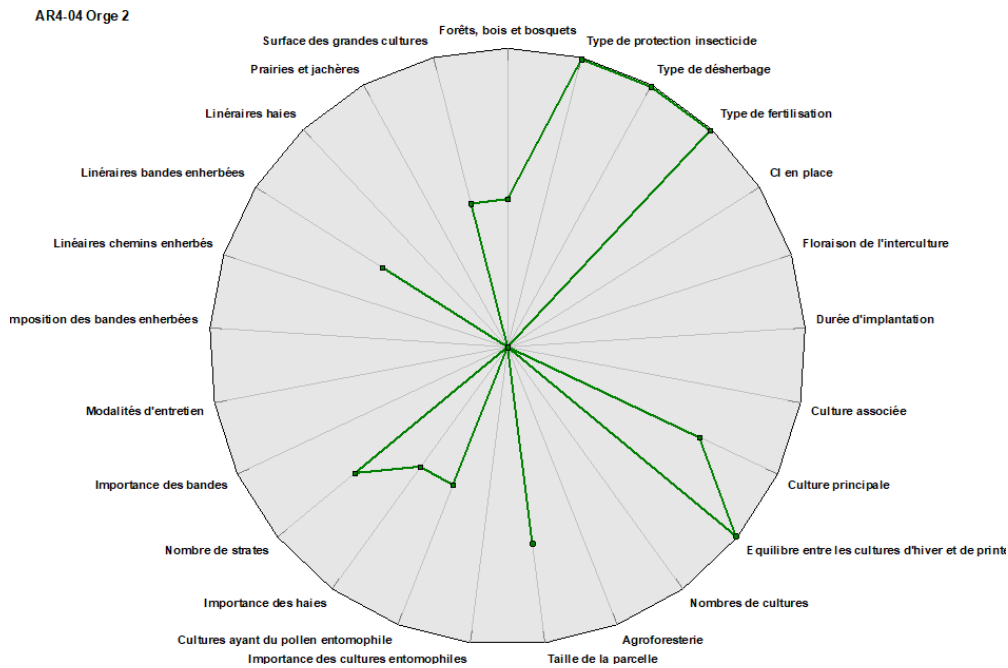


Figure 38. Evaluation des attributs de la parcelle de l'orge 2.

Les attributs de l'orge 2 les plus favorables pour les auxiliaires sont : le type de protection insecticide, le type de désherbage, le type de fertilisation, et l'équilibre entre les cultures d'hiver et de printemps.

Pour étudier ce modèle DEXi nous présentons les données du terrain (*Figure 39*) en parallèle les évaluations issues de DEXi auxiliaires.

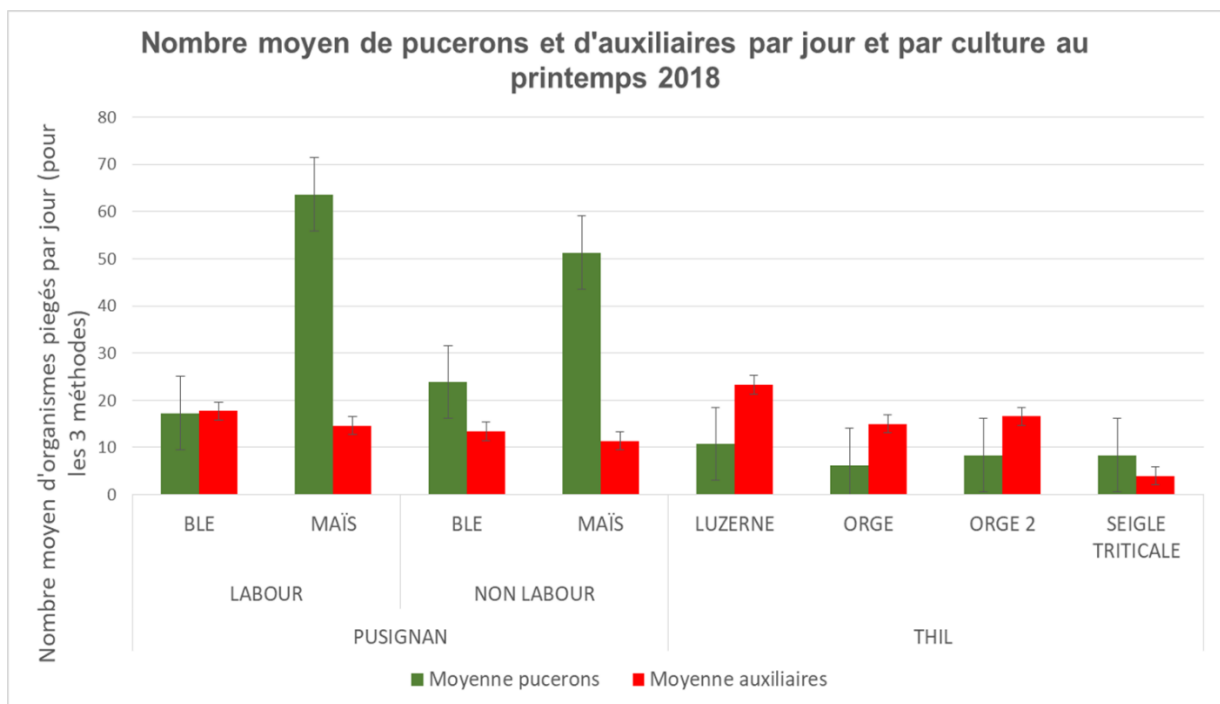


Figure 39. Moyenne de pucerons et d'auxiliaires collectés par jour et par culture au printemps 2018.

Le graphique montre que les parcelles en agriculture biologique à Thil ont des effectifs d'auxiliaires supérieures à celles en agriculture conventionnelle à Pusignan. La luzerne est la culture où il y a plus d'auxiliaires par prélèvement et les parcelles de maïs sont celles qui ont plus de pucerons par prélèvement. Le seigle-triticales a été identifié par DEXi comme la parcelle plus favorable aux auxiliaires, cependant les données du terrain de cette parcelle ne sont pas très significatives car il a séché tôt en saison, limitant ainsi la période de capture. Les parcelles labourées et sans labour de blé et de maïs ne montrent pas de différences significatives entre elles.

Enfin, la *Figure 40* a été réalisée pour comparer la variabilité de ces espèces auxiliaires capturés et observés à Pusignan et à Thil et pour voir s'il y avait des différences entre les deux types d'agriculture.

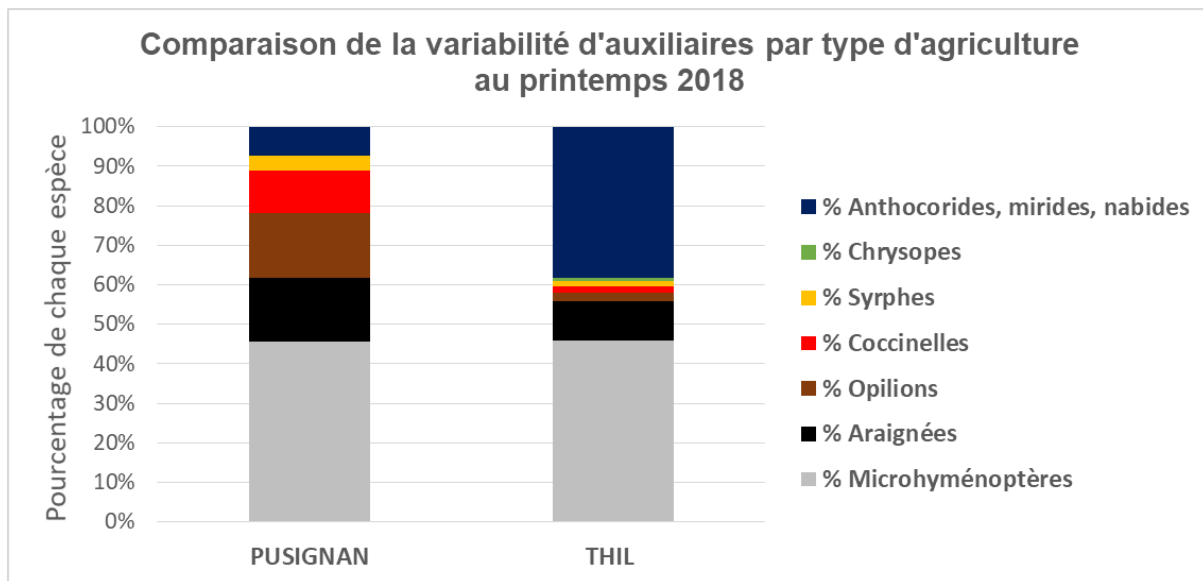


Figure 40. Comparaison de la variabilité d'auxiliaires par type d'agriculture au printemps 2018.

Dans ce graphique, la proportion de micro-hyménoptères est similaire pour les deux types d'agriculture et représente 45% du total des auxiliaires récoltés. Les anthocorides-mirides-nabides représentent 40% des auxiliaires dans les parcelles d'agriculture biologique mais seulement 8% dans les parcelles de Pusignan. Par contre, les araignées et les opilions sont bien présents dans les parcelles d'agriculture conventionnelle certainement à cause de la présence de culture plus haute et plus tardive telle que le maïs.

4. DISCUSSION

4.1. Régulation naturelle des pucerons en grandes cultures ?

Bien que les auxiliaires régulent de manière importante les populations de pucerons, plusieurs auteurs ont également montré, que leur dynamique dépend fortement de la période initiale d'infestation (Gosselke, 2001 ; Bianchi et al., 2004) et des contraintes du milieu (Yang, 2017). Parmi ces contraintes, les conditions climatiques, l'état de la culture et l'environnement de la parcelle doivent être pris en compte dans l'étude des phénomènes de régulation naturelle.

4.1.1. Effet méthode de piégeage

Les trois méthodes employées pour la récolte des données (observations, aspirations et cuvettes jaunes) donnent des informations différentes entre elles, mais néanmoins complémentaires. Ces différences semblent logiques car il existe sur le terrain de nombreux facteurs qui entrent en jeu (les observateurs, les conditions météorologiques, la machine agricole,...). Ces écarts méthodologiques ont été également montrés via les analyses statistiques de type GLM.

Les **aspirations** ont permis d'estimer de manière satisfaisante les populations de pucerons et de micro-hyménoptères. Cependant, cette méthode ne donne pas d'informations satisfaisantes pour les insectes de plus grande taille comme les coccinelles ou les syrphes. En effet, ils sont nettement plus difficiles à aspirer. De plus, l'efficacité d'aspiration dépend aussi de la culture. La mise en œuvre de l'aspiration en culture de maïs est difficile de par sa végétation importante qui gêne les déplacements de l'opérateur et ses mouvements.

Les **cuvettes jaunes** piègent bien les populations d'auxiliaires en général (syrphes, coccinelles, opilions, araignées, micro-hyménoptères, et anthocorides-mirides-nabides) et capturent les populations ailées de pucerons. Grâce cette méthode, les pics de vols de pucerons ont été observés à l'automne (*R. padi*) et au printemps (*M. dirhodum*, *S. avenae* et *R.padi*). Par contre, cette méthode ne permet pas d'observer les pucerons sans aile et les pucerons momifiés car ils ne peuvent pas accéder aux cuvettes.

Les **observations visuelles** se sont avérées très pertinentes concernant l'estimation des populations de pucerons (vivants et momifiés), mais nettement moins pour la faune auxiliaire en général. Les auxiliaires les plus observés sont les coccinelles et les araignées. Cette méthode n'est pas performante si les insectes sont enfouis dans la végétation comme dans le cas de la luzerne où les aspirations sont nettement plus efficaces. Malgré des modes opératoires bien définis dans les protocoles, les observations peuvent varier d'une personne à l'autre

L'observation visuelle et les cuvettes jaunes sont donc des méthodes complémentaires pour le suivi des populations de pucerons et d'auxiliaires. En revanche, l'aspiration est une méthode pertinente en vue du couplage des observations de pucerons et d'auxiliaires de petites tailles mais pas pour l'observation de ceux de grandes tailles.

4.1.2. Effet saison et conditions climatiques

Plusieurs différences ont été observées dans le suivi les populations de pucerons et d'auxiliaires à l'automne 2017 et au printemps 2018. Durant les deux saisons, les colonies de pucerons ont évolué d'une manière similaire et telle que l'avait déjà montrée plusieurs auteurs comme Dixon (2000). La population augmente régulièrement, atteint un pic, puis diminue en abondance. Cette diminution peut être due à un cortège d'auxiliaires, parasitoïdes ou prédateurs. Les études montrent que ce niveau de régulation est relativement constant d'une année sur l'autre (Hodek et al., 1996 ; Dixon, 2000).

Les auxiliaires en général ont été davantage présents au printemps qu'à l'automne. Ces différences peuvent être liées aussi aux conditions météorologiques, la température étant généralement plus élevée au printemps. Nous avons pu identifier à partir de l'analyse de données la corrélation existante entre les populations de pucerons et les conditions climatiques, notamment la température. Divers auteurs ont déjà étudié, cette relation entre pucerons, auxiliaires et conditions météorologiques (Dean, 1974 ; Gosselke 2001 ; Dixon et al., 2005 et Dixon et al., 2009).

Dans nos études, une corrélation entre les pucerons et la température semble évidente. Dans l'étude nous avons vu cette corrélation dans les représentations graphiques mais elle a été difficile de montrer statistiquement. Cela doit être dû au fait que la température optimale pour le développement des pucerons soit située entre 20 et 25 degrés (Dean, 1974 et Dixon et al., 2009). Enfin, les données du terrain ont également confirmé les propos de Dean (1974) : lorsque la température dépasse les 30 degrés ou descend en dessous de zéro, peu de pucerons ont été observés.

En outre, la pluie et l'irrigation semblent affecter négativement aux pucerons malgré que nous n'avons pas pu le confirmé avec les analyses car les données de pluie de la journée ils ne sont pas assez représentatifs pour les analyses. Cet effet a été également enregistré par Gosselke et al. (2001). De la même manière, dans les cas du maïs, lors des périodes d'irrigation les populations ont nettement baissées.

4.1.3. Effet type d'auxiliaire

Tous les auxiliaires ne suivent pas la même dynamique de population et ont des régimes alimentaires différents selon leur stade de développement. Par exemple, les syrphes et les coccinelles adultes peuvent manger aussi du pollen, alors que ce n'est pas le cas lorsqu'elles sont au stade larvaire où elles sont nettement plus entomophages.

La fécondité des femelles de *Coccinella septempunctata* est déterminée par la consommation de pucerons entre l'émergence et la reproduction. Les femelles de *C. septempunctata* ont besoin d'un minimum de pucerons (500 pucerons) pour permettre le dépôt des œufs (Bianchi, 2004). Cela pourrait être une des raisons pour lesquelles des corrélations importantes entre les pucerons et les coccinelles ont été observées au cours de l'étude. Les coccinelles selon Bianchi (2004) et Yang (2017) sont de bons auxiliaires « nettoyeurs des cultures », c'est-à-dire qu'elles vont pouvoir consommer un grand nombre de pucerons et ainsi permettre de réduire les populations de pucerons même lorsque celles-ci sont assez développées ou arrivent tard dans la saison. Au cours notre l'étude, les pics de coccinelles se sont toujours produit après le pic des pucerons.

Les populations de syrphes ont été plus importantes à l'automne qu'au printemps. Ces évolutions ont déjà été remarquées par Dixon et al. (2005), qui soulignent qu'au printemps, les syrphes apparaissent avant et terminent leur développement plus rapidement que les coccinelles, alors que dans la seconde moitié de l'année, ce sont les seuls capables d'avoir un cycle complet de développement avant que les pucerons disparaissent. Les auteurs supposent également que ce "décalage" serait davantage une conséquence d'une contrainte liée au cycle de vie des syrphes qu'une réponse à la concurrence. De la même manière, Raymond et al. (2014) montre que l'influence des larves de syrphes en automne sur la population totale de pucerons au printemps est encore plus importante que l'influence des larves de syrphes prédatrices au début du printemps. Dans une moindre mesure aux, des corrélations positives entre le nombre de syrphes et de pucerons ont également été observées. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Gosselke et al. (2001) qui a mis en évidence une relation positive entre le nombre d'œufs de syrphes et la densité de pucerons.

Par ailleurs, une présence importante des micro-hyménoptères et des pucerons momifiés a été observé dans les parcelles de maïs et dans une moindre mesure dans les parcelles de blé et de luzerne. Le pic de pucerons momifiés a été observé à la même période que le pic de micro-hyménoptères. En revanche, un décalage de 2 semaines entre le pic de pucerons et de micro-hyménoptères a été constaté dans la majorité des observations à l'automne et au printemps. Cette période de 2 semaines correspond au modèle de Lotka et Volterra connu comme « proie-prédateur ».

En outre, il semble que dans l'ensemble des espèces de micro-hyménoptères capturées il y a certainement quelques-unes qui sont des parasitoïdes de pucerons. Nous l'avons vérifié par les déterminations effectuées via le laboratoire de Jean-David CHAPELIN-VISCARDI du laboratoire d'éco-entomologie (Tableau 2). Ce pouvoir régulateur des parasitoïdes est confirmé par Caballero et al. (2012). Son étude a montré que l'inclusion de prédateurs volants et de parasitoïdes dans des cages de vol a entraîné une diminution de 45,6% de la densité de pucerons par rapport à des cages sans ces deux groupes auxiliaires.

En ce qui concerne aux anthocorides, mirides et nabides, il a été observé une présence supérieure de ces auxiliaires au printemps et dans les parcelles d'agriculture biologique. Par contre, nous n'avons pas pu montrer des corrélations intéressantes entre ces insectes et les pucerons. Les observations des autres auxiliaires, notamment les chrysopes, n'ont été pas assez nombreuses durant l'étude pour conclure quant à une corrélation concernant cette espèce. Peut-être il est dû à son comportement nocturne (ACTA, 2017) car toutes les observations se sont réalisées pendant la journée.

Via les analyses statistiques de type GLM, nous avons mis en évidence une corrélation positive entre la population de pucerons et la somme d'auxiliaires rencontrés pour les modèles d'aspiration et d'observation visuelle. Par contre, avec les analyses statistiques nous n'avons pas pu montrer cette corrélation auxiliaire par auxiliaire.

En conséquence, les auxiliaires sont certainement très importants dans les phénomènes de régulation naturelle des pucerons, mais il est encore difficile à les caractériser quantitativement car de nombreux autres facteurs liés aux cultures et aux conditions climatiques interviennent.

4.1.4. Effet type de culture

L'évolution des populations de pucerons est également affectée par le développement phénologique des cultures présentes dans les parcelles. Dans un premier temps, tant que les plantes sont des hôtes appropriés pour les pucerons, leur population augmente de manière exponentielle. Après le mois de juin, de par le dessèchement des plantes, le développement des pucerons diminue linéairement.

Par exemple, il a été observé à Pusignan que le blé est un hôte approprié pour les pucerons au début de la saison de croissance, mais qu'il devient bien moins propice au développement des pucerons lorsqu'il sèche. Par ailleurs, après cette période, une population plus importante de pucerons a été observée dans le maïs. Cette migration entre les cultures de *Sitobion avenae* est souvent signalée dans la bibliographie en Europe occidentale (Bianchi et al., 2004).

Dans le cas de la luzerne, une évolution parallèle entre la population de pucerons et les micro-hyménoptères a été observé.

Les deux parcelles d'orge sont celles qui ont eu moins de pucerons. Cela peut être dû à la présence d'une haie au bord des deux parcelles, servant de refuge aux organismes auxiliaires. En revanche, cette possible régulation des pucerons est difficile à démontrer de manière statistique.

L'effet significatif du type de culture sur la population de pucerons a été également montré grâce à l'analyse statistique via le GLM, où cette variable est apparue comme significative dans les trois modèles.

4.1.5. Effet du système de culture et du paysage autour de la parcelle

Suite aux analyses des données, il a été observé qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les parcelles labourées et non labourées par rapport au nombre de pucerons et d'auxiliaires.

A cause de la présence de la féverole au début de la saison, dans le maïs non labouré, le pic de pucerons a été plus faible que dans la parcelle labourée. Cela pourrait être attribué à la faune auxiliaire présente dans la culture de féverole sur laquelle, il y avait des pucerons.

Landis (2000) avait déjà souligné l'importance de la présence de féverole et d'autres légumineuses en général. Il a montré que les cultures mixtes sont plus bénéfiques que les cultures pures dans le service de régulation des auxiliaires.

Cependant, l'intensité du travail du sol, en particulier le labour, a été souvent documenté dans la bibliographie comme nuisible aux arthropodes du sol. Néanmoins, effectivement il y a eu des études sur l'impact du labour sur les ennemis naturels aériens comme les micro-hyménoptères, les syrphes ou les coccinelles.

Par rapport au type d'agriculture, les données paysagères pour les parcelles de Pusignan sont les mêmes donc nous n'avons pas pu constater des différences significatives entre ces parcelles. Par contre, les parcelles de Thil (en agriculture biologique) ont une complexité du paysage plus importante en termes d'abondance de haies et de chemins enherbés. Ces parcelles, en accord avec Roschewitz et al. (2005) et Vollhardt et al. (2008), ont une plus faible abondance de pucerons par rapport au nombre d'auxiliaires. La méta-analyse de Letourneau et al. (2009) a suggéré également que la complexité du paysage avait des effets positifs sur les ennemis naturels.

En revanche, Chabert (2017) a suggéré que cette réponse positive à l'hétérogénéité du paysage ne se traduit pas nécessairement par une lutte plus efficace contre les ravageurs. Par exemple, les parcelles en agriculture biologique à Thil n'ont pas eu un taux de parasitisme de pucerons plus fort que celles d'agriculture conventionnelle à Pusignan. Cela est en accord avec Caballero et al. (2012), qui montrent que cette complexité du paysage n'affecte pas la densité de parasitoïdes dans les champs.

4.2. Potentiel d'actuation des auxiliaires pour chaque parcelle ?

4.2.1. Qualité du modèle DEXi « potentiel d'auxiliaires »

Grâce à cet outil l'agriculteur arrive à estimer quels sont les pratiques culturales et les éléments paysagers les plus favorables pour les auxiliaires. L'objectif est qu'il puisse adapter ses pratiques pour bénéficier au maximum de la régulation naturelle. Par contre, il ne pourra pas prédire la quantité des auxiliaires présents dans les parcelles car il y a d'autres facteurs qui ont une influence déterminante sur les auxiliaires et qui ne sont pas renseignés dans le modèle, notamment la température et la population initiale. Donc, comme le signale Bohanec et al. (2004), ces modèles sont assez généraux et sont le plus souvent utilisés pour l'aide à la décision plutôt que pour la prédiction.

Même s'il s'est avéré très utile dans la pratique, le logiciel DEXi a été utilisé dans de nombreuses situations réelles (Bohanec et al., 1999; Bohanec et al., 2004) ces modèles qualitatifs peuvent présenter néanmoins certaines limites.

Dans notre cas après d'avoir comparée l'évaluation du nouveau DEXi avec les données du terrain, nous avons pu constater que cet outil donne des informations satisfaisantes quand les parcelles sont très différentes entre elles, c'est-à-dire, quand elles ont un environnement et un système de culture assez différents entre eux. Par exemple, dans notre étude on arrive à distinguer le potentiel des auxiliaires selon le type d'agriculture (conventionnelle ou biologique). Par contre, si les parcelles ont des systèmes de cultures et des environnements proches, le modèle DEXi_Auxiliaire a du mal à identifier des différences entre parcelles. Ce problème est structurel et avait été identifié par Bohanec dès 1992.

4.2.2. Voies d'amélioration de l'outil DEXi

Un des avantages de l'outil DEXi est qu'il peut s'adapter à des situations différentes en changeant le poids donné à chaque attribut du modèle. Sachant que de nombreux paramètres varient d'une région à l'autre, il semble nécessaire que les utilisateurs potentiels puissent se former à son usage afin qu'ils puissent calibrer cet outil en fonction des caractéristiques des systèmes de cultures et de l'environnement de leur région. Cette calibration peut être réalisée avec des données récoltées sur le terrain ou par expertise.

Dans cette étude, il a été montré que les populations de pucerons sont en relation avec la présence de certains auxiliaires et avec certaines données météorologiques. Ainsi, une autre voie d'amélioration de l'outil DEXi consisterait à venir compléter les informations de DEXi par un modèle climatique. Il faudrait également construire un nouvel outil DEXi_pucerons.

Ce type d'outil pourrait devenir de plus en plus adapté aux objectifs des utilisateurs via un suivi d'un collectif de partenaires.

5. CONCLUSION

Les suivis réalisés à l'automne 2017 et au printemps 2018 dans deux sites différents (agriculture conventionnelle et agriculture biologique) de la région de Rhône-Alpes rendent compte de manière générale des effets de la faune auxiliaire et d'autres facteurs sur le phénomène de régulation des pucerons en grandes cultures.

La dynamique de population des pucerons suit des tendances similaires dans les différentes parcelles observées. Il a été mis en évidence une concordance spatio-temporelle entre la présence des auxiliaires et celle des pucerons. Ainsi, un décalage de deux semaines entre le pic de pucerons et les auxiliaires, notamment les micro-hyménoptères, a été observé régulièrement. Les organismes auxiliaires peuvent donc stabiliser les populations des pucerons mais il est encore difficile de caractériser quantitativement ce niveau de régulation car d'autres facteurs comme les conditions climatiques, l'état de la culture, l'utilisation d'insecticides et l'environnement proche de la parcelle semblent également être déterminants dans cette régulation.

Par rapport aux conditions climatiques, lorsqu'il commence à faire froid ou que les températures dépassent les 30 degrés, les populations de pucerons diminuent drastiquement. A cause de cela, un effectif plus important d'auxiliaires a été observé au printemps qu'en automne. La pluie et l'irrigation semblent affecter négativement les pucerons. De plus, l'état de la végétation présente dans les parcelles affecte l'évolution des pucerons surtout lors de la dessiccation des cultures. Dans les parcelles en agriculture biologique les auxiliaires ont été plus abondants au printemps. En revanche, en culture de blé et de maïs les parcelles labourées et non labourées ont des effectifs de pucerons et d'auxiliaires comparables.

Les trois méthodes utilisées (observations, aspirations et cuvettes jaunes) donnent des informations différentes entre elles, mais néanmoins complémentaires. L'observation visuelle est une bonne méthode pour le suivi des pucerons, la cuvette jaune est efficace pour la capture des pucerons ailés et les auxiliaires en général. L'aspiration est une méthode pertinente en vue du couplage des observations de pucerons et d'auxiliaires de petites tailles mais pas pour l'observation de ceux de grandes tailles.

Ainsi, l'étude de cette régulation est dépendante des méthodes d'observation et de piégeage des insectes. En vue de la création de modèles de prédiction, nous avons pu vérifier que les modèles sont plus robustes si les résultats de chaque méthode sont analysés méthode par méthode. Dans trois modèles les populations des pucerons sont bien en relation avec l'ensemble des auxiliaires. Cela pourrait être associé avec un phénomène de régulation naturelle des pucerons mais d'autres variables environnementales interviennent telles que la température et le type de culture.

La comparaison des données du terrain et les évaluations du nouveau DEXi « potentiel d'auxiliaires volants » semble satisfaisante sur l'ensemble des parcelles étudiées en Rhône-Alpes. Les « potentiels d'auxiliaires volants » obtenus avec DEXi permettent de distinguer les parcelles en agriculture conventionnelle et biologique, en revanche, cet outil ne permet pas de distinguer plusieurs parcelles ayant le même type d'agriculture. Cette limite de sensibilité globale peut s'expliquer par la similitude de nombreux critères liés à l'environnement et au système de culture. En revanche, le modèle DEXi ne pourra pas prédire exactement la quantité des auxiliaires présents dans les parcelles car il y a d'autres facteurs qui ont une influence déterminante sur les auxiliaires et qui ne sont pas renseignés dans le modèle notamment les conditions climatiques ou la population initiale d'auxiliaires.

Enfin, l'ensemble de cette étude va permettre de mieux cerner les phénomènes de régulation naturelle des pucerons. Néanmoins, il reste à approfondir l'analyse des données avec tous les partenaires de ce projet. Les premières analyses statistiques effectuées et les premiers modèles obtenus constituent un socle assez solide à partir duquel il sera certainement possible de développer des modèles de prédiction plus robustes et représentatifs. En ce qui concerne l'outil DEXi, ce dernier devrait s'améliorer au cours du temps car les simulations sont faciles à réaliser et l'intégration de nouvelles connaissances est aisée. La diffusion de ces outils validés devrait à terme permettre aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques afin de bénéficier au mieux de la régulation naturelle des ravageurs par les auxiliaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Banfield-Zanin J.A., Rossiter, J.T., Wright, D.J., Leather, S. R., Staley, J. T. 2012. Predator mortality depends on whether its prey feeds on organic or conventionally fertilised plants. *Biological Control*, **63**, 56–61.
- Bianchi, F.J., Booij, C.J.H., Tscharntke, T. 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **273**, 1715–1727.
- Bianchi, F. J. J. A., & Van Der Werf, W. 2004. Model evaluation of the function of prey in non-crop habitats for biological control by ladybeetles in agricultural landscapes. *Ecological Modelling*, **171**, 177–193.
- Bohanec, M. 1992. Evaluating options by combined and quantitative methods, **80**, 67–89.
- Bohanec, M., 2000. DEXi: A program for multi-attribute decision making. <http://www.ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>
- Bohanec, M., Zupan, B. 2004. A function-decomposition method for development of hierarchical multi-attribute decision models. *Decision Support Systems*, **36**, 215–233.
- Bohanec, M., Cortet, J., Griffiths, B., Žnidaršič, M., Debeljak, M., Caul, S., Krogh, P.H. 2007. A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, **51**, 239–250.
- Bosem Baillod, A., Tscharntke, T., Clough, Y., Batáry, P. 2017. Landscape-scale interactions of spatial and temporal cropland heterogeneity drive biological control of cereal aphids. *Journal of Applied Ecology*, **54**, 1804–1813.
- Caballero-López, B., Bommarco, R., Blanco-Moreno, J.M., Sans, F.X., Pujade-Villar, J., Rundlöf, M., Smith, H.G. 2012. Aphids and their natural enemies are differently affected by habitat features at local and landscape scales. *Biological Control*, **63**, 222–229.
- Chabert, A. et al. 2002. Etude de l'effet à moyen terme de préparations insecticides sur les auxiliaires entomophages en culture de blé. *AFPP- Sixième CIRA*, **183**.
- Chabert, A. 2017. Agriculture, Ecosystems and Environment Practices of conservation agriculture prevail over cropping systems and landscape heterogeneity in understanding the ecosystem service of aphid biocontrol. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **249**, 70–79.
- Chapin, J.W., Thomas, J.S., Gray, S.M., Smith, D.M., Halbert, S.E., Chapin, J.A.Y.W. 2001. Seasonal Abundance of Aphids (Homoptera : Aphididae) in Wheat and Their Role as Barley Yellow Dwarf Virus Vectors in the South Carolina Coastal Plain Seasonal Abundance of Aphids (Homoptera : Aphididae) in Wheat and Their Role as Barley Yellow Dwarf V, **94**, 410–421.
- Chaplin-Kramer, R., O'Rourke, M.E., Blitzer, E.J., Kremen, C. 2011. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*, **14**, 922–932.

- Dean, G.J. 1974. Effect of temperature on the cereal aphids *Metopolophium dirhodum* (Wlk.), *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Macrosiphum avenae* (F.) (Hem., Aphididae). *Bulletin of Entomological Research*, **63**, 401–409.
- Dedryver, C., Le Ralec, A. 2010. Comptes Rendus Biologies The conflicting relationships between aphids and men : A review of aphid damage and control strategies, **333**, 539–553.
- Denis, A., Villenave-Chasset, J. 2009. Habitats and food preferences concerning Syrphidae and Chrysopidae auxiliaries, **9**.
- Dixon, A.F.G., Jarosik, V., Honek, A. 2005. Thermal requirements for development and resource partitioning in aphidophagous guilds. *European Journal of Entomology*, **102**, 407–411.
- Dixon, A.F.G., Honěk, A., Keil, P., Kotela, M.A.A., Šizling, A.L., Jarošík, V. 2009. Relationship between the minimum and maximum temperature thresholds for development in insects. *Functional Ecology*, **23**, 257–264.
- Elliott, N.C., Kieckhefer, R.W., Beck, D. 2000. Adult Coccinellid Activity and Predation on Aphids in Spring Cereals. *Biological Control*, **173**, 218–226.
- Elliott, N.C., Kieckhefer, R.W., Beck, D.A. 2002. Effect of aphids and the surrounding landscape on the abundance of Coccinellidae in cornfields. *Biological Control*, **24**, 214–220.
- Frantz, A., Plantegenest, M., Simon, J. 2006. Temporal habitat variability and the maintenance of sex in host populations of the pea aphid, (August), 2887–2891.
- Gosselke, U., Triltsch, H., Roßberg, D., Freier, B. 2001. GETLAUS01 - The latest version of a model for simulating aphid population dynamics in dependence on antagonists in wheat. *Ecological Modelling*, **145**, 143–157.
- Hodek, I. 1976. Oecologia Action of Photoperiod at Cold in Diapausing *Chrysopa carnea* Females, **311**, 9–11.
- 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.
- Lang, A. 2003. Intraguild interference and biocontrol effects of generalist predators in a winter wheat field. *Oecologia*, **134**, 144–153.
- Larsson, H. 2005. A crop loss model and economic thresholds for the grain aphid, *Sitobion avenae* (F.), in winter wheat in southern Sweden. *Crop Protection*, **24**, 397–405.
- 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**, 573–592.
- Morgan, D. 2000. Population dynamics of the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi* (L.), during the autumn and winter: a modelling approach. *Agricultural and Forest Entomology*, **2**, 297–304.

- Parry, H.R., Evans, A.J., & Morgan, D. 2006. Aphid population response to agricultural landscape change: {A} spatially explicit, individual-based model. *Ecological Modelling*, **199**, 451–463.
- Poeydebat, C., Carval, D., de Lapeyre de Bellaire, L., Tixier, P. 2016. Balancing competition for resources with multiple pest regulation in diversified agroecosystems: a process-based approach to reconcile diversification and productivity. *Ecology and Evolution*, **6**, 8607–8616.
- Raymond, L., Sarthou, J., Plantegenest, M., Gauffre, B. 2014. Agriculture , Ecosystems and Environment Immature hoverflies overwinter in cultivated fields and may significantly control aphid populations in autumn. “*Agriculture, Ecosystems and Environment*,” **185**, 99–105.
- Redlich, S., Martin, E.A., Steffan-Dewenter, I. 2018. Landscape-level crop diversity benefits biological pest control. *Journal of Applied Ecology*, (January), 1–10.
- Rispe, C., Orsay, F. 1998. Models of sexual and asexual coexistence in aphids based on constraints, **11**.
- Roschewitz, I., Hücker, M., Tschardtke, T., Thies, C. 2005. The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **108**, 218–227.
- Schmidt, M.H., Lauer, A., Purtauf, T., Thies, C., Schaefer, M., Tschardtke, T. 2003. Relative importance of predators and parasitoids for cereal aphid control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **270**, 1905–1909.
- Sigsgaard, L., 2002. A survey of aphids and aphid parasitoids in cereal fields in Denmark, and the parasitoids’ role in biological control. *Journal of Applied Entomology* **126**, 101–107.
- Simon, J., Peccoud, J. 2018. ScienceDirect Rapid evolution of aphid pests in agricultural environments. *Current Opinion in Insect Science*, **26**, 17–24.
- Skirvin, D.J., Perry, J.N., Harrington, R. 1997. ELU11 A model describing the population dynamics of *Sitobion avenae* and *Coccinella septempunctata*. *Ecological Modelling*, **96**, 29–39.
- Station, R. E. 1989. An estimate of the potential economic losses to some crops due to aphids in Britain, **8**(February), 25–29.
- Vollhardt, I.M.G., Tschardtke, T., Wäckers, F.L., Bianchi, F.J.J.A., Thies, C. 2008. Diversity of cereal aphid parasitoids in simple and complex landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **126**, 289–292.
- Woltz, J.M., Isaacs, R., Landis, D.A. 2012. Landscape structure and habitat management differentially influence insect natural enemies in an agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **152**, 40–49.
- Yang, L., Zeng, Y., Xu, L., Liu, B., Zhang, Q., Lu, Y. 2018. Agriculture , Ecosystems and Environment Change in ladybeetle abundance and biological control of wheat aphids over

time in agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **255** (September 2017), 102–110.

Zhao, Z., Hui, C., Li, B. 2015. Effects of agricultural intensification on ability of natural enemies to control aphids, (April).

Žnidaršič, M., Bohanec, M., Zupan, B. 2008. Modelling impacts of cropping systems: Demands and solutions for DEX methodology. *European Journal of Operational Research*, **189**, 594–608.

Ouvrages spécialisés

ACTA. 2011. Les pucerons des grandes cultures. Cycles biologiques et activités de vol, 136 pp.

ACTA. 2016. Guide pratique de défense des cultures. ACTA éditions, France, 913 pp.

ACTA. 2017. Les auxiliaires des cultures. ACTA éditions, France, 263 pp.

ACTA. 2018. Index biocontrol. ACTA éditions, France, 374 pp.

Bellmann, H. 2017. 450 insectes. Les indispensables Delachaux. Delachaux et Niestlé, France, 256 pp.

Dixon, A.F.G., 1998. Aphid Ecology. An optimization approach. Second ed. Chapman and Hall, London.

Dixon, A.F.G. 2000. Insect Predator-Prey Dynamics: Ladybird Beetles and Biological Control. Cambridge University Press, Cambridge, 257 pp.

Villeneuve-Chasset, J., 2017. Biodiversité fonctionnelle - Protection des cultures et auxiliaires sauvages. France Agricole, 148 pp.

FORMATIONS

ARVALIS. 2018. Formation laboratoire éco-entomologie. Boigneville, 13/04/2018

WEBGRAPHIE

AGRESTE, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>, 04/05/2018

INRA, <https://www6.inra.fr/encyclopedie-pucerons>, 23/05/2018

Ministere d'agriculture et d'alimentation, <http://agriculture.gouv.fr/>, 16/06/2018

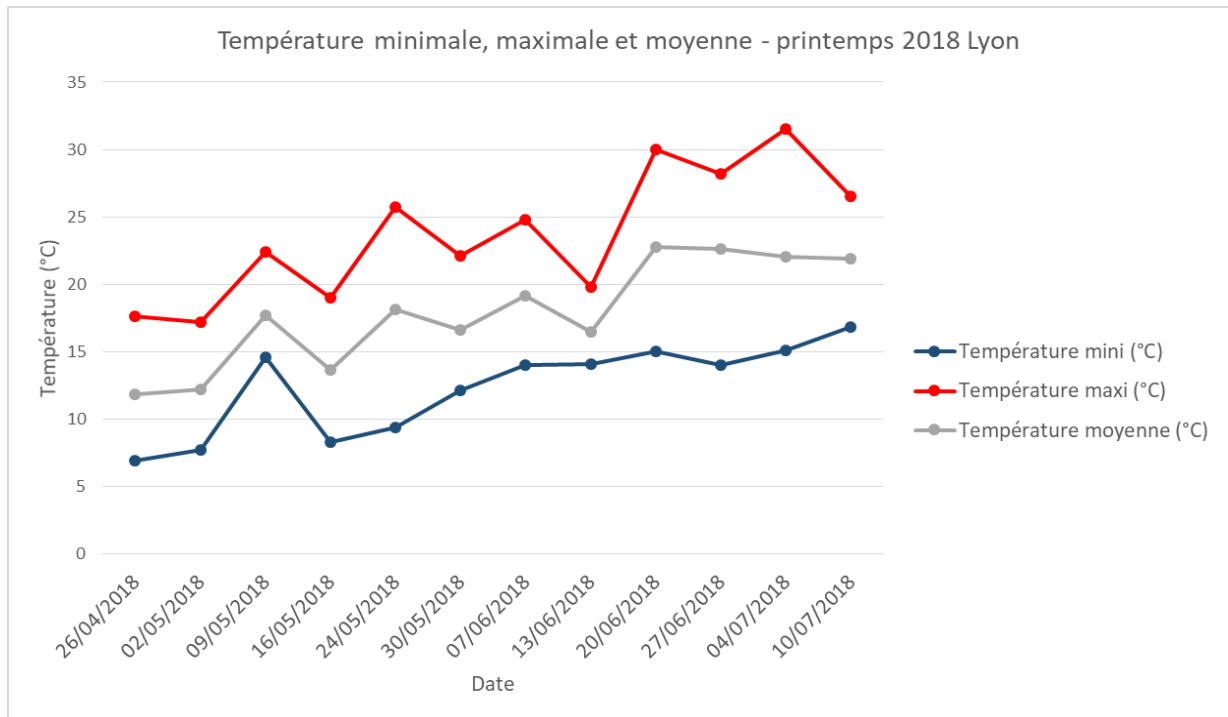
EPHYTIA, INRA, <http://ephytia.inra.fr/fr/Home/index>, 12/07/2018

ARENA-AUXIMORE, <http://arena-auximore.fr/>, 05/08/2018

ACTA-Les instituts techniques agricoles, <http://www.acta.asso.fr/>, 10/08/2018

ANNEXES

I. Données de température printemps 2018



Prévoir les régulations naturelles des pucerons par les auxiliaires en grandes cultures
Collectes et analyses de données en vue de l'amélioration d'un outil d'évaluation
multicritère DEXi.

Résumé

En France, la plus grande partie des surfaces agricoles sont occupées par des grandes cultures qui sont impactées par divers ravageurs causant des dégâts directs et indirects et des pertes économiques importantes. Parmi ceux-ci les pucerons sont les ravageurs les plus redoutés. Concernant les méthodes alternatives aux insecticides vis-à-vis des pucerons, la « régulation naturelle ou le contrôle biologique par conservation » tend à rechercher des solutions pour favoriser les organismes auxiliaires au sein des parcelles agricoles. Les agriculteurs auraient besoin d'outils d'aide à la décision pour faciliter la mise en place de mesures favorables à ces auxiliaires. Dans ce contexte, la problématique de ce stage est de caractériser le service de régulation des pucerons par leur faune auxiliaire, ainsi que d'améliorer les outils d'aide à l'évaluation multicritère DEXi existants. Grâce aux suivis réalisés par trois méthodes différentes (observation visuelle, aspiration et cuvette jaune) en région Rhône-Alpes, il a été constaté que les populations de pucerons évoluent de manières similaires dans les différentes parcelles observées. Des approches statistiques de type ACP et GLM ont permis de mettre en évidence une concordance spatio-temporelle entre la présence des auxiliaires et des pucerons. Néanmoins, l'effet d'autres facteurs comme les conditions climatiques, l'état de la culture et l'environnement proche de la parcelle sont également importants à prendre en compte dans cette régulation et sont encore mal cernés. Des études complémentaires sur ces variables, ainsi que sur le ratio auxiliaire/ravageur, permettraient de mieux comprendre ce processus de régulation naturelle.

Mots clés : pucerons, régulation naturelle, organismes auxiliaires, grandes cultures, outils d'aide à la décision, évaluation multicritère

Abstract

In France, most of the territory occupied by agriculture belongs to arable crops, of which cereals represent the main production with more than 9 million hectares. Aphids are harmful pests in these crops causing direct and indirect damage and significant economic losses. Among alternative insecticide control methods for aphids, "natural regulation or conservational biological control" tends to stimulate the habitats where beneficial organisms are present in order to maintain them in agricultural plots. Farmers would need decision support tools to facilitate the implementation of measures that support these beneficial organisms. In this context, the goal of my internship is to characterize the aphid control service by their natural enemies, as well as to improve the existing DEXi multicriteria assessment tools. Thanks to the monitoring carried out by three different methods (visual observation, aspiration and yellow bowls) in the Rhône-Alpes region, it has been seen that the population dynamic of aphids follows similar trends in the different plots observed. Statistical approaches such as PCA and GLM highlight a spatial-temporal concordance between the presence of natural enemies and aphids. Nevertheless, the effect of other factors like climatic conditions, the state of the crop and the environment close to the plot are also important to take into account in this regulation and are still poorly defined. Further studies on these variables, as well as the auxiliary / pest ratio, would provide a better understanding of this natural regulation process.

Key words: aphids, conservation biological control, beneficial organisms, arable crops, evaluation tools