

 <p>LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p> <p>MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION</p>	<p><b>Appel à projets de recherche</b>  <b>« Pour et Sur le Plan Ecophyto »</b>  <b>Edition 2014 : Contribuer à l'essor du biocontrôle</b>  <b>PSPE2</b></p>	
---	--	---

MAJ : 13/04/2018

### Rapport final PSPE2 projet FLEUR

- Numéro SIREPA : 2567
- Numéro de l'axe : 2
- Numéro de l'action : 7
- Nom de la structure bénéficiaire : Université Rennes 1
- Libellé exact du projet : Manipulation de la biodiversité floristique en cultures de céréales
- Date de signature de la convention : 27/07/2015
- 
- 1. **Fiche de synthèse** à diffusion publique : *modèle « Ecophyto » (Cf colloque Ecophyto Recherche) jointe au mail.*

#### 2. **Rapport d'activité :**

- **Exécution du projet par tâche et partenaire**

Ce projet a comporté 7 partenaires : L'UMR-CNRS 6553 ECOBIO de l'Université de Rennes 1, l'UMR INRA de Sophia-Antipolis, l'UMR INRA Agrocampus Ouest-Université de Rennes 1 IGEPP, l'UMR INRA-AgroParisTech Agronomie et trois entreprises, la SA Pinault, Ter-Qualitechs et Dervenn. Les trois entreprises ont essentiellement aidé à la mise en place du réseau des agriculteurs partenaires de la tâche 3. L'implication des différents partenaires est indiquée dans chaque tâche.

#### **Tâche 1 : Gestion du projet. Responsable : Joan van Baaren (UMR ECOBIO)**

L'UMR CNRS 6553 ECOBIO a recruté un doctorant (Maxime Damien) dès septembre 2015 pour 3 ans. Le doctorant a consacré 100% de son temps au projet et il a été co-encadré par l'université de Rennes 1 et l'INRA de Sophia Antipolis, ce qui a permis de créer du lien entre les équipes. Le doctorant a effectué un séjour à Antibes en 2018 pour analyser les contenus en sucres de parasitoïdes placés dans des mésocosmes en extérieur avec des compositions en fleurs allant de 1 à 3 espèces. Un stagiaire de Master a été pris en co-direction entre l'université de Rennes 1 et l'UMR IGEPP au printemps 2018 pour étudier le taux de parasitisme dans les champs mixtes (céréales et féveroles). Nous avons eu des échanges très réguliers entre l'université de Rennes 1 et l'INRA de Grignon, avec des échanges d'échantillons. Les entreprises partenaires nous ont mis en contact avec leurs clients agriculteurs, ce qui nous a permis de créer notre réseau d'expérimentation au champ. La société SA Pinault a recruté un stagiaire qui nous a aidés pour les contacts avec les agriculteurs. En conclusion, le projet a permis de créer des liens entre les différents partenaires, liens qui n'existaient pas auparavant. De ce fait, le projet PLANTSERV portant sur l'impact des plantes de services sur la régulation des ravageurs de céréales et des virus qu'ils transmettent a été obtenu dans le cadre du plan Ecophyto II par l'UMR ECOBIO associant l'IGEPP et une nouvelle thèse en co-encadrement doit débiter (2019-2022). Ce projet est mené en concertation avec le projet Activ'Biol du métaprogramme INRA SMaCH, co-porté par l'INRA de Rennes et de Grignon et associant l'UMR ECOBIO, a déjà démarré et vise à comparer l'utilisation de mélanges fleuris pérennes et annuels sur la régulation des ravageurs. Les contacts établis grâce à la société Pinault nous ont permis de

développer une collaboration avec la Société Yves Rocher, cliente de la SA Pinault et une bourse de thèse CIFRE a commencé en 2017 entre ECOBIO et la société Yves Rocher.

## **Tâche 2 : Détermination des effets des différentes espèces de fleurs sur les ennemis naturels et attractivité par rapport aux ravageurs. Responsable : A Le Ralec (UMR IGEPP).**

Cette tâche comporte trois sous-tâches, (1) la recherche d'espèces de plantes susceptibles d'augmenter l'efficacité des insectes parasitoïdes en leur fournissant du nectar, (2) la mesure de l'attractivité des plantes (3) l'évaluation des risques liés à l'utilisation de ces fleurs, et en particulier le risque d'attraction d'insectes nuisibles à la culture visée ou aux cultures adjacentes.

### **1. Recherche de plantes utiles aux parasitoïdes et aux prédateurs (UMR-CNRS ECOBIO)**

A l'UMR-CNRS ECOBIO, une quinzaine d'espèces de fleurs ont été étudiées au laboratoire pour leur effet sur la fitness des insectes parasitoïdes, la plupart actuellement commercialisées en mélange par la SA Pinault (entreprise partenaire du projet), et qui ont donc été déjà sélectionnées pour leur capacité à produire du nectar et à attirer des insectes. Le problème du choix des espèces de fleur est complexe, car elles doivent à la fois être nutritives pour les parasitoïdes, attractives à distance (en cas d'implantation en bordures des champs de céréales), peu coûteuses, non salissantes, avoir une durée de floraison longue et la capacité de pouvoir fleurir en Bretagne en hiver. Certaines espèces ont déjà été testées pour leur intérêt pour les parasitoïdes dans la littérature, mais aucune espèce n'a par exemple été étudiée pour ses capacités de floraison hivernale. Cette partie du projet a donc consisté en des études au laboratoire de mesures du taux de fécondité et de longévité des parasitoïdes, à des essais de croissance des fleurs en serre, ainsi qu'à des discussions avec les agriculteurs sur l'acceptabilité de ces espèces en bandes fleuries. Les espèces sélectionnées à l'issue des expériences sont le sarrasin, la moutarde et les fêveroles (Damien et al. soumis et Damien et al. en préparation). Le bleuet bien que favorable aux parasitoïdes n'a pas été choisi en raison de son coût élevé, de son faible taux de germination et de développement en présence des autres espèces. Ces espèces peu coûteuses sont de plus éligibles pour les couverts végétaux en Surfaces d'Intérêt Ecologique (SIE) et pour les couverts d'inter-culture longue (5ème programme d'actions de la directive Nitrates). Ce mélange a été utilisé les hivers 2016-2017 et 2017-2018 (tâche 3), avec des variations minimales (variétés de sarrasin et de fêveroles). Cette tâche a aussi permis de montrer que certaines espèces de fleurs ne sont pas intéressantes dans ce cadre, en particulier la phacélie, dont le nectar n'est pas accessible pour les parasitoïdes, la matricaire, le calendula, la mauve dont le nectar est accessible mais n'améliorent pas leurs performances et le lin dont la durée de floraison est trop courte.

### **2. Attractivité de plantes (UMR-CNRS ECOBIO)**

Des expériences en laboratoire ont aussi été menées pour comprendre le comportement des parasitoïdes dans un champ : en effet, dans le contexte de bandes fleuries placées à l'extérieur du champ, les parasitoïdes de pucerons des céréales, du genre *Aphidius*, n'ont accès aux ressources nutritives qu'à l'extérieur du champ. Cependant, sortir du champ pour s'alimenter peut aussi comporter des risques et éloigner les parasitoïdes de leur source d'hôtes (les pucerons) installée dans le champ, qui est indispensable à leur reproduction. Un stage de M2 a été réalisé en 2016, dont l'objectif était d'explorer les prises de décision comportementales liées à ce compromis, dans le cadre des théories de l'Optimal Foraging. Ces recherches ont permis de montrer que les femelles choisissaient de s'alimenter lorsque les fleurs de bonne qualité sont disponibles, quand elles ne sont pas encore accouplées et quand elles sont plus affamées. L'effet de l'accouplement n'était pas prévu et semble le plus important (Damien et al. Publication soumise).

Ces recherches sont couplées à une expérience en milieu semi-naturel (mésocosmes placés à l'extérieur), dans lesquelles des femelles de parasitoïdes sont relâchées en présence de fleurs d'une seule espèce ou de mélanges de deux ou trois espèces (en utilisant les espèces sélectionnées pour les expériences hivernales). Les femelles sont capturées de nouveau après 48h afin de déterminer si elles ont réellement utilisé le nectar proposé (analyse du contenu en sucres des femelles, qui a été réalisée à l'INRA de Sophia Antipolis en avril 2018)(Damien et al. Publication en préparation).

Une collaboration avec le laboratoire de G Heimpel (University of Minnesota, USA) a aussi été établie (le doctorant Maxime Damien a réalisé là-bas un séjour de 5 mois de juillet à décembre 2017) afin de développer le contexte théorique des choix entre l'alimentation et la ponte en étudiant les capacités de vol des parasitoïdes en condition de faibles densités d'hôtes et d'accès ou non à de la ressource nutritive (ce qui correspond à la période hivernale en Bretagne, avec ou sans bandes fleuries). Une publication est en préparation sur cette thématique : Damien et al.).

Ces recherches fondamentales peuvent permettre de donner des pistes sur la distance à laquelle les bandes fleuries auront une efficacité, c'est-à-dire si elles seront réellement utilisées par les parasitoïdes pour accroître leur activité dans les cultures adjacentes ou plutôt pour se disperser en dehors de ces dernières.

### **3. Effets négatifs potentiels des bandes fleuries : attractivité des ravageurs (UMR IGEPP)**

Parmi d'éventuels effets négatifs de la mise en place de bandes ou couverts fleuris à proximité des parcelles agricoles figure le risque que certaines plantes favorisent le développement d'insectes phytophages, en particulier des pucerons. Certains d'entre eux pourraient être ravageurs de culture, notamment en cas de proximité taxonomique entre plantes de cultures et plantes de couvert. Mais ces pucerons pourraient également servir d'hôtes relais pour des parasitoïdes, permettant leur multiplication à proximité, ou dans, les parcelles à protéger. Pour tester ces hypothèses, des échantillonnages de pucerons sains et parasités ont été effectués dans des bandes fleuries et des cultures en mélange.

Les résultats montrent que même si les espèces rencontrées dans les différentes sessions d'échantillonnage sont des ravageurs potentiels de plusieurs cultures (légumineuses, brassicacées, etc.), les bandes fleuries semblent peu attractives pour les pucerons qui s'y trouvent en très faible abondance. De plus, ces pucerons sont partiellement régulés par des parasitoïdes, dont certains pourraient jouer un rôle dans la régulation des pucerons sur les cultures adjacentes. Au vu des résultats obtenus, on peut donc faire l'hypothèse que les bandes fleuries diversifiées n'aggravent pas le risque de dégâts de pucerons dans les parcelles cultivées. En revanche, les mélanges moins diversifiés ou les couverts monospécifiques pourraient être plus attractifs et favoriser le maintien hivernal de certaines espèces polyphages, comme *M. persicae*. Le rapport bénéfices -risques de ces aménagements doit donc être précisé. Enfin, les cultures en mélange fournissent bien des hôtes supplémentaires pour les espèces de parasitoïdes les plus généralistes, comme *Aphidius matricariae*.

D'autre part, à la demande des agriculteurs, il a également été vérifié que les bandes fleuries n'attiraient pas plus les limaces dans les cultures que la végétation spontanée herbacée de bords de champs. Des piégeages de limaces ont donc été effectués à la fois dans les bandes, les marges herbeuses et les cultures et nous avons pu montrer que les bandes fleuries attiraient significativement moins de limaces que la végétation spontanée (Thèse Maxime Damien 2018). Le mélange fleuri proposé ne présente donc pas de risques avérés pour les cultures cibles et les cultures adjacentes.

**Tâche 3 : Manipulation expérimentale des aménagements fleuris en parcelles agricoles conventionnelles et biologiques. Responsable : N Desneux (UMR Sophia Antipolis). Participants : tous.**

La tâche 3 est plus particulièrement dédiée aux essais sur le terrain concernant l'agencement optimal des apports fleuris et la phénologie idéale. Les trois entreprises partenaires ont aidé à la mise

en place du réseau de partenaires. L'entreprise SA Pinault a recruté aussi un stagiaire pour aider aux relevés de terrain.

Le projet ayant débuté en septembre 2015 avec la thèse de Maxime Damien, il n'a pas été possible de proposer en Bretagne des aménagements fleuris pour cet hiver-là, les contacts avec les agriculteurs venant juste de commencer et la composition du mélange idéal à semer n'ayant pas encore été évaluée. Par contre, nous avons pu mener une expérience de terrain pendant l'hiver 2015-2016 car grâce à des conditions hivernales particulièrement douces, les couverts hivernaux d'interculture de moutarde mis en place par les agriculteurs ont fleuri. Nous avons obtenu l'autorisation des agriculteurs de réaliser des observations dans leurs champs. Une quinzaine de sites comportant une interface immédiate entre un couvert hivernal de moutarde en fleurs et une céréale d'hiver ont été sélectionnés. Les pucerons et les parasitoïdes ont été prélevés et déterminés. Les principaux résultats mettent en évidence un taux de parasitisme très élevé pendant toute la saison, autour de 60%. Par ailleurs, la proportion de pucerons parasités a été plus élevée à proximité des couverts de moutarde que dans le côté opposé du champ. Le taux de parasitisme a atteint 70% en bordure de la moutarde. Or comme il a été démontré dans la tâche 2 que la moutarde avait seulement un effet faible sur la performance des parasitoïdes, cette augmentation du taux de parasitisme de 10% laisse penser que des bordures comportant des fleurs de meilleure qualité pourraient être très utiles. La plupart des champs étaient en agriculture conventionnelle cet hiver-là, les agriculteurs biologiques n'ayant pas de couverts hivernaux en grande majorité. Les résultats ont permis d'écrire une publication dans la revue *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Damien et al. 2017).

Les résultats encourageants du premier hiver et ceux de la tâche 2 nous ont permis de proposer un mélange fleuri aux agriculteurs pour les hivers 2016-2017 et 2017-2018. Les bandes fleuries ont été suivies de décembre à mars. Les suivis de décembre ont permis de montrer que 3 espèces de pucerons arrivaient sur les pousses de céréales dès les premiers stades (dès qu'elles mesuraient 5cm), et que ces pucerons étaient parasités par l'ensemble de la communauté de parasitoïdes observées en hiver depuis 2010 en Bretagne. Les deux hivers, le doctorant et l'équipe de l'UMR ECOBIO ont piégé dans les bandes fleuries, les bords de champs et les cultures de céréales trois groupes d'arthropodes (araignées, carabes et staphylins), tous prédateurs généralistes et potentiellement prédateurs de pucerons. Toute la saison, les prédateurs ont été plus présents dans les bandes fleuries et dans les champs à proximité des bandes fleuries que du côté opposé. Même sans fleurs, les bandes fleuries présentaient une hauteur de végétation supérieure au bord de champ et à la culture avant de geler, et une température légèrement plus élevée (Thèse Maxime Damien 2018) pouvant jouer un rôle de refuge climatique.

L'UMR IGEPP a mesuré l'intérêt d'une approche moléculaire dans le cadre de l'expérimentation conduite sur les cultures en mélange. L'hypothèse était que les cultures mixtes (céréales-légumineuses) via la présence de fleurs augmenteraient le taux de parasitisme des pucerons ravageurs du blé. Le taux de parasitisme apparent, calculé sur la base de la proportion de pucerons momifiés dans l'ensemble des pucerons dénombrés, a été comparé avec un taux de parasitisme "réel", prenant en compte les pucerons parasités morts (momies) et vivants. La proportion de pucerons parasités parmi les pucerons vivants a été obtenue par extraction d'ADN (méthode Hotshot) et une PCR utilisant le couple d'amorces spécifique des Aphidiinae. Ces analyses n'ont pas permis de montrer une augmentation du taux de parasitisme en présence de fleurs. Ces résultats sont toutefois à prendre avec précaution car il semble y avoir eu des problèmes techniques, le taux de parasitisme calculé n'étant que de 7% et donc bien inférieur aux taux habituellement observés dans les parcelles.

#### **Tâche 4. Effets de bandes fleuries pérennes sur une diversité de ravageurs, leurs dégâts ainsi qu'une diversité d'organismes auxiliaires et l'intensité des régulations biologiques : UMR Agronomie**

A Grignon, une expérimentation au champ, reposant sur la comparaison de l'effet de différentes bandes fleuries pérennes sur les régulations de ravageurs, a été mise en place pour une durée de quatre ans. Une partie de l'essai a été conservée une 5<sup>ème</sup> année pour réaliser quelques observations supplémentaires. Huit mélanges floraux contrastés ont été constitués, en faisant varier la diversité

spécifique (de 9 à 29 espèces) et fonctionnelle (diversité des ressources florales) des plantes présentes. Ces mélanges (plus un témoin « absence de bande », semé avec la culture) ont été implantés en bandes de 6×44 m espacées de 50 m, dans une parcelle de 13 ha. Les espèces composant le mélange sont toutes indigènes, en grande majorité pérennes et fréquemment rencontrées sur les bords de champ. Ceci a permis de créer des habitats stables sans besoin de les resemmer tous les ans. La parcelle a été cultivée avec des cultures sensibles aux dégâts causés par les insectes, selon une rotation de quatre ans (légumineuse–colza–blé–maïs). Pour dissocier les interactions culture × année climatique, le dispositif comprend chaque année deux termes de la rotation, répétés sur trois blocs. Les cultures ont été conduites avec un faible niveau de pesticides, et aucun insecticide, par la mise en œuvre de systèmes de culture intégrés. Un important effort expérimental a été réalisé pour quantifier les auxiliaires, les ravageurs et leur régulation, dans les bandes fleuries et dans les cultures adjacentes, à l'aide de comptages et piégeages au printemps et en automne.

Nous montrons que des bandes fleuries pérennes et diversifiées sont un levier permettant d'accroître la lutte biologique envers une diversité de ravageurs des céréales, des légumineuses et du colza. Leur effet sur les prédateurs épigés et volants, ainsi que sur les parasitoïdes se traduit par de moindre quantité de la plupart des espèces de pucerons, des criocères, des sitones, et par un parasitisme accru de la bruche et des coléoptères ravageurs du colza. L'intensité de l'effet des bandes fleuries dépend surtout de la quantité de ressources florales fournies lors de la présence des auxiliaires, de février à octobre, selon les couples auxiliaire-ravageur visés. Ceci souligne le rôle central de la diversité des périodes de floraison dans les bandes fleuries. En étudiant des bandes contrastées pour leur richesse, nous montrons par ailleurs que seules les bandes initialement les plus diversifiées conservent cette diversité végétale sur plusieurs années. Pour plusieurs des ravageurs étudiés, l'impact des bandes sur les populations de ravageurs est différé dans le temps (l'année suivante) et dans l'espace (parcelles environnantes du fait de la dispersion des insectes). La contribution des bandes fleuries ne peut donc être pleinement efficace que si ces dernières sont déployées à l'échelle d'un territoire. Cet effet différé des bandes, combiné à leur efficacité seulement partielle en termes d'impact sur la régulation, implique que ce levier doit être mobilisé en cohérence avec d'autres techniques préventives, telles que les associations d'espèces.

#### **Tâche 5 : Valorisation du projet. Responsable : C Le Lann (UMR CNRS ECOBIO).**

UMR ECOBIO : Deux conférences grand public ont été réalisées dans le cadre de la fête de la science en octobre 2017 et dans le cadre du festival Pint of Science en mai 2018, respectivement. Deux articles de vulgarisation grand public ont été publiés dans Science Ouest au début et à la fin du projet (<http://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/341/actualite/des-fleurs-contre-les-pesticides> ; <https://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/366/actualite/des-pesticides-pas-toujours-utiles>), et un article destiné aux agriculteurs dans la revue Horizon (N°130 Avril/Mai 2016, p19-p23). Maxime Damien (doctorant du projet) a été interviewé sur le plateau TV du village des sciences en octobre 2016 (<https://www.youtube.com/watch?v=saE9DgShHBs&feature=youtu.be/52m20s>). Les recherches du projet FLEUR ont également fait l'objet d'un article dans Ouest France (<https://www.ouest-france.fr/environnement/si-des-fleurs-pouvaient-remplacer-les-pesticides-5673449>).

UMR ECOBIO/ INRA Sophia-Antipolis et INRA IGEPP : Plusieurs résultats ont également été présentés à l'occasion de différents colloques nationaux (8<sup>ème</sup> colloque des jeunes chercheurs du département Santé et Protection de l'Environnement de l'INRA, Toulouse, 29 juin-1 juillet 2016, Colloques des Entomophagistes, Lyon, 17-19 Mai 2017) et internationaux (Colloque SFE-BSE, 24-29 Octobre 2016, Marseille ; Entomology 2017, Denver, USA, 5 – 8 Nov 2017 ; 1<sup>st</sup> international Congress in Biological control, Pékin, Chine, 5 – 8 May 2018). Des plaquettes de présentation du projet et de restitution des résultats sur chaque hiver ont été produites à destination des agriculteurs. Un livret

d'identification des pucerons et des parasitoïdes a été produit à destination de l'entreprise SA Pinault qui nous a aidés dans les relevés de terrain. Le projet FLEUR a également permis d'établir une collaboration avec l'entreprise Yves Rocher (service agronomie de La Gacilly) qui se traduit par un co-encadrement de thèse CIFRE (2017-2020) avec l'Université de Rennes 1, dans la continuité du projet. Les collaborations mises en place dans le cadre du projet FLEUR entre l'UMR ECOBIO, les Inra de Rennes et de Grignon ont également été pérennisées via deux nouveaux projets (Activ'Biol et PLANTSERV) avec un co-encadrement de thèse prévu entre l'UMR ECOBIO et l'UMR IGEPP.

UMR : Agronomie : Les valorisations réalisées sur la durée du projet sont les suivantes :

- présentations orales à deux colloques d'envergure internationale en 2018 (symposiums de la Société Française d'Écologie et de la European Society of Agronomy).

- les résultats (partiels) ont été présentés à l'occasion de la participation à environ cinq réunions d'agriculteurs par an entre 2016 et 2018, sur sollicitation de chambres d'agriculture (animation de groupes « Biodiversité » ou de groupes DEPHY), de CIVAM et de GAB.

- les connaissances produites ont été mobilisées lors de la participation à de nombreux ateliers de co-conception de systèmes de culture agroécologiques intégrant notamment des bandes fleuries utiles à la santé des cultures, pour des agriculteurs, des instituts techniques ou des acteurs de la recherche (2 ateliers en 2016, 2 en 2017 et 4 en 2018).

En raison du temps très important qu'il a fallu consacrer aux identifications d'insectes et du peu de moyens humains consacrés au projet dans l'UMR Agronomie, l'analyse des données a pris du retard. Elle n'est pas encore terminée. Des articles scientifiques sont en préparation et plusieurs seront soumis dans les années à venir.

- **Moyens (humains et techniques) effectivement mis en œuvre**

UMR-CNRS 6553 ECOBIO : Les moyens humains à Rennes ont consisté en : un doctorant (Maxime Damien) encadré par Joan van Baaren (PR ECOBIO), Cécile Le Lann (MC ECOBIO) et Nicolas Desneux (DR INRA Sophia Antipolis). Julien Pétillon (MC ECOBIO) s'est intégré au projet pour la détermination des araignées piégées les deux dernières années. Les personnels techniques d'ECOBIO ont largement contribué au projet : Romain Georges (IE CNRS) pour les contacts avec les agriculteurs, la production des plaquettes à destination des agriculteurs et la synchronisation des expériences de terrain, Olivier Jambon pour le piégeage et la détermination des carabes, Stéphanie Llopis pour les déterminations de parasitoïdes, Thierry Fontaine pour la production de fleurs pour les essais de laboratoire. Plusieurs étudiants de M2 et de M1 ont contribué au projet chacune des 3 années de terrain (en particulier Adrien Bonvin (M2, 2016), Lena Barascou (M1, 2017), Aurélien Ridet (M1, 2017) et Benoit Chtioui (M2, 2018)). Le personnel administratif a été impliqué pour la gestion des commandes. Les moyens techniques mis à disposition pour le projet ont été les 5 véhicules de terrain d'ECOBIO largement utilisés dans les campagnes de terrain, les enceintes climatiques pour élever les pucerons ramenés du terrain, le matériel optique (binoculaires et microscopes) pour les déterminations.

UMR IGEPP : Bernard Chaubet puis Christelle Buchard (TFR INRA) : identification des pucerons et des parasitoïdes. Yoann Navasse (doctorant 2013-2016) : échantillonnage de pucerons sur bandes fleuries ; analyses moléculaires. Anne Le Ralec (PR), Bruno Jaloux (MCF) : échantillonnage des pucerons et parasitoïdes au sein des bandes fleuries ; évaluation des taux de parasitisme par observation directe et détection moléculaire. Stagiaires : Gwendal Chadelaud (M1 BEE Université de Rennes 1, 3 mois avril-juin 2016) ; Maximilien Abomès (M2 BV Université d'Angers, 6 mois mars-août 2018).

UMR Agronomie : le projet a mobilisé un technicien pour tous les travaux de terrain, et trois stagiaires de M1 ou M2 par an : Paola Salazar, Romain Angeleri et Camille Frottier en 2014, Clémence Barbier, Timothée de la Teyssonnière et Romain Leporatti en 2015, Adrien de Villenaut, Pierre Berteloot et Henri Deveyer en 2016 et Jacqueline Gandar, Amaury Guillet et Anthony Herbin en 2017.

UMR ISA Sophia-Antipolis : Nicolas Desneux est co-encadrant de la thèse de Maxime Damien. Les analyses biochimiques par test anthrone ont été réalisées par Lucie Monticelli (doctorante au sein de l'UMR ISA) et Maxime Damien, sur la base de l'élaboration d'un protocole spécifique mis en place par Lucie Monticelli et par des stagiaires de l'UMR ISA.

- Réalisation des jalons et production des livrables annoncés

#### Les résultats attendus étaient :

1. De mettre en évidence les espèces végétales les plus efficaces pour augmenter l'efficacité et la fitness des parasitoïdes dans les mélanges floraux actuellement commercialisés en quantifiant l'intensité de la régulation biologique permise par l'implantation des aménagements fleuris. Ces plantes ne doivent pas favoriser les ravageurs des cultures (blé, colza, légumineuses, maïs). Le résultat consiste en un mélange floristique favorable aux ennemis naturels et plus particulièrement aux parasitoïdes, dans différents types de culture (blé, colza...).

**Résultats obtenus** : un mélange de moutarde, sarrasin, bleuet, et féveroles, avec différentes variétés de sarrasin et de féveroles pour un échelonnement des floraisons sur l'hiver a été validé pendant deux hivers et permet effectivement une augmentation du taux de parasitisme, mais aussi de favoriser les populations d'arthropodes prédateurs : carabes, staphylins et araignées.

Lorsqu'il s'agit de favoriser une diversité d'auxiliaires sur le long terme, les résultats obtenus à Grignon ont montré que les mélanges initialement les plus diversifiés sont ceux qui le restent le plus sur le long terme. Il a par ailleurs été mis en évidence le fort intérêt d'espèces à floraison très précoce (ex. pâquerette, véroniques) sur le parasitisme de plusieurs coléoptères du colza. Ces résultats, combinés au succès d'implantation des différentes espèces testées (60 en tout dans les différents mélanges) nous ont amenés à définir une liste de 40 espèces p retenir pour les travaux ultérieurs.

2. De proposer des méthodologies pratiques de l'enrichissement floristique comprenant les méthodes d'aménagement spatial et temporel des référentiels déterminés ci-dessus.

**Résultats obtenus** : le mélange est semé fin août-début septembre (en même temps que les couverts classiques d'inter-culture) et immédiatement adjacent aux céréales cultivées qui sont, elles, semées en octobre-novembre. La bande fleurie permet l'installation et le développement de la population d'ennemis naturels dès le mois de décembre et son maintien jusqu'au printemps.

Pour les bandes pérennes, un semis en septembre-octobre est recommandé. Ces espèces ayant une très faible vigueur initiale, la maîtrise des adventices d'automne est un point crucial à gérer via des faux-semis ou un labour précédent le semis et via le choix d'une parcelle avec un faible stock semencier.

3. De mesurer l'impact de ces aménagements floraux sur le service écosystémique de régulation des ravageurs et leur acceptabilité par les agriculteurs à travers l'exemple concret des cultures de céréales dans une matrice paysagère de grandes cultures, dans la LTER Armorique et à Grignon.

**Résultats obtenus** : le mélange annuel à Rennes et le mélange pérenne à Grignon ont effectivement permis d'augmenter le taux de parasitisme. Le taux de prédation n'a pas pu être testé directement, mais les prédateurs sont plus nombreux et diversifiés dans les bandes fleuries en comparaison à des témoins sans bandes. Les mélanges ont été testés dans deux régions aux pratiques agricoles contrastées et sont bien acceptés par les agriculteurs.

4. En terme de généralité, notre projet a permis d'identifier les caractéristiques des mélanges qui affectent efficacement les régulations étudiées et donc les caractéristiques florales favorables

aux différentes familles de parasitoïdes et ainsi de donner des pistes sur les mélanges floraux potentiellement utiles dans d'autres cultures (légumières ou vergers par exemple). En effet, les pièces buccales des parasitoïdes de pucerons du genre *Aphidius* sont très semblables d'une espèce à l'autre et il est probable que les caractéristiques physiques des fleurs leur fournissant la meilleure accessibilité et la meilleure composition en nectar soient les mêmes pour les espèces parasitant les pucerons des céréales ou les pucerons des légumes ou d'arbres fruitiers.

**Résultats obtenus :** les caractéristiques des fleurs utiles aux parasitoïdes sont d'avoir une floraison coïncidant avec la période de vol des parasitoïdes, c'est-à-dire de février à novembre pour ceux étudiés à Grignon, selon les espèces visées et de octobre à mars pour ceux étudiés en Bretagne où les hivers sont plus doux. Le nectar floral doit être accessible immédiatement, à défaut de production de nectar extra-floral librement accessible. Il ne faut pas d'espèces avec des corolles profondes (comme la phacélie par exemple). Les plantes doivent être riches en hexoses. La couleur jaune est particulièrement attractive et cela a pu être vérifié en Bretagne. Les mélanges annuels et pérennes présentent chacun des intérêts.

- Collaboration effective à l'intérieur du projet et, éventuellement, entre projets,

Comme développé lors de la description de la tâche 1, l'UMR CNRS 6553 ECOBIO a recruté un doctorant (Maxime Damien) dès septembre 2015 pour 3 ans. Le doctorant a consacré 100% de son temps au projet et il a été co-encadré par l'université de Rennes 1 et l'INRA de Sophia Antipolis, ce qui a permis de créer du lien entre les équipes. Le doctorant a effectué un séjour à Antibes en 2018 pour analyser les contenus en sucres de parasitoïdes placés dans des mésocosmes en extérieur avec des compositions en fleurs allant de 1 à 3 espèces. Un stagiaire de Master a été pris en co-direction entre l'université de Rennes 1 et l'UMR IGEPP au printemps 2018 pour étudier le taux de parasitisme dans les champs mixtes (céréales et féveroles). Nous avons eu des échanges très réguliers entre l'université de Rennes 1 et l'INRA de Grignon, avec des échanges d'échantillons. Les entreprises partenaires nous ont mis en contact avec leurs clients agriculteurs, ce qui nous a permis de créer notre réseau d'expérimentation au champ. La société SA Pinault a recruté un stagiaire qui nous a aidés pour les contacts avec les agriculteurs. En conclusion, le projet a permis de créer des liens entre les différents partenaires, liens qui n'existaient pas auparavant. De ce fait, le projet PLANTSERV portant sur l'impact des plantes de services sur la régulation des ravageurs de céréales et des virus qu'ils transmettent a été obtenu dans le cadre du plan Ecophyto II par l'UMR ECOBIO associant l'IGEPP et une nouvelle thèse en co-encadrement doit débuter (2019-2022). Ce projet est mené en concertation avec le projet Activ'Biol du métaprogramme INRA SMaCH, co-porté par l'INRA de Rennes et de Grignon et associant l'UMR ECOBIO, a déjà démarré et vise à comparer l'utilisation de mélanges fleuris pérennes et annuels sur la régulation des ravageurs. Les contacts établis grâce à la société Pinault nous ont permis de développer une collaboration avec la Société Yves Rocher, cliente de la SA Pinault et une bourse de thèse CIFRE a commencé en 2017 entre ECOBIO et la société Yves Rocher.

- Liens établis avec les acteurs du plan Ecophyto, en particulier du ou des dispositifs concernés

En Bretagne, grâce aux clients des entreprises partenaires du projet, nous avons établi un réseau d'agriculteurs en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique partenaires du projet. Chez les agriculteurs conventionnels, nous utilisons les couverts hivernaux à proximité immédiate des champs de céréales (sans route, haie, fossé etc...) pour y planter une bande fleurie. Chez les agriculteurs biologiques, nous leur demandons d'implanter une bande fleurie dans un champ de céréales d'hiver, en sacrifiant le blé qui aurait dû être implanté à la place de la bande (nous les indemnisons pour la surface de blé perdue, soit 500 à 1000m<sup>2</sup> par champ). Le réseau est maintenant bien constitué avec plusieurs agriculteurs qui participent depuis plusieurs années. Après chaque hiver,

nous leur avons présenté les résultats de l'hiver et majoritairement les participants ont été très intéressés. Ces agriculteurs vont de nouveau participer à d'autres projets (comme le projet PLANTSERV et le projet Activ'Biol) directement issus du projet FLEUR. Les résultats obtenus par l'UMR Agronomie ont été présentés lors de réunions de groupes DEPHY dans l'Essonne et l'Eure-et-Loir. Certains des agriculteurs de ces groupes collaborent avec l'UMR Agronomie dans le cadre de projets nouveaux.

- Différents produits du projet

Les principaux résultats consistent en :

- Référentiel d'espèces de fleurs utiles aux parasitoïdes en hiver dans le contexte du projet (sarrasin, bleuet, moutarde et féveroles) et référentiel d'espèces qui ne peuvent pas être utilisées dans ce contexte, même si leur nectar est favorable.
- Référentiel d'espèces de pucerons pouvant être attirés par ces bandes fleuries sur le terrain en conditions hivernales et estivales.
- Etude des paramètres influençant la motivation des parasitoïdes à pondre et à se nourrir (une publication soumise Damien et al. à Behavioral Ecology, une en relecture finale avant soumission Damien et al. et une en préparation sur les résultats obtenus par Maxime Damien aux USA).
- Etude aux champs montrant que les couverts hivernaux de moutarde augmentent le taux de parasitisme par les parasitoïdes de pucerons des céréales (une publication acceptée Damien et al. 2017)
- Etude aux champs montrant la présence de prédateurs terrestres (carabes, staphylins et araignées, même après une période de gel). Une publication soumise Damien et al. à Biological Conservation.
- Mise au point de tests anthrones permettant de vérifier si un parasitoïde s'est réellement ou non nourri de nectar de fleurs.
- Mise en évidence de l'effet positif des bandes fleuries sur les pollinisateurs et absence d'effets sur les carabes au printemps
- Etablissement d'un réseau d'agriculteurs en agriculture biologique et conventionnelle.
- Plusieurs communications dans des congrès nationaux et internationaux.
- Plaquettes de résultats des différents hivers à destination des agriculteurs.
- Nombreuses publications de vulgarisation, présentation devant le grand public (radio, télévision, fête de la science...).

#### 4. Rapport scientifique : 10 à 15 pages en format à peu près libre

- Introduction rappelant la problématique, les enjeux et l'état de l'art

*Contexte général et socio-économique : importance de la lutte biologique par conservation*

Bien que l'emploi des pesticides doive être drastiquement réduit (cf plan ECOPHYTO), la lutte chimique reste prédominante pour maintenir la santé des cultures vis-à-vis des insectes ravageurs. En effet, les stratégies actuelles de protection intégrée permettent de diminuer les pesticides de 50%, mais essentiellement les fongicides et les herbicides, et non les insecticides. Cependant, une réduction de l'emploi de ces produits phytosanitaires dans des paysages et des systèmes de cultures simplifiés, qui comportent souvent une biodiversité très restreinte, affecterait grandement la stabilité des systèmes de production (Tscharrntke *et al.* 2005), sans que l'on connaisse précisément ce qui se passerait réellement.

Suite aux difficultés de l'application de la lutte biologique par lâchers inondatifs en grande culture, on se tourne maintenant vers la lutte biologique par conservation dont le principe est d'augmenter l'abondance des ennemis naturels et de diminuer celle des ravageurs à travers la modification (en particulier l'enrichissement floristique) de leur environnement (Eilenberg *et al.* 2001). Ainsi, un nombre croissant d'entreprises privées (incluant celles impliquées dans le projet) proposent des services de conseils pour les agriculteurs afin de mettre en œuvre des pratiques plus « écologiques » de gestion de la santé des cultures, permettant de réduire l'usage des pesticides tout en maintenant le niveau de production et la rentabilité économique.

Cependant, les techniques de lutte biologique par conservation restent très empiriques et très peu développées en grandes cultures. Elles doivent donc être rationalisées par une meilleure compréhension des mécanismes écologiques en œuvre, notamment pour mieux prédire leur efficacité. Ceci devrait permettre de comprendre le service écosystémique majeur que représente le contrôle biologique des ravageurs par les ennemis naturels.

### *Utiliser la végétation locale pour contrôler les interactions multi-trophiques*

L'idée centrale de ce projet est de comprendre comment l'augmentation de la biodiversité végétale dans la végétation non cultivée aux abords des parcelles peut soutenir la lutte biologique par conservation. Des relations positives entre la biodiversité (nombre d'espèces et abondance des individus dans chaque espèce) et le fonctionnement et la résilience de l'écosystème ont été observées dans de nombreux travaux, dans différents écosystèmes agricoles et forestiers. Par exemple, les prédateurs généralistes profitent souvent d'une diversité élevée de proies, elles-mêmes favorisées par une diversité végétale importante (Symondson *et al.* 2002; Miyashita *et al.* 2012; Bompard *et al.* 2013). Le mélange d'espèces cultivées et de plantes compagnes apporte souvent une meilleure résistance de l'association végétale aux attaques de bioagresseurs. Le mécanisme sous-jacent serait que l'apport **de ressources trophiques** (nectar, pollen, proies alternatives) **augmenterait globalement la présence d'auxiliaires** des bioagresseurs et agirait positivement sur leur fitness (Obrycki *et al.* 2009 ; Al-Dobai *et al.* 2012; Wächers & van Rijn 2012; Bompard *et al.* 2013). Cependant, ces effets positifs ne sont pas toujours observés d'une part et cela ne se traduit pas systématiquement par une régulation des populations des ravageurs ciblés, ni une réduction de leurs dégâts dans les systèmes étudiés. Ceci s'explique souvent par le fait que les mélanges fleuris ne sont pas spécifiquement conçus pour cet objectif de contrôle biologique et qu'il y a des interactions de type interférence ou prédation intra-guilde qui peuvent réduire les effets positifs. De plus, les travaux passés sont très **sectoriels** et se limitent souvent à **une seule culture** (souvent des cultures légumières) et **un seul ravageur**, dans un seul système de culture donné. Dans beaucoup de systèmes, comme par exemple en grandes cultures, il n'existe **pas de connaissance opérationnelle** permettant de raisonner la composition des mélanges fleuris selon un objectif quantifiable de régulation des ravageurs et selon les systèmes de culture concernés et le contexte paysager environnant. Il est alors nécessaire de progresser dans la connaissance de la nature, du niveau de diversité végétale et des caractéristiques des espèces à semer afin de favoriser les régulations des communautés de ravageurs des grandes cultures. En réalité, l'effet de la biodiversité n'est pas unique (complémentarité, redondance ou dilution de la ressource), mais comprend également l'ensemble des interactions, y compris physiologiques, entre plantes, ravageurs et auxiliaires et expliquant leurs performances relatives.

### *Le système agronomique étudié : les grandes cultures et leurs ravageurs*

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes focalisés sur les grandes cultures, dans une matrice paysagère qui contient du blé et du colza, auxquels nous nous sommes tout particulièrement intéressés, mais aussi du maïs et des pois. Les bioagresseurs considérés sont principalement les pucerons (pour le blé et le colza) et les méligèthes (sur colza). La période étudiée est principalement l'hiver et le début du printemps (décembre-avril). Ces choix tiennent compte d'un projet qui doit se

réaliser en 3 ans, avec des moyens limités et se basent sur l'ensemble des connaissances déjà accumulées sur ces systèmes, qui permettent de commencer le projet immédiatement, assurant ainsi les résultats.

Tout d'abord, concernant le choix de la période d'étude, il faut noter que la mortalité hivernale des insectes (les ravageurs et leurs ennemis naturels) est un processus clé en lutte biologique par conservation car les niveaux d'abondances initiales des ravageurs et ennemis naturels en fin d'hiver expliquent les dynamiques ultérieures. Ceci a été démontré pour les pucerons des céréales en Bretagne (Plantegenest *et al.* 2001). Malgré cette importance, ce qui se passe pendant cette période est très peu considéré dans la littérature sur le contrôle biologique, en particulier car les collectes hivernales d'individus nécessitent un effort d'échantillonnage plus fort du fait de la moindre abondance des insectes à cette période. Dans les cultures semées en automne (céréales d'hiver, colza), la prédation et le parasitisme des ravageurs en automne et hiver peut réduire significativement les abondances de ravageurs au printemps ainsi que la transmission des virus, comme celui de la jaunisse nanisante de l'orge qui se transmet aux céréales en début d'hiver, à faible densité de pucerons. Par exemple, la thèse de T Andrade (2013) a mis en évidence des taux de parasitisme pouvant aller jusqu'à 80% en période hivernale sur les pucerons des céréales. Les deux types de ravageurs sur lesquels se sont focalisés le projet ont été choisis pour l'ensemble des connaissances déjà existantes sur ces espèces, en absence d'enrichissement fleuri, ce qui constitue un témoin fiable sur de nombreuses années de la situation sans ces aménagements.

Dans les champs de blé, les pucerons représentent une forte nuisibilité directe (perte de rendement) et indirecte (transmission de virus) (Ragsdale *et al.* 2011; Radcliffe & Ragsdale 2002) et l'hivernation se fait partiellement à des stades actifs. En Europe, les dégâts directs liés aux pucerons représentent des pertes annuelles de 700 000 tonnes de blé (environ 10%). La jaunisse nanisante en France cause des pertes moyennes de 20% (Dedryver *et al.* 2010). La lutte intégrée contre les pucerons des céréales comporte l'utilisation de variétés résistantes, la lutte biologique et les méthodes culturales, si possible en combinaison. En revanche, ce concept ne remet pas en cause le traitement des semences aux insecticides, quasi généralisé, alors qu'il est en totale incohérence avec l'idée de protection intégrée car il s'agit d'un traitement systématique et non lié à un risque réel. Par ailleurs, aucune variété de céréales parfaitement résistante aux pucerons n'a été découverte en Europe, malgré des recherches intensives. La lutte par lâchers inondatifs de parasitoïdes est à l'étude, en particulier par une entreprise belge (Viridaxis) qui produit en masse des parasitoïdes de pucerons et qui est associée à l'Université de Louvain-La-Neuve, université partenaire officielle du projet. Cependant, cette méthode est coûteuse et ne sera probablement pas applicable facilement. La lutte biologique par conservation commence seulement à être étudiée par l'apport de ressources nutritives pour les ennemis naturels des pucerons (Obrycki *et al.* 2009). Cependant, les mécanismes écologiques et les effets non-intentionnels de cette méthode sont peu connus (Dedryver *et al.* 2010). Sur colza, le puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) peut se rencontrer à l'automne et est vecteur de trois virus responsables de pertes de rendement allant jusqu'à 8 q/ha et ses piqûres crispent et jaunissent les feuilles. Ce puceron devient de plus résistant à plusieurs insecticides. Le puceron cendré du chou (*Brevicoryne brassicae*) peut provoquer l'avortement des fleurs et un échaudage induisant des pertes de rendement.

En France comme en Europe, le melligèthe de colza (*Meligethes aeneus*) est l'un des principaux ravageurs des cultures de colza. Suite à l'émergence depuis des sites d'hivernation, les adultes migrent vers les parcelles de colza pour se nourrir de pollen en détruisant les boutons floraux et les femelles pondent dans les bourgeons floraux, occasionnant ainsi de fortes pertes de rendement (Nilsson 1994). À l'échelle locale, l'abondance des melligèthes et leurs dégâts sont en partie affectés par les pratiques liés à la disponibilité en azote, la densité du couvert, les cultures pièges (Valantin-Morison *et al.* 2007) et le travail du sol (Rusch *et al.* 2011). Parmi les cultures pièges, on peut citer la navette, reconnue de longue date pour être attractive à la fois des melligèthes et d'autres insectes ravageurs du colza (Cook *et al.* 2006 ; Barari *et al.* 2005). À une échelle plus large, des paysages avec une forte proportion d'habitats semi-naturels maintiennent des populations plus réduites de melligèthes en raison d'un contrôle biologique par les parasitoïdes plus important (Thies *et al.* 2003).

En particulier, les endo-parasitoïdes des larves de méligèthes (*Tersilochus heterocerus*, *Phradis morionellus* et *P. interstitialis*) peuvent causer des taux de mortalité très élevés (Jourdeuil 1960 ; Ulber *et al.* 2010), représentant ainsi un contrôle biologique substantiel (Nilsson 2010).

### *Etat de l'art de la lutte biologique par conservation en agriculture*

De nombreux agriculteurs implantent déjà des mélanges d'espèces végétales en bordure de leurs parcelles, qu'il s'agisse de bandes enherbées ou de bandes fleuries à visées esthétiques, de refuge pour le petit gibier ou destinées à favoriser les abeilles domestiques. En revanche, les objectifs de régulation des bioagresseurs de grandes cultures ne sont que très rarement pris en compte dans ces enrichissements, parce que l'on ne connaît pas le potentiel de régulation que ces aménagements fleuris pourraient apporter, ni les dommages évités à la culture ou les dégâts potentiels. En effet, les principaux mélanges fleuris actuellement commercialisés ont été mis au point le plus souvent pour favoriser les pollinisateurs, ou certains ennemis naturels (plutôt les prédateurs), ou pour des aspects purement esthétiques, mais jamais pour les parasitoïdes, qui régulent pourtant la majorité des ravageurs et **qui sont surtout actifs en hiver** dans les grandes cultures comme le blé (Andrade 2013), contrairement à la plupart des prédateurs (ceux-ci seront cependant étudiés dans ce projet car ils peuvent apporter de la redondance fonctionnelle). La plupart des études ont été réalisées sous serre ou autour de cultures légumières mais jamais dans une mosaïque de différentes grandes cultures.

Il a été mis en évidence en laboratoire que différentes espèces de parasitoïdes et de prédateurs vivent plus longtemps, pondent plus et sont plus résistants lorsque leurs adultes ont accès à des ressources trophiques (Obrycki *et al.* 2009 ; Al-Dobai *et al.* 2012 ; Wächers & van Rijn 2012 ; Bompard *et al.* 2013). Il a aussi été montré que la nourriture peut être un facteur limitant pour les parasitoïdes en plein champs, en particulier dans les champs ne fournissant pas ou peu d'apports alimentaires floraux, comme les cultures de céréales (Wratten *et al.* 2012 ; Brewer & Elliot 2004). Il a été mis en évidence que l'aspect « accessibilité spatiale » de ces ressources trophiques (donc la façon dont ces ressources sont disposées par rapport à la culture, qui peut modifier la distance que les ennemis naturels ont à parcourir pour y accéder) n'était pas à négliger : par exemple, Frère *et al.* (2007) ont mis en évidence l'importance de la disposition des roses à proximité des champs sur leur impact sur des populations de pucerons et leurs parasitoïdes. Pour une même culture et un même type de fleur choisie, les résultats peuvent donc être contradictoires selon l'arrangement spatial de la ressource nutritive (Brown *et al.* 2010). Ceci est lié au fait que les relations multi-trophiques ont été peu étudiées, par exemple les effets de l'interférence, de la compétition apparente ou de la prédation intra-gilde. Maintenir la biodiversité d'ennemis naturels grâce à des plantes non cultivées peut aussi créer des risques, par exemple celui d'attirer des ravageurs supplémentaires sur la culture que l'on souhaite protéger ou sur les cultures adjacentes.

Dans le cas des cultures de blé en Bretagne, le projet Landscaphid (2010-2013) a mis en évidence l'impact des conditions climatiques sur les réseaux trophiques comportant les différentes espèces de pucerons trouvées en hiver et leurs parasitoïdes et prédateurs (syrphes) (Andrade 2013, Raymond *et al.* 2014). La saison optimale pour ces implantations florales doit donc aussi être étudiée. Dans le cas des cultures de colza, les travaux précités ont nettement mis en évidence l'importance cruciale de la mosaïque d'habitats à l'échelle du paysage sur les taux de parasitisme des méligèthes. Les agriculteurs n'ont cependant que peu d'emprise sur ce levier, et les très rares travaux s'étant intéressés aux aménagements fleuris aux abords des parcelles (Hausammann 1996 ; Lethmayer *et al.* 1997) n'ont jamais cherché à optimiser la composition botanique des mélanges botaniques.

L'ensemble de ces paramètres met en évidence que malgré le manque de connaissances sur la façon dont les apports floraux pourraient contribuer à la diminution des ravageurs en grandes cultures, de nombreux facteurs laissent à penser qu'un effet positif est fortement probable (Al-Dobai *et al.* 2012 ; Wächers & van Rijn 2012) et qu'une meilleure connaissance du système est nécessaire afin de déterminer quel type d'apport floral peut être mis en place en fonction de la mosaïque de

cultures considérée et du climat local. Il est aussi nécessaire de déterminer le lien entre les apports floraux et le taux de parasitisme ou de prédation effectif (Brown *et al.* 2010).

- **Les approches scientifiques et techniques utilisées**

L'objectif général de ce projet est d'explicitier les relations fonctionnelles entre le degré de biodiversité présent dans les aménagements fleuris et l'arrangement spatial de ces aménagements par rapport à la culture (bandes fleuries ou autre type de disposition) et le fonctionnement des communautés d'arthropodes présentes dans les grandes cultures et dans ces habitats aménagés.

**Les objectifs spécifiques du projet FLEUR et les méthodes employées ont été les suivants :**

- **Tâche 2 : Détermination des effets des différentes espèces de fleurs sur les ennemis naturels et attractivité par rapport aux ravageurs. Responsable : A Le Ralec.**

Cette tâche comporte plusieurs sous-objectifs, (1) la recherche d'espèces de plantes susceptibles d'augmenter l'efficacité des insectes parasitoïdes en leur fournissant du nectar, (2) la mesure de l'attractivité des plantes (3) l'évaluation des risques liés à l'utilisation de ces fleurs, et en particulier le risque d'attraction d'insectes nuisibles à la culture visée ou aux cultures adjacentes.

**Méthodes :**

**Pour l'objectif 1**, à ECOBIO, une quinzaine d'espèces de fleurs ont été étudiées au laboratoire pour leur effet sur la fitness des insectes parasitoïdes, la plupart actuellement commercialisées en mélange par la SA Pinault (entreprise partenaire du projet), et qui ont donc été déjà sélectionnées pour leur capacité à produire du nectar et à attirer des insectes. Le problème du choix des espèces de fleur est complexe, car elles doivent à la fois être nutritives pour les parasitoïdes, attractives à distance (en cas d'implantation en bordures des champs de céréales), peu coûteuses, non salissantes, avoir une durée de floraison longue et la capacité de pouvoir fleurir en Bretagne en hiver. Certaines espèces ont déjà été testées pour leur intérêt pour les parasitoïdes dans la littérature, mais aucune espèce n'a par exemple été étudiée pour ses capacités de floraison hivernale. Des discussions avec les agriculteurs et avec la SA Pinault ont été réalisées sur l'acceptabilité de ces espèces en bandes fleuries. Pour la quinzaine d'espèces retenues, des mesures du taux de fécondité et de longévité des parasitoïdes nourris à partir de différentes espèces ont été réalisées.

**Pour l'objectif 2**, cette partie du projet s'est décomposée en 4 parties expérimentales:

- **Expérience sur le choix entre pondre et se nourrir:** Des expériences en laboratoire ont été menées pour comprendre le comportement des parasitoïdes dans un champ : en effet, dans le contexte de bandes fleuries placées à l'extérieur du champ, les parasitoïdes de pucerons des céréales, du genre *Aphidius*, n'ont accès aux ressources nutritives qu'à l'extérieur du champ. Cependant, sortir du champ pour s'alimenter peut aussi comporter des risques et éloigner les parasitoïdes de leur source d'hôtes (les pucerons) installée dans le champ, qui est indispensable à leur reproduction. Un stage de M2 a été réalisé en 2016, dont l'objectif était d'explorer les prises de décision comportementales liées à ce compromis, dans le cadre des théories de l'Optimal Foraging. En effet, en variant le temps passé à rechercher de la nourriture, les parasitoïdes modifient leur espérance de vie et donc leur succès reproducteur. Des modèles stochastiques ont permis d'estimer le meilleur choix entre la recherche d'hôtes ou de nourriture en fonction de l'état interne du parasitoïde, de la disponibilité en nourriture et en hôtes quand ils se trouvent dans des parties différentes de l'environnement. Des modèles ont aussi permis de déterminer la distribution d'une population de parasitoïdes entre les deux parties de l'habitat en fonction du nombre de compétiteurs et des possibilités

d'interférence (Sirot et Bernstein 1996). Dans le cadre de ce stage, l'accent a été mis sur les choix à réaliser par les femelles de parasitoïdes en fonction de leur état interne (âge, degré d'affaiblissement, état fécondé ou non), de la distance entre le champ et la source de nourriture et de la qualité de la source de nourriture (type de fleurs disponibles).

- **Vérification de l'utilisation effective des fleurs proposées** : L'objectif du séjour de Maxime Damien à ISA (printemps 2018) était de réaliser des analyses biochimiques permettant d'évaluer la capacité d'insectes parasitoïdes à acquérir de la ressource énergétique via du nectar de fleur cultivée en conditions hivernales. **Méthodes** : Différentes espèces de fleurs dont le nectar a augmenté la fitness des parasitoïdes dans l'expérience précédente ont été cultivées durant les mois de Décembre à Février 2017-2018, au sein du jardin expérimental de l'UMR ECOBIO (moutarde, sarrasin et féverole). Des parasitoïdes émergents, élevés au laboratoire, ont été mis à s'alimenter durant 24h sur les différentes espèces de fleurs puis congelés. Ces échantillons ont ensuite été apportés par Maxime Damien à l'UMR ISA pour la réalisation de tests anthrones (extractions des sucres et analyses biochimiques) afin de quantifier les quantités de trois différents sucres représentatifs des réserves énergétiques des individus (glucose, fructose et glycogène) en fonction des différents traitements d'alimentation (fleurs, contrôles positifs alimentés au sucrose, contrôles négatifs non alimentés).
- **Etude expérimentale des préférences et performances des parasitoïdes sur différents mélanges floraux** : L'objectif de cette expérience était d'établir la comparaison entre préférences et performances des insectes parasitoïdes pour la ressource florale, le long d'un gradient de diversité à densité de fleurs constante et en conditions semi-naturelles. **Méthode** : Pour ce faire, 18 cages de 1m<sup>2</sup> de surface et 2m de hauteur ont été construites dans les jardins de l'UMR ECOBIO. Au sein de ces cages, deux gradients ont été mis en place. Allant des cages contrôles vides, aux mélanges à trois espèces (2 plantes fleuries de moutarde, bleuet et sarrasin), avec les différentes combinaisons intermédiaires à deux espèces (3 plantes fleuries de deux des espèces) et des cages en mono-spécifique avec 6 plantes fleuries d'une seule espèce. Sur ces deux gradients, des lâchers et des recaptures de parasitoïdes de l'espèce *Aphidius ervi* ont été réalisés. Au sein d'un des deux gradients, un pot de blé infesté de pucerons *Metopolophium dirhodum* a été mis en place dans chaque cage afin de comparer les abondances de pucerons parasités en fonction du niveau de diversité florale et donc de nectars différents. Dans le second gradient, les parasitoïdes ont été re-capturés après 48h puis congelés afin de comparer les niveaux de réserves énergétiques en fonction du niveau de diversité florale, via une analyse biochimique par méthode HC-Ms réalisée à ECOBIO.
- **Développement du contexte théorique entre pondre et se nourrir** : Maxime Damien a réalisé un stage de 5 mois aux USA en 2017 (juillet-novembre) dans le laboratoire du Pr. Georges Heimpel. L'objectif était de développer le contexte théorique des choix entre l'alimentation et la ponte en étudiant les capacités de vol des parasitoïdes en condition de faibles densités d'hôtes et d'accès ou non à de la ressource nutritive (ce qui correspond à la période hivernale en Bretagne, avec ou sans bandes fleuries). Du fait de problèmes techniques avec le dispositif expérimental permettant le vol forcé des insectes, l'influence de la distance de vol n'a pas pu être étudiée. Une expérience a donc été menée afin d'évaluer l'interaction entre l'accès à de la ressource sucrée et la densité en hôtes sur la vitesse et la qualité de maturation en œufs d'insectes parasitoïdes de l'espèce *Aphelinus certus*. **Méthodes** : Dans un premier temps, les capacités de parasitisme potentielles de cette espèce ont été quantifiées selon différents traitements nutritifs. Pour cela, la charge et la taille des œufs matures des femelles à 1, 3, 5 et 8 jours de vie ont été mesurées pour des femelles : non nourries, nourries au miel, nourries par piqûres nutritionnelles sur hôtes et enfin nourries au miel et par des piqûres nutritionnelles. Ensuite, une expérience a été réalisée afin de comparer la charge en œufs de femelles ayant accès ou non à du miel, et en présence de faible ou forte densité en hôtes (3 vs 20 hôtes disponibles).

**Pour l'objectif 3**, nous avons évalué les risques de ces aménagements floraux en mesurant l'attractivité des fleurs choisies sur les principaux ravageurs des cultures adjacentes aux cultures étudiées, ainsi que sur les parasitoïdes. Les collectes ont été réalisées dans des bandes fleuries expérimentales, dans des bandes fleuries à proximité des champs de céréales pendant trois hivers et dans des champs mixtes céréales/légumineuses.

- **Tâche 3** : La tâche 3 est plus particulièrement dédiée aux essais sur le terrain concernant l'agencement optimal des apports fleuris et la phénologie idéale. L'objectif était de quantifier, au champ l'effet de l'introduction d'aménagements fleuris comprenant les plantes identifiées ci-dessus, sur la dynamique des ravageurs et leur taux de parasitisme/prédation. Nous pouvons supposer que l'apport de ressources trophiques se traduit par une augmentation du processus de régulation des ravageurs qui a été mesuré, ainsi que les abondances de pucerons, parasitoïdes et différents groupes de prédateurs. Ces mesures ont été réalisées sur le terrain pendant trois ans. Les intérêts agronomiques de ces aménagements floraux ont été déterminés auprès des agriculteurs, en agriculture conventionnelle et biologique.

#### **Méthodes :**

##### **1. Suivi des populations de ravageurs et de leurs ennemis naturels pendant 3 hivers :**

Le projet ayant débuté en septembre 2015 avec la thèse de Maxime Damien, il n'a pas été possible de proposer en Bretagne des aménagements fleuris pour cet hiver-là, les contacts avec les agriculteurs venant juste de commencer et la composition du mélange idéal à semer n'ayant pas encore été évaluée. Par contre, nous avons pu mener une expérience de terrain pendant l'hiver 2015-2016 car grâce à des conditions hivernales particulièrement douces, les couverts hivernaux de moutarde mis en place par les agriculteurs dans le cadre de la PAC ont fleuri. Nous avons obtenu l'autorisation des agriculteurs de réaliser des observations dans leurs champs. Une quinzaine de sites comportant une interface immédiate entre un couvert hivernal de moutarde en fleurs et une céréale d'hiver ont été sélectionnés. Les pucerons et les parasitoïdes ont été prélevés et déterminés.

Les résultats encourageants du premier hiver et ceux de la tâche 2 nous ont permis de proposer un mélange fleuri aux agriculteurs pour les hivers 2016-2017 et 2017-2018. Le mélange a été implanté dans une vingtaine de champs, mais le suivi n'a pu être fait que dans une douzaine de champs (certains couverts n'ont pas poussé correctement, certains agriculteurs n'ont pas suivi les consignes données, malgré la plaquette qui leur a été distribuée et les explications de vive voix lors de la livraison des graines). Les bandes fleuries ont été suivies dès le début décembre (les céréales ont été semées très tard cette année, mi-novembre pour les agriculteurs conventionnels, fin novembre pour les agriculteurs biologiques).

##### **2. Evaluation du taux de parasitisme par une méthode moléculaire**

Le taux de parasitisme d'une population de puceron peut être estimé par la proportion de pucerons parasités (momies) parmi les pucerons vivants. Toutefois, cette méthode minimise le taux de parasitisme réel, puisque les pucerons parasités mais encore vivants ne sont pas pris en compte. Il est possible de collecter l'ensemble des pucerons vivants échantillonnés et de les élever au laboratoire. Mais cette méthode est gourmande en temps et nécessite de disposer des différentes plantes hôtes des espèces de pucerons échantillonnées. L'utilisation de méthodes moléculaires pourrait apporter un gain de temps et donc de puissance d'échantillonnage appréciable. Elle pourrait toutefois s'avérer trop coûteuse pour des études de routine. Nous avons voulu mesurer l'intérêt d'une approche moléculaire dans le cadre de l'expérimentation conduite sur les cultures en mélange. L'hypothèse étant que les cultures mixtes augmenteraient le taux de parasitisme des pucerons ravageurs du blé, nous avons comparé le taux de parasitisme apparent, calculé sur la base de la proportion de pucerons momifiés dans l'ensemble des pucerons dénombrés, avec un taux de parasitisme "réel", prenant en compte les pucerons parasités morts (momies) et vivants. La proportion de pucerons parasités parmi les pucerons vivants a été obtenue par extraction d'ADN

(méthode Hotshot) et une PCR utilisant le couple d'amorces spécifique des Aphidiinae. Cette simple PCR permet de savoir si un puceron est parasité ou non, mais pas d'identifier l'espèce présente. Cela est cependant suffisant pour répondre à la question posée ici et permet de traiter une grande quantité d'individus pour un faible coût.

### 3 - Impact des cultures en mélange sur le taux de parasitisme des pucerons des céréales

Au printemps 2018, le taux de parasitisme des pucerons des céréales en culture de Poacées pure et en culture de mélanges Poacées-Fabacées, a été comparé dans 22 parcelles, sur deux sites. L'hypothèse testée est que les Fabacées peuvent fournir aux parasitoïdes des ressources alimentaires (nectar floral ou extra-floral chez la féverole) ou des hôtes alternatifs (sur le pois), avec pour conséquence une efficacité de régulation plus grande des pucerons des céréales.

#### Tâche 4

##### **4.1 Élaboration d'une méthodologie pour caractériser une diversité de ravageurs, leurs dégâts ainsi qu'une diversité d'organismes auxiliaires et l'intensité des régulations biologiques**

Cette tâche a été réalisée de manière complémentaire au projet PSPE CASIMIR, au cours duquel les méthodes expérimentales comparées concernaient surtout les céréales et les auxiliaires marcheurs (comparaison de différents protocoles basés sur les pièges Barber). Concernant les méthodes permettant de décrire les communautés d'auxiliaires aériens / volants, nous avons choisi de comparer quatre méthodes contrastées après un recensement de l'existant : filet fauchoir, piège cornet, observations visuelles et pièges jaunes englués. Ces quatre méthodes de piégeage ont été comparées en 2015 sur quelques bandes fleuries du dispositif expérimental décrit ci-dessous.

##### **4.2 Quels sont les effets des aménagements fleuris sur la structure et le fonctionnement des communautés d'auxiliaires et de ravageurs à l'échelle de la rotation ? Participants : UMR Agronomie et UMR IGEPP**

Méthodes : Une expérimentation au champ, reposant sur la comparaison de l'effet de différentes bandes fleuries sur les régulations de ravageurs, a été mise en place, pour une durée de quatre ans. Huit mélanges floraux contrastés ont été constitués, en faisant varier la diversité spécifique et fonctionnelle des plantes présentes. Ces mélanges (plus un témoin « absence de bande », semé avec la culture) ont été implantés en bandes de 6x44 m espacées de 50 m, dans une parcelle de 13 ha. Cette distance permet un isolement des bandes vis-à-vis des déplacements de la faune marcheuse et des auxiliaires volants de petite taille.

La parcelle est cultivée avec des cultures sensibles aux dégâts causés par les insectes, selon une rotation de quatre ans (légumineuse–colza–blé–maïs). Pour dissocier les interactions culture × année climatique, le dispositif comprend chaque année deux termes de la rotation, répétés sur trois blocs. Les cultures sont conduites avec un faible niveau de pesticides, et aucun insecticide, par la mise en œuvre de systèmes de culture intégrés.

Un important effort expérimental est réalisé pour quantifier les auxiliaires, les ravageurs et leur régulation, dans les bandes fleuries et dans les cultures adjacentes, à l'aide de comptages et piégeages au printemps et en automne. Cette importante collecte de données se fait au détriment de l'identification des insectes au laboratoire et du traitement des données, qui n'est réalisé que de manière très partielle à ce stade. Dans l'ensemble, l'expérimentation se déroule comme prévu. Seule la météo très pluvieuse du printemps 2016 n'a pas permis de faire les observations souhaitées (tous les insectes volants ont été anéantis) et la sécheresse en août-septembre a contrarié l'implantation d'une culture de colza.

- **Résultats obtenus**

## **Tâche 2 : Détermination des effets des différentes espèces de fleurs sur les ennemis naturels et attractivité par rapport aux ravageurs.**

### **1. Objectif 1: Recherche de plantes utiles aux parasitoïdes et aux ennemis naturels**

**Résultats :** Les espèces sélectionnées à l'issue des expériences sont le sarrasin, le bleuet, la moutarde et la fèveole (Damien et al. Soumis à Behavioural Ecology et Damien et al. en préparation). Il a déjà été démontré que le sarrasin était une espèce dont le nectar est particulièrement favorable, pour toutes les espèces de parasitoïdes chez lesquelles cela a été évalué. Par contre, cette espèce n'est pas la plus attractive à distance. Elle n'attire pas d'insectes ravageurs des grandes cultures, étant d'une famille très différente. Elle fleurit sur plusieurs semaines (3 floraisons successives), et plantée en août-septembre, elle peut fleurir plusieurs mois. Son inconvénient majeur est de ne pas du tout supporter le gel, elle meurt à 0°C, même si cette température n'est atteinte qu'une nuit. La moutarde n'a pas un nectar de très bonne qualité, mais il permet de doubler la survie des parasitoïdes, et cette plante est très attractive (peut-être en partie à cause de sa couleur). Elle peut fleurir sur plusieurs mois pendant l'hiver, et ne gèle qu'à -5°C. Etant déjà largement utilisée dans les couverts hivernaux, elle est facilement acceptée par les agriculteurs. Elle attire quelques espèces de pucerons, mais sans que cela pose vraiment un problème en hiver, d'autant qu'ils peuvent alors constituer des réservoirs de parasitoïdes pour le printemps (Navasse, 2016). Le bleuet produit un nectar de très bonne qualité, ainsi que du nectar extra-floral, par contre les graines se vendent cher. Les fèveoles ont comme avantage de produire du nectar extra-floral, c'est-à-dire d'être utilisables par les parasitoïdes même lorsqu'elles ne sont pas encore en fleurs. Elles sont aussi bien acceptées par les agriculteurs. Ces fleurs (sarrasin, moutarde, fèveole et bleuet) ont donc été sélectionnées pour proposer aux agriculteurs un mélange susceptible d'offrir du nectar aux parasitoïdes sur la période octobre-mars. Les proportions de chaque espèce ont été réfléchies avec l'aide de la SA Pinault. Ce mélange a été utilisé les hivers 2016-2017 et 2017-2018 (sans le bleuet qui n'a pas fleuri le premier hiver), avec des variations minimales (variétés de sarrasin et de fèveoles). Cette tâche 2 a aussi permis de montrer que certaines espèces de fleurs ne sont pas intéressantes dans ce cadre, en particulier la phacélie, dont le nectar n'est pas accessible pour les parasitoïdes, la matricaire, le calendula, la mauve dont le nectar est accessible mais n'améliore pas leurs performances et le lin dont la durée de floraison est trop courte.

### **2. Objectif 2: mesure de l'attractivité et de la qualité des plantes**

**Expérience sur le choix entre pondre ou se nourrir:** Ces recherches ont permis de montrer que les femelles choisissaient de s'alimenter lorsque les fleurs de bonne qualité sont disponibles, quand elles ne sont pas encore accouplées et quand elles sont affamées. L'effet de l'absence d'accouplement n'était pas prévu et semble le plus important, ce qui a fait l'objet d'une publication actuellement soumise.

#### **Résultats de l'expérience sur la vérification de l'utilisation effective des fleurs par les parasitoïdes:**

Les résultats de l'expérience en cages dans les jardins expérimentaux d'ECOBIO ont permis de mettre en évidence que les fleurs cultivées en conditions hivernales permettaient un accès à de la ressource nutritive aux insectes parasitoïdes. En effet, certaines variations dans la quantité de sucres présentes chez les parasitoïdes des différents traitements ont pu être observées. Les parasitoïdes ayant eu accès à la solution nutritive de sucrose présentaient des quantités de sucrose, fructose et glycogène les plus élevées par rapport aux parasitoïdes des autres traitements. Cependant, les parasitoïdes nourris au nectar de sarrasin possédaient des quantités de fructose intermédiaires, non différentes des contrôles positifs, ni des individus ayant consommé du nectar de moutarde ou de fèveole. Enfin les quantités de glycogène (principale forme de stockage des réserves énergétiques) étaient plus

élevées pour les parasitoïdes nourris au nectar de moutarde et de féverole que ceux des contrôles négatifs non nourris. Les analyses biochimiques par test anthrone décrites ont été réalisées par Lucie Monticelli et Maxime Damien, sur la base de l'élaboration d'un protocole spécifique mis en place par Lucie Monticelli, doctorante au sein de l'UMR ISA.

**Résultats de l'étude expérimentale des préférences et performances des parasitoïdes sur différents mélanges floraux :** Les résultats de cette expérience sont encore en cours d'analyse, notamment les analyses biochimiques de niveau de réserves énergétiques du fait de problèmes techniques au cours du projet. Cependant les abondances de pucerons parasités elles aussi en cours d'analyse tendent à mettre en évidence une abondance plus importante de pucerons parasités au sein des cages contenant des fleurs de moutarde en situation mono-spécifique, par rapport aux autres fleurs seules, ou en combinaisons. Ceci pourrait résulter d'une part de la forte attractivité de la fleur de moutarde par rapport aux autres espèces de fleurs, ayant davantage favorisé l'alimentation des parasitoïdes par rapport aux autres fleurs seules ou en combinaisons. D'autre part, ces résultats pourraient également s'expliquer par le faible bénéfice du nectar de moutarde sur la longévité des parasitoïdes, ayant favorisé ces derniers à utiliser la ressource acquise pour se reproduire, contrairement aux autres fleurs seules ou en combinaisons, où les nectars sont plus favorables à la survie.

**Théorisation du choix entre pondre et se nourrir :** Concernant le stage de 5 mois de Maxime Damien au laboratoire du Pr. Georges Heimpel aux USA, les données sont toujours en cours d'analyse. Les analyses préliminaires ont pu mettre en évidence que la maturation des œufs se faisait rapidement suite à l'émergence avec une production maximale en l'absence de ponte atteinte à trois jours de vie, quel que soit le traitement nutritif. La seconde expérience a permis de mettre en évidence que l'accès à de la ressource sucrée comme le miel favorisait la maturation en œufs. Cependant, cette maturation était d'autant plus importante que la densité en hôtes était forte, laissant supposer un effet synergique de ces deux facteurs sur le processus de maturation. Une publication sera réalisée sur ces résultats.

### **3 : Effets négatifs potentiels des bandes fleuries : attractivité des ravageurs**

#### **3.1 - Bandes fleuries, mélanges complets, printemps (2014, 2015, 2016) :**

- *Expérience préliminaire* : afin d'estimer le potentiel de colonisation des mélanges floraux par les pucerons et leurs parasitoïdes, des bandes fleuries ont été semées sur le site d'Agrocampus Ouest à Rennes. Quatre mélanges fleuris de la SA Pinault ont été testés, avec 2 répétitions pour chaque, soit 8 bandes fleuries de 12,5 m<sup>2</sup> chacune (figure 1). Le semis a eu lieu début avril et des suivis hebdomadaires ont été effectués de mai à septembre 2014, avec pour chaque espèce, un comptage sur 10 plantes prises au hasard. Au total, une seule espèce de puceron a été observée, le puceron cendré du chou, *Brevicoryne brassicae*, sur moutarde blanche, en juin et juillet. Un seul individu parasité a été échantillonné par un parasitoïde du genre *Trioxys*. En 2016, sur 3 bandes fleuries implantées sur le même site, aucun puceron n'avait été détecté. Ce résultat contraste fortement avec les interactions plantes pucerons potentielles identifiées. En effet, une liste des espèces de pucerons pouvant être rencontrés sur les espèces des mélanges fleuris utilisés a été établie au préalable, d'après les données de la littérature (Blackman & Eastop, 2006) : elle compte 30 espèces de pucerons pour les 42 espèces de plantes figurant dans les mélanges. Cependant, ces mélanges complets sont sans doute défavorables à la colonisation des plantes hôtes par des espèces aphidiennes spécialisées, du fait de la forte densité du couvert associée à une faible densité de chaque espèce au sein de ce couvert.



Figure 1 : bande fleurie implantée sur le site d'Agrocampus Ouest (juillet 2014)

- *Suivis en parcelles de producteurs* : en 2015 et 2016, quatre bandes fleuries (mélange "Paradis des insectes 70% Bio" SA Pinault, composé de 12 espèces annuelles) d'environ 200 m<sup>2</sup> chacune, semées en bordure d'une parcelle de blé d'hiver ont été échantillonnées toutes les deux semaines, de mars à mai, selon le protocole décrit ci-dessus. Les plantes adventices non semées ont également été échantillonnées. La localisation des bandes a été différente pour ces 2 années. Au total, neuf espèces de pucerons ont été identifiées, essentiellement en 2015, sur trois plantes hôtes principales, le seigle, la vesce et la moutarde (Tableau 1). Trois espèces de parasitoïdes ont été échantillonnées en 2015 sur de ces pucerons : *Praon volucre*, *Aphidius matricariae* et *Diaeretiella rapae*. Les trois espèces de pucerons identifiées sur seigle sont les principales espèces pouvant occasionner des dégâts sur blé. Même si elles ont permis le développement du parasitoïde généraliste *P. volucre*, il semble peu judicieux d'inclure le seigle ou tout autre Poacée dans une bande fleurie, d'autant que ces plantes ne fournissent pas de ressources alimentaires pour les parasitoïdes adultes. Plus largement, toutes les espèces de pucerons identifiées dans les bandes fleuries sont potentiellement ravageurs de plantes cultivées, notamment Brassicacées et Fabacées. Cependant, leur densité a été extrêmement faible durant les 3 années de suivi et ils étaient tous attaqués par des parasitoïdes (à l'exception de *Megoura viciae*) qui pourraient à la fois limiter leur développement sur les plantes fleuries et coloniser les parcelles adjacentes.

Tableau 1 : Synthèse des principales associations trophiques identifiées au sein des bandes fleuries (printemps 2014, 2015, 2016)

Plante	Pucerons	Parasitoïdes
Seigle	<i>Sitobion avenae</i> <i>Metopolophium dirhodum</i> <i>Rhopalosiphum padi</i>	<i>Praon volucre</i>  <i>Aphidius matricariae</i>
Vesce commune ( <i>Viscia sativa</i> )	<i>Megoura viciae</i> <i>Acyrtosiphon pisum</i>	
Moutarde blanche ( <i>Sinapis alba</i> )	<i>Brevicoryne brassicae</i> <i>Myzus persicae</i>	<i>Diaeretiella rapae</i> <i>Aphidius matricariae</i>

### 3.2 – Bandes fleuries, mélange simplifié, automne-hiver (2016-2017, 2017-2018)

Des suivis entomologiques en période automno-hivernale ont été réalisés dans des bandes fleuries comportant 3 espèces de plantes (sarrasin, moutarde blanche, féverole), en 2017 et 2018, de mi-décembre à fin février, toutes les trois semaines. Les colonies de pucerons et les momies présentes sur 5 plantes de chaque espèce ont été collectées et placées dans l'alcool (96%).

Quatre espèces de pucerons ont été identifiées : *M. viciae* et *Aphis fabae* sur féverole, *Myzus persicae* et *Brevicoryne brassicae* sur moutarde. Un petit nombre de pucerons parasités (momies) a été trouvé,

avec une majorité de momies de l'espèce *M. persicae*. L'identification moléculaire des parasitoïdes présents dans ces momies est en cours, mais il faut souligner que ces trois espèces peuvent être attaquées par un même parasitoïde, *Aphidius matricariae*. Cette espèce est également un parasitoïde des pucerons des céréales, en particulier de *Rhopalosiphum padi*, comme l'ont confirmé les échantillonnages réalisés aux mêmes dates dans les parcelles de céréales adjacentes (voir plus loin). Les couverts comportant des Brassicacées pourraient donc favoriser le maintien en hiver de parasitoïdes pouvant réguler les populations de pucerons des céréales. Ces couverts agiraient comme des réservoirs de ces auxiliaires par le biais du puceron *M. persicae*. Pour affiner l'estimation du parasitisme de ce puceron dans les bandes fleuries, tous les individus collectés en hiver sont en cours d'analyse par biologie moléculaire pour détecter la présence d'un parasitoïde et l'identifier. Pour cela on utilise en 1<sup>er</sup> lieu un couple d'amorces spécifiques des Aphidiinae (séquence du gène 16S, 210 Pb, Derocles et al., 2012) puis un couple d'amorces spécifiques de l'espèce *A. matricariae* (séquence du gène CO1, 397 Pb, Navasse & Le Ralec, données non publiées). Cette méthode va permettre de quantifier plus précisément le taux de parasitisme de *M. persicae* dans les couverts fleuris. Cette information est importante pour déterminer si l'avantage de la présence de Brassicacées dans ces couverts, lié à une fonction de réservoir d'auxiliaires est supérieur au risque pour les cultures environnantes, colza notamment, associé au maintien d'un puceron ravageur sur cette ressource hivernale.

### 3.3 – Cultures en mélange Poacées – Fabacées (printemps 2018)

Les suivis entomologiques ont été réalisés toutes les 3 semaines, de fin mars à mi-juin. Les pucerons vivants et parasités (momies) présents sur 50 plants de chaque espèce végétale choisis au hasard ont été collectés et placés en alcool 96% pour les pucerons, à sec jusqu'à émergence pour les momies. Tous les individus ont été ensuite identifiés au laboratoire. Les analyses effectuées sur ces prélèvements montrent qu'effectivement les Fabacées sont colonisées par des pucerons, *Acyrtosiphon pisum* sur pois et *Aphis fabae* sur féverole. Des momies ont été récoltées uniquement sur *A. pisum*. Le taux de parasitisme des pucerons des céréales n'est pas plus élevé en culture en mélange qu'en culture pure (voir plus loin). En revanche, la composition de la communauté parasitaire est modifiée, comme le montrent les réseaux trophiques construits sur la base de l'identification des parasitoïdes ayant émergés des momies récoltées (Figure 2). Les espèces de parasitoïdes spécialistes des pucerons des céréales, en particulier *Aphidius rhopalosiphi*, semblent défavorisées par le mélange de plantes. La plus forte proportion de parasitoïdes généralistes dans la communauté, *Aphidius avenae*, *Aphidius ervi*, *Praon volucre*, dans les cultures en mélange apparaît essentiellement liée au parasitisme sur *A. pisum*, avec un faible impact sur le parasitisme des pucerons des céréales. Ces 1<sup>ers</sup> résultats doivent cependant être confirmés. En effet, le taux d'émergence des momies récoltées a été faible, du fait de mauvaises conditions de stockage. Enfin, une espèce spécialiste du puceron du pois, *Aphidius aedyi*, a également été identifiée.

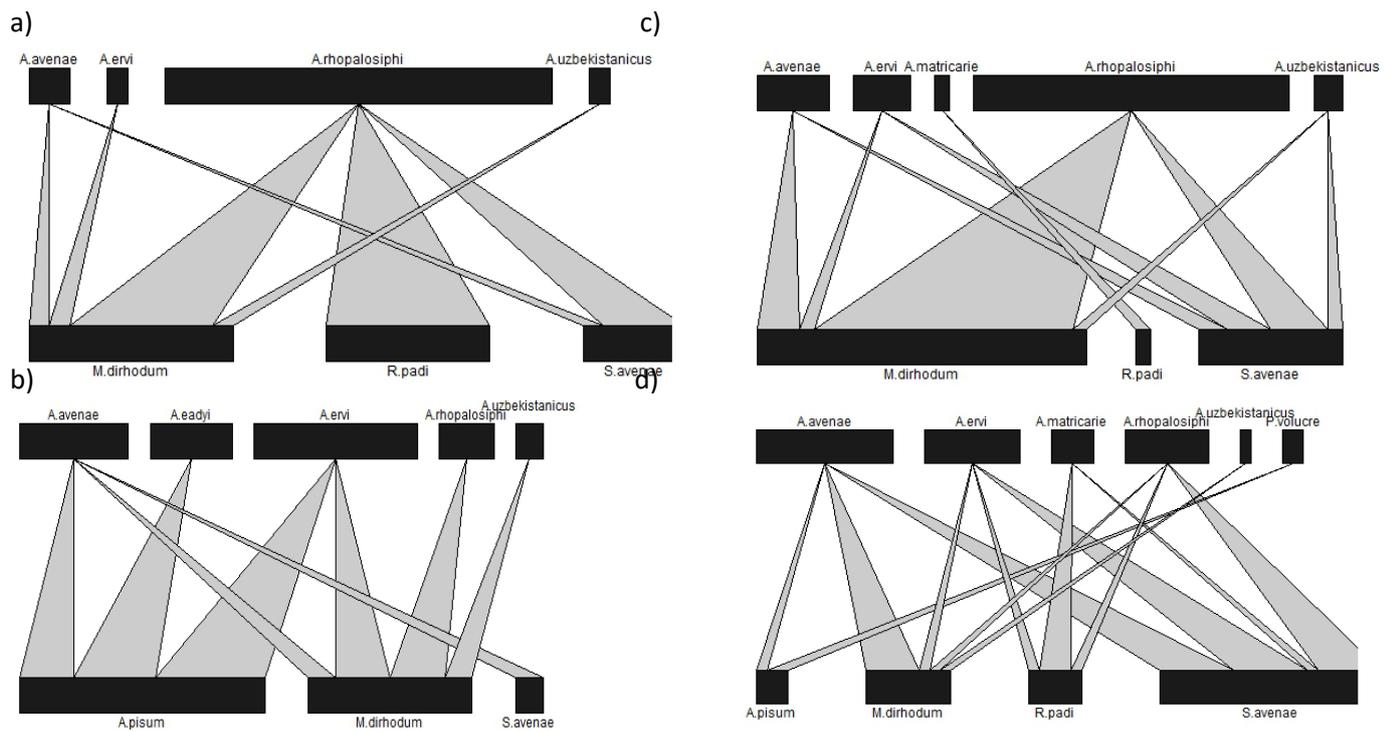


Figure 2 : réseaux trophiques pucerons (bas) – parasitoïdes (haut) en parcelles de Poacées pures a) parcelles INRA Le Rheu c) parcelles d'agriculteurs La Gacilly et en parcelles en mélange Poacées-Fabacées b) parcelles INRA Le Rheu d) parcelles d'agriculteurs La Gacilly

**Conclusion** : même si les espèces rencontrées dans les différentes sessions d'échantillonnage sont majoritairement de potentiels ravageurs de différentes cultures, les bandes fleuries semblent peu attractives pour les pucerons. La faible colonisation des plantes pourrait résulter de la dispersion de la ressource en plantes hôtes au sein du mélange. De plus, ces pucerons sont partiellement régulés par des parasitoïdes, dont certains pourraient jouer un rôle dans la régulation des pucerons sur les cultures adjacentes. Au vu des résultats obtenus, on peut donc faire l'hypothèse que les bandes fleuries diversifiées n'aggravent pas le risque de dégâts de pucerons dans les parcelles cultivées. En revanche, les mélanges moins diversifiés ou les couverts monospécifiques pourraient être plus attractifs et favoriser le maintien hivernal de certaines espèces polyphages, comme *M. persicae*. Le rapport bénéfices -risques de ces aménagements doit donc être précisé. Enfin, les cultures en mélange fournissent bien des hôtes supplémentaires pour les espèces de parasitoïdes les plus généralistes. Il reste à démontrer que ces hôtes ont un effet de renforcement sur le parasitisme des pucerons ravageurs ciblés, et non un effet de dilution sur les différentes ressources.

### Tâche 3 : Manipulation expérimentale des aménagements fleuris en parcelles agricoles conventionnelles et biologiques.

#### 1. Suivi des populations de ravageurs et de leurs ennemis naturels pendant 3 hivers :

Les principaux résultats de l'hiver 2015-2016 sur des champs de céréales à proximité immédiate de couverts de moutarde mettent en évidence un taux de parasitisme très élevé pendant toute la saison, autour de 60%. Par ailleurs, la proportion de pucerons parasités a été plus élevée à proximité des couverts de moutarde que dans le côté opposé du champ. Le taux de parasitisme a atteint 70% en bordure de la moutarde. Or comme il a été démontré dans la tâche 2 que la moutarde avait seulement un effet faible sur la performance des parasitoïdes, cette augmentation du taux de

parasitisme de 10% laisse penser que des bordures comportant des fleurs de meilleure qualité pourraient être très utiles. La plupart des champs étaient en agriculture conventionnelle cet hiver-là, les agriculteurs biologiques n'ayant pas de couverts hivernaux en grande majorité. Les résultats ont permis d'écrire une publication dans la revue *Agriculture, Ecosystems and Environment* (Damien et al. 2017).

Résultats des hivers 2016-2017 et 2017-2018 : Les suivis de décembre 2016 et 2017 ont permis de montrer que 3 espèces de pucerons arrivaient sur les pousses de céréales dès qu'elles mesuraient 5cm, et que certains de ces pucerons devaient arriver parasités, car toutes les espèces de parasitoïdes observées en hiver depuis 2010 en Bretagne ont été observées. Les pièges à insectes marcheurs installés dans les bandes fleuries, dans les champs à proximité des bandes fleuries, à l'autre extrémité du champ et dans la bordure herbeuse de l'autre côté du champ ainsi que les pièges à interception permettant de mesurer dans quel sens se faisait le flux d'insectes (de la bordure vers le champ et inversement) ont mis en évidence l'activité des arthropodes prédateurs. L'année 2016-2017, malgré un épisode de froid exceptionnel observé à partir de la fin décembre, et contrairement à ce qui est indiqué dans la littérature, nous avons observé 3 groupes d'insectes tout l'hiver (araignées, carabes et staphylins), tous prédateurs généralistes mais potentiellement prédateurs de pucerons. Les pucerons n'ont pas résisté au coup de froid de fin décembre et de la mi-janvier et ne sont réapparus qu'en mars/avril, alors même que les fleurs avaient gelé. Cependant, toute la saison, les insectes prédateurs ont été plus présents dans les bandes fleuries et dans les champs à proximité des bandes fleuries que du côté opposé. Même sans fleurs, les bandes fleuries présentaient une hauteur de végétation supérieure avant de geler, pouvant jouer un rôle sur le microclimat et présenter des ressources plus abondantes que ce qui peut exister dans le champ. Les résultats de l'hiver 2017-2018 ont globalement confirmé les observations de l'hiver précédent. Par ailleurs, aucune différence majeure n'a été mise en évidence entre les champs en agriculture conventionnelle et ceux en agriculture biologique.

## 2. Evaluation du taux de parasitisme par une méthode moléculaire

1055 pucerons collectés sur les différentes parcelles suivies ont été analysés. Seuls 75 se sont révélés parasités, soit 7% des individus analysés. Le taux de parasitisme "réel" ainsi obtenu ne diffère pas significativement du taux de parasitisme apparent (GLM, p.value=0,1122) (Figure 3). Le gain obtenu par cette méthode dans l'évaluation du taux de parasitisme ne paraît pas suffisant pour justifier de cette analyse supplémentaire. Cependant, le niveau de détection paraît très faible si on le compare à des études antérieures conduites à la même période sur pucerons de différentes cultures, dont des céréales, où 35% des individus vivants collectés étaient parasités (Derocles et al., 2014). Des problèmes techniques liés à la méthode d'extraction de l'ADN pourraient être à l'origine de cette faible détection. Ce résultat reste donc à confirmer.

## 3 - Impact des cultures en mélange sur le taux de parasitisme des pucerons des céréales

Bien que la présence de féverole et de pois au sein de la culture de céréales impacte la structure des communautés de pucerons et de parasitoïdes, en favorisant les Aphidiinae les plus généralistes, aucun impact n'a pu être mesuré ni sur l'abondance ni sur le taux de parasitisme des pucerons des céréales. Les différences observées ne sont pas significatives, sauf en début de saison où la colonisation des céréales par les pucerons est plus forte en culture pure (Figure 4). Les cultures en mélange pourraient être moins attractives pour les pucerons ailés, et les plantes hôtes plus difficiles à localiser au sein du mélange. L'absence d'effet observé sur le taux de parasitisme des pucerons doit cependant être modulée par le fait que les densités de pucerons observées en 2018 ont été particulièrement faibles, ne dépassant jamais 0,2 pucerons par plant.

## Tâche 4

### 4.1 Élaboration d'une méthodologie pour caractériser une diversité de ravageurs, leurs dégâts ainsi qu'une diversité d'organismes auxiliaires et l'intensité des régulations biologiques

Les deux types de pièges qui permettent de décrire au mieux la diversité des communautés d'auxiliaires sont le piège cornet et le filet fauchoir. Ces méthodes sont cependant celles qui demandent le plus de temps pour leur mise en œuvre, sur le terrain et au laboratoire. À l'inverse, les observations visuelles sont très peu chronophages mais sont peu adaptées à l'identification des insectes de petite taille. Ces observations sont également fortement dépendantes des conditions météorologiques lors de leur réalisation, tout comme l'utilisation du filet fauchoir. Concernant les pièges jaunes englués, leur utilisation est très simple et rapide, mais l'identification des insectes piégés est rendue très délicate par l'action de la glue. Pour la suite de l'expérimentation, l'utilisation du piège cornet a été retenue car c'est la seule méthode donnant une mesure intégratrice dans le temps de l'abondance et de l'activité des auxiliaires.

Pour caractériser non seulement la pression en ravageurs sur la culture, mais surtout leur régulation par les auxiliaires, nous avons retenu une méthode d'observation adaptable à la diversité des grandes cultures étudiées. Sachant que la mesure d'une abondance de ravageurs à une seule date renseigne très mal sur l'existence de régulations biologiques, cette méthode combine :

- une mesure du niveau d'abondance initiale du ravageur, lors de son arrivée dans la parcelle. Cet état initial permet de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale due aux effets paysagers par exemple ;
- des mesures d'abondances à des dates successives, permettant de calculer un taux d'accroissement du ravageur, ce taux étant plus susceptible de traduire l'existence d'une régulation ;
- à chaque observation des ravageurs sur la culture, observation systématique de tous les auxiliaires présents dans la végétation, représentant un « potentiel de régulation » ;
- lorsque cela est possible (pucerons, méligèthes, altises), détermination du taux de parasitisme des ravageurs.

La réflexion a été partagée avec des partenaires d'autres projets (par ex. CASDAR MUSCARI et ANR PEERLESS), ce qui a permis d'uniformiser les méthodes d'observation entre plusieurs projets en cours en lien avec les bandes fleuries. Dans le détail, les protocoles précis ont été adaptés selon les ravageurs étudiés, selon leur mobilité et la facilité de leur observation. Par exemple, des comptages visuels étaient les plus appropriés pour des ravageurs immobiles alors que l'utilisation d'un aspirateur était le plus efficace pour échantillonner les espèces se laissant tomber au sol dès que la végétation est remuée.

### 4.2 Quels sont les effets des aménagements fleuris sur la structure et le fonctionnement des communautés d'auxiliaires et de ravageurs à l'échelle de la rotation ? Participants : UMR Agronomie et UMR IGEPP

L'implantation des bandes fleuries s'est parfaitement déroulée. Nous avons pu ainsi obtenir des bandes contrastées pour leur composition botanique, vis-à-vis de la diversité des espèces présentes et des ressources apportées aux insectes. Les mélanges ont évolué durant les quatre années, avec une légère réduction du nombre d'espèces au cours du temps. Les bandes comprenant le plus faible nombre initial d'espèces (9) sont celles qui se sont appauvries le plus rapidement et étaient dominées essentiellement par des graminées à la fin de l'essai en 2017. Si les graminées peuvent apporter des sites de protection aux prédateurs épigés (carabes, épigées), elles fournissent très peu de ressources florales (pas de nectar notamment) aux insectes volants comme les syrphes et les parasitoïdes. En revanche, les bandes semées avec le plus grand nombre d'espèces (29) sont celles qui ont le mieux conservé leur diversité végétale au cours du temps (Figure 3).



Figure 3. Exemple de bandes fleuries riches en plantes à floraison précoce (en haut, avec gléchoma faux-lierre, pissenlit et barbarée) et à floraison estivale (en bas, avec centaurée scabieuse, tanaïs, chicorée sauvage, anthémis des teinturiers et carotte).

Dans les bandes fleuries, les quantités de syrphes (prédateurs aphidiphages) piégés sont corrélées à la quantité de plantes en fleurs dont le nectar leur est accessible. Mais dans la culture, compte-tenu des fortes capacités de dispersion des syrphes, les différences entre bandes s'estompent. L'effet des bandes sur les arthropodes marcheurs (carabes, araignées, staphylins...) n'a commencé à se manifester qu'à partir de la troisième année et il s'est fortement amplifié ensuite. Dans la bande fleurie en tant que telle, les quantités de carabes ont légèrement augmenté en quantité, mais leur diversité s'est plus fortement accrue. Dans la culture adjacente, les quantités de carabes sont passées d'environ 20 à plus de 100 carabes par piège entre 2014 et 2018. S'il a été difficile de mettre en évidence des flux de carabes depuis les bandes vers la culture, nous avons en revanche observé que le statut nutritionnel (ratio masse/taille, sur le même principe qu'un indicateur de masse corporelle) était plus élevé en face des bandes fleuries qu'en face des témoins. Dans notre essai, l'effet des bandes fleuries semble donc plus provenir d'un effet d'augmentation des ressources trophiques que d'un effet « refuge » des bandes fleuries. L'absence de travail du sol, d'insecticide et la

couverture quasi-permanente du sol ont probablement contribué à rendre la parcelle cultivée comme un habitat déjà très favorable aux arthropodes. Contrairement au cas des syrphes, nous n'avons pas observé de différenciation des communautés d'arthropodes épigés selon le type de mélange botanique, seule la bande témoin se distinguait fortement de toutes les autres bandes fleuries.

Les pucerons sont les insectes pour lesquels un effet immédiat des bandes fleuries a pu être mesuré dans la plupart des cas. Sur orge de printemps, pois de printemps et sur colza (pucerons verts en automne), une réduction de 30 à 75% des pucerons a été constatée en face des bandes fleuries par rapport aux témoins, essentiellement du fait d'un nombre plus élevé de prédateurs (syrphes, coccinelles etc.). Dans les cas des pucerons cendrés du colza, la quantité de pucerons présents en sortie hiver était négativement corrélée à la quantité et à la diversité de carabes, ce qui suggère un rôle de ces prédateurs sur les premiers pucerons colonisant la parcelle. Cependant, durant tout le printemps, les populations de pucerons ont cru de manière exponentielle sans que les auxiliaires présents sur le colza n'aient pu les réguler. Sur l'orge de printemps, nous avons également observé une réduction des larves de criocères en face des bandes fleuries comparées aux témoins, sans que l'origine de la régulation n'ait pu être identifiée (probablement par prédation).

Dans le cas coléoptères s'attaquant au colza et à la féverole, très peu étudiés, la régulation passe essentiellement par l'effet des micro-hyménoptères parasitoïdes. Sur colza, le taux de parasitisme des altises d'hiver, des charançons du bourgeon terminal et des méligèthes est plus élevé en face des bandes fleuries par rapport aux témoins. Par exemple, il passe ainsi de 8% à 19% pour les méligèthes et de 4 à 23% pour les altises. Plus que l'effet bande / témoin, le parasitisme dépend surtout de la quantité de plantes en fleurs fournissant du nectar aux parasitoïdes durant leur période de vol (en février et mars pour les parasitoïdes des altises et des charançons, en avril pour les parasitoïdes le méligèthes), avec de fortes relations entre la fourniture de ressources florales et le taux de parasitisme. Dans le cas des cécidomyies de siliques, le taux de parasitisme était globalement toujours très élevé (55%) sans aucun lien avec les bandes fleuries. Sur féverole, les dégâts causés aux semences par les bruches étaient plus faibles en face des bandes fleuries (54%) qu'en face des témoins (70%) (Figure 4). De plus, le taux de parasitisme est passé de 28% dans les témoins à près de 60% près de certaines bandes fleuries. Comme précédemment, ce parasitisme est fortement corrélé aux ressources florales présentes dans les bandes fleuries à la période de vol du parasitoïdes (en mai).

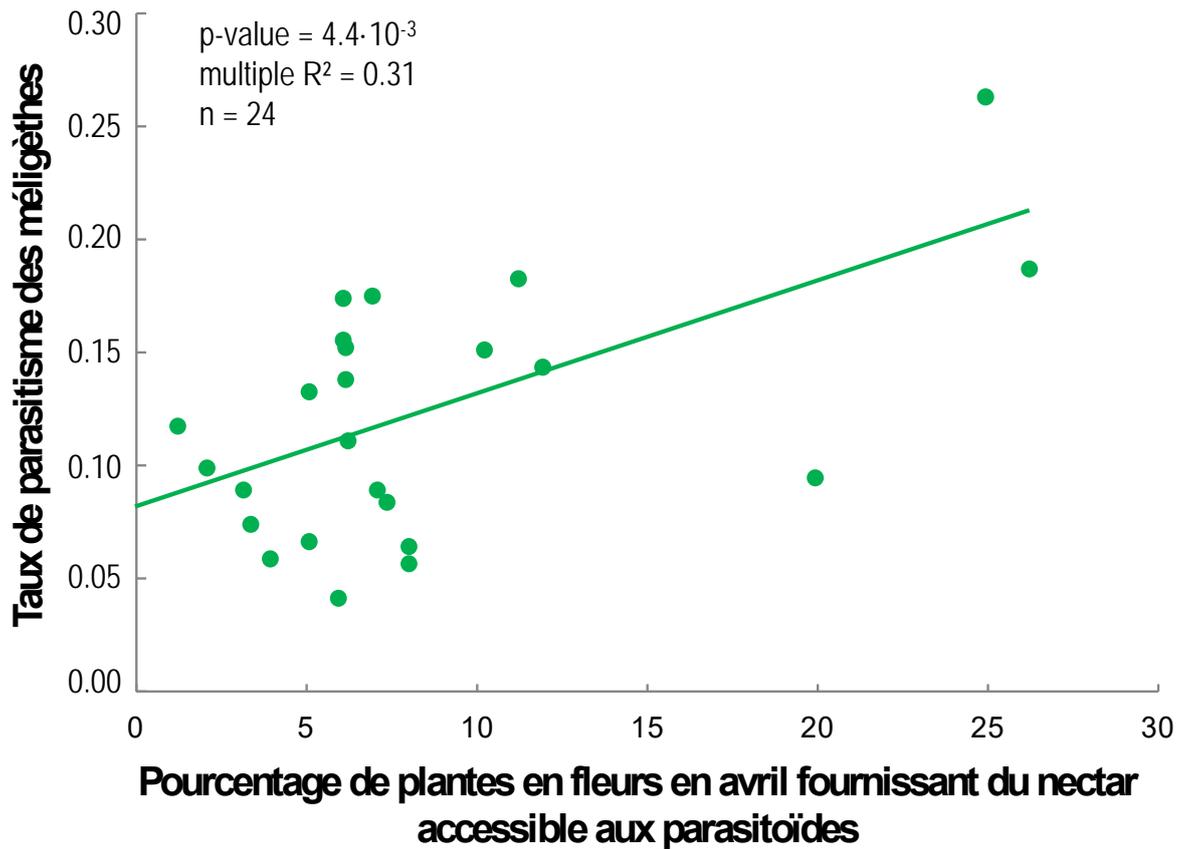


Figure 4. Effet de la quantité de ressources en nectar pour les parasitoïdes sur le taux de parasitisme des méligèthes du colza à 5m des bandes fleuries (à 20m, le taux de parasitisme est le même partout, à 11%).

#### Tâche 5 : Valorisation du projet. Responsable : C Le Lann.

Deux conférences grand public ont été réalisées dans le cadre de la fête de la science en octobre 2017 et du festival Pint of Science en mai 2018, respectivement. Deux articles de vulgarisation grand public ont été réalisés dans Science Ouest au début et à la fin du projet (<http://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/341/actualite/des-fleurs-contre-les-pesticides>; <https://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/366/actualite/des-pesticides-pas-toujours-utiles>), et un article destiné aux agriculteurs dans la revue Horizon. Maxime Damien (doctorant du projet) a été interviewé sur le plateau TV du village des sciences en octobre 2016 (<https://www.youtube.com/watch?v=saE9DgShHBs&feature=youtu.be/52m20s>). Plusieurs résultats ont également été présentés à l'occasion de différents colloques nationaux (Colloque des jeunes chercheurs du département Santé et Protection de l'Environnement de l'INRA, Toulouse, 29 juin 1 juillet 2016, Colloques des Entomophagistes, Lyon, 17-19 Mai 2017) et internationaux (Colloque SFE-BSE, 24-29 Octobre 2016, Marseille ; Entomology 2017, Denver, USA, 5 – 8 Nov 2017 ; 1<sup>st</sup> international congress in Biological control, Pékin, Chine, 5 – 8 May 2018). Des plaquettes de présentation et résultats du projet ont été produites à destination des agriculteurs. Un livret d'identification des pucerons et des parasitoïdes a été produit à destination de l'entreprise SA Pinault qui nous a aidés dans les relevés de terrain. Des contacts ont été pris avec l'entreprise Yves Rocher (service agronomie de La Gacilly) qui ont depuis permis le lancement avec l'Université de Rennes 1 d'un projet de thèse CIFRE dans la continuité du projet.

Les partenaires INRA (Grignon et IGEPP) ont obtenu un projet Activ'Biol (SMACH INRA) qui permet de poursuivre le projet en particulier dans la Région parisienne. Cécile Le Lann a obtenu un

projet dans le cadre du plan Ecophyto 2 (PlantSERV) qui permettra de tester les méthodes des bandes fleuries hivernales dans les régions des Pays de La Loire et de Bretagne avec en plus une évaluation des dégâts de jaunisse nanisante transmise par les pucerons des céréales et des rendements par télédétection.

Le réseau des agriculteurs participants s'est considérablement agrandi et nous avons mis en commun avec l'IGEPP les contacts des agriculteurs contactés dans les différents projets en Ille-et-Vilaine sur la ZA Armorique. Nous organisons maintenant deux fois par an, une fois dans le nord de l'Ille-et-Vilaine et une fois dans le sud un repas avec les agriculteurs avec des présentations des différents projets.

## Publications

Damien M, Le Lann C, Desneux N, Alford L, Al-Hassan D, Georges R, Van Baaren J. 2017. Change in plant phenology during winter increases pest control but not trophic link diversity. **Agriculture Ecosystems and Environment** 247: 418-425

Tougeron K, Damien M, Le Lann C, Brodeur J & van Baaren J. **2018**. Changes in host-parasitoid communities over the years in cereal crops of Western France: Does climate warming matters? Sous presse **Frontiers in Ecology and Evolution-Population and Evolutionary Dynamics**".

Maxime Damien, Joan Van Baaren, Nicolas Desneux, Romain Georges, Diab Al Hassan, Olivier Jambon, Aurélien Ridet, Cécile Le Lann. Can different semi-natural habitats near cereal crops sustain active ground predatory arthropods in winter? Soumis à **Biological Conservation**

Maxime Damien, Léna Barascou, Aurélien Ridet, Joan Van Baaren, Cécile Le Lann. Feeding or ovipositing: Do physiological state and flower type affect foraging decisions of parasitoids? Soumis à **Behavioral Ecology**.

Maxime Damien, Emma Jeavons, Cécile Le Lann, Diab Al-Hassan, Romain Georges, Olivier Jambon, Nicolas Desneux, Anne Le Ralec, Joan Van Baaren. Disentangling the benefits provided by flower strips to winter parasitoid communities. **En préparation**

Maxime Damien, Joan Van Baaren, Stéphanie Llopis, Nicolas Desneux, Cécile Le Lann. How does floral nectar quality affect resource allocation among traits in parasitoid wasps? **En relecture finale avant soumission**.

Nguyen LTH, Lavoit AV, Metay-Merrien C, Wajnberg E, Amiens-Desneux E, Desneux N. Bottom-up effects of water stress on the aphid parasitoid *Aphidius ervi* (Hymenoptera: Braconidae). *En preparation pour soumission à Entomologia Experimentalis et Applicata*

## Communications scientifiques

Maxime DAMIEN, Cécile LE LANN, Nicolas DESNEUX, Diab DEL-HASSAN, Romain GEORGES, Joan VAN BAAREN; Winter mustard covers around wheat crops increases parasitism of aphid pests. 8ème journées des doctorants du département SPE (INRA), Toulouse, 29 juin – 1 juillet 2016

Damien M, Le Lann C, Desneux N, Van Baaren J. Mustard covers around wheat crops: Increasing winter parasitism of aphid pests. **Sfécologie 2016. International conference on Ecological Sciences. 24-28 Octobre 2016. Marseille.**

Damien M., Le Lann C, Desneux N, Van Baaren J. Food patch quality effects on female parasitoids foraging behaviour. **Les Entomophagistes 18-20 mai 2017. Lyon, France.**

Damien M, Le Lann C, Al Hassan D, Jambon O, Georges R, Desneux N, Van Baaren J: Ground predators benefit more from semi-natural than natural habitats under harsh climatic conditions. **Entomology 2017. Denver 5-8 novembre. Colorado USA.**

Van Baaren J.\*, Damien M., Desneux N., Le Lann C. & Tougeron K., 2018. Are arthropods (aphids and their associated parasitoids and predators) from mild winter climates losing their winter diapause? **The First International Congress of Biological Control. Beijing, China 14-16 mai 2018.**

Damien M, Van Baaren J, Desneux N, Le Lann C. Global environmental change may benefit Conservation biological control in temperate-climate areas. **The First International Congress of Biological Control. Beijing, China 14-16 mai 2018.**

Damien M., Van Baaren J., Al Hassan D., Jambon O. , Georges R., Desneux N., Le Lann C. Is the winter season becoming favorable period for conservation biological control in wheat fields from temperate climatic areas? **Wheat 2018 seminar, 6-7 December 2018, Prague, Czech Republic.**

Damien M., Barascou L., Ridet A., Van Baaren J. and Le Lann C. Feeding or ovipositing: Do physiological state and flower type affect foraging decisions of parasitoids? **Zoological days, 7-8 February 2019, Brno, Czech Republic.**

Gardarin A., D. Le Floch et M. Valantin-Morison. 2018. The effect of contrasted perennial flower strips on the parasitism of oilseed rape and faba bean herbivores. **Colloque de l'European Society of Agronomy, août 2018, Genève.**

Gardarin A., D. Le Floch et M. Valantin-Morison. 2018. The effect of contrasted perennial flower strips on the parasitism of oilseed rape and faba bean herbivores. **SfÉcologie 2018, octobre 2018, Rennes.**

Van Baaren J. Trophic webs of cereal aphids and their parasitoids and overwintering strategies around the world. Lincoln University. New Zealand. August 23 2017

Van Baaren J. Biodiversity conservation to improve control of crop pest insects in the context of climate change. University of Talca, Chile. August 16 2016

Impact of climate conditions on the diversity and function of a guild of aphid parasitoids. August 22 2016. University of Talca, Chile.

#### *Vulgarisation scientifique*

Science ouest, N° 341, Avril 2016, *Des fleurs contre les pesticides*. <http://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/341/actualite/des-fleurs-contre-les-pesticides>

Science ouest, N°366, Novembre 2018, *Des pesticides pas toujours utiles*. <https://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/366/actualite/des-pesticides-pas-toujours-utiles>

Horizon, N°130, Avril/Mai 2016, *Les parasitoïdes, des alliés actifs en hiver à favoriser (p19-23)*.

Manipulation de la biodiversité floristique pour renforcer le contrôle biologique des insectes nuisibles. Joan van Baaren. Conférence grand public dans le cadre du festival des sciences. Vézin-Le-Coquet. 6 octobre 2016.

Flower power : vers une agriculture plus écologique ! Cécile Le Lann. Conférence grand public dans le cadre du festival Pint of science. Rennes. 16 mai 2018.

- **Discussion et conclusion**

Dans les systèmes de grandes cultures, les rotations conduisent à une mosaïque agricole dominée d'octobre à mars par des cultures de blé d'hiver et des couverts hivernaux composés de plantes utilisées pour l'enrichissement des sols en azote et limiter les phénomènes d'érosion, sinon par simple obligation légale. L'augmentation des températures moyennes durant cette période a favorisé la floraison de ces dernières, mais également l'activité et la reproduction des pucerons nuisibles pour les cultures (Simon and Peccoud, 2018), tout comme l'activité et la diversité en parasitoïdes qui constituent leurs principaux agents de bio-contrôle (Andrade et al., 2016, Tougeron et al. 2018). La situation actuelle d'autres catégories d'ennemis naturels tels que les prédateurs généralistes de la faune du sol restait cependant inconnue. En conséquence, l'ouest de la France, sous l'influence du climat tempéré océanique, peut être ainsi considéré comme une zone d'étude modèle pour aborder ces problématiques de la lutte biologique par conservation durant la saison hivernale face aux changements climatiques. En effet, ces hivers doux vont probablement devenir plus fréquents vers le nord et l'est sous l'influence du réchauffement climatique et atteindre d'autres régions de grandes cultures céréalières comme la Beauce, la Picardie et la Wallonie. Au cours de ce projet FLEUR, les travaux ont dans un premier temps porté sur l'étude des bénéfiques de la diversité floristique d'espèces cultivées sur la fitness des insectes parasitoïdes déjà identifiés comme actifs durant cette saison. Dans un deuxième temps, les travaux ont cherché à identifier comment la présence de plantes cultivées en fleurs dans les couverts hivernaux ou sous forme de « bandes fleuries » en bordure de champs cultivés pouvait permettre de favoriser une diversité de parasitoïdes et prédateurs, régulant non seulement les pucerons mais aussi l'ensemble des ravageurs des cultures présents à l'échelle de la rotation.

Les plantes à fleurs nectarifères sont régulièrement utilisées en lutte biologique par conservation pour promouvoir les insectes consommateurs de nectar tels que les insectes parasitoïdes (Arnó et al., 2018; Balzan, 2017; Tschumi et al., 2016a). Ces plantes, en leur procurant de la ressource nutritive, permettent de favoriser les dynamiques de populations de ces insectes et la pression qu'ils exercent sur leurs hôtes, ravageurs des cultures. Le choix des espèces de plantes à fleurs repose sur un certain nombre d'études empiriques ayant mis en évidence des effets bénéfiques du nectar de fleurs de ces espèces sur la survie (Russell, 2015) ou la reproduction (da Silva Camilo et al., 2016; Irvin and Hoddle, 2015; Jamont et al., 2014) des parasitoïdes. Cependant, bien que certaines études aient pu mettre en évidence des augmentations du taux de parasitisme d'organismes nuisibles par ces méthodes d'aménagements (Balzan and Moonen, 2014; Tschumi et al., 2016b), l'efficacité semble relative entre les systèmes d'interactions concernés, les conditions environnementales et l'échelle spatiale considérée (Heimpel and Mills, 2017). Afin d'accroître l'efficacité de cette méthode, une possibilité est donc d'établir des systèmes d'interactions plus favorables dans le temps par la sélection d'espèces de plantes à fleurs bénéfiques pour la fitness des ennemis naturels, permettant de promouvoir la dynamique de populations des arthropodes ciblés dans un cadre fonctionnel (Gardarin et al., 2018).

La fitness d'un organisme est contrainte par des compromis évolutifs du fait de la compétition entre plusieurs fonctions, comme la survie ou la reproduction et des traits d'histoires de vie qui leur sont associés (de Jong and van Noordwijk, 1992; Williams, 2008). En conséquence, les organismes présentent des stratégies d'histoire de vie maximisant leur fitness. Ces dernières sont dépendantes de l'état interne de l'organisme (Morano et al., 2013), mais également de leur environnement (Killen et al., 2013; Stienen et al., 2015). Chez les parasitoïdes, il existe plusieurs compromis dans l'acquisition et l'allocation entre traits de vie de la ressource nutritive présente dans leur environnement. L'objectif de la première partie de la thèse de Maxime Damien était donc d'étudier l'effet de la qualité du nectar des espèces de plantes à fleurs cultivées sur la plasticité de l'allocation de l'énergie acquise par la nutrition entre les traits chez les insectes parasitoïdes. Ces études ont été réalisées en utilisant l'espèce *Aphidius rhopalosiphi* comme espèce modèle de parasitoïde, notamment du fait de son abondance dans les communautés hivernales de parasitoïdes dans la région d'étude (Andrade et al., 2016).

Dans cette première partie, il a pu être démontré que les connaissances sur la prise de décisions dans l'acquisition de ressources chez les insectes parasitoïdes sont encore incomplètes quant à son déterminisme, particulièrement en ce qui concerne la ressource nutritive et le compromis entre fitness immédiate et fitness future. L'effet du statut d'accouplement mis en évidence pour les femelles d'*A. rhopalosiphi* (Damien et al. Soumis à Behavioural Ecology) nécessite notamment d'être testé chez d'autres espèces pour confirmer son éventuelle intégration dans les modèles prédictifs relatifs à l'approvisionnement optimal en ressources. De plus, les tests effectués avec les espèces de fleurs aux caractéristiques fonctionnelles différentes laissent supposer que pour des individus naïfs, la prise de décisions se base sur leurs préférences innées, indépendamment des bénéfices énergétiques de la ressource disponible. Bien que conforme aux attendus du modèle théorique de Tenhumberg et al., (2006), des études complémentaires sur les effets de la qualité de la ressource sont nécessaires, notamment en tenant compte des capacités d'apprentissage par association. En effet celles-ci pourraient permettre une compréhension plus fine du compromis entre fitness immédiate et future et constitueraient un apport intéressant aux champs théoriques et appliqués de la théorie de l'approvisionnement optimal en ressource. Les travaux sur la consommation de nectar par les femelles d'*A. rhopalosiphi* confirment que tous les nectars ne se valent pas pour favoriser la fitness et diminuer le coût des compromis physiologique des insectes parasitoïdes. Les nectars dominés en sucroses sont les plus adaptés à favoriser la fitness des parasitoïdes. Cependant la plasticité observée des syndromes de traits liés aux œufs en fonction des différents régimes alimentaires pour une espèce de parasitoïde koinobionte demande à être davantage investiguée. En effet, ce processus pourrait notamment avoir des répercussions sur les compétitions intra-guildes en conditions naturelles et donc sur l'écologie de ces communautés.

Ces résultats dans leur ensemble appuient le fait que la sélection d'espèces de plantes à fleurs pour les méthodes de lutte biologique par conservation ciblant les insectes parasitoïdes nécessite avant tout une compréhension fine de leur relation fonctionnelle. Ils tendent également à justifier que le choix d'un « niveau de diversité minimal » dans la composition des mélanges afin de pouvoir construire un système d'interactions optimal et dynamique entre ces différents niveaux trophiques. Du fait des effets contrastés entre espèces de plantes, une approche empirique plus complexe apparaît nécessaire afin de pouvoir étudier les effets associatifs entre les espèces de plantes à fleurs sur la fitness des insectes parasitoïdes.

La seconde partie de la thèse de Maxime Damien a consisté en un suivi des populations de ravageurs et d'ennemis naturels pendant 3 hivers, en champs en agriculture conventionnelle et biologique. Le premier bénéfice attendu dans la mise en place d'aménagements fonctionnels favorables à la lutte biologique par conservation est que la diversité en plantes choisies puisse bénéficier aux ennemis naturels des ravageurs ciblés, sans attirer d'autres espèces de ravageurs potentiellement nuisibles pour la culture étudiée ou pour les cultures voisines. Les échantillonnages de pucerons et les piégeages de limaces au sein des bandes fleuries ont montré que la mise en place de ces habitats n'induisait pas le recrutement d'organismes nuisibles pour les cultures ciblées de blé d'hiver, ni pour les cultures voisines. De plus, parmi les pucerons attirés par les bandes fleuries, le puceron *Myzus persicae* constitue un hôte alternatif de certaines espèces de parasitoïdes présentes comme *Aphidus matricariae* (Krespi, 1990; Kröber and Carl, 1991). De la même façon, l'hypothèse est que ces plantes nectarifères procurent de la ressource nutritive aux parasitoïdes favorisant ainsi leur fitness. Des études ont démontré que les parasitoïdes consommaient de la ressource sucrée en conditions naturelles lorsque des aménagements fleuris étaient mis en place (Lavandero et al., 2005; Winkler et al., 2009). Cependant, cette possibilité en conditions hivernales restait à être mise en évidence. Les tests antrones effectués sur des femelles parasitoïdes ayant eu accès à des fleurs qui se sont développées en conditions hivernales tendent à montrer que les individus peuvent bénéficier d'un apport nutritif augmentant leurs réserves énergétiques. Il semblerait donc que les conditions hivernales ne soient pas un facteur limitant à la production de nectar et à leur consommation par les parasitoïdes, au moins pour certaines espèces de fleurs comme le sarrasin, la moutarde et le bleuet,

mais comme ce n'est pas le cas pour les fèveoles, ce facteur reste à vérifier pour toutes les fleurs qui pourraient être candidates.

Le second bénéfice de la mise en place de ces aménagements est de favoriser la survie des prédateurs de la faune du sol actifs durant cette saison. L'hypothèse que les caractéristiques de la végétation et notamment sa taille et son recouvrement procurent un microclimat plus favorable à la survie des individus hibernant a d'ailleurs largement été avancée dans la littérature (Collins et al., 2003; Frank and Reichhart, 2004; Holland et al., 2009). Cette hypothèse a été vérifiée par l'une des rares études empirique (Luff, 1966), qui a mis en évidence qu'une augmentation de 15 cm de la taille de la végétation augmentait la survie en conditions hivernales de deux espèces de coléoptères *Stenus clavicornis* (Coléoptères, Staphylinidae) et *Dromius melanocephalus* (Coléoptères, Carabidae). Durant l'hiver 2017-2018, nos mesures des conditions microclimatiques au sein des cultures et des habitats semi-naturels ont permis de mettre en évidence que les températures minimales étaient plus élevées dans les bandes fleuries que dans la culture et à la végétation herbeuse spontanée, confirmant pour la première fois l'hypothèse de microclimats plus favorables dans les végétations hautes (Damien et al. Soumis). Cette différence de microclimat explique ainsi les activités plus importantes de coléoptères et d'araignées observées pendant l'hiver 2016-2017 au sein des bandes fleuries par rapport à la culture et aux bandes herbeuses spontanées. A l'inverse, durant l'hiver 2017-2018 où les températures étaient plus douces, les activités mesurées montrent que ces organismes peuvent rester actifs au sein de la culture, et ce même plus qu'au sein des habitats semi-naturels. La mise en place de bandes fleuries aux espèces hautes et couvrantes peut procurer les bénéfices attendus par ce type d'aménagements de la même façon que ce qui est observé pendant les saisons printemps et été (Damien et al. Soumis à Biol Conserv).

La complexification du système pucerons-parasitoïdes depuis les dix dernières années suite à l'arrêt d'entrée en diapause d'un nombre croissant d'espèces, l'activité mise en évidence de la faune prédatrice du sol et la floraison des couverts fleuris, sont autant d'éléments qui traduisent des changements de phénologie à chaque niveau de la chaîne trophique dans les grandes cultures céréalières de l'ouest de la France pendant la saison hivernale. L'ensemble des résultats présentés tendent à démontrer que cela se traduit également par la mise en place de systèmes d'interactions pouvant être favorables aux méthodes de lutte biologique par conservation. En effet, que ce soit par la mise en place de mélanges d'espèces plus favorables aux parasitoïdes dans les couverts hivernaux, ou par des aménagements locaux et favorables à la faune du sol, les interactions entre les niveaux trophiques s'inscrivent dans la continuité des processus observés durant les saisons printemps-été. Dans ce contexte, il est donc possible d'envisager des méthodes continues qui puissent permettre de restaurer la stabilité et la résilience des réseaux trophiques afin de limiter les populations d'organismes nuisibles.

Cependant, ces résultats mettent également en avant un certain nombre de challenges méthodologiques et théoriques. En effet, les densités hivernales très faibles permettent une caractérisation exhaustive de la communauté pucerons-parasitoïdes ainsi qu'une quantification précise de la pression exercée par les parasitoïdes sur les pucerons, alors qu'aucune méthode fiable ne permet la quantification de la pression exercée par les prédateurs généralistes de la faune du sol. Ce problème méthodologique ne permet pas de quantifier les services rendus par les différentes guildes et d'évaluer l'efficacité relative de ces dernières quant à la régulation des populations de pucerons, ni des variations en réponse aux différents aménagements fonctionnels. Cette situation pose également un certain nombre de questions théoriques et fonctionnelles sur l'écologie des communautés. Les faibles densités actuelles posent également la question des interactions intra et inter-guildes pour la ressource. En effet, si les populations de consommateurs primaires et secondaires semblent favorisées par l'augmentation des températures, la saison hivernale constitue toujours une période où les ressources restent limitées. Dans ce contexte, l'augmentation de la diversité spécifique dans les différentes guildes résulte-elle en une meilleure redondance fonctionnelle ou à l'inverse favorise-t-elle la compétition entre les individus et les espèces ? Ce sont des questions et des enjeux qu'il est nécessaire de considérer afin de pouvoir mieux prédire et

anticiper l'évolution des systèmes d'interactions dans un contexte de développement durable des paysages agricoles.

En effet, la seconde partie de la thèse a permis de montrer que la saison hivernale, actuellement la plus affectée par les changements climatiques dans les régions au climat tempéré, représente maintenant une période propice à la mise en place de méthodes de lutte biologique par conservation, permettant ainsi de pouvoir envisager les processus de contrôle biologique par la diversité végétale tout au long de l'année. Ce résultat est une première dans le contexte de la lutte biologique par conservation principalement concentrée jusqu'à maintenant sur les saisons de végétation. Nos résultats démontrent que la sélection des espèces végétales pour la lutte biologique par conservation doit également tenir compte des variations saisonnières (par exemple dans la sécrétion de nectar) en adaptant les espèces et les mélanges identifiés comme bénéfiques pour les ennemis naturels selon leur phénologie, et ce afin de pouvoir maintenir constant les processus écologiques dans le temps. De la même manière, des études sur la dynamique de populations entre la saison hivernale et la saison de végétation sont nécessaires à tous les niveaux de la chaîne trophique. En effet, les travaux conduits ont permis de mettre en évidence que la faune du sol et les prédateurs généralistes qui la composent ne bénéficient pas uniquement des aménagements pour passer la saison hivernale sous forme quiescente ou en diapause, mais que ces derniers peuvent maintenant exploiter activement les aménagements fonctionnels mis en place. Ceci implique donc là encore une sélection et une disposition adaptée de la diversité végétale utilisée dans les méthodes de cultures ou de lutte biologique par conservation. Les résultats obtenus durant ce projet se sont également concentrés à l'échelle des parcelles. Pourtant, nos résultats montrent que les différences entre cultures conventionnelles et biologiques semblent faibles et auquel cas propres à certains taxons dans un contexte donné. Il serait donc intéressant de pouvoir évaluer les bénéfices de la diversité végétale cultivée à l'échelle des paysages agricoles. En effet, la présence des couverts dans la mosaïque pourrait avoir des bénéfices non seulement à l'échelle des parcelles voisines, mais du fait de la capacité de dispersion des parasitoïdes par exemple, à l'échelle plus large du paysage.

La démarche d'apport de ressources florales pour favoriser le parasitisme des pucerons des céréales s'applique au parasitisme des insectes présents sur d'autres cultures, notamment les coléoptères du colza et des céréales, pourvu que leur composition florale soit adaptée. Compte-tenu de la diversité des périodes de vol des espèces de parasitoïdes concernées, nous avons testé à Grignon des bandes fleuries pérennes de composition botanique contrastées. D'une part, nous avons montré que la diversité des périodes de floraison permettait de fournir des ressources florales accessibles aux parasitoïdes durant toute l'année (dès février), avec un effet bénéfique sur le taux de parasitisme des ravageurs. Ces ressources florales sont également bénéfiques aux syrphes (prédateurs de pucerons), dont nous avons observé la contribution à la régulation des pucerons sur céréales et cultures de légumineuses. D'autre part, nous montrons que les mélanges initialement les plus diversifiés (près de 30 espèces) sont ceux qui restent diversifiés sur le long terme. Enfin, ces bandes pérennes fournissent des habitats stables aux prédateurs généralistes épigés (carabes, staphylins, araignées) leur permettant de coloniser en grand nombre la culture adjacente. Si la régulation des pucerons est souvent forte et immédiate, les bandes fleuries n'ont qu'un effet partiel en augmentant le parasitisme des ravageurs de quelques dizaines et pourcent. Leur insertion doit donc être complétée avec la mise en œuvre de systèmes de culture favorables aux régulations des insectes et avec des démarches à l'échelle territoriale afin de démultiplier leurs bénéfices.

L'ensemble de ces résultats permet de pouvoir considérer la région d'étude comme un laboratoire expérimental face à ces problématiques et devrait pouvoir permettre d'anticiper le développement de ces méthodes à une plus large échelle géographique. Par exemple, les études conduites récemment dans le cadre du projet Woodnet (Biodiversa) ont pu mettre en évidence des variations le long du gradient Ouest-Est, comme des décalages dans les pics des populations de pucerons (Rapport de Léna Barascou, M2), avec en Bretagne un pic en mai (faible), alors qu'en

Picardie et Belgique, le pic de pucerons se produit en juin et est beaucoup plus abondant. Ceci pourrait alors conduire à moduler les périodes d'implantation des mélanges fleuris ou la sélection d'espèces différentes selon des fonctions procurées identiques mais avec des phénologies appropriées aux conditions environnementales propres aux régions situées le long de ce gradient. De la même manière, le service de contrôle biologique par les guildes de parasitoïdes est plus important à l'ouest de ce gradient (Rapport de Léna Barascou, M2). Les phénomènes de pullulations printanières observés depuis 30 ans dans l'ouest de la France ont ainsi diminué et ne sont plus observés depuis le début des années 2010. A l'inverse, des phénomènes de pullulations se poursuivent dans les cultures céréalières d'Europe centrale comme en République Tchèque (Saska. P, pers comm). Il apparaît alors intéressant et nécessaire de comparer l'ensemble des systèmes d'interactions trophiques hivernaux le long de ce gradient afin de pouvoir identifier la diversité végétale et floristique, ainsi que son aménagement, qui favoriserait le service de contrôle biologique précoce des populations de ravageurs et permettrait de limiter ces épisodes de pullulations face aux modifications environnementales futures.

- **Références bibliographiques**

- Al Dobai S., Reitz S., Sivinski J. 2012. [Tachinidae \(Diptera\) associated with flowering plants: Estimating floral attractiveness](#). *Biol. Contr.* 61: 230-239.
- Andrade T. 2013 Evolution spatiotemporelle de la diversité et du fonctionnement d'une guildes de parasitoïdes. Thèse de doctorat. Université Rennes1.
- Barari H., Cook S.M., Clark S.J., Williams I.H. 2005. Effect of a turnip rape (*Brassica rapa*) trap crop on stem-mining pests and their parasitoids in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *BioControl* 50: 69-86.
- Bompard A., Jaworski C., Bearez P., Desneux N. 2013. Sharing a predator: can an invasive alien pest affect the predation on a local pest? *Popul. Ecol.* 55: 433-440.
- Brewer M.J., Elliot N.C. 2004. Biological control of cereal aphids in North America and mediating effects of host plant and habitat manipulations. *Annu. Rev. Entomol.* 49: 219-242.
- Brown M.W., Mathews C.R., Krawczyk G. 2010. Extrafloral nectar in an apple ecosystem to enhance biological control. *J. Econ. Entomol.* 103: 1657-1664.
- Castagneyrol B, Giffard B, Péré P. 2013. Plant apparency, an overlooked driver of associational resistance to insect herbivory. *J. Ecol.* 101: 418-429.
- Cook S.M., Smart L.E., Martin J.L., Murray D.A., Watts N.P., Williams I.H. 2006. Exploitation of Host Plant Preferences in Pest Management Strategies for Oilseed Rape (*Brassica napus*). *Entomol. Exp. Applic.* 119: 221-229.
- Decourtye A., Mader E., Desneux N. 2010. Landscape scale enhancement of floral resources for honey bees in agro-ecosystems. *Apidologie* 41: 264-277.
- Dedryver C.A., Le Ralec A., Fabre F. 2010. The conflicting relationships between aphids and men : A review of aphid damage and control strategies. *C. R. Biol.* 333, 539-553.
- Derocles S.A., Plantegenest M., Simon J.C., Taberlet P., Le Ralec A. 2012. A universal method for the detection and identification of Aphidiinae parasitoids within their aphid hosts. *Mol. Ecol. Resour.* 12: 634-645.
- Eilenberg, J., et al. 2001. [Suggestions for unifying the terminology in biological control](#). *BioControl* 46, 387-400.
- Frère I., Fabry J., Hance T. 2007. [Apparent competition or apparent mutualism? An analysis of the influence of rose bush strip management on aphid population in wheat field](#). *J. Appl. Entomol.* 131: 275-283.

- Haenke S., Scheid B., Schaefer M., Tschardt T., Thies C. 2009. [Increasing syrphid fly diversity and density in sown flower strips within simple vs. complex landscapes](#). *J. Appl. Ecol.* 46: 1106-1114.
- Hance T., van Baaren J., Vernon P., Boivin G. 2007. Impact of temperature extremes on parasitoids in a climate change perspective. *Annu. Rev. Entomol.* 52: 107-126.
- Hausammann A. 1996. Strip-management in rape crop: is winter rape endangered by negative impacts of sown weed strips? *J. Appl. Entom.* 120: 505-512.
- Jourdheuil P. 1960. Influence de quelques facteurs écologiques sur les fluctuations de population d'une biocénose parasitaire. Etude relative à quelques Hyménoptères parasites de divers Coléoptères inféodés aux Crucifères. *Ann. Epiphyties* 11: 445-660.
- Le Lann C., Wardziak T., van Baaren J., van Alphen J.J.M. 2011. Plasticity in metabolic rates and life history traits affects foraging behaviour in a parasitic wasp. *Funct. Ecol.* 25: 641-651.
- Le Ralec A., Anselme C., Outreman Y., Poirié M., van Baaren J., Le Lann C., van Alphen J.J.M. 2010. Evolutionary ecology of the interactions between aphids and their parasitoids. *C. R. Biol.* 333: 554-565.
- Lethmayer C., Nentwig W., Frank T. 1997. Effects of weed strips on the occurrence of noxious coleopteran species (Nitidulidae, Chrysomelidae, Curculionidae). *Z. Pflanzenkr. Pflanzenschutz.* 104: 75-92.
- Martin E.A., Reineking B., Seo B., Steffan Dewenter I. 2013. Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 110: 5534-5539.
- Meynard J.M., Girardin P. 1991. Produire autrement. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* 15: 1-19. <http://www.inra.fr/dpenv/meynac15.htm>.
- Meynard J.M., Doré T., Lucas P. 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *C. R. Biol.* 326: 37-46.
- Miyashita T, Chishiki Y, Takagi SR. 2012. *Popul. Ecol.* 54: 573-581.
- Mulder C.P.H., Uliassi D.D., Doak D.F. 2011. Physical stress and diversity-productivity relationships: The role of positive interactions. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 98: 6704-6708.
- Naeem S. 1998. Species redundancy and ecosystem reliability. *Conserv. Biol.* 12: 39-45.
- Nilsson C. 1994. Pollen Beetle (*Meligethes aeneus* spp.) in oilseed rape crops (*Brassica napus* L.): Biological interactions and crop losses. Dissertation. Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Nilsson C. 2010. Impact of soil tillage on parasitoids of oilseed rape pests. In: Williams I. H. (Ed.), *Biocontrol-Based Integrated Management Of Oilseed Rape Pests*. Springer, London. pp. 45-76.
- Obrycki JJ, Harwood JD, Kring TJ, O'Neil RJ. 2009. *BioControl.* 51: 244-254.
- Parolin P., Bresch C., Poncet C., Desneux N. 2012. Functional characteristics of secondary plants for increased pest management. *Int. J. Pest Manag.* 58: 369-377.
- Plantegenest et al 2001. M. Plantegenest, J.S. Pierre, C.A. Dedryver, P. Kindlman, Assessment of the relative impact of different natural enemies on population dynamics of the grain aphid *Sitobion avenae* in the field, *Ecol. Entomol.* 404-410.
- Ragsdale DW, Landis DA, Brodeur J, Heimpel GE, Desneux N. 2011. *Annu. Rev. Entomol.* 56: 375-399.

- Raymond L, Plantegenest M, Gauffre B, Sarthou JP, Ladet S, Vialatte A. 2014. Agric. Ecosyst. Environ. 185: 99-105.
- Rusch A., Valantin-Morison M., Sarthou J-P., Roger-Estrade J. 2011. Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landsc. Ecol.* 26: 473-486.
- Steudel B., Hector A., Friedl T., Löffke C., Lorenz M., Wesche M., Kessler M. 2012. Biodiversity effects on ecosystem functioning change along environmental stress gradients. *Ecol. Lett.* 15: 1397-1405.
- Sarthou JP 2009 Le piège cornet unidirectionnel, nouveau piège entomologique d'interception. *L'entomologiste* 65:107-108.
- Symondson WOC, Sunderland KD, Greenstone MH. 2002. *Annu. Rev. Entomol.* 47: 561–594.
- Thies C., Steffan-Dewenter I., Tscharrntke T. 2003. Effects of landscape context on herbivory and parasitism at different spatial scales. *Oikos* 101: 18-25.
- Tscharrntke T., Klein A.M., Kruess A., Steffan-Dewenter I., Thies C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity- ecosystem service management. *Ecol. Lett.* 8: 857-874.
- Ulber B., Williams I.H., Klukowski Z., Luik A., Nilsson C. 2010. Parasitoids of oilseed rape pests in Europe: Key species for conservation biocontrol. In: Williams I.H. (Ed.), *Biocontrol-Based Integrated Management Of Oilseed Rape Pests*. Springer, London. pp. 45-76.
- Valantin-Morison M., Meynard J.M., Doré T. 2007. Crop management and environment effects on insects in organic winter oil seed rape (WOSR) in France. *Crop Protect.* 26: 1108-1120.
- Wäckers F, van Rijn PCJ 2012. Pick and mix: selecting flowering plants to meet the requirements of target biological control insects. In: *Biodiversity and Insect Pests: Key Issues for Sustainable Management*, First Edition. Edited by Geoff M. Gurr, Steve D. Wratten, William E. Snyder, Donna M.Y. Read. PP139-145.
- Wiescher P.T., Pearce-Duvet J.M.C., Feener D.H. 2012. Assembling an ant community: Species functional traits reflect environmental filtering. *Oecologia* 169: 1063-1074.
- Wratten S.D., Gillespie M., Decourtye A., Mader E., Desneux N. 2012. Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services. *Agric. Ecosyst. Environ.* 159: 112-122.

#### 4. Contribution au plan Ecophyto (et à l'agroécologie)

- Ce qui a été effectivement produit et transféré (ex : un outil proposé avec un guide d'utilisation et ayant fait l'objet de formation avec des utilisateurs)

Ce qui a été produit est un mélange fleuri composé de trois espèces de plantes non coûteuses, non salissantes, qui n'attirent pas de ravageurs supplémentaires, qui sont utilisées par des hôtes alternatifs permettant aux populations de parasitoïdes de se développer, qui fleurissent en hiver s'il ne gèle pas (produisant ainsi du nectar utilisable par les parasitoïdes), qui sont attractives pour les parasitoïdes par la couleur dominante jaune de la moutarde et qui créent à proximité de la culture un refuge microclimatique favorable aux arthropodes prédateurs (carabes, staphylins et araignées). En agriculture conventionnelle, ce mélange annuel peut s'implanter dans les couverts hivernaux que les agriculteurs mettent en place entre septembre et mars, aux endroits où ils planteront du maïs au printemps.

Les résultats ont été expliqués aux agriculteurs qui ont participé aux expériences.

Il manquerait maintenant une utilisation à grande échelle et une production en masse du mélange à commercialiser, ce qui n'a pas pu être réalisé dans le cadre du projet (ce n'était pas l'un des objectifs).

- Les sorties identifiées, produites à l'état de prototypes ayant fait l'objet de discussion avec des utilisateurs potentiels

Le mélange annuel décrit ci-dessus et proposé en Bretagne correspond à cette définition de prototype.

Les espèces étudiées dans les différents mélanges pérennes à Grignon ont servi de base à l'élaboration d'un mélange pérenne unique. Ce dernier a été discuté avec différents partenaires de la R&D et a été implanté dans un réseau de 25 agriculteurs dans les régions Centre et Île-de-France. Ce mélange a également été implanté dans de nombreux essais portés par des institut techniques (ex. FNAMS, Terre Inovia) et dans des unités expérimentales de l'INRA (Dijon et Bourges).

- Les sorties projetées ou envisageables en indiquant comment une finalisation pourrait intervenir

Une finalisation pourrait intervenir si d'une part une société produisait le mélange et le commercialisait et si d'autre part les coopératives qui démarchent les agriculteurs proposaient le mélange.

Concernant les espèces pérennes, une communication reste à réaliser auprès des semenciers. L'offre en semences d'origine locale est actuellement très faible et les semences sont proposées à des tarifs inabordables pour des agriculteurs.

- Les connaissances, informations et/ou recommandations que des acteurs pourront exploiter, afin de contribuer au développement du biocontrôle, dans un cadre qu'on essaiera de préciser

Les connaissances sur l'implantation du mélange annuel en Bretagne ont été résumées ci-dessus. Le cadre est plus simple à mettre en place dans le système d'agriculture conventionnel existant actuellement en Bretagne, avec une rotation de cultures pures blé/maïs, puisque les agriculteurs doivent mettre obligatoirement en place un couvert hivernal et la plupart des agriculteurs contactés n'étaient pas particulièrement réticents à l'idée d'implanter le mélange proposé sur toute la surface du couvert hivernal. De ce fait, le blé cultivé en agriculture conventionnelle ne nécessite plus de traitement insecticide (le traitement des semences est de toute façon interdit depuis cet automne mais les couverts hivernaux fleuris pourraient permettre de convaincre les agriculteurs d'éviter les traitements foliaires que ce soit préventifs ou curatifs. Si cette méthode était adoptée à large échelle, alors il y aurait probablement des effets synergiques à l'échelle du paysage qui accentueraient encore les effets positifs.

En agriculture biologique, c'est plus compliqué car les agriculteurs n'implantent pas de couverts hivernaux. Mettre en place des bandes fleuries à proximité des champs de céréales pose alors deux problèmes : d'une part, une partie de la surface du champ doit être consacrée à l'implantation de la bande fleurie plutôt qu'à la céréale (surface perdue) et d'autre part les bandes fleuries doivent être implantées en début septembre alors que les céréales sont semées en novembre, ce qui nécessite deux passages. Il serait nécessaire de réfléchir à des mesures de compensation.

Dans tous les cas, on suggérera comment « aller plus loin » et avec qui.  
Inclure dans cette partie :

- Une réflexion plus large, sur la promotion du biocontrôle dans la/les filière(s) concernée(s) par le projet et sur les possibilités de transposer à d'autres méthodes de biocontrôle ou à d'autres situations analogues les résultats du projet.

Les travaux en Bretagne mettent en évidence qu'il faudrait maintenant travailler à une échelle plus large, en intégrant probablement les chambres d'agriculture ou les réseaux d'agriculteurs. Les travaux mettent en évidence les changements possibles en lutte biologique par conservation suite au réchauffement des hivers et au fait que les fleurs qu'il est possible d'utiliser dans les couverts d'inter-culture fleurissent maintenant en hiver, offrant des ressources aux ennemis naturels des ravageurs. Les méthodes qui peuvent s'appliquer dès à présent en Bretagne pourraient s'appliquer d'ici quelques années dans le nord et l'est de la France.

Les travaux de l'UMR Agronomie, qui avaient été réalisés à l'échelle d'une parcelle expérimentale, s'orientent désormais vers l'évaluation de l'effet des bandes fleuries dans un réseau de parcelles d'agriculteurs mettant en œuvre des systèmes de culture contrastés : agriculture biologique, intégrée, de conservation ou conventionnelle. Nous pourrions ainsi évaluer la plus-value apportée par les bandes fleuries par rapport aux effets de systèmes de culture qui eux aussi peuvent favoriser les prédateurs et parasitoïdes du fait d'une réduction du travail du sol ou d'usage des produits phytosanitaires.

Dans le cas des coléoptères ravageurs du colza et des légumineuses, ces insectes et leurs parasitoïdes ne réalisent qu'un seul cycle par an et dispersent fortement dans le paysage. Il en résulte que les stratégies qui favorisent une régulation naturelle voient leurs effets différés dans le temps et dilués dans l'espace, ce qui n'incite guère les agriculteurs à mobiliser ces régulations. La gestion des insectes en grandes cultures doit donc reposer sur (i) une gestion territoriale, dépassant les limites de chaque parcelle, et pluriannuelle mobilisant des connaissances issues de l'agroécologie, et (ii) une coordination entre les acteurs gérant les différentes entités du territoire (parcelles agricoles, haies, voies de communications). Des projets sont actuellement construits en ce sens pour traiter de ces problématiques.

### **3. Rapport financier**

L'ensemble des dépenses prévues a été réalisé dans le temps imparti, avec peu de variations par rapport à ce qui était prévu. La thèse s'est déroulée en 3 ans et la soutenance a coïncidé avec la fin du projet.