



HAL
open science

Evaluation du niveau de ressources florales des parcelles de grandes cultures pour les insectes auxiliaires : relations avec la réalisation de services écosystémiques de régulation et de production

Justine Rivers-Moore

► To cite this version:

Justine Rivers-Moore. Evaluation du niveau de ressources florales des parcelles de grandes cultures pour les insectes auxiliaires : relations avec la réalisation de services écosystémiques de régulation et de production. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. hal-02789963

HAL Id: hal-02789963

<https://hal.inrae.fr/hal-02789963>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

Rapport de stage 2^{ème} année – **M2-IEGB**

1^{er} mars – 31 aout 2017

RIVERS-MOORE Justine

Evaluation du niveau de ressources florales des parcelles de grandes cultures pour les insectes auxiliaires : relations avec la réalisation de services écosystémiques de régulation et de production

UMR 1201 DYNAFOR – INRA

24 Chemin de Borde Rouge - 31326 Castanet-Tolosan

Direction du stage :

VIALATTE Aude – Maître de conférences – ENSAT Auzeville-Tolosane aude.vialatte@ensat.fr

ANDRIEU Emilie – Chargée de recherche – INRA Castanet –Tolosan emilie.andrieu@inra.fr

Encadrement universitaire :

CHARPENTIER Anne – Maître de conférences – Université de Montpellier anne.charpentier@cefe.cnrs.fr

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, un très grand merci à Aude Vialatte et Emilie Andrieu, pour leur encadrement, leur disponibilité, et surtout leur confiance en moi pour mener à bien ce projet. Merci de me donner la possibilité, et la chance, de continuer à travailler avec vous.

Merci à Anne Charpentier, toujours disponible pour ses élèves quand il le faut, pour m'avoir montré qu'on peut toujours faire mieux, et aller au bout des choses et de nos réflexions.

Je remercie également Olivier Thaler. IEGB, c'est un peu des hauts et des bas, parfois on en pleure, parfois on en rit, mais maintenant que c'est terminé je regarde derrière et je vois tout ce que ça m'a apporté. Ces deux années auront été une étape essentielle, et je crois qu'aujourd'hui j'ai enfin trouvé un sens à mon parcours, à mes choix parfois atypiques. Je peux regarder devant moi et me dire « ça y'est, j'ai les valises pleines de belles choses, j'ai aussi des compétences, je connais des gens...je peux prendre la direction qui me plait, et je vais m'éclater ». Merci.

Merci à toute l'équipe de DYNAFOR. C'est incroyable d'arriver là et de se sentir si bien. Pour votre accueil, votre bonne humeur, les gouters du matin, les barbecues, les Molky, le chat sur le tapis et tout le reste.

Merci à tous ceux qui m'ont accompagnée dans le projet, notamment l'équipe technique pour m'avoir formée et accompagnée sur le terrain, mais aussi pour votre aide précieuse au labo. Spécial merci à tous les stagiaires de l'année, et surtout au Bureau Des Stagiaires. On s'est supporté pendant ces longs mois, et c'était encore plus fun avec vous ! Enorme merci à Oriane, à ta joie de vivre infinie, et à ce début d'amitié.

Merci à tous les copains d'IEGB pour ces deux années au top, pour la cohésion impressionnante de notre promo, pour les rires, les chansons, les projets. Vous êtes géniaux.

À Léo, Oriane (encore toi ?), Faustine et tous les autres. Merci à mes coloc qui font que rentrer chez moi le soir est toujours un plaisir. 🎵

SOMMAIRE

I - INTRODUCTION	1
1. Contexte de l'étude.....	1
2. Etat de l'art et problématique	2
2.1 Enjeux de l'évaluation et de la préservation de la biodiversité en milieu agricole	2
2.2 Les habitats semi-naturels mis en avant pour favoriser les services de régulation, et les habitats cultivés négligés.....	3
2.3 De multiples taxons en jeu, induisant des synergies et antagonismes entre services...	3
2.4 Pour une compréhension du rôle des habitats cultivés dans les niveaux de services...	4
3. Programme et réalisations	5
II - MATÉRIELS ET MÉTHODES	5
1. Échantillon.....	6
2. Récolte des données	6
2.1 Service de contrôle biologique	6
2.2 Service de pollinisation	7
2.3 Communauté d'adventices	8
2.4 Production agricole.....	8
3. Analyse des données.....	8
3.1 Construction et description des variables	8
3.2 Matrice de corrélation entre les variables.	10
3.3 Construction de modèles	10
III - RESULTATS	11
1. Effets des ressources locales et paysagères sur les fonctions de prédation et de pollinisation	11
1.1 Des ressources locales limitées	11
1.2 Corrélations entre les variables explicatives	11

1.3 Influence des ressources adventices et du paysage sur les niveaux de contrôle biologique.....	11
1.4 Influence des ressources adventices et du paysage sur le potentiel de pollinisation..	12
2. Synergies et antagonismes entre les services de régulation	13
3. Influence des processus de contrôle biologique et des facteurs locaux sur le rendement	13
3.1 La régulation biologique par les prédateurs n’a pas d’impact sur le rendement.....	13
IV - DISCUSSION.....	14
1. Effets des ressources locales et paysagères sur les fonctions de prédation et de pollinisation	14
1.1 Des ressources locales limitées	14
1.2 Influence des ressources adventices et du paysage sur les contrôles biologiques	14
1.3 Influence des ressources adventices et du paysage sur le potentiel de pollinisation..	17
1.4 Un manque de connaissances sur les pratiques	18
2. Synergies et antagonismes entre les services de régulation	18
3. Influence des processus de contrôle biologique et de la communauté locale d’adventices sur le rendement	18
4. Perspectives.....	19
V – CONCLUSION	20
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE	
ANNEXE I : Diagramme de GANTT du projet SEcoMod.....	
ANNEXE II : Diagramme de GANTT de la part du projet concernée par le stage.....	
ANNEXE III : Détails sur la mise en place des protocoles « cartes sentinelles ».....	
ANNEXE IV : Codes, noms latins et vernaculaires des espèces relevées dans les parcelles SEcoMod.....	

I - INTRODUCTION

1. Contexte de l'étude

L'UMR DYNAFOR (DYNamiques et écologie des paysages AgriFORestiers) est une unité mixte de recherche (UMR) qui associe depuis 2003 des chercheurs de 2 départements de l'INRA (SAD et EFPA) et des enseignants chercheurs de l'ENSAT (Ecole Nationale d'Agronomie de Toulouse) et de l'EIPurpan (Ecole d'ingénieur de Purpan) qui font partie de l'INP (Institut National Polytechnique) de Toulouse. L'UMR s'est engagée, depuis sa création en 2003, dans le développement d'un ensemble de recherches qui s'inscrivent résolument dans le champ d'une écologie du paysage « pour l'action ». Il s'agit de faire face aux enjeux actuels dans les espaces ruraux et forestiers, induits par les changements globaux qui concernent conjointement le climat, l'occupation des terres, la biodiversité et les activités humaines (DYNAFOR, 2013). L'objectif principal de l'UMR est de comprendre et de modéliser les relations entre des processus écologiques, des processus techniques et des processus socio-économiques dans la gestion de ressources naturelles renouvelables.

Sous la coordination d'Aude Vialatte, le **projet SEcoMod**, sur lequel je travaille durant ce stage, cherche à **développer un modèle spatialement explicite sur les services écosystémiques de régulation et pollinisation, pour évaluer leurs niveaux et compromis et explorer des modalités de gestion concertée de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la mosaïque des cultures**. Débuté fin 2016 pour une durée de 3 ans, il s'inscrit dans le cadre des travaux de l'axe « SEcoTeam » de Dynafor, qui développe une approche interdisciplinaire des services écosystémiques rendus par la biodiversité dans les paysages agriforestiers. Le projet, d'un budget de 68500€, est financé à 100% par le métaprogramme « *Ecoserv 2* » (programme transversal aux départements INRA). La thèse qui a lieu dans le cadre du projet est financée séparément, par « *Ecoserv 2* » ainsi que par la région Occitanie. En termes de moyens humains, le projet est coordonné par trois chercheuses de l'UMR. Une doctorante est chargée des volets du projet portant respectivement sur une synthèse bibliographique des relations entre paysage-pratiques-services de régulation, et le développement du modèle. Je suis chargée, à l'aide des techniciens du laboratoire ainsi que de stagiaires présents en soutien sur différentes périodes, d'une grande partie du volet portant sur l'évaluation *in situ* de processus écologiques impliqués dans les services de contrôle biologique des ravageurs et de pollinisation dans les parcelles de céréales à paille. L'objectif est d'évaluer le rôle des ressources florales intra-parcellaires et du paysage sur les niveaux de ces services de régulation et de production. Concrètement, je coordonne l'équipe technique, et suis ainsi responsable de la récolte et de l'analyse des données.

2. Etat de l'art et problématique

2.1 Enjeux de l'évaluation et de la préservation de la biodiversité en milieu agricole

Les écosystèmes jouent un rôle important dans le bien-être de l'Homme et des autres espèces via les services qu'ils apportent, dits **services écosystémiques** (MEA 2005). Ces services ont été classés par le Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005) en quatre catégories : les services d'approvisionnement (par ex. bois, nourriture...), les services de régulation (par ex. régulation du climat), les services culturels et les services de soutien (par ex. processus de formation des sols, de croissance des plantes). Selon de nombreux auteurs, plus il y a de biodiversité au sein d'un écosystème, plus les services qui en découlent sont importants, notamment en qualité (Cardinale *et al.* 2012). En milieu agricole, la biodiversité planifiée, c'est-à-dire cultivée, et la biodiversité associée, c'est-à-dire naturellement présente, interagissent de manière complexe à de nombreux niveaux, et assurent, par exemple, la régulation naturelle des ravageurs des cultures, la pollinisation, le contrôle des maladies, ou le recyclage des nutriments (Altieri 1999 ; Gurr *et al.* 2003).

On observe depuis une cinquantaine d'années une forte érosion de la biodiversité, en particulier dans les systèmes agricoles (Nations Unies 1992 ; Cardinale *et al.* 2012). D'après le MEA (2005), le principal facteur de cette érosion est la destruction des habitats, notamment la conversion des milieux naturels en cultures mais également l'artificialisation des terres agricoles. Dans la littérature, les produits phytosanitaires de synthèse sont également considérés comme l'un des responsables majeurs du déclin de la biodiversité dans les agroécosystèmes (Le Roux *et al.* 2008). Cette diminution de la biodiversité dans le monde a des conséquences importantes sur le fonctionnement des écosystèmes et sur les sociétés humaines, pouvant réduire les ressources en nourriture, en énergie, en matériaux et médicaments (Chaplin *et al.* 2000, Hooper *et al.* 2005). En milieu agricole, la perte de biodiversité engendre des problèmes dans la production de biomasse, la décomposition et le recyclage des éléments nutritifs, ou encore dans les régulations biologiques, rendant les systèmes de production vulnérables aux ravageurs (Chaplin *et al.* 2000 ; Cardinale *et al.* 2012).

L'Etat français, sous l'impulsion des directives européennes, a lancé en 2008 le plan Ecophyto I, puis en 2015 Ecophyto II qui vise à réduire de 50% l'utilisation des produits phytopharmaceutiques d'ici à 2025. Un des objectifs de ces plans est d'amener les exploitants agricoles à adopter des pratiques alternatives limitant le recours aux pesticides et de les encourager à se tourner vers des systèmes agroécologiques (MEDDE 2015). Dans le même sens, la 'loi biodiversité' de 2016 prévoit une interdiction de l'utilisation des insecticides néonicotinoïdes à partir de septembre 2018. Les effets négatifs de ces insecticides sur les

pollinisateurs sont en effet aujourd'hui avérés (Goulson 2013 ; Vanbergen 2013). Pour répondre aux changements liés à ces nouvelles réglementations, les acteurs du monde agricole sont en demande d'alternatives à l'utilisation d'intrants chimiques. Une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes agricoles devrait contribuer, à terme, à proposer de nouvelles modalités de gestion favorisant les services écosystémiques et donc une agriculture moins dépendante des intrants chimiques. Cependant, les relations entre biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et services écosystémiques apparaissent souvent comme non linéaires, variant notamment selon l'échelle d'étude, comme la parcelle et le paysage (Kremen *et al.* 2004 ; Tamburini *et al.* 2016). Les liens et interactions entre services écosystémiques sont ainsi complexes, rendant difficile la proposition de mesures de gestion favorables conjointement à différents services et sans effets négatifs.

2.2 Les habitats semi-naturels mis en avant pour favoriser les services de régulation, et les habitats cultivés négligés

Dans l'étude des relations entre biodiversité, services écosystémiques et production agricole, la plupart des recherches se sont, à ce jour, focalisées sur les habitats non cultivés. L'impact positif des éléments semi-naturels dans les agroécosystèmes a d'ailleurs été montré à plusieurs reprises (Bianchi *et al.* 2006 ; Rusch *et al.* 2016). L'idée sous-jacente d'une dépendance écologique des cultures vis-à-vis des habitats non cultivés, assurant la fourniture de différentes ressources comme des proies ou des zones de nidification pour les organismes auxiliaires, a ainsi permis de mettre la gestion paysagère en avant pour favoriser les services écosystémiques de pollinisation et de contrôle biologique (Chaplin-Kramer *et al.* 2011; Cole *et al.* 2017). Cependant, il a été récemment suggéré que les cultures peuvent, pour certains auxiliaires, leur fournir plus de ressources que ne le font les habitats semi-naturels (Tscharntke *et al.* 2016 ; Vialatte *et al.* 2017). Certains réseaux trophiques au sein des habitats cultivés semblent même fonctionner de façon relativement indépendante des réseaux trophiques associés aux habitats non cultivés adjacents (Vialatte *et al.* 2005, 2007 ; Deroclès *et al.* 2014 ; Raymond *et al.* 2014). Le rôle écologique des habitats cultivés dans les paysages agricoles a ainsi été sous-estimé, alors qu'il ouvre des voies de gestion complémentaires à la gestion des habitats non-cultivés, notamment pour soutenir les services écosystémiques de contrôle biologique et de pollinisation.

2.3 De multiples taxons en jeu, induisant des synergies et antagonismes entre services

Par ailleurs, à l'échelle de la parcelle, les espèces ou les groupes taxonomiques impliqués dans les services de régulation peuvent être influencés de différente manière suivant les pratiques. Une même culture peut ainsi être à la fois une ressource et une perturbation pour différentes espèces suivant les pratiques ou la période de l'année (Fahrig *et al.* 2011). De même, une

pratique donnée peut favoriser un groupe d'auxiliaires participant à la réalisation d'un service écosystémique tout en en défavorisant d'autres (Eyre *et al.* 2012), et l'amélioration d'un service peut mener à la réduction d'un autre service (Bennett *et al.* 2009). Un groupe taxonomique peut, également, être impliqué dans plusieurs services de régulation (Pineda *et al.* 2007 ; Jauker & Wolters 2008). A des échelles plus larges, l'hétérogénéité du paysage influence différemment les espèces en fonction de leur perception de cette hétérogénéité, c'est-à-dire en fonction de l'hétérogénéité fonctionnelle du paysage (Fahrig *et al.* 2011, Schellhorn *et al.* 2015). Les différences de réponses des groupes taxonomiques ou espèces aux pratiques et à l'hétérogénéité des paysages génèrent donc des **synergies** et **antagonismes** au sein même des services de régulation (Bennett *et al.* 2009). Ces types de synergies et antagonismes sont largement sous-estimés. Evaluer les niveaux de services écosystémiques nécessite ainsi de considérer l'ensemble des groupes taxonomiques auxiliaires en jeu et leurs interactions, ce qui semble difficilement réalisable *in situ*. Une alternative est de se focaliser sur les niveaux des fonctions écologiques réalisées par les communautés d'auxiliaires.

2.4 Pour une compréhension du rôle des habitats cultivés dans les niveaux de services

L'objectif de cette étude est d'évaluer, au sein d'un ensemble de parcelles en grandes cultures, comment les fonctions de contrôle biologique et de pollinisation varient selon le contexte local et quelles en sont les conséquences sur les niveaux de production.

Une production agroécologique est fortement dépendante de deux familles de services écosystémiques : **le contrôle biologique et la pollinisation** (Zhang *et al.* 2007 ; Crowder *et al.* 2010, Doré *et al.* 2011). De plus, parmi les différentes ressources offertes localement par les habitats cultivés aux auxiliaires, les **adventices** leur fournissent des ressources florales ou des proies alternatives à des périodes critiques de leurs cycles (Norris & Kogan 2005 ; Requier *et al.* 2015; Vialatte *et al.* 2017). Nous nous basons donc sur ces constats, en cherchant à évaluer les relations entre les adventices présentes dans les parcelles cultivées et les niveaux de services de pollinisation, de contrôle biologique et la production.

Nous avons ainsi testé les hypothèses (i) que les adventices présentes dans les parcelles en grandes cultures soutiennent la réalisation des services écosystémiques de contrôle biologique et de pollinisation et (ii) que le contrôle biologique influence le rendement de la parcelle.

En analysant conjointement les niveaux de différents services (dont différents contrôles biologiques) ainsi que celui de la production, les relations de type synergie et antagonisme sont explicitement considérées. La compréhension de ces relations est d'un fort intérêt dans la mise au point de mesures agroécologiques. Des descripteurs paysagers sont également considérés,

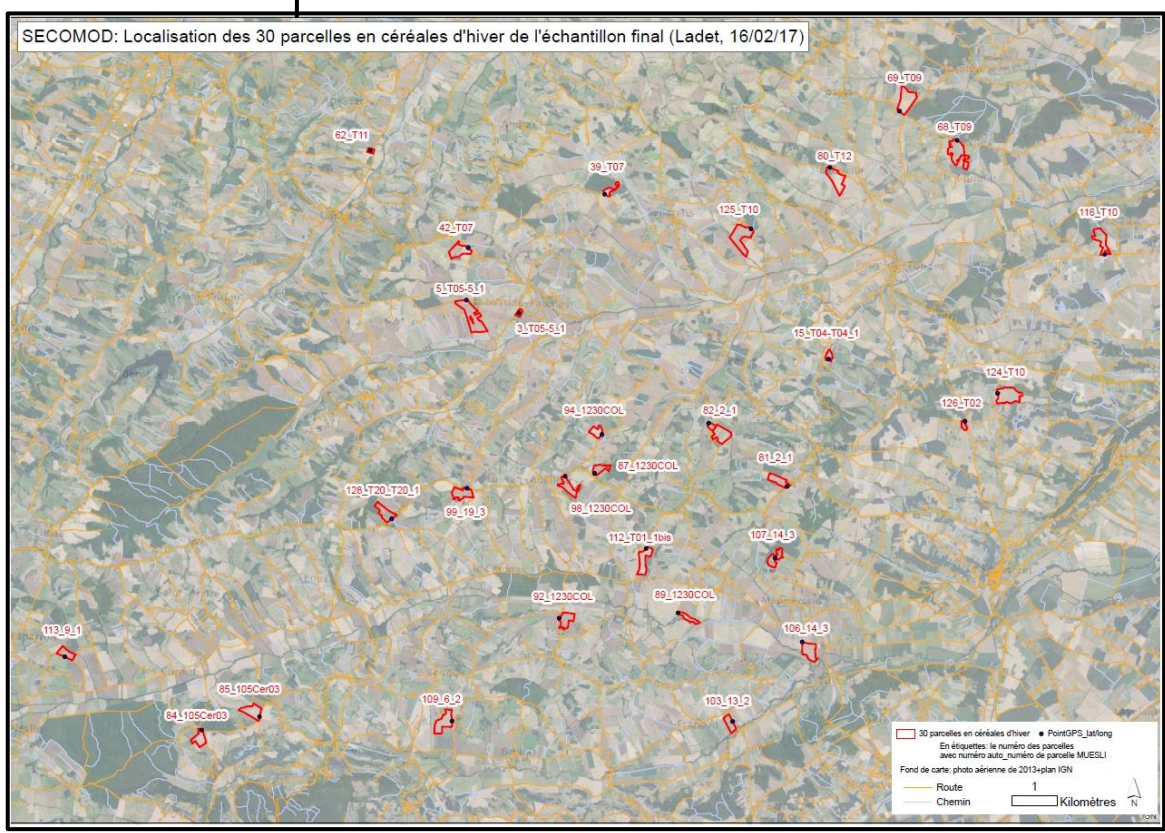
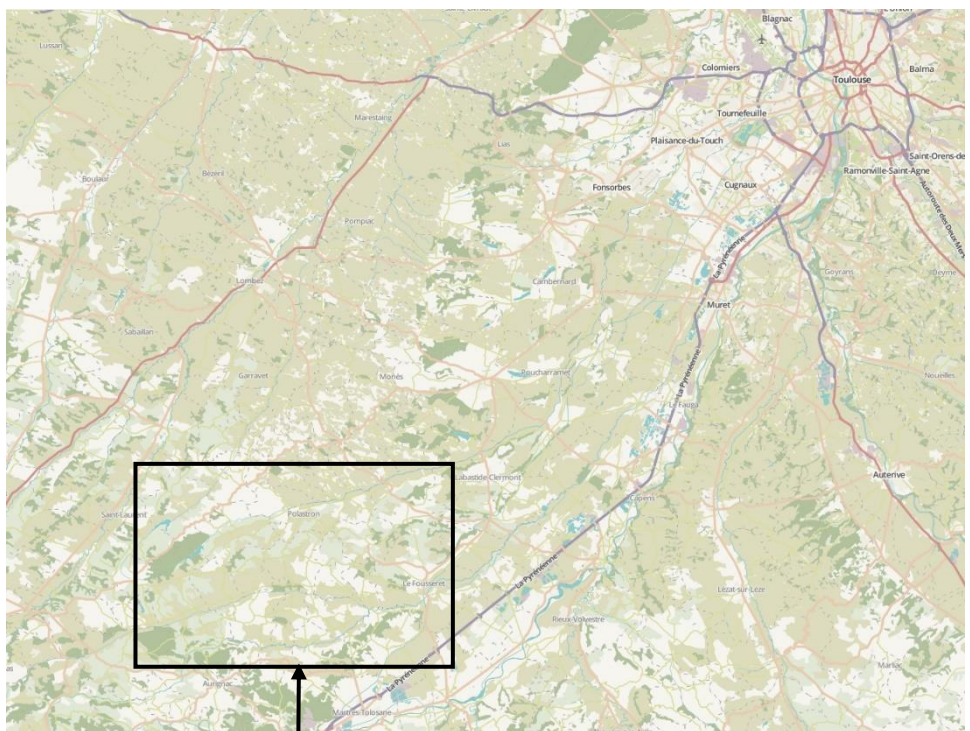


Figure 1 : Localisation du site d'études et des 30 parcelles suivies du projet SECoMod

Source : Openstreetmap & Ladet S. 2017

pour évaluer l'importance des adventices à l'échelle de la parcelle par rapport aux autres habitats, notamment non cultivés, et leurs ressources associées et connues (Bianchi *et al.* 2006).

Nous nous sommes concentrés sur les cultures d'hiver majoritaires dans le site d'étude : les céréales à paille. La pression des ravageurs y est une problématique importante, même si les pertes liées à leurs pullulations restent à des fréquences faibles (mais les pertes étant alors très élevées, une vigilance voire des traitements systématiques se sont imposés). Les céréales à paille ne sont pas dépendantes de la pollinisation entomophile, mais leur intérêt dans la réalisation du service de pollinisation réside dans le fait (i) qu'elles constituent une surface cultivée très importante au sein de la mosaïque agricole et qu'elles côtoient des cultures entomophiles et (ii) qu'elles se placent dans une rotation de cultures impliquant des espèces fortement dépendantes des pollinisateurs (par ex. colza, tournesol ...). Nous considérons donc la pollinisation mesurée au sein des parcelles de notre étude comme un « potentiel de pollinisation ». Enfin, un bon niveau de pollinisation peut aussi être un indicateur du bon état écologique de l'agroécosystème.

3. Programme et réalisations

Sous le regard et les conseils de mes responsables, j'ai été chargée durant ce stage de mettre en place tout ce qui était nécessaire pour tester ces hypothèses. Afin de récolter les nombreuses données dont nous avons besoin, un important travail de terrain a été mené, pour mesurer les services de prédation et de pollinisation de même que les adventices présentes et les rendements des parcelles suivies. Ce travail de terrain a impliqué un temps non négligeable de préparation en laboratoire : élevage des pucerons, culture des phytomètres, préparation des protocoles, *etc.*

J'ai ainsi été chargée de l'organisation et de la récolte des données : planification et organisation des sessions de terrain, responsabilité de l'élevage et de la culture, gestion du matériel nécessaire, *etc.* J'ai été présente sur 70 % des sessions de terrain (soit 13 jours), avec les techniciens et stagiaires, ainsi que 80% du travail de laboratoire (soit environ 30 jours) (avec l'aide de deux stagiaires). J'étais également chargée de 100% de la saisie et du traitement des données pour cette partie du projet. Le diagramme de GANTT du projet SEcoMod est visible en [Annexe I](#), et celui des tâches liées à la partie du projet concernée par mon stage en [Annexe II](#).

II - MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le site d'étude se situe dans les 'Vallées et coteaux de Gascogne', à une soixantaine de km au sud de Toulouse (figure 1). Suivi par l'INRA depuis bientôt 30 ans pour des projets nombreux et variés, ce site est labellisé *Long Term Ecological Research Network* (LTER) et appartient à la Zone Atelier (ZA) Pygar en cours de labellisation.

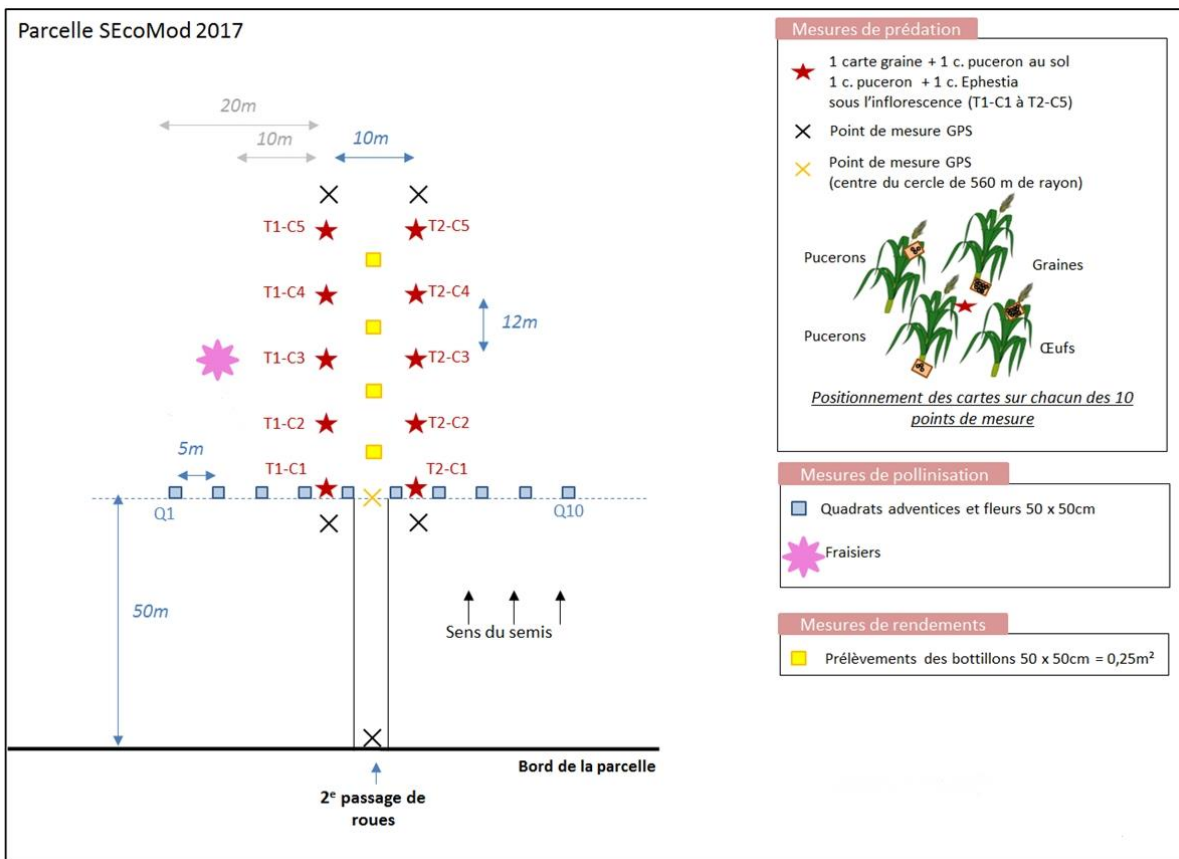


Figure 2 : Schéma de mise en place des expérimentations dans chaque parcelle.

Cette région est caractérisée principalement par des systèmes agricoles en polyculture-élevage. On y trouve ainsi une mosaïque de cultures, de prairies temporaires ou permanentes, et d'éléments boisés. La proportion relativement importante d'éléments semi-naturels comme les haies et les bois explique l'intérêt qu'a l'UMR Dynafor à travailler dans cette zone, notamment pour étudier le lien entre le paysage, la biodiversité et les services associés en milieu agricole. Le laboratoire possède ainsi des données à long terme sur l'occupation du sol, la biodiversité et les pratiques des agriculteurs sur le site.

1. Échantillon

Trente parcelles en grandes cultures conventionnelles ont été sélectionnées pour le projet selon un gradient paysager. Pour cela, le taux de boisement a été calculé, avec le logiciel *ArcGis*, dans une zone d'1km² autour du barycentre de 109 parcelles candidates. Les parcelles en culture d'hiver facilement accessibles, et présentant un taux de boisement étirant au maximum le gradient, ont été privilégiées. En effet, la maximisation de la gamme de variation de la variable paysagère permet de comprendre avec plus de précision la corrélation entre ce facteur et d'autres variables écologiques (Pasher *et al.* 2013; Brennan *et al.* 2002). Sur les 30 parcelles choisies *in fine*, 26 sont des parcelles de blé, 3 d'orge et une de triticale. Le taux de boisement autour des parcelles va de 0 à 28%.

2. Récolte des données

Pour tester si les adventices présentes dans les parcelles cultivées sont favorables aux niveaux de services de régulation biologique et de pollinisation, via l'hypothèse de fourniture de ressources aux auxiliaires, différentes expérimentations ont été mises en place dans une zone de mesures de 50x50m matérialisée sur chaque parcelle à l'aide de fanions. L'ensemble des protocoles du projet a été mis en place sur cette zone, située à 50m du bord de la parcelle, au niveau du 2^{ème} passage de roues (figure 2). Cette distance permet d'éviter un effet bordure en restant éloignés des zones où les auxiliaires se situent de façon privilégiée (Collins *et al.* 2003)

2.1 Service de contrôle biologique

Pour évaluer le taux de prédation dans chaque parcelle, des bio-agresseurs (puceron, graines d'adventice, œufs de lépidoptère) ont été présentés de façon standardisée sur des cartes, dans chaque parcelle. Ces cartes de papier de verre de 5x5cm contenaient, suivant la carte, trois individus de puceron vert du pois (*Acyrtosiphon pisum*), 10 graines de *Viola arvensis* ou amas d'œufs du lépidoptère *Ephestia kuehniella*, appelé communément pyrale de la farine. Des détails concernant la fabrication de ces cartes sont visibles en Annexe III. Ces organismes ont été choisis car ils sont très communs dans les agroécosystèmes européens, et qu'ils font partie de réseaux trophiques larges impliquant différentes communautés d'auxiliaires.

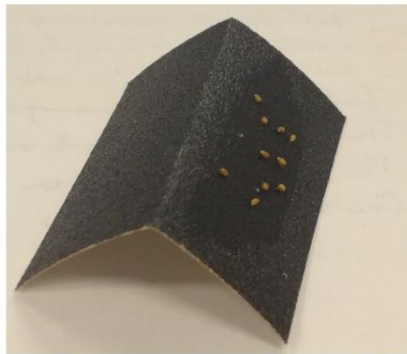
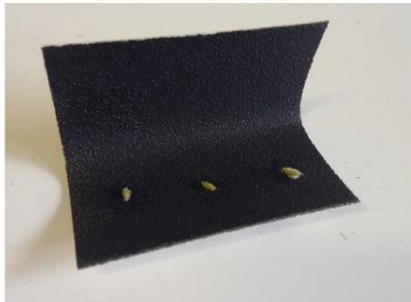


Figure 3 : Photos des cartes sentinelles placées dans les parcelles.

En haut à gauche : pucerons. En bas à gauche : œufs. A droite : graines. *Source : JRM*

	Lundi	Mardi (J+1)	Vendredi (J+4)
Session 1 : 24 au 28 avril (±1100°C cumulés)	Pose de 20 cartes « puceron », 10 cartes « graine » et 10 cartes	Récupération des cartes « puceron »	Récupération des cartes « graine » et « œuf »
Session 2 : 29 mai au 2 juin (±1500°C cumulés)	« œuf » par parcelle		

Figure 4 : Calendrier de pose des cartes sentinelles dans les parcelles



Figure 5 : Photo des fraisiers dans une des trois tentes *insect-proof*. *Source : JRM*

Figure 6 : Photo des 6 fraisiers placés dans la parcelle (4 « pollinisés » et 2 « témoins » ensachés). *Source : JRM*



Dix points de mesure distants chacun de 12m ont été positionnés sur deux transects espacés de 10m, de part et d'autre du 2ème passage de roues (figure 2). A chaque point, quatre « cartes sentinelles » étaient fixées : au sol, une carte de pucerons et une carte de graines, fixées à l'aide d'une épingle. En canopée, une carte de pucerons et une carte d'œufs, agrafées sous une inflorescence ou sur une haute feuille de la culture (figures 2 & 3)

Les cartes sentinelles ont été posées sur le terrain durant deux périodes, suivant le planning figure 4. Pour chaque session, le nombre de puceron restant sur la carte était compté directement dans la parcelle et noté sur une fiche de relevé, de même que pour les graines. Pour ce qui est des œufs, les cartes étaient ramenées au laboratoire et observées à la loupe binoculaire. Trois classes étaient alors identifiées : prédation totale des œufs (> 95%), prédation partielle, absence de prédation (< 5%).

2.2 Service de pollinisation

Pour évaluer la pollinisation entomophile, la technique des phytomètres a été utilisée (Steffan-Dewenter *et al.* 2001). Les phytomètres sont des plantes sentinelles, produites en conditions contrôlées et placées sur le terrain, permettant à terme d'évaluer le niveau de pollinisation.

Suite à des essais avec différentes espèces de phytomètres (Carrié *et al.* 2016a) de 2014 à 2016, le choix définitif s'est porté sur des fraisiers de variété *Korona*, en grande partie dépendants de la pollinisation entomophile, et leurs fruits et graines facilement manipulables et discernables. 600 fraisiers « racine nue » ont ainsi été cette année pralinés et repiqués dans des godets thermoformés noirs de dimensions 8x8x7 cm.

Dès l'apparition des premières fleurs, les plantes en pots étaient placées dans une tente « *insect-proof* » (figure 5) pour empêcher la pollinisation par les insectes. La veille de leur placement sur le terrain, les fleurs ouvertes sur les plants ont été marquées avec du scotch bleu. Six plants ont ensuite été déposés dans chaque parcelle (figure 6) : quatre plants ouverts à la pollinisation entomophile, dits « pollinisés », et deux plants ensachés dans de la gaze pour empêcher l'accès aux insectes pollinisateurs, dits « témoins », seulement autopollinisés ou pollinisés par le vent. Après quatre jours dans la culture, les pots ont été identifiés et ramenés dans les tentes « *insect-proof* ». Les fleurs ouvertes sur les parcelles ont été marquées d'un scotch rouge. Le marquage au scotch permet de différencier les fleurs ouvertes lors de la mise en place de l'expérimentation de celles ouvertes dans les tentes, avant ou après la manipulation. Au total, cette année, 180 fraisiers ont été placés dans les parcelles au moment de leur floraison, soit du 14 au 18 avril.

Les fraises issues des fleurs marquées ont été récoltées et placées dans des sachets individuels sur lesquels figurait le code du pot (figure 7). Une fois pesée, chaque fraise était placée au



Figure 7 : Photo de fraises mûres placées dans des sachets codés avant d'être pesées et congelées.

Source : JRM

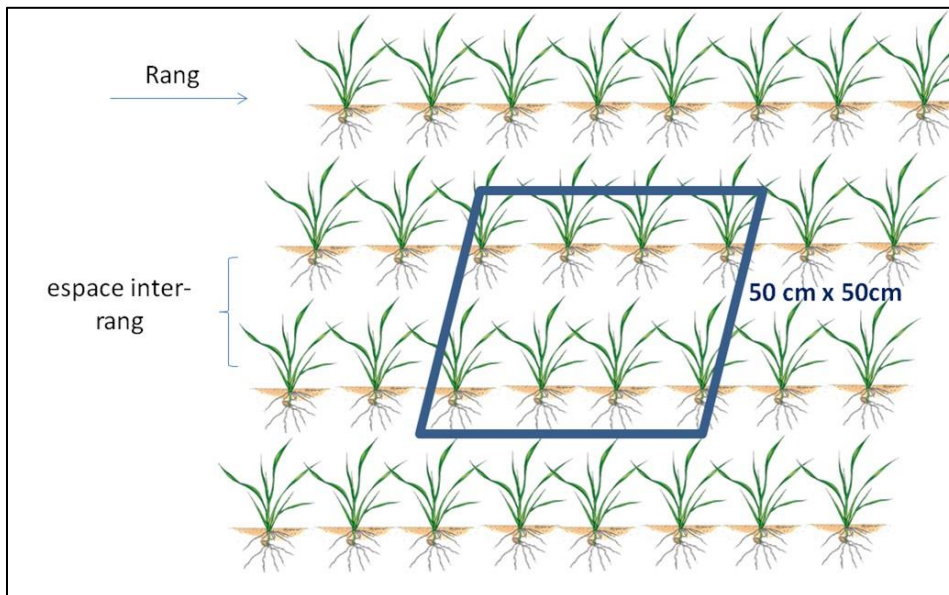


Figure 8 : Placement du quadrat dans la parcelle pour récolter le bottillon de céréales

congélateur dans l'attente du traitement des akènes. Pour chaque fraise, 40 akènes ont été prélevés aléatoirement (10 par quart pour éviter de se concentrer inconsciemment sur les plus belles graines) et utilisés pour un test de flottaison. Les akènes fertiles sont plus lourds que l'eau, alors que les akènes non fécondés flottent (Klatt *et al.* 2014). Le ratio entre le nombre d'akènes fertiles et non-fécondés pour chaque fruit, de même que son poids, nous informent sur la pollinisation de celui-ci. En effet, d'après Klatt *et al.* (2014), le succès de pollinisation est lié directement au poids des fraises et au nombre d'akènes fertilisés par fruit.

L'année précédente, les fraises n'étaient pas congelées, et il était donc nécessaire d'effectuer l'ensemble des manipulations sur celles-ci dès leur récolte. Pour permettre d'étaler dans le temps ces manipulations chronophages, nous avons choisi cette année la congélation. Suite à plusieurs tests effectués sur des fraises congelées et non-congelées, nous avons montré que la congélation n'avait pas d'impact sur le test de flottaison des graines.

2.3 Communauté d'adventices

Dix quadrats de 50x50 cm ont été positionnés tous les 5 mètres sur une bande située à 50m de la bordure de la parcelle et perpendiculaire au sens du semis (figure 2), dans lesquels le nom de chaque espèce végétale présente, son pourcentage de recouvrement, son stade et le nom de l'espèce dominante ont été relevés du 29 mai au 16 juin 2017.

2.4 Production agricole

Le rendement a été évalué sur chacune des 30 parcelles.

Des prélèvements ont été effectués entre le 15 et le 23 juin (suivant l'espèce), à maturité physiologique des céréales et quelques jours avant la moisson. Des bottillons ont été récoltés en coupant toutes les talles présentes dans un cadre en bois de 0,25m² (figure 8). Quatre bottillons sont prélevés par parcelle (figure 2) et placés chacun dans un sac en papier annoté. Les sacs ont ensuite été stockés suspendus dans une serre pendant une semaine hors d'atteinte des rongeurs.

Une fois secs, les pailles ont été pesées, et les épis pesés et comptés. Après passage dans une batteuse, les grains extraits ont été étuvés 24h à 110°C puis pesés et comptés afin de calculer le « poids aux 1000 grains ».

3. Analyse des données

Toutes les analyses ont été faites grâce au logiciel R 3.4.1 (R Development Core Team 2017) et aux packages « lmtest », « effects », « Hmisc », « ggplot2 », « PerformanceAnalytics », « fmsb », « nortest », « fitdistrplus » & « PairedData ».

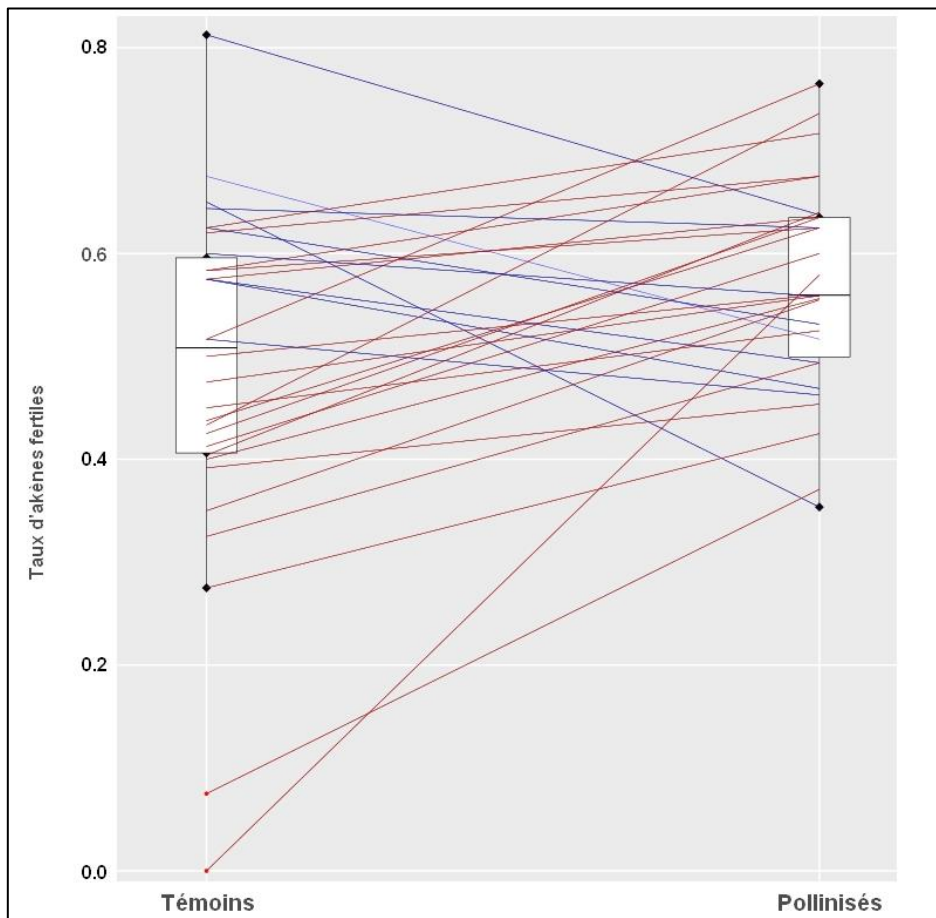


Figure 9 : Taux d'akènes fertiles de chaque parcelle en fonction du traitement (T ou P). Chaque ligne relie la valeur 'Témoin' et 'Pollinisée' de la même parcelle.

3.1 Construction et description des variables

- Taux de prédation

Les différents taux de prédation utilisés ont été calculés en faisant le rapport entre le nombre d'individus consommés au moment de la récupération des cartes sentinelles et le nombre d'individus placés initialement sur la carte. Pour les œufs, observés à la loupe binoculaire pour évaluer leur prédation, les trois classes identifiées à la loupe binoculaire ont été considérées comme des taux de prédation de 0, 0.5 et 1. Une moyenne a ensuite été faite par parcelle pour obtenir le taux de prédation sur chacune et pour chaque type de bioagresseur.

Suite à un test de *Wilcoxon* effectué pour chaque bio-agresseur entre les sessions 1 et 2, il est ressorti une différence non significative entre les deux sessions de relevé pour les pucerons au sol et les pucerons au niveau foliaire, alors qu'on a pu voir une différence significative pour les œufs et les graines. Il a donc été choisi d'utiliser seulement la deuxième session de relevés pour les pucerons, et les deux sessions pour le reste des bio-agresseurs.

- Taux de pollinisation

Le taux de pollinisation a dans un premier temps été calculé de deux manières différentes. La première méthode a consisté à faire la différence, pour chaque parcelle, entre le poids moyen des fraises « pollinisées » et des fraises « témoin ». Cette différence entre plants témoins et pollinisés correspond à la « part du poids des fruits liée à la pollinisation entomophile » et est considérée ici comme un taux de pollinisation des plantes sentinelles. La deuxième méthode a consisté à faire de même avec le taux d'akènes fertiles. Les parcelles dont les différences donnaient au taux négatif ont été considérées comme ayant une pollinisation nulle.

Un test de *Wilcoxon* pour échantillons appariés a ensuite été réalisé pour comparer les poids ou taux d'akènes fertiles des plants témoins ou pollinisés. Le test ayant fait ressortir une différence significative entre les deux types de plants pour le taux d'akènes fertiles (figure 9), et le succès de pollinisation étant très lié à ce taux d'après Klatt *et al.* (2014), nous avons choisi de considérer le taux de pollinisation comme la différence entre le taux d'akènes fertiles des plants pollinisés et témoins pour chaque parcelle.

- Variables paysagères

Les variables paysagères utilisées pour l'analyse ont été calculées dans un 'buffer' de 1km (soit 563m de rayon) autour de chaque parcelle SEcoMod à l'aide des logiciels *Chloé 2012 V20* et *ArcGis*. Les variables considérées sont : l'indice de Shannon paysager (SHDI total), l'indice de Shannon des cultures (SHDI cultures), le pourcentage de bois, le pourcentage de prairies permanentes et le pourcentage de blé.

Tableau I : Corrélations de Spearman entre les variables ‘explicatives’ (n=30). Les nombres entre parenthèses sont le VIF (*Variance Inflation Factor*) pour chaque variable.

Signification des codes: 0 ‘****’ 0.001 ‘***’ 0.01 ‘**’ 0.05 ‘.’

	SHDI adventices	% bois	% Prairies permanentes	SHDI total	SHDI cultures	% blé
SHDI adventices	(1.87)	0.14	0.42 *	-0.041	-0.11	-0.25
% bois		(1.10)	0.022	-0.061	-0.19	-0.044
% prairies permanentes			(1.99)	0.40	-0.071	-0.40 *
SHDI total				(1.68)	0.41 *	-0.26
SHDI cultures					(1.52)	-0.33
% blé						(1.71)

- Ressource florale

Deux variables ont été calculées à partir des données botaniques : l'indice de shannon (SHDI) de diversité spécifique en adventices, et la richesse spécifique. L'intérêt de l'utilisation du SHDI est la prise en compte de l'abondance (dans notre cas du recouvrement) des espèces relevées.

L'indice de Shannon a été calculé comme suit :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

Avec : $p_i = n_i / N$

n_i = le recouvrement d'une espèce

N = le recouvrement total de l'échantillon & S = le nombre total d'espèces de la parcelle

- Rendement

Le rendement a été calculé en multipliant le poids d'un grain (PMG / 1000) avec le nombre de grain total de chaque bottillon de 0,25 m². L'addition entre eux de ces résultats pour les quatre relevés par parcelle nous a permis d'obtenir une mesure du rendement en g/m² et donc en quintaux / hectare (q/ha).

3.2 Matrice de corrélation entre les variables.

- Entre variables explicatives

Pour tester le niveau de colinéarité dans les modèles, les coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés entre les variables explicatives, ainsi que leur VIF (*Variance Inflation Factor*).

Les variables qui apparaissent dans le tableau I sont celles sélectionnées au final, suite à ces calculs, pour apparaître dans les modèles linéaires. Les variables «% d'habitats semi-naturels », « % de cultures » et « richesse spécifique en adventices » n'ont pas été utilisées, étant trop fortement corrélées à d'autres variables explicatives.

- Entre variables réponses

Des tests de corrélation de Spearman ont été effectués entre les variables de prédation (n=4) et de pollinisation pour tester les interactions de type synergie ou antagonisme entre elles.

3.3 Construction de modèles

Des Modèles Linéaires (LM) et des Modèles Linéaires Généralisés (GLM) à loi quasi-binomiale ont été construits pour tester si les niveaux de prédation et de pollinisation dans les parcelles peuvent être expliqués par la diversité locale en adventices et certaines variables paysagères.

La loi quasi-binomiale est la plus adaptée aux données sous formes de taux, tout en évitant la surdispersion.

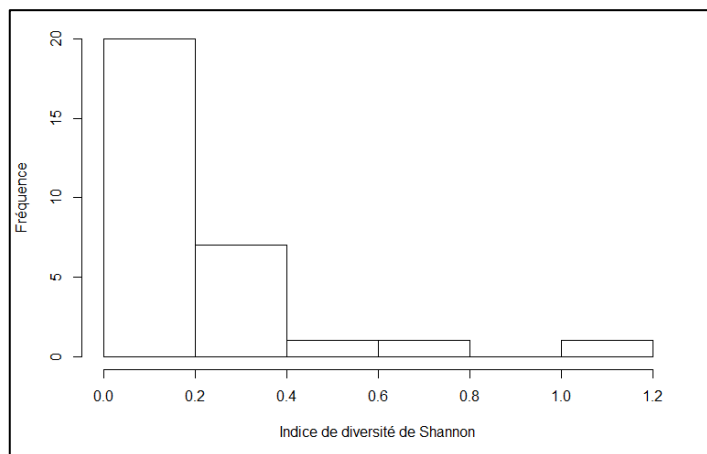


Figure 10 : fréquence du niveau de SHDI en adventices dans les 30 parcelles en céréale à paille étudiées

Figure 11 : Richesse spécifique en adventices dans les 30 parcelles étudiées

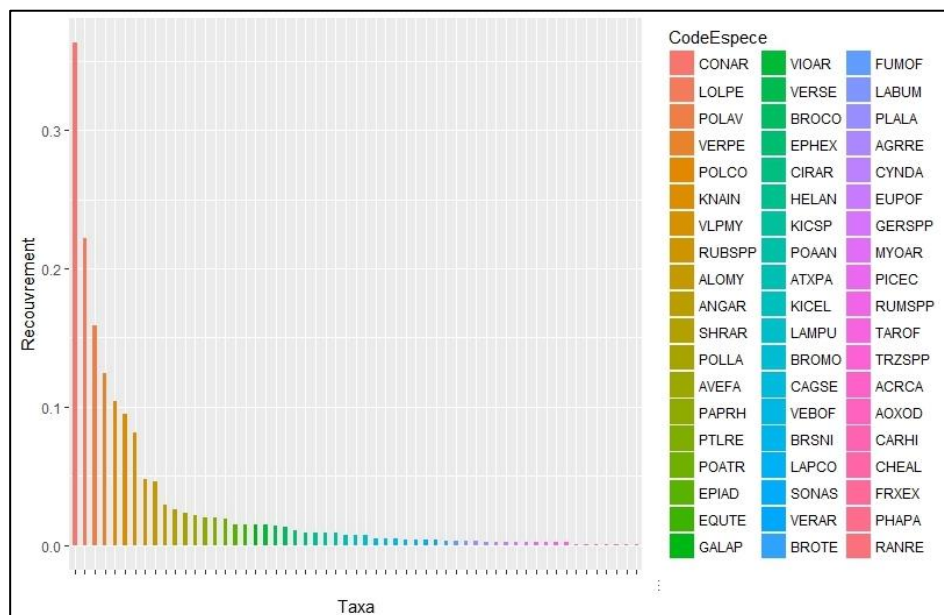
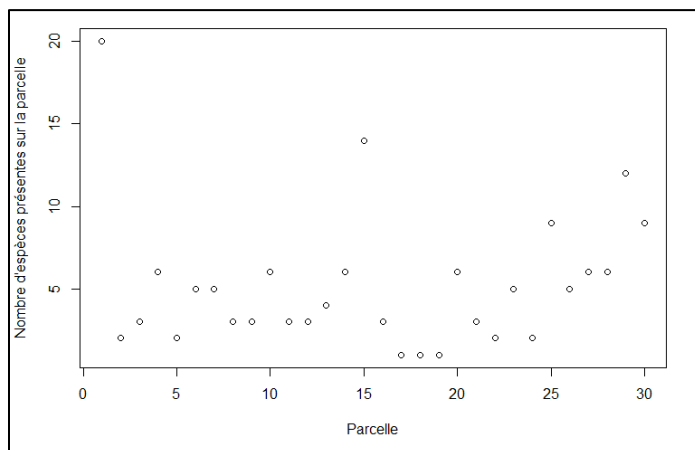


Figure 12 : Recouvrement total des 57 espèces relevées sur l'ensemble des 30 parcelles

Tableau II : Niveaux moyens de prédation mesurés sur les 30 parcelles pour les deux sessions. La variance, médiane et valeurs minimales et maximales sont précisées.

	Min.	Median	Mean	Max.	σ
Graines	0.23	0.69	0.66	0.93	0.17
Œufs	0.60	0.76	0.75	0.95	0.08
Pucerons au sol	0.53	0.90	0.85	1.00	0.12
Pucerons foliaire	0.02	0.25	0.26	0.53	0.12

Sauf pour le rendement, tous les modèles ont été construits de la même façon :

Glm(Variable à expliquer ~ 5 variables paysagères + SHDI adventices)

III - RESULTATS

1. Effets des ressources locales et paysagères sur les fonctions de prédation et de pollinisation

1.1 Des ressources locales limitées

La richesse spécifique et la diversité spécifique (SHDI) en adventices étant très corrélées ($Rho = 0.8^{***}$), c'est l'indice de diversité de Shannon qui a été utilisé. Celui-ci varie de 0.007 à 1.098 ($m = 0.189$ et $\sigma = 0.235$). Cet indice est faible sur la plupart de parcelles SEcoMod, 20 parcelles ayant un SHDI inférieur à 0.2 et 27 étant situées en dessous de 0.4 (figure 10). Peu d'espèces sont en effet présentes dans les céréales : 19 parcelles ont moins de 5 espèces adventices (figure 11) et sur les 57 espèces relevées, 50 ne dépassent pas 5 % de recouvrement cumulés sur les 30 parcelles (figure 12). Il y a également peu de variabilité d'une parcelle à l'autre, 80 % des parcelles possédant 0 à 6 espèces d'adventices (Figure 11). Seules 3 parcelles sortent du lot avec 20 espèces (Sd01¹), 14 espèces (Sd15) et 12 espèces (Sd29). Les noms latins et vernaculaires correspondant aux codes des 57 espèces relevées sont disponibles en Annexe IV.

1.2 Corrélations entre les variables explicatives

La matrice de corrélation (test des rangs de Spearman) (tableau I) nous montre les variables finalement sélectionnées pour construire les modèles linéaires. Les données entre parenthèses représentent le VIF (*Variance Inflation Factor*). Celui-ci est en dessous du seuil de 10 pour l'ensemble des variables, il n'y a donc pas de colinéarité influençant la robustesse des modèles.

1.3 Influence des ressources adventices et du paysage sur les niveaux de contrôle biologique

a. La prédation diffère en fonction du type de proie

Il y a bien eu de la prédation sur les parcelles SEcoMod. En moyenne sur les deux sessions, le taux de prédation des graines varie en effet de 0.23 à 0.93 ($m = 0.66$ et $\sigma = 0.17$), celui des œufs de 0.6 à 0.95 ($m = 0.75$ et $\sigma = 0.08$), celui des pucerons au sol de 0.53 à 1.00 ($m = 0.85$ et $\sigma = 0.12$) et enfin celui des pucerons au niveau foliaire, le moins fort, varie de 0.02 à 0.53 ($m = 0.26$ et $\sigma = 0.12$) (tableau II).

1 « Sd » est le code associé à chaque parcelle. Il signifie 'Secomod'.

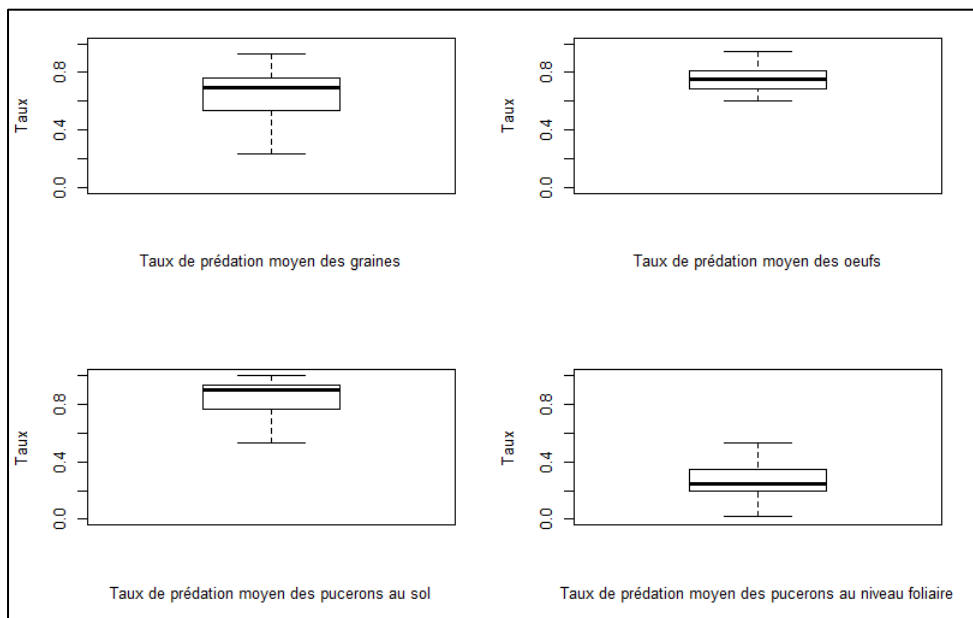


Figure 13 : Taux de prédation moyen sur les deux sessions, pour chaque type de proie

Figure 14 : Taux de prédation moyen de chaque parcelle, pour chaque type de proie

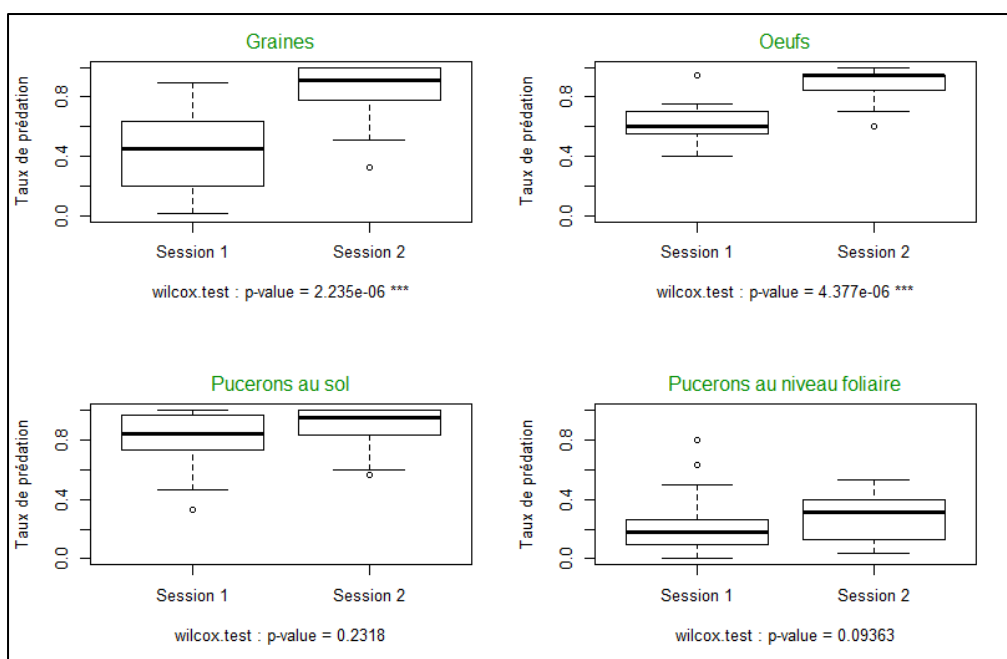
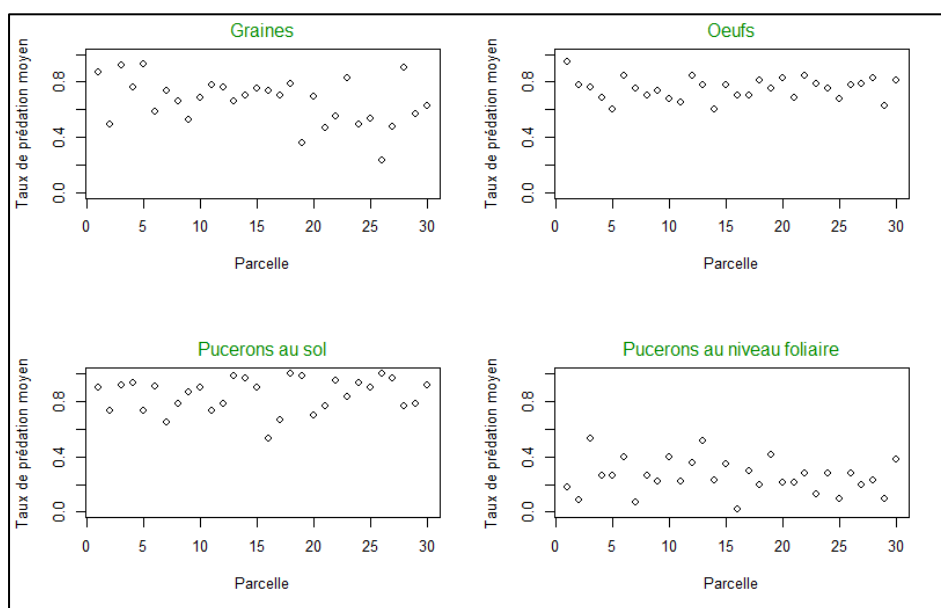


Figure 15 : Taux de prédation moyen, en fonction du type de proie et de la session

Le niveau de prédation moyen entre les deux sessions varie en fonction du type de proie exposé. La prédation des pucerons au niveau de la canopée est en moyenne trois fois moins importante que la prédation des œufs (figure 13). De même, la prédation des pucerons au sol est plus de trois fois supérieure à celle des pucerons au niveau foliaire. Il y a donc une forte variation d'un type de proie à l'autre. Cependant, pour chaque type de proie, il y a peu de variabilité inter-parcellaire du niveau de prédation (figures 12 & 14). Certaines parcelles sortent légèrement du lot, comme la parcelle 01 sur laquelle la prédation des œufs a été plus importante, ou la parcelle 26 dont le taux de prédation des graines est particulièrement bas comparé aux autres parcelles.

b. Une variabilité temporelle de la prédation des œufs et des graines

On peut observer une variabilité temporelle de la prédation sur certaines proies. Entre les sessions 1 et 2, elle est en effet significativement différente pour les graines (test de *Wilcoxon* : $V=2$, $p\text{-value} = 2.235e^{-06}$ ***) et les œufs (test de *Wilcoxon* : $V=1$, $p\text{-value} = 4.377e^{-06}$ ***). Il n'y a pas de différence significative entre les sessions 1 et 2 pour la prédation sur les pucerons (figure 15).

c. Des niveaux de prédation davantage influencés par les variables paysagères que par la communauté locale d'adventices

Les différents taux de prédation sont tous expliqués par des facteurs différents, voire aucun (tableau III). Aucune variable n'influence par exemple significativement le taux de prédation des graines en session 1 et le taux de prédation des pucerons au niveau foliaire. Au contraire, le taux de prédation des pucerons au sol est influencé négativement par le pourcentage de blé et le taux de boisement autour des parcelles. Pour les graines, le taux de prédation en session 2 est, à la différence de la session 1, influencé positivement par la diversité des habitats et négativement par la diversité des cultures autour des parcelles. Concernant les œufs, les variables de prédation sont expliquées positivement en session 1 par la diversité en adventices dans la parcelle, et négativement en session 2 par le pourcentage de prairies permanentes dans le *buffer* d'1km² entourant les parcelles. Il y a donc une influence des plusieurs facteurs paysagers sur les niveaux de contrôle biologique, qui par contre sont peu influencés par la présence et la diversité d'adventices au niveau local.

1.4 Influence des ressources adventices et du paysage sur le potentiel de pollinisation

a. Une pollinisation entomophile faible mais réelle

Le taux de pollinisation entomophile varie, pour les 30 parcelles SEcoMod, de 0 à 0.57 ($m = 0.12$ et $\sigma = 0.13$). Cette pollinisation est globalement basse puisque 18 parcelles ont un taux inférieur à 0.1 (figure 16). Neuf parcelles ont un taux égal à zéro. C'est-à-dire que, pour ces

Tableau III : Résultats des Modèles Linéaires Généralisés (GLM) testant l'influence des facteurs paysagers et locaux (adventices) sur les processus de prédation et de pollinisation. Seules les variables explicatives significatives apparaissent dans le tableau.

Signification des codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'

Variable à expliquer	Variable explicative	Estimate	SE	P-value
Taux de pollinisation	-	-	-	-
Taux prédation graines – Session 1	-	-	-	-
Taux prédation graines – Session 2	SHDI total	6.27039	2.60986	0.0247 *
	SHDI cultures	-4.81022	2.20509	0.0396 *
Taux prédation œufs – Session 1	SHDI adventices	1.384392	0.525939	0.0149 *
Taux prédation œufs – Session 2	% Prairies Permanentes	- 0.054822	0.025904	0.0454*
Taux prédation pucerons foliaire	-	-	-	-
Taux prédation pucerons au sol	% Blé	-0.09610	0.03344	0.00857 **
	% Bois	-0.06640	0.02913	0.03223 *

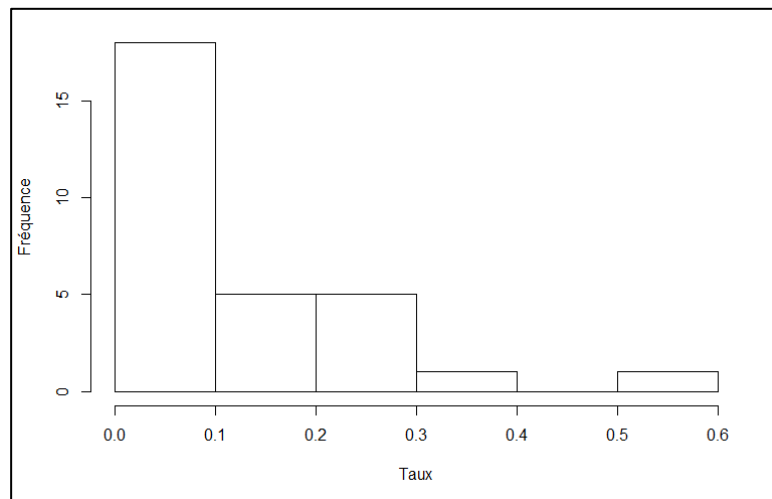


Figure 16 : fréquence des taux de pollinisation dans les 30 parcelles en céréale à paille étudiées

Tableau V : Résultats des Modèles Linéaires (LM) testant l'influence de la diversité en adventices et des processus de régulation sur le rendement. Seules les variables explicatives significatives apparaissent dans le tableau.

Signification des codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.'

Modèle	Variable à expliquer	Variable explicative	Estimate	SE	P-value	R ²
Facteurs locaux	Rendement	SHDI adventices	-33.64	13.05	0.0175 *	0.4807

parcelles, le taux d'akènes fertiles des fraisiers « pollinisés » était en moyenne inférieur à celui des fraisiers « témoins ».

Bien que bas, ces taux n'en restent pas moins le résultat d'une pollinisation entomophile. Le taux d'akènes fertiles des fraisiers « témoins » est, en effet, significativement différent de celui des fraisiers « pollinisés » (paired t-test : $t = 2.65$, $p\text{-value} = \mathbf{0.01273}$ *).

b. L'intensité de visite des pollinisateurs n'est pas expliquée par les facteurs locaux et paysagers étudiés

Aucune des variables paysagères n'a d'influence, d'après le GLM (tableau III), sur le taux de pollinisation. De même, la diversité en adventices dans la parcelle n'explique pas la variabilité du taux de pollinisation.

2. Synergies et antagonismes entre les services de régulation

Les tests de corrélation de Spearman font ressortir différentes corrélations positives ou négatives entre les taux de prédation ainsi que le taux de pollinisation (tableau IV).

Ainsi, une corrélation positive significative entre le taux de prédation des pucerons au sol et le taux de prédation des pucerons en canopée est observée, en session 1 comme en session 2 ($Rho = 0.52$ ** et $Rho = 0.44$ *). De même, en session 2, on observe une corrélation entre le taux de prédation des œufs, situés dans la canopée, et le taux de prédation des pucerons situés également en hauteur ($Rho = 0.44$ *) et celui des pucerons placés au sol ($Rho = 0.39$ *). Ainsi, en session 2, les trois taux de prédation (pucerons au sol, au niveau foliaire, et œufs) sont corrélés positivement. Ces corrélations positives indiquent donc que, globalement, les parcelles avec un taux de prédation des œufs faible ont un taux de prédation des pucerons faible.

La matrice de corrélation (tableau IV) montre une corrélation négative entre le taux de prédation des graines en session 1 et le taux de prédation des pucerons au sol en session 2 ($Rho = -0.53$ **). De même, elle fait ressortir une corrélation négative entre le taux de pollinisation et le taux de prédation des graines en session 2 ($Rho = -0.45$ *).

3. Influence des processus de contrôle biologique et des facteurs locaux sur le rendement

3.1 La régulation biologique par les prédateurs n'a pas d'impact sur le rendement

Le premier modèle linéaire (LM) construit pour comprendre les processus locaux expliquant la variabilité du rendement des 30 parcelles suivies a donné peu de résultats (tableau V). En effet, aucun des processus de contrôle biologique étudiés (quatre taux de prédation sur une ou deux sessions) n'a d'influence sur le rendement. Par contre, la diversité en adventices ressort comme ayant une influence négative significative sur le rendement ($p\text{-value} = 0.0175$ *).

IV - DISCUSSION

1. Effets des ressources locales et paysagères sur les fonctions de prédation et de pollinisation

1.1 Des ressources locales limitées

Les relevés botaniques effectués dans les 30 parcelles SEcoMod ont fait ressortir une richesse et une diversité en adventices assez limitées. Bien que nous nous attendions à plus de plantes indésirables dans les parcelles, leur faible présence est compréhensible. En effet, une forte présence d'adventices est, la plupart du temps, suivie d'une baisse de rendement, en particulier pour les céréales à paille (Kristensen, Olsen & Weiner 2008), et donc n'est pas recherchée par les agriculteurs. Par ailleurs, d'après ces auteurs, un semi dense du blé permet une suppression ou une diminution des adventices, engendrant du même temps une hausse du rendement. Ces constats ont été faits dans les parcelles SEcoMod : la plupart des parcelles étaient semées très denses, ne laissant pas de place aux adventices.

1.2 Influence des ressources adventices et du paysage sur les contrôles biologiques

♣ Les expérimentations menées sur le terrain pour évaluer la bio-régulation ont bien fonctionné. En effet, on a pu observer une prédation réelle sur les bioagresseurs placés dans les parcelles de céréales. Cette régulation est cependant différente en fonction du type de proie et du placement sur la plante. Les pucerons placés au niveau foliaire ont ainsi été beaucoup moins consommés que les trois autres types de bioagresseurs.

Ces différences entre les quatre types de proies sont certainement dues à la différence de cortège de prédateurs de ces espèces. Au sol, par exemple, les cortèges de granivores et de carnivores se partagent les différentes proies, bien que de nombreuses espèces omnivores soient présentes également dans les parcelles. Par exemple, les principaux prédateurs des pucerons sont, d'après une étude de Sunderland & Vickerman (1980), les forficules, les carabes et les staphylyns, mais d'autres prédateurs comme les syrphes ou des arachnides jouent également un rôle dans leur consommation. Les graines, elles, sont consommées principalement par des carabes granivores ou omnivores (Honek *et al.* 2013). De même, la différence de prédation entre les pucerons au sol et en canopée montre une différence dans le cortège de prédateurs est différent entre les deux. Par ailleurs, le taux de prédation des pucerons au sol est borné sur son maximum. Sur le terrain, les pucerons étaient très souvent tous consommés, quelle que soit la carte ou la parcelle. Cette constatation nous amène à nous poser la question du protocole. La pose de plus de pucerons sur les cartes aurait, en effet, peut-être permis d'observer un taux de prédation plus important, mais également aurait eu un impact potentiel intéressant sur la variabilité inter-parcellaire de cette

prédation, qui est dans notre cas assez faible et permet difficilement de faire ressortir des ‘patrons’ de prédation des pucerons au sol.

♣ On a pu observer une forte variabilité temporelle de la prédation pour les œufs et les graines. Les niveaux de prédation de ces proies a en effet fortement augmenté en session 2. Cela nous laisse à penser que les cortèges de prédateurs arrivent assez tard dans la saison pour ces deux types de bioagresseurs.

On peut supposer que les prédateurs des œufs et des graines sont principalement des espèces spécialistes. En effet, d’après Welch & Harwood (2014) et Tschardtke *et al.* (2005), la prédation précoce est effectuée principalement par des espèces généralistes, capables de se nourrir même lorsque la densité de proies est faible, alors que les prédateurs spécialistes adaptent leur cycle à la présence des proies et ont donc un pic démographique plus tardif, équivalent au pic de présence des ravageurs. Il est donc possible que les prédateurs des œufs et des graines soient des espèces généralistes en première session, qui sont rejointes ensuite par un cortège de prédateurs plus spécialisés. Au contraire, pour les pucerons au sol la prédation déjà forte augmente très peu en session 2. On peut alors supposer que ce sont des prédateurs généralistes (comme le sont les carabes), ayant un cycle plus étalé, qui consomment principalement ces espèces tout au long de la saison. La prédation des pucerons situés dans la canopée reste faible au cours de la saison, interrogeant sur l’abondance du cortège de prédateurs en jeu, mais aussi sur l’adéquation du dispositif pour les prédateurs volants comme les coccinelles.

La prédation précoce a une grande importance, puisqu’elle permet, d’après Welch & Harwood (2014), d’exercer une pression sur des populations de ravageurs encore petites et vulnérables, et donc de limiter leur croissance. Il est ainsi important dans la gestion de l’agroécosystème de pouvoir favoriser le contrôle dans le temps, de manière à avoir une amplitude temporelle suffisamment importante pour lutter de manière efficace contre les bioagresseurs.

♣ On a pu voir que les différents ‘services de contrôle biologique’ sont influencés par des facteurs variés. Ainsi, le taux de prédation des pucerons au niveau foliaire et celui des graines en première session ne sont pas influencés par les variables paysagères étudiées et la diversité d’adventices dans la parcelle. Pour les autres services, elles sont influencées par des facteurs paysagers, et principalement en deuxième session et de manière négative. Seul le taux de prédation des œufs en première session est lié à la diversité en adventices dans la parcelle, bien que d’après Altieri *et al.* (1999), les adventices (dont principalement certaines familles comme les astéracées ou fabacées) influencent la diversité et l’abondance d’arthropodes auxiliaires qui aident à la diminution des populations de ravageurs.

Or, nous avons vu que les cortèges d'espèces prédatrices peuvent être différents d'un type de proie à l'autre mais également dans le temps (Welch & Harwood 2014). On suppose donc ici que les différents cortèges sont influencés par différents facteurs paysagers ou locaux. Par exemple, d'après Barbosa & Wratten (1998), des habitats diversifiés au niveau structurel, biologique ou temporel fournissent une diversité de micro-habitats et donc une diversité de proies pour les ennemis naturels. Ainsi, la présence d'adventices dans la parcelle pourrait favoriser les prédateurs et ainsi la régulation biologique, en augmentant la possibilité qu'ils trouvent des proies. Des niveaux de prédation influencés en session 1 par la diversité d'adventices, comme pour les œufs de lépidoptères, semblent témoigner de la présence d'ennemis naturels généralistes de manière précoce dans la parcelle (et qui y ont potentiellement hiverné), ayant survécu et trouvant des ressources grâce à la diversité d'habitats et de proies fournie par les adventices. Des effets du contexte paysager en deuxième session (comme l'effet positif de la diversité totale du paysage sur les niveaux de prédation des graines) pourraient être associés à des prédateurs spécialistes arrivant de manière plus tardive, et venant des éléments paysagers alentour où ils ont pu hiverner et trouver des ressources complémentaires jusqu'à l'augmentation suffisante des proies dans les cultures. Ces deux types de prédateurs peuvent être appelés, d'après Tschamntke *et al.* (2005), '*cultural species*' (*i.e.* faisant l'ensemble de leur cycle dans la parcelle) et '*dispersers*' (*i.e.* colonisant les cultures depuis les habitats non cultivés).

D'après Chaplin-Kramer *et al.* (2011), de très nombreuses études ont été faites sur l'influence positive de l'hétérogénéité du paysage sur les auxiliaires de culture, les habitats semi-naturels variés permettant l'hivernation et la fourniture de ressources à ces derniers, et l'important *spill-over* des espèces vers les cultures engendrant leur présence dans les habitats cultivés à certaines périodes de l'année (Tschamntke *et al.* 2005, Rand *et al.* 2006). Leur méta-analyse n'a pas montré d'influence du paysage sur les services de régulation eux-mêmes, malgré l'augmentation des auxiliaires, mais de leur côté, Bianchi *et al.* (2006) affirment que la pression de ravageurs est moins importante et la présence d'auxiliaires plus forte dans les paysages complexes. Cela pourrait expliquer l'influence qu'a la diversité des éléments paysagers sur le taux de prédation des graines en session 2, dans notre étude. Ce lien entre paysage et fonctions des espèces auxiliaires est aujourd'hui encore mal connu, et il est ainsi difficile de comprendre pourquoi le pourcentage de bois ou de prairies permanentes autour de nos parcelles influence négativement certains taux de prédation, d'autant plus avec un nombre limité de parcelles étudiées. On peut cependant supposer un effet concurrentiel des prairies permanentes qui seraient attractives pour certains prédateurs aux dépens des parcelles de céréales à paille, tandis qu'un paysage qui devient majoritairement de type forestier serait peu attractif pour les organismes inféodés aux milieux cultivés. Un pourcentage de blé important peut également influencer le *spill-over*, donc

le déplacement des espèces des habitats semi-naturels vers les champs, ainsi que l'abondance des espèces prédatrices généralistes et spécialistes dans la culture (Andow 1991), ou bien induire un phénomène de dilution, ce qui peut expliquer les résultats de nos modèles sur le taux de prédation des pucerons au sol ainsi que celui des graines en deuxième session.

Enfin, les niveaux de prédation évalués dans notre étude sont la résultante de l'action de différents organismes auxiliaires. Cela peut impliquer des effets opposés de variables paysagères sur les taux mesurés. En tous cas, l'ensemble des résultats témoigne de la difficulté à dresser la carte d'un paysage optimal, favorable à l'ensemble des contrôles biologiques souhaités.

1.3 Influence des ressources adventices et du paysage sur le potentiel de pollinisation

♣ Les expérimentations sur le terrain à l'aide des phytomètres ont permis de faire ressortir une pollinisation entomophile au sein de parcelles. Celle-ci est relativement faible dans la plupart des parcelles, voire même nulle sur certaines, mais elle montre cependant la présence de pollinisateurs et la consommation de ressources, dans des parcelles où la culture elle-même ne leur fournit rien. Cole *et al.* (2017) ont récemment montré que l'utilisation des différents éléments paysagers par les pollinisateurs varie dans le temps, en fonction de la disponibilité des ressources. On peut ainsi supposer que la faible pollinisation est en partie due au fait que les relevés effectués à l'aide des phytomètres, en avril, ne correspondent pas à une période favorable à la présence de pollinisateurs en grandes cultures. On peut tout de même considérer ici la parcelle comme ayant un potentiel de soutien au service de pollinisation au niveau paysager. En effet, bien que les pollinisateurs ne sont pas directement utiles pour les cultures étudiées, celles-ci peuvent apporter à ces auxiliaires des ressources leur permettant d'aller polliniser ensuite les parcelles alentour.

♣ Cependant, il ne nous est pas encore possible de comprendre qu'est ce qui influence cette pollinisation entomophile dans les parcelles. Aucune des variables paysagères de même que la communauté adventice locale n'est, en effet, ressortie comme ayant une influence sur celle-ci. Ces résultats peuvent être dus aux ressources adventices limitées dans les parcelles étudiées. Pour ce qui est de l'impact du paysage et de son hétérogénéité sur la pollinisation, il est étonnant d'avoir de tels résultats. En effet, de nombreux auteurs ont montré l'effet positif de l'hétérogénéité du paysage sur la pollinisation des cultures (Kremen *et al.* 2014 ; Carrié 2016b). On peut alors supposer que le dispositif employé ici n'est pas idéal et qu'il ne permet pas d'avoir des modèles statistiques robustes. En effet, le protocole permettant de mesurer le taux d'akènes fertiles n'était pas toujours très précis. L'utilisation de la taille des graines plutôt que leur flottaison pourrait permettre d'avoir des résultats plus fiables (Ariza *et al.* 2011). De même, la quantité de fraises obtenue avec six fraisiers dans chaque parcelle est variable et limitée. De

nombreux plants n'ont donné qu'une fraise, voire aucune. Les taux de pollinisation calculés correspondraient potentiellement mieux à la réalité si deux fois plus de fraises avaient été obtenus. L'entretien des fraisiers et la manipulation des fruits sont cependant fortement chronophages, et il est difficile d'imaginer doubler la production de ceux-ci.

1.4 Un manque de connaissances sur les pratiques

Contrairement à ce que nous pensions, la diversité en adventices dans la parcelle n'est pas ressortie de notre étude comme ayant un impact sur les processus de régulation. Pour mieux comprendre ce qui, au niveau local, influence ces processus, des connaissances sur les pratiques des agriculteurs seraient nécessaires. En effet, de nombreuses pratiques, dont l'utilisation de pesticides (Pimentel *et al.* 1992 ; Geiger *et al.* 2010 ; Goulson 2013), peuvent impacter plus ou moins fortement la pollinisation et la régulation biologique. De même, Carrié (2016c, soumis) a montré dans son étude dans les coteaux de Gascogne que l'influence du paysage sur la diversité des pollinisateurs et les services qu'elle apporte varie en fonction de l'intensité des pratiques à l'échelle du paysage (*e.g.* intensité d'application d'herbicides dans les cultures). Celles-ci peuvent ainsi fortement influencer nos résultats, mais nous sont inconnues aujourd'hui.

2. Synergies et antagonismes entre les services de régulation

En session 2, trois taux de prédation (pucerons au sol, au niveau foliaire, et œufs) sont corrélés positivement. Il existe ainsi des synergies entre ces trois services de contrôle biologique qui sont donc potentiellement influencés par les mêmes facteurs, les mêmes pratiques (Bennett *et al.* 2009). Il existe également des synergies entre les taux de prédation des pucerons au sol et en canopée, pour les deux sessions. Ce résultat peut nous amener à supposer que ce sont les mêmes prédateurs qui consomment ces bioagresseurs, mais la forte différence de prédation entre les deux pour chaque session est plutôt le signe que les prédateurs sont différents mais qu'ils sont influencés par les mêmes facteurs au niveau local.

Une corrélation négative existe entre la prédation des graines en session 1 et celle des pucerons au sol en session 2. Ce type d'antagonisme est difficilement interprétable, les deux types de prédation étant étalés dans le temps.

3. Influence des processus de contrôle biologique et de la communauté locale d'adventices sur le rendement

♣ Aucun des processus de contrôle biologique étudiés n'a d'impact sur le rendement. Pourtant, certains auteurs, comme Cardinale *et al.* (2003), ont montré que le rendement est plus important avec l'augmentation de la densité et du nombre d'espèces d'ennemis naturels dans la parcelle. Cependant, nous n'avons pas mesuré directement le nombre d'ennemis naturels ou de ravageurs

mais seulement le taux de prédation sur chaque parcelle. Or, une parcelle ayant un faible taux de prédation n'a pas forcément pour autant un grand nombre de ravageurs et donc de dégâts et d'impacts sur le rendement de la céréale semée. Ainsi, il semble difficile de relier directement les taux de prédation et le rendement en céréales. Le meilleur moyen pour cela serait de connaître, en plus du service de régulation, la densité de ravageurs (par ex. de pucerons) au même moment sur les parcelles.

♣ La diversité en adventices a une influence négative significative sur le rendement. En effet, comme précisé plus tôt, une forte présence d'adventices est souvent synonyme d'une baisse de rendement (Kristensen, Olsen & Weiner 2008). Deux parcelles influencent principalement cette tendance dans notre étude. La première (Sd01) sur laquelle l'agriculteur a choisi de ne pas agir, ce qui peut donc expliquer les fortes densité et richesse en adventices, et la deuxième (Sd29) dont la densité était faible suite à une attaque de ravageur au semi, qui a engendré l'arrivée en nombre des adventices. Dans le premier cas, on peut supposer que les adventices ont eu un impact sur le rendement, mais dans le deuxième le rendement aurait été faible même sans la présence d'adventices, qui se sont installées parce que l'espace était disponible. Encore une fois, nos résultats montrent des tendances, mais il serait intéressant de connaître des détails plus précis sur la conduite des cultures dans les parcelles pour être sûrs de les interpréter correctement.

♣ Ces résultats nous font supposer que la prédation par les auxiliaires de cultures et les bénéfiques qu'ils peuvent apporter ne compensent pas la présence d'adventices dans la parcelle. Cependant, nous pouvons faire l'hypothèse que sur une parcelle sans traitement chimique insecticide et donc avec un potentiel d'attaque de ravageurs plus important, l'intérêt de la prédation pourrait ressortir. Dans un cas avec un fort traitement, seule la présence d'adventices se retrouve néfaste à la culture, et ainsi la présence de prédateurs ne change rien. L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est une donnée qui devrait être prise en compte dans les futures analyses.

4. Perspectives

♣ Ce travail nous amène à nous poser la question des bénéfiques réels pour l'agriculteur d'une certaine présence d'adventices dans la parcelle, comparés aux impacts négatifs que ceux-ci semblent avoir dans la culture. La mise en place de « *beetle banks* » peut permettre de favoriser la biodiversité dans la parcelle et la régulation par les prédateurs (Collins *et al.* 2002), sans pour autant impacter de manière trop importante le rendement. Ce type de dispositifs n'engendre cependant une augmentation de l'abondance de prédateurs que jusqu'à une certaine distance. La présence de ressources complémentaires au sein même de la parcelle est donc toujours

nécessaire, notamment avec l'augmentation de la taille des parcelles, pour atteindre un équilibre entre prédateurs et ravageurs et donc arriver à un meilleur contrôle biologique.

♣ Ceci reste cependant encore à démontrer. Pour cela, de nouvelles études et analyses doivent être effectuées. La prise en compte des pratiques des agriculteurs au niveau paysager permettrait, par exemple, une meilleure compréhension des synergies et antagonismes entre les services au sein des parcelles, et ce qui les influence. Les pratiques étant multiples, et leur intégration dans les données chronophage, il pourrait être déjà intéressant de classer les parcelles étudiées en deux modalités d'intensité de pratiques et de voir ce qui en ressortirait.

Au niveau des ressources adventices, seules la diversité et la richesse spécifique ont été prises en compte. Or, toutes les espèces n'ont pas les mêmes fonctions dans l'écosystème, de même que la même phénologie. La prise en compte des traits fonctionnels des plantes présentes dans les parcelles, c'est-à-dire de certaines caractéristiques mesurables sur les individus (Violle 2007), permettrait de ne pas seulement tenter de relier la présence de plantes avec la réalisation de services, mais plutôt de comprendre quel type de plante, et ses traits, influence tel ou tel service. L'utilisation des traits est une nouvelle manière d'explorer la biodiversité.

♣ La présence d'adventices dans la parcelle n'est pas seulement soupçonnée d'apporter des ressources aux espèces effectuant un *spill-over* mais également de soutenir les espèces effectuant l'ensemble de leur cycle dans la parcelle. Les données du projet doivent donc être mises face aux données récoltées dans les tentes à émergence cette année, sur les 30 parcelles étudiées. Ces tentes permettent de connaître les espèces hivernant dans le sol, au centre de la parcelle ainsi qu'en bordure.

V – CONCLUSION

Notre étude ne fait pas ressortir de lien fort entre la présence et la diversité d'adventices dans les parcelles en céréales à paille et la pollinisation ou les contrôles biologiques, bien que certains cortèges d'auxiliaires semblent y être plus sensibles, notamment ceux consommant les œufs de lépidoptère. De même, aucune relation entre les services de régulation et le rendement en céréales à paille n'a été observée. Cependant, des réponses variables et parfois opposées entre les niveaux de prédation des diverses proies ou le potentiel de pollinisation vis à vis des facteurs paysagers sont observés. Des synergies semblent ainsi exister entre différents contrôles biologiques, mais les facteurs paysagers les influencent par ailleurs de manière très variée. Nos résultats témoignent bien de la difficulté à dresser la carte d'un paysage optimal, favorable à l'ensemble des services souhaités. De nombreuses études doivent donc encore être faites pour comprendre de quoi dépendent, au niveau parcellaire comme paysager, le contrôle biologique et

la pollinisation, et à quel point ceux-ci agissent sur le rendement. L'utilisation des traits des adventices mais également l'étude de leur lien avec les espèces hivernant directement dans la culture sont des pistes possibles pour, à terme, mieux comprendre le rôle des cultures elles-mêmes dans la dynamique de l'agroécosystème, et proposer aux acteurs du monde agricole une gestion raisonnée des cultures aux niveaux local et paysager.

BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 19-31.
- Andow, D. A. (1991). Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual review of entomology*, 36(1), 561-586.
- Ariza, M. T., Soria, C., Medina, J. J., & Martínez-Ferri, E. (2011). Fruit misshapen in strawberry cultivars (*Fragaria × ananassa*) is related to achenes functionality. *Annals of Applied Biology*, 158(1), 130-138.
- Barbosa, P., & Wratten, S. D. (1998). Influence on plants on invertebrate predators: implications to conservation biological control. In *conservation biological control, Chapter 5*. Academic Press.
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology letters*, 12(12), 1394-1404.
- Benton, T. G., Vickery, J. A., & Wilson, J. D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*, 18(4), 182-188.
- Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H., & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 273(1595), 1715-1727.
- Brennan J. M., Bender D. J., Contreras T. A., & Fahrig L. (2002) Focal patch landscape studies for wildlife management. In: Wu J, Taylor WW (eds) Optimizing sampling effort across scales. Integrating landscape ecology into natural resource management. *Cambridge University Press*, Cambridge, pp 68–91
- Cardinale, B. J., Harvey, C. T., Gross, K., & Ives, A. R. (2003). Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi-enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem. *Ecology Letters*, 6(9), 857-865.
- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., ... & Kinzig, A. P. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59- 67.
- Carrié, R. (2016a). Hétérogénéité des paysages et des pratiques agricoles - Effets sur la diversité des abeilles sauvages et la pollinisation (*Doctoral dissertation*).

- Carrié, R., Andrieu, E., Ouin, A. (2016b, *in prep.*). Assemblages of uncommon bee species affect pollination success along a gradient of landscape complexity.
- Carrié, R., Andrieu, E., Ouin, A., & Steffan-Dewenter, I. (2016c, *submitted*) Interactive effects of landscape-wide intensity of farming practices and landscape complexity on wild bee diversity. *Landscape Ecology*.
- Chapin III, F. S., Zavaleta, E. S., Eviner, V. T., Naylor, R. L., Vitousek, P. M., Reynolds, H. L., ... & Mack, M. C. (2000). Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405(6783), 234-242.
- Chaplin-Kramer, R., O'Rourke, M., Blitzer, E., and Kremen, C. (2011). A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity: pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters* 14 (9): 922–32.
- Cole, L. J., Brocklehurst, S., Robertson, D., Harrison, W., & McCracken, D. I. (2017). Exploring the interactions between resource availability and the utilisation of semi-natural habitats by insect pollinators in an intensive agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 157-167.
- Collins, K. L., Boatman, N. D., Wilcox, A., Holland, J. M., & Chaney, K. (2002). Influence of beetle banks on cereal aphid predation in winter wheat. *Agriculture, ecosystems & environment*, 93(1), 337-350.
- Collins, K. L., Boatman, N. D., Wilcox, A., & Holland, J. M. (2003). “Effects of Different Grass Treatments Used to Create Overwintering Habitat for Predatory Arthropods on Arable Farmland.” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 96 (1–3): 59–67.
- Crowder, D. W., Northfield, T. D., Strand, M. R., & Snyder, W. E. (2010). Organic agriculture promotes evenness and natural pest control. *Nature*, 466(7302), 109-112.
- Derocles, S. A., Le Ralec, A., Besson, M. M., Maret, M., Walton, A., Evans, D. M., & Plantegenest, M. (2014). Molecular analysis reveals high compartmentalization in aphid–primary parasitoid networks and low parasitoid sharing between crop and noncrop habitats. *Molecular ecology*, 23(15), 3900-3911.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., & Tittone, P. (2011). Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 197-210.
- DYNAFOR. (2013). Présentation.
<https://dynafor.toulouse.inra.fr/dynafornet/index.php/fre/Presentation>

- Eyre, M. D., Luff, M. L., Atlihan, R., & Leifert, C. (2012). Ground beetle species (Carabidae, Coleoptera) activity and richness in relation to crop type, fertility management and crop protection in a farm management comparison trial. *Annals of Applied Biology*, 161(2), 169-179.
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F., Crist, T., Fuller, R., Sirami, C., Siriwardena, G., & Martin, J-L. (2011). Functional Landscape Heterogeneity and Animal Biodiversity in Agricultural Landscapes: Heterogeneity and Biodiversity. *Ecology Letters* 14: 101–12.
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W. W., Emmerson, M., Morales, M. B., ... & Eggers, S. (2010). Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 97-105.
- Goulson, D. (2013). Review: An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977-987.
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Luna, J. M. (2003). Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, 4(2), 107-116.
- Honek, A., Martinkova, Z., & Jarosik, V. (2013). Ground beetles (Carabidae) as seed predators. *EJE*, 100(4), 531-544.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., ... & Schmid, B. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs*, 75(1), 3-35.
- Jauker, F., & Wolters, V. (2008). Hover flies are efficient pollinators of oilseed rape. *Oecologia*, 156(4), 819.
- Klatt, B. K., Holzschuh, A., Westphal, C., Clough, Y., Smit, I., Pawelzik, E., & Tschardtke, T. (2014). Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *In Proc. R. Soc. B* (Vol. 281, No. 1775, p. 20132440). *The Royal Society*.
- Kremen, C., Williams, N. M., Bugg, R. L., Fay, J. P., & Thorp, R. W. (2004). The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecology letters*, 7(11), 1109-1119.
- Kristensen, L., Olsen, J., & Weiner, J. (2008). Crop density, sowing pattern, and nitrogen fertilization effects on weed suppression and yield in spring wheat. *Weed Science*, 56(1), 97-102.

- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., ... & Herzog, F. (2008). Agriculture et biodiversité: des synergies à valoriser. Rapport final. *Ministère de l'Agriculture et de la Pêche*.
- MEDDE, (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie). (2015). Plan ECOPHYTO II. http://www.agence-nationale/recherche.fr/fileadmin/documents/2017/151022_ecophyto.pdf.
- MEA : Hassan, R., Scholes, R., & Ash, N. (2005). Ecosystems and human well-being: current state and trends, vol 1. *Findings of the condition and trends working group of the Millennium Ecosystem Assessment*.
- Nations Unis. 1992. « Convention sur la Diversité Biologique » <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-fr.pdf>
- Norris, R. F., & Kogan, M. (2005). Ecology of interactions between weeds and arthropods. *Annu. Rev. Entomol.*, 50, 479-503.
- Pasher, J., Mitchell, S. W., King, D. J., Fahrig, L., Smith, A. C., & Lindsay, K. E. (2013). Optimizing landscape selection for estimating relative effects of landscape variables on ecological responses. *Landscape Ecology* 28 (3): 371–83.
- Pimentel, D., Acquay, H., Biltonen, M., Rice, P., Silva, M., Nelson, J., ... & D'amore, M. (1992). Environmental and economic costs of pesticide use. *BioScience*, 42(10), 750-760.
- Pineda, A., Morales, I., Marcos-Garcia, M. A., & Fereres, A. (2007). Oviposition avoidance of parasitized aphid colonies by the syrphid predator *Episyrphus balteatus* mediated by different cues. *Biological Control*, 42(3), 274-280.
- Rand, T. A., Tylianakis, J. M., & Tschamntke, T. (2006). Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecology letters*, 9(5), 603-614.
- Raymond, L., Sarthou, J. P., Plantegenest, M., Gauffre, B., Ladet, S., & Vialatte, A. (2014). Immature hoverflies overwinter in cultivated fields and may significantly control aphid populations in autumn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 99-105.
- Requier, F., Odoux, J. F., Tamic, T., Moreau, N., Henry, M., Decourtye, A., & Bretagnolle, V. (2015). Honey bee diet in intensive farmland habitats reveals an unexpectedly high flower richness and a major role of weeds. *Ecological Applications*, 25(4), 881-890.

- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., ... & Woltz, M. (2016). Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.
- Schellhorn, N. A., Gagic, V., & Bommarco, R. (2015). Time will tell: resource continuity bolsters ecosystem services. *Trends in ecology & evolution*, 30(9), 524-530.
- Sunderland, K. D., & Vickerman, G. P. (1980). Aphid feeding by some polyphagous predators in relation to aphid density in cereal fields. *Journal of Applied Ecology*, 389-396.
- Tamburini, G., De Simone, S., Sigura, M., Boscutti, F., & Marini, L. (2016). Conservation tillage mitigates the negative effect of landscape simplification on biological control. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 233-241.
- Tscharntke, T., Rand, T. A., & Bianchi, F. J. (2005). The landscape context of trophic interactions: insect spillover across the crop—noncrop interface. In *Annales Zoologici Fennici* (pp. 421-432). Finnish Zoological and Botanical Publishing Board.
- Tscharntke, T., Karp, D., Chaplin-Kramer, R., Batáry, P., DeClerck, F., Gratton, C., ... & Hunt, L. (2016). When Natural Habitat Fails to Enhance Biological Pest Control – Five Hypotheses. *Biological Conservation* 204, Part B: 449–58.
- Vanbergen, A. J. (2013). Threats to an ecosystem service: pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5), 251-259.
- Vialatte, A., Dedryver, C. A., Simon, J. C., Galman, M., & Plantegenest, M. (2005). Limited genetic exchanges between populations of an insect pest living on uncultivated and related cultivated host plants. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 272(1567), 1075-1082.
- Vialatte A., Plantegenest M., Simon J.C. & Dedryver C.A. (2007). Farm-scale assessment of movement patterns and colonisation dynamics of the grain aphid in arable crops and hedgerows. *Agricultural & Forest Entomology*, 9: 337-346.
- Vialatte, A. (2015). “Formulaire de proposition du projet SEcoMod.” AàP EcoSerV 2 : projet “Recherche.”
- Vialatte, A., Tsafack, N., Al Hassan, D., Dufplot, R., Plantegenest, M., Ouin, A., Villenave Chasset, J., and Ernoult, A. (2017). Landscape Potential for Pollen Provisioning for Beneficial Insects Favours Biological Control in Crop Fields. *Landscape Ecology* 32
- Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 116(5), 882-892.

- Welch, K. D., & Harwood, J. D. (2014). Temporal dynamics of natural enemy–pest interactions in a changing environment. *Biological control*, *75*, 18-27.
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological economics*, *64*(2), 253-260.

ANNEXE I : Diagramme de GANTT du projet SEcoMod

(Tiré de l'appel à projet « Ecoserv 2 », Vialatte 2015)

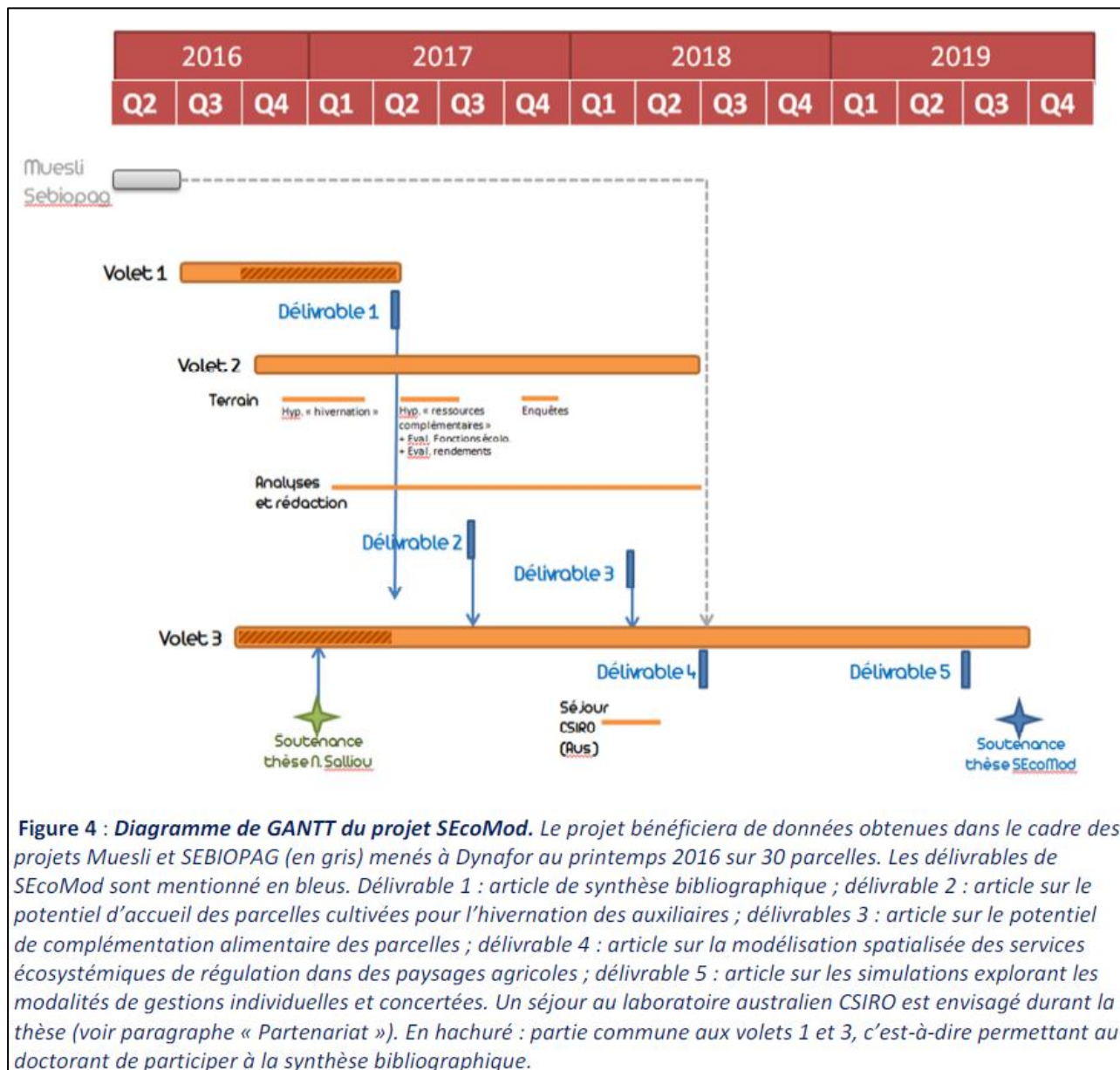
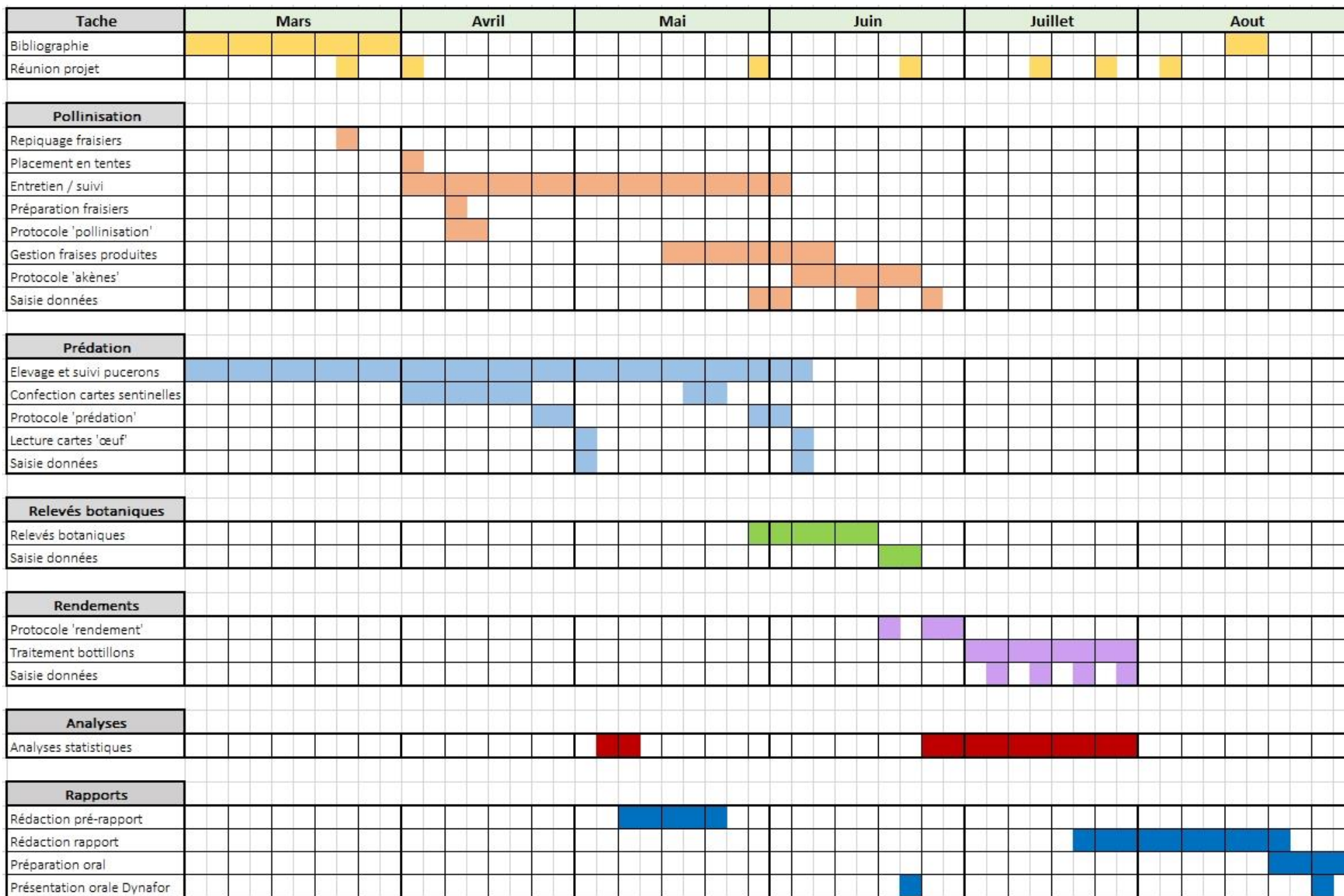


Figure 4 : Diagramme de GANTT du projet SEcoMod. Le projet bénéficiera de données obtenues dans le cadre des projets Muesli et SEBIOPAG (en gris) menés à Dynafor au printemps 2016 sur 30 parcelles. Les livrables de SEcoMod sont mentionnés en bleu. Délivrable 1 : article de synthèse bibliographique ; livrables 2 : article sur le potentiel d'accueil des parcelles cultivées pour l'hivernation des auxiliaires ; livrables 3 : article sur le potentiel de complémentarité alimentaire des parcelles ; livrables 4 : article sur la modélisation spatialisée des services écosystémiques de régulation dans des paysages agricoles ; livrables 5 : article sur les simulations explorant les modalités de gestion individuelles et concertées. Un séjour au laboratoire australien CSIRO est envisagé durant la thèse (voir paragraphe « Partenariat »). En hachuré : partie commune aux volets 1 et 3, c'est-à-dire permettant au doctorant de participer à la synthèse bibliographique.

ANNEXE II : Diagramme de GANTT de la part du projet concernée par le stage



ANNEXE III : Détails sur la mise en place des protocoles « cartes sentinelles »

Les cartes « puceron » : le puceron du pois (*Acyrtosiphon pisum*) est une espèce d'hémiptère de la famille des aphididés, qui se développe sur de nombreuses fabacées. Pour produire suffisamment de pucerons pour confectionner les 1200 cartes nécessaires au projet, les pucerons ont été élevés en cages d'élevage, sur des plants de féverole (*Vicia faba*) changés tous les 15 jours environ. Récoltés régulièrement, les adultes étaient congelés jusqu'à la confection des cartes. Celles-ci étaient réalisées en collant 3 pucerons sur chaque carte à l'aide d'une colle à bois vinylique, puis placées au congélateur jusqu'à utilisation sur le terrain. Les cartes étaient laissées 24h dans la parcelle, les organismes nécrophages prenant le relais sur les prédateurs après cette période.

Les cartes « graine » : il s'agit de graines de *Viola arvensis*. La pensée des champs est une espèce de plante herbacée de la famille des Violacées. Chaque carte est confectionnée avec 10 graines collées sur une moitié à l'aide d'une colle à bois vinylique et conservée jusqu'à utilisation à température ambiante.

Les cartes « œuf » : *Ephestia kuehniella* (pyrale de la farine, appelée aussi teigne de la farine ou papillon gris de la farine est une espèce de lépidoptères de la famille des Pyralidae dont les larves s'attaquent essentiellement à la farine, aux grains de céréales (blé, maïs, riz), à la semoule, aux flocons d'avoine, au muesli, aux biscuits et pâtes alimentaires. Les œufs ont été commandés auprès de la société Biotop. A réception, les œufs ont été collés sur des cartes par saupoudrage sur un point de colle SADER sans solvant d'environ 2mm, puis conservés à -20°C jusqu'à utilisation.

ANNEXE IV : Codes, noms latins et vernaculaires des espèces relevées dans les parcelles SEcoMod

Code espèce	Nom latin	Nom vernaculaire
ACRCA	<i>Acer campestre</i>	Erable champêtre
ALOMY	<i>Alopecurus myosuroides</i>	Vulpin des champs
AOXOD	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	Flouve odorante
ATXPA	<i>Atriplex patula</i>	Arroche étalée
AVEFA	<i>Avena fatua</i>	Avoine folle
BRSNI	<i>Brassica nigra</i>	Chou noir
BROCO	<i>Bromus commutatus</i>	Brome confondu
BROMO	<i>Bromus hordeaceus</i>	Brome mou
BROTE	<i>Bromus tectorum</i>	Brome des toits
CAGSE	<i>Calystegia sepium</i>	Liseron des haies
CARHI	<i>Cardamine hirsuta</i>	Cardamine hirsute
CHEAL	<i>Chenopodium album</i>	Chénopode blanc
CIRAR	<i>Cirsium arvense</i>	Chardon des champs
CONAR	<i>Convolvulus arvensis</i>	Liseron des champs
CYNDA	<i>Cynodon dactylon</i>	Chiendent pied de poule
AGRRE	<i>Elytrigia repens</i>	Chiendent rampant
EPIAD	<i>Epilobium tetragonum</i>	Epilobe à quatre angles
EQUTE	<i>Equisetum telmateia</i>	Prêle géante
EPHEX	<i>Euphorbia exigua</i>	Euphorbe exiguë
EUPOF	<i>Euphrasia officinalis</i>	Euphrase de Rostkov
POLCO	<i>Fallopia convolvulus</i>	Renouée liseron

FRXEX	<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun
FUMOF	<i>Fumaria sp.</i>	Fumeterre officinale
GALAP	<i>Galium aparine</i>	Gaillet gratteron
GERSPP	<i>Geranium sp.</i>	Géranium indéterminé
HELAN	<i>Helianthus annuus</i>	Tournesol
KICEL	<i>Kickxia elatine</i>	Linaire élatine
KICSP	<i>Kickxia spuria</i>	Linaire bâtarde
KNAIN	<i>Knautia integrifolia</i>	Knautie hybride
LABUM	<i>Lamium album</i>	Lamier amplexicaule
LAMPU	<i>Lamium purpureum</i>	Lamier pourpre
LAPCO	<i>Lapsana communis</i>	Lampsane commune
LOLPE	<i>Lolium perenne</i>	Ray-grass Anglais
ANGAR	<i>Lysimachia arvensis</i>	Mouron rouge
MYOAR	<i>Myosotis arvensis</i>	Myosotis des champs
PAPRH	<i>Papaver rhoeas</i>	Coquelicot
POLLA	<i>Persicaria lapathifolia</i>	Renouée à feuilles de patience
PHAPA	<i>Phalaris paradoxa</i>	Alpiste paradoxal
PICEC	<i>Picris echioides</i>	Helminthie fausse-vipérine
PLALA	<i>Plantago lanceolata</i>	Plantain lancéolé
POAAN	<i>Poa annua</i>	Pâturin annuel
POATR	<i>Poa trivialis</i>	Pâturin commun
POLAV	<i>Polygonum aviculare</i>	Renouée des oiseaux
PTLRE	<i>Potentilla reptans</i>	Potentille rampante
RANRE	<i>Ranunculus repens</i>	Renoncule rampante

RUBSPP	<i>Rubus sp.</i>	Ronce
RUMSPP	<i>Rumex sp.</i>	Patience non déterminée
SHRAR	<i>Sherardia arvensis</i>	Shérardie
SONAS	<i>Sonchus asper</i>	Laiteron rude
TAROF	<i>Taraxacum officinale</i>	Pissenlit
TRZSPP	<i>Triticum sp.</i>	Blé ou épautre
VEBOF	<i>Verbena officinalis</i>	Verveine officinale
VERAR	<i>Veronica arvensis</i>	Véronique des champs
VERPE	<i>Veronica persica</i>	Véronique de Perse
VERSE	<i>Veronica serpyllifolia</i>	Véronique à feuilles de serpolet
VIOAR	<i>Viola arvensis</i>	Pensée des champs
VLPMY	<i>Vulpia myuros</i>	Vulpie queue-de-rat

RESUME

Les agroécosystèmes sont des écosystèmes complexes présentant une très forte dynamique au niveau spatial comme temporel. Pour limiter les intrants chimiques mettant en péril leur équilibre, de nombreux travaux portent sur les interactions entre les espèces (notamment auxiliaires) et leurs réponses aux pratiques agricoles et aux facteurs paysagers, afin de développer des mesures de gestion agroécologiques. Dans cette étude, nous testons l'hypothèse que les adventices peuvent favoriser les services écosystémiques de pollinisation et de contrôle biologique, et le niveau de production. Pour cela, nous évaluons sur 30 parcelles en céréales à paille au sud de Toulouse les niveaux de contrôle biologique sur différents bioagresseurs, le niveau de pollinisation, la ressource florale, le rendement et certains indices paysagers. Notre travail ne fait pas ressortir de lien fort entre la diversité d'adventices et les services de régulation. De plus, aucune relation entre ces services et le rendement en céréales à paille n'est constatée. Cependant, des réponses variables et parfois opposées entre les niveaux de services vis à vis des facteurs paysagers sont observées. Nos résultats témoignent de la difficulté à comprendre le fonctionnement d'un agroécosystème et à proposer des mesures de gestion optimales et durables aux acteurs du monde agricole. Cette étude doit être continuée, de manière à mieux comprendre le rôle des adventices pour la biodiversité, et ce qui influence les services de régulation.

Mots-clés : Services écosystémiques, adventices, contrôle biologique, pollinisation, grandes cultures, paysage, agroécologie

ABSTRACT

Agroecosystems are complex ecosystems with very strong spatial and temporal dynamics. To limit chemical inputs that threaten their equilibrium, many studies focus on the interactions between species (especially auxiliary species) and their responses to agricultural practices and landscape factors, in order to develop agro-ecological management measures. In this study, we test the hypothesis that weeds can promote ecosystem services for pollination and biological control, and the level of production. For this purpose, we evaluate on 30 cereal crops fields in the south of Toulouse the levels of biological control on different pests, the level of pollination, the floral resource, the yield and some landscape indices. Our work does not reveal a strong link between weed diversity and regulating services. In addition, no relationship is seen between these services and the yield. However, variable and sometimes conflicting responses between service levels with respect to landscape factors are observed. Our results show that it is difficult to understand the functioning of an agroecosystem and to propose optimal and lasting management measures to agriculture actors. This study should be continued in order to better understand the role of weeds for biodiversity and what influences regulating services.

Keywords: Ecosystem services, weeds, biological control, pollination, crops, landscape, agroecology