



HAL
open science

Évaluation des effets directs et indirects de systèmes de culture et de bandes fleuries sur la régulation de populations de ravageurs de grande culture

Justine Pigot

► **To cite this version:**

Justine Pigot. Évaluation des effets directs et indirects de systèmes de culture et de bandes fleuries sur la régulation de populations de ravageurs de grande culture. Sciences agricoles. Université Paris-Saclay, 2023. Français. NNT : 2023UPASB050 . tel-04453600

HAL Id: tel-04453600

<https://theses.hal.science/tel-04453600>

Submitted on 12 Feb 2024

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.

Évaluation des effets directs et indirects de systèmes de culture et de bandes fleuries sur la régulation de populations de ravageurs de grande culture

*Assessing the direct and indirect effects of cropping systems and
flower strips on pest control*

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n°581 : Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Agro-écologie
Graduate School : Biosphera. Référent : AgroParisTech

Thèse préparée dans l'UMR **Agronomie** (Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE), sous la direction de **Thierry DORÉ**, Professeur, et le co-encadrement de **Antoine GARDARIN**, Maître de conférences, et de **Muriel VALANTIN-MORISON**, Directrice de recherche.

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 16 novembre 2023, par

Justine PIGOT

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Jean-Pierre SARTHOU Professeur, ENSAT	Président
Lionel ALLETTO Directeur de recherche, INRAE (centre Occitanie-Toulouse)	Rapporteur & Examineur
Bruno RAPIDEL Chercheur (HDR), CIRAD	Rapporteur & Examineur
Lucie BUCHI Maîtresse de conférences, University of Greenwich	Examinatrice
Sandrine PETIT Directrice de recherche, INRAE (centre Dijon)	Examinatrice

Titre : Évaluation des effets directs et indirects de systèmes de culture et de bandes fleuries sur la régulation de populations de ravageurs de grande culture

Mots clés : *Brassica napus*, *Psylliodes chrysocephala*, Pratiques agricoles, Etats du milieu, Contrôle biologique, Paysage

Résumé : L'intensification de l'agriculture, qui a permis une augmentation de la production, pose un certain nombre de problèmes environnementaux et sociétaux, comme des pollutions, une perte de biodiversité et des impacts négatifs sur la santé humaine. Ainsi, de nouveaux modes de production ont émergé, comme l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation des sols. Pour réduire la dépendance à l'usage de produits phytosanitaires, ces modes de production mettent en œuvre des combinaisons de techniques permettant de gérer les populations de bioagresseurs, notamment celles d'insectes ravageurs. Par exemple, la réduction du travail du sol peut favoriser les communautés de prédateurs, de manière directe en réduisant les perturbations, et indirectement en leur procurant des micro-habitats et des ressources alimentaires plus nombreuses. L'implantation de plantes compagnes est également souvent mise en avant pour sa capacité potentielle à perturber les comportements des ravageurs. De plus, l'implantation de bandes fleuries pourrait contribuer positivement à la régulation des populations de ravageurs. Ainsi, la thèse a plusieurs objectifs : (i) évaluer les effets directs et indirects, via les états du milieu résultant de pratiques contrastées, des systèmes de culture sur la régulation des populations de ravageurs de grande culture et (ii) évaluer l'impact de la présence de bandes fleuries sur ces populations. Cette thèse est centrée sur la culture du colza et les populations d'altises.

Pour répondre à ces objectifs, nous nous sommes appuyés sur un réseau de parcelles d'une trentaine d'agriculteurs du Bassin Parisien, en agriculture biologique, de conservation du sol ou conventionnelle. Nous avons étudié les impacts des pratiques agricoles sur la régulation biologique de deux manières. La première est fondée sur les effets directs des pratiques via les itinéraires techniques, et la seconde sur les états du milieu qui résultent

des pratiques en place. Ces deux approches sont complémentaires et participent à affiner l'étude des systèmes de culture. Nous avons également pris en compte la régulation top-down en considérant les prédateurs potentiellement présents et les proies alternatives qui peuvent perturber et limiter la régulation. Nous avons observé un fort impact négatif de l'utilisation d'insecticides, et des effets plus modérés d'autres pratiques, comme un effet positif du labour, sur les populations de larves et les risques associés. Nous avons également constaté une forte influence des caractéristiques de la végétation, comme un impact négatif de la présence d'autres espèces végétales sur le nombre de larves. En effet, une diversité végétale pourrait limiter la reconnaissance du colza par les altises. Nous nous sommes également intéressés à un éventuel effet bénéfique de la présence d'une bande fleurie sur l'estivation des altises d'hiver. Nous avons constaté que des bandes fleuries, présentes aux abords des parcelles, ne constituent pas un lieu d'estivation pour les altises d'hiver.

Dans nos études, nous avons également pris en compte des éléments du paysage, comme le pourcentage de culture aux années n et $n-1$. Cependant, leurs effets restent limités.

Enfin, avec cette thèse, nous soulignons la nécessité de réaliser davantage d'études dans des parcelles agricoles. En effet, une telle approche pourrait permettre d'étudier plus finement l'effet de la mise en place de pratiques agricoles et de l'implémentation d'habitats semi-naturels sur la régulation des ravageurs. De plus de telles études, comme celles menées dans la thèse, offrent des pistes de réflexion pour les agriculteurs et tous les acteurs du monde agricole.

Title: Assessing the direct and indirect effects of cropping systems and flower strips on pest control

Keywords: *Brassica napus*, *Psylliodes chrysocephala*, Farming practices, Microenvironment characteristics, Biological control, Landscape

Abstract: The intensification of agriculture, which has led to an increase in production, also arises a number of environmental and social problems, including pollution, biodiversity loss and negative impacts on human health. As a result, new production methods have emerged, such as organic farming or conservation agriculture. To reduce the dependence on pesticides, cropping systems must include other techniques in order to manage the pests. For example, limited soil tillage can promote the natural enemies, both directly by reducing soil disturbance and indirectly by providing micro-habitats and more food resources. Sowing companion plants is also often seen as a mean to potentially disrupt the behaviour of pests. In addition, sowing flower strips could have a positive impact on pest control. The thesis had two objectives: (i) to evaluate the direct and indirect effects of cropping systems on the control of pest populations in autumn and (ii) to evaluate the impact of the presence of a flower strip on these populations. This thesis focuses on oilseed rape and cabbage stem flea beetle populations.

To meet these objectives, we used a network of around thirty farmers in the Paris basin, using organic, conservation or conventional agriculture. We studied the impact of farming practices on pest control in two ways. The first is based on direct effects of farming practices, and the second is based on the microenvironment characteristics, resulting from the farming practices. These two approaches are complementary and help to refine the study of cropping systems.

We have also taken into account top-down regulation by considering the natural enemies and the alternative preys which can disrupt and limit the biological control. We observed a strong negative impact of insecticide use and more moderate effects of other practices, such as a positive one of tillage on larvae populations and the associated risk. We also observed a strong influence of vegetation characteristics, such as the presence of other plant species, which reduces the number of larvae. Indeed, plant diversity around oilseed rape plants could limit the recognition of the host plant by cabbage stem flea beetle. We were also interested in the possible beneficial effect of the presence of a flower strip on aestivation of cabbage stem flea beetles. We found that flower strips near the fields do not act as an aestivation site for this insect.

In our studies, we also took into consideration landscape elements, such as the percentage of crops in years n and $n-1$. However, their effects remain limited.

Finally, this thesis highlights the need to carry out more studies based on farmers' fields. Indeed, such an approach allows more detailed examination of the effect of farming practices and of the implementation of semi-natural habitats on pest control. In addition, studies such as those carried out in this thesis provide food for thought for farmers and all people involved in agriculture.

*A ma Mamie qui nous a quittés bien trop tôt,
Mais qui veille sur nous depuis les Cieux,*

*A mon Papa, sans qui je ne serais pas ici aujourd'hui,
Si le monde n'était rempli que de personnes comme toi,
Il serait bien plus beau,*

*A Ted, que la Destinée m'a envoyé alors que je sombrais,
Mon amour pour toi est infini (+1).*

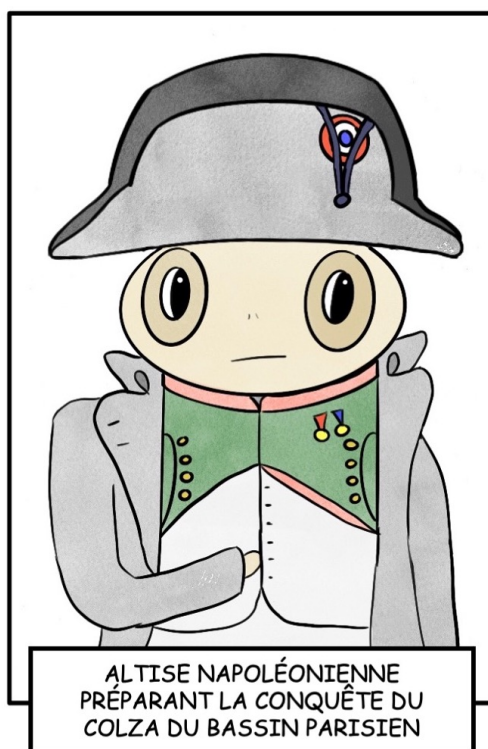
Un jour Napoléon dit : « Un croquis vaut mieux qu'un long discours. ».

Plus tard, un père agriculteur, qui est collectionneur à ses heures perdues, expliqua à sa fille que rien ne valait mieux qu'un livre bien illustré, notamment par Benjamin Rabier.

Ainsi, la fille, qui plus tard rédigea une thèse décida qu'il fallait l'illustrer et ce, même si elle n'avait pas les talents de dessinateur de Germaine Bouret ou de Rosa Bonheur.

En effet, elle se dit que même le moins intéressé des lecteurs pourrait ouvrir sa thèse et a minima y regarder les dessins...

Enfin, la dite fille, à l'origine de la thèse que vous tenez entre vos mains, vous souhaite une bonne lecture, si c'est ce que vous vous apprêtez à faire, sinon vous ne pouvez que regarder les illustrations, c'est bien aussi.



©Dessin de Justine Pigot

En plus de ses multiples dessins, la thèse s'accompagne de nombreuses citations de chansons des Cowboys Fringants.

Si vous souhaitez les écouter, il existe, pour la plupart des chansons citées ici, une version enregistrée avec l'Orchestre Symphonique de Montréal.

Une douce pensée va à Karl Tremblay, chanteur des Cowboys Fringants, qui s'en est allé rejoindre les étoiles la veille de la soutenance de cette thèse.

La vie est un cadeau fragile dont il faut profiter avant qu'il ne soit trop tard.

Avant-propos

« C'est des années plus tard qu'ils ont vu le non-sens
Dans la panique ont déclaré l'état d'urgence
Quand tous les océans ont englouti les îles
Et que les inondations ont frappé les grandes villes
Et par la suite pendant toute une décennie
Ce fut les ouragans et puis les incendies
Les tremblements de terre et la grande sécheresse
Partout sur les visages on lisait la détresse
Les gens ont dû se battre contre les pandémies
Décimés par millions par d'atroces maladies
Puis les autres sont morts par la soif ou la faim
Comme tombent les mouches, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus rien»

Les Cowboys fringants, Plus rien



**Salon International
de
L'Agriculture 2003**

Qui a participé à la thèse ?

Cette thèse a été co-financée par l'INRAE, via son département AgroEcoSystèmes (AE) et AgroParisTech via l'école doctorale ABIES (ED 581, « Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement, Santé»). Une partie des expérimentations a été financée par l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Elle s'est déroulée dans l'UMR Agronomie INRAE/AgroParisTech (UMR 0211) basée sur le site de Grignon, puis sur celui de Palaiseau.

Cette thèse s'appuie sur un réseau d'agriculteurs initié en 2017-2018 dans différents départements du bassin parisien (Essonne, Eure-et-Loir et Yvelines). Ce réseau porte le nom de SCARABEE pour Système de Culture Agroécologiques, Régulations biologiques et Biodiversité.

De nombreuses personnes ont participé au travail de thèse et à son bon déroulement, dans la phase expérimentale, mais également dans les phases d'élaboration des protocoles, de traitement des données, etc. Parmi ces personnes se trouvent notamment l'équipe encadrante, le comité de pilotage, l'équipe de gestionnaires et l'équipe technique de l'UMR Agronomie, dont un technicien très investi à la thèse, des CDD techniques et des stagiaires, ainsi que des volontaires de l'unité. Je remercie encore une fois toutes ces personnes sans qui il n'aurait pas été possible de réaliser cette thèse.



Pourquoi allez-vous lire une thèse faite dans un contexte un peu particulier ?

Comme toutes les thèses, je suppose, ma thèse a connu son lot de désagréments liés à des problèmes matériels et humains. En effet, même en apportant le plus grand soin à tenter de prévoir les petits couacs qui pourraient arriver, certains surviennent malgré tout...

Cependant, le plus grand obstacle n'a pas été ces désagréments, mais une pandémie mondiale qui a décidé de se déclencher un peu avant le début de ma thèse. J'ai donc eu la chance de commencer ma thèse confinée dans ma ferme. Le travail sur le terrain et en laboratoire a ensuite été ponctué de deux autres confinements. Tout comme les systèmes de culture ont des effets directs et indirects sur les organismes qui vivent dans les parcelles, effets que cette thèse cherche à comprendre, la crise Covid et ses confinements ont également de tels effets. Si les effets directs sur mon travail demeurent limités, ce n'est pas le cas des effets indirects. En effet, le deuxième et troisième confinements ont été moins limitants que le premier, notamment pour les déplacements et la venue au laboratoire. Ainsi, même si l'unité Agronomie était plutôt vide, nous avons tout de même pu faire notre terrain. Même s'il a été ponctué d'un blocage de Grignon, où les étudiants ont tenté de sauver le site d'un achat malheureux. Il s'agissait d'une action, certes désespérée, mais que je peux comprendre. De plus, avec un peu de négociations, nous avons limité l'impact sur la thèse et le terrain a pu se faire sans trop d'encombres.

Mais revenons sur la crise Covid et ses effets indirects, ces effets que j'avais bien trop sous-estimés. Il est vrai que la crise a bien impacté notre vie courante durant les confinements, nous limitant à des sorties dans un kilomètre de rayon, sauf pour les courses, sans sortir de notre département, sauf pour les habitants limitrophes, mais pas au tout début, enfin finalement personne ne comprenait la même chose. Nous étions du moins tous en accord sur une chose : toute sortie nécessitait un précieux sésame, j'ai nommé « l'attestation de déplacement dérogatoire ». Puis, il y a eu l'histoire des pass vaccinaux. Mais je ne vais pas m'attarder sur tout cela, car nous l'avons tous vécu et y avons survécu tant bien que mal. Ce qui m'intéresse ici, ce sont les effets indirects qui résultent de la crise. En effet, cet épisode a brisé bien des choses dans notre société, rendant le monde un petit peu plus gris. Les lieux vides et la méfiance des gens ont accru le sentiment de solitude et ont donné naissance à un environnement pesant. Les différentes crises

qui ont succédé au Covid n'ont fait que renforcer ce mal-être ambiant. Ainsi, le monde est bien triste de nos jours, comme le disent les Cowboys Fringants dans leur chanson « D'une tristesse » :

« Le monde est d'une tristesse et les humains sont malheureux
Derrière les beaux filtres, non, les gens ne sont pas joyeux
Dans le chaos et l'indifférence de la foule
On n'entend pas le son d'une larme qui coule »

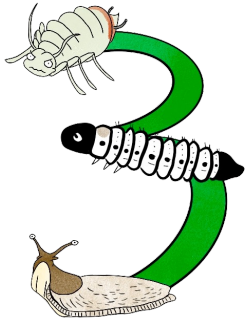
Ainsi, la fin de thèse n'a pas été des plus simples et des plus joyeuses, mais si vous lisez cette thèse, c'est que j'y ai survécu. Malheureusement, je n'ai pas eu le temps de valoriser toutes mes expérimentations pour qu'elles figurent dans ce manuscrit. Mais pas d'inquiétude, cela serait fait ultérieurement et donnera, lorsqu'il le sera possible, lieu à des publications. Affaire à suivre donc !

Pourquoi une fille de paysan décida de faire une thèse ?

D'aussi loin que je me souviens, j'ai toujours été de nature curieuse. J'observais les petits êtres qui peuplaient mon jardin et les parcelles de mon père, en ramenant quelques-uns dans ma maison. Mon père m'emmenait souvent dans nos champs qu'il a cessé de labourer afin de favoriser la vie du sol. J'y comptais les vers de terre, emblème des agriculteurs qui ne labourent pas, comparant nos champs à ceux des voisins. Ma grand-mère me laissait également un petit espace de son jardin pour que je puisse y faire mes expérimentations de semis de blé dans des petits carrés expérimentaux, même si je ne saurais pas dire aujourd'hui ce que je cherchais à tester à l'époque. De toutes manières, j'oubliais souvent mes expérimentations qui se retrouvaient malheureusement envahies d'adventices.

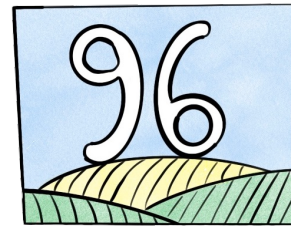
D'aussi loin que je me souviens, j'ai toujours voulu reprendre la ferme familiale, mais mes bonnes capacités et mon intérêt pour la science m'ont conduits sur des études plus longues que prévu. Enfin, il vaut mieux en savoir trop que pas assez. Ainsi, je me décidai à faire une thèse, que je souhaitais la plus large possible. En effet, je me suis assez vite aperçue qu'il existait un fossé au sein du monde agricole : les pistes découvertes par la recherche ne sont pas toujours accessibles aux agriculteurs et certaines sont assez loin de nos problématiques. Même s'il est vrai que tous deux n'ont pas forcément les mêmes objectifs, j'ai toujours trouvé bien dommage que ces deux univers soient si distants. Cela peut avoir plusieurs origines, mais je ne m'attarderai pas trop longtemps sur cette problématique qui ouvre de nombreux débats et peut sans problème faire l'objet d'une thèse à elle seule, et qui est peut-être déjà faite d'ailleurs. Je note cependant que cela peut être un problème de communication, dont la forme n'est pas toujours la plus adéquate entre les différents acteurs du monde agricole. En effet, mon père me disait toujours qu'une explication claire et simple valait bien cent explications complexes. Il citait alors Coluche : « Technocrates, c'est les mecs que, quand tu leur poses une question, une fois qu'ils ont fini de répondre, tu comprends plus la question que tu as posée. ». Il ne sous-entendait pas par-là que les scientifiques étaient des technocrates, mais que certaines personnes ont tendance à s'embourber à des explications interminables qui ne sont pas toujours des plus faciles à comprendre. Il peut donc être intéressant d'avoir des personnes à l'interface des différents acteurs, capables de transmettre les informations à l'un comme à l'autre. Je ne sais pas encore quel rôle je jouerai dans cette histoire, mais il est sûr que je vais tenter d'y trouver une place, car il y a, je pense, beaucoup à y gagner.

La thèse en chiffres



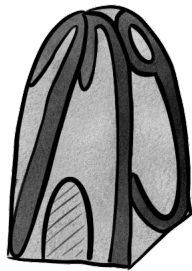
Nous nous sommes intéressés à la régulation biologique des pucerons des céréales, des altises d'hiver et des limaces

C'est le nombre de parcelles suivies (blé, orge et colza d'hiver). Certaines pendant un an, d'autres deux ; pour une ou plusieurs expérimentations



Ce sont les pots Barber posés pour capturer les invertébrés présents, dont les prédateurs des pucerons, altises et limaces

C'est la masse de sol que nous avons prélevée afin de quantifier les limaces présentes dans les parcelles en s'inspirant de la méthode de South (1964)



Nous avons posé des tentes à émergence pour quantifier les altises sortant d'estivation et les arthropodes sortant d'hivernation

Pour mener à bien toutes les expérimentations, nous avons été mobilisés environ 21 mois sur le terrain



Remerciements

« On ne retrouvera jamais l'émerveillement
Que l'on avait enfants
Tout se complique lorsque l'on devient grands

Mais il ne faudrait pas non plus s'en faire accroire
Et vivre sans espoir
La vie n'est pas juste un long purgatoire

S'il est vrai qu'il faut se battre au quotidien
Il n'en sera pas vain
L'effort sait faire apprécier le bon vin

A quoi bon s'en faire et nous apitoyer
On va tous y passer
Tant qu'à être là vaut mieux en profiter »

Les Cowboys fringants, Une autre journée qui se lève



Photographie : Ivan Le Masson

A mon encadrement de thèse

Je remercie mes encadrants de thèse, Thierry, Antoine et Muriel, pour m'avoir accompagnée dans cette aventure. Merci pour votre compréhension, ainsi que pour les réunions et relectures. Je sais que je ne suis pas la plus typique des doctorantes, mais vous avez grandement participé à enrichir tout le travail accompli. Merci Antoine pour ta participation sur le terrain ! Merci Thierry pour tes relectures très efficaces !

Je profite également de ce paragraphe pour remercier les membres de mon comité de pilotage : Dave Bohan, Gaël Caro, Ariane Chabert, Anne Le Ralec, Adrien Rusch et Alexandra Jullien. Nos discussions m'ont beaucoup apporté et ont contribué à améliorer nos expérimentations.

Je remercie également les membres du jury de thèse, Lucie Büchi, Sandrine Petit, Lionel Alletto, Bruno Rapidel et Jean-Pierre Sarthou, pour avoir accepté d'évaluer et de relire mon travail.

Je remercie également l'école doctorale et notamment Alexandre Péry et Ivan Sache qui sont très investis dans leurs rôles et ont toujours répondu présents. Je remercie également Corinne Fiers pour sa réactivité et son aide précieuse.

J'ai également une pensée pour Aude et Hermine, vous ne faisiez pas partie de mon encadrement, mais je vous remercie d'avoir été à mon écoute. Aude, je te remercie pour ta bienveillance et toutes nos discussions sur la thèse. Hermine, je te remercie d'avoir toujours pris le temps de prendre de mes nouvelles et je te remercie encore pour toute l'aide que tu m'as apportée ici, tout comme lorsque nous étions dans l'Empire du Milieu.

A l'UMR Agronomie et les personnes qui ont participé à cette thèse

Je remercie toutes les personnes de l'UMR Agronomie qui m'ont accueillie dans l'unité, pour certains depuis le début de mon stage de fin d'études en 2019. J'y ai passé de bons moments grâce à vous !

Un très grand merci à tous ceux qui ont participé à mes folles aventures sur le terrain ou au laboratoire ! Tout le travail accompli dans la thèse n'aurait pas été possible sans vous !

Le premier que je remercie est sans grande surprise mon acolyte Alexandre ! J'ai bien cru que j'allais m'ennuyer avec toi lorsque tu ne parlais pas beaucoup, à part « oui », « non » ou « hum », mais tu as bien changé depuis ! J'espère que tu garderas de bons souvenirs de cette thèse que nous avons menée ensemble (et de bonnes méthodes pour le terrain) ! Peut-être que nous resterons amis, même si les doctorants ça va, ça vient, mais au moins je sais que tu garderas mon magnifique PowerPoint pour les grandes réunions techniques !

Ensuite, vient notre breton adoré : Dominique, plus connu sous le nom de « Dodo ». Je te remercie d'avoir toujours répondu présent, même pour aller faire du terrain dans la neige ! J'espère que tu réussiras à trouver une autre réserve de bonbons pour survivre !

De même, je remercie Arnaud pour avoir été présent pour les carottes de sol, même si tu as été à l'origine d'un faux départ en 2022, il faudra faire attention à ne plus laisser la gouge sous le vérin !

Je remercie également Richard et Véronique pour leur aide sur le terrain, mais également dans le traitement des échantillons au laboratoire.

Je remercie également Ivan pour son implication sur le terrain et au laboratoire. J'espère que tu t'es bien amusé avec nous !

Je remercie les CDD techniques qui sont venus m'aider sur le terrain et au laboratoire : Emmanuel, Eva, Louis, Mathis et Céline. Je remercie également les stagiaires que j'ai co-encadrés et qui m'ont beaucoup aidée sur le terrain : Lucie, Grégoire, Anaïs et Théo.

Enfin, un grand merci à Moetez qui s'est porté volontaire pour une journée découverte sur le terrain. J'espère que tu gardes un bon souvenir de cette journée sans fin, et notamment du moment où l'agriculteur est venu charger notre Géonor, car la chenille avait fini par casser sur le chemin. Je te remercie aussi pour tous les bons moments à Grignon et Palaiseau (notamment les pauses cookies) !

Vous m'avez tous aidée dans la joie et la bonne humeur, malgré les confinements et tous les problèmes de terrain !

Un grand merci à Arnaud et Nicolas pour votre aide pour les analyses. Les PLS c'est super !

Je remercie également Jean-David Chapelin-Viscardi et son équipe, ainsi qu'Alexis Saintilan, pour leur aide sur l'identification des arthropodes !

Je remercie également la plateforme PIXANIM de l'UMR Physiologie de la Reproduction et des Comportements (INRAE Centre Val de Loire), notamment Hans Adriaensen, Frédéric Elleboudt et François Lecompte. Votre aide nous a été précieuse, même si les analyses ne sont pas présentes dans ce manuscrit.

Un grand merci aux agriculteurs du réseau, sans qui tout cela n'aurait pu être possible. Merci d'avoir accepté nos expérimentations sur vos parcelles et d'avoir pris le temps de répondre à nos questionnaires, parfois très longs.

Je remercie Angélique et Michèle pour toute l'aide que vous m'avez apportée pour l'administratif, les achats, etc. C'est un bonheur d'avoir des personnes comme vous pour nous épauler dans notre aventure de doctorant !

Michèle, je te remercie pour ta bienveillance, pour tes petits mots dans les bons comme dans les mauvais moments. J'espère que je ne t'ai pas causé trop de soucis ! Je te fais beaucoup de bisous.

J'ai une grande et tendre pensée pour mes compères doctorants et CDD, avec qui j'ai passé de super soirées au bar, les repas du midi, les pauses et partagé encore plein d'autres activités, parfois farfelues ! Je suis contente que nous formions une bonne équipe, soudée et vous avez été d'un grand soutien tout au long de la thèse.

Je remercie l'équipe de CDD : Baptiste, Claire, Gael, Louis, Louise, Lucie, Mariem, Matthieu, Michel (bon courage pour ta thèse !), Simon et Thibault.

Un grand merci à Julie pour toutes les activités que nous avons faites ensemble et pour ta bonne humeur. Tu as été d'un grand soutien et je te souhaite beaucoup de bonnes choses pour l'avenir ! Je te remercie également énormément pour m'avoir hébergée durant la transition Grignon-Palaiseau, j'espère que je ne t'ai pas trop embêtée !

Une pensée particulière va à Malick : tu me connais depuis l'époque des stages où nous partagions le même bureau, pour ton plus grand plaisir j'en suis sûre, surtout pendant les séances papotages avec Audrey ! Je te souhaite beaucoup de bonnes choses pour la suite !

Un grand merci aux filles, Emma, Juliette et Marie, pour votre bonne humeur quotidienne et nos petites discussions en tout genre. Votre présence m'a fait chaud au cœur. Je vous souhaite beaucoup de courage pour la suite !

Enfin un grand merci à Tiana, mon super-RATP-man protecteur du RER B (et de la RATP en général) ! Qu'aurais-je fais sans toi certains jours ?! J'espère que tu as apprécié avoir partagé ton bureau avec moi (au moins pour les bonbons) ! Je te souhaite beaucoup de bonnes choses pour la suite et pour ton avenir dans le ferroviaire !

Une pensée particulière va au Scooby-Gang et aux Gardarinettes : Cécile, Clémence, Lola et Mélissandre. Vous avez ensoleillé mes journées et beaucoup de mes soirées à Grignon ! Cécile et Mélissandre pour toutes ces discussions sur des tonnes de sujets, Clémence pour les activités en tous genres et ta bonne humeur sans faille. Et enfin, Lola, ma sœur de thèse avec qui j'ai partagé tellement de choses ! Je ne vous remercierai jamais assez pour tout !

A mes colloos chéris

Mes colloos chéris de Grigri ! Comment aurait été cette thèse sans vous ?! La collooc 2B a abrité tellement de rires et de bons moments en votre compagnie ! Asma, Manhattan, Pedro et Valentine, vous demeurerez toujours mes colloos adorés et vous aurez toujours une place particulière dans mon cœur ! Je vous dis à bientôt pour une soirée raclette !

Aux amis qui me sont chers

Je remercie toutes les personnes qui me sont chères dans mon petit village marnais. Merci à Monique et Claude, Claudine et Lionel, Marie-Rose et Robert, ainsi qu'à Stéphane et Gabriel. Votre présence égaille ma vie, même si elle augmente souvent un peu mon alcoolémie.

J'ai une pensée pour Anne-Sophie, ma compère de prépa. Même si nous ne sommes pas dans le même cursus, il semblerait que nous finissions à chaque fois dans la même panade... Force et Honneur.

Je pense également à mes meilleures amies : Audrey, Ce et Chloé. Je vous remercie toutes les trois d'avoir toujours répondu présentes pour moi, dans les bons comme dans les mauvais moments ! Vous êtes des femmes formidables et ma vie est pleine de couleurs à vos côtés !

Audrey, ma Bichette, je te remercie pour tout et je te souhaite tellement de bonnes choses. Tu le mérites, ne l'oublie jamais. Nous partageons nos rires et nos pleurs, et nous les partagerons encore un bon moment !

Chloé, mon acolyte depuis tant d'années pour des sorties en tous genres. C'est toujours un plaisir de papoter et faire des plans sur la comète avec toi ! Même si nous devons avorter notre plan initial qui consistait à devenir vieilles filles ensemble, je répondrai toujours présente à toutes nos aventures !

พี่ชนิดา เธอคือคนที่ปรากฏตัวแบบไม่คาดคิดในช่วงกักตัว!
คุณเป็นผู้หญิงที่ยอดเยี่ยมที่ฉันแบ่งปันหลายสิ่งหลายอย่างด้วย! ขอขอบคุณสำหรับทุกสิ่ง!
ฉันหวังว่าการแปลจะดี ถ้าไม่ใช่ฉันก็หวังว่ามันจะตกลงอย่างน้อย!

A ma famille

En premier lieu, je remercie mon papa, un homme admirable sans qui je ne serais pas là. Je ne te remercierai jamais assez pour tout ce que tu as fait pour moi et pour la ferme. La vie n'est pas toujours facile, mais je serai toujours là pour toi (et pour aller à la brocante le samedi). J'espère que cette thèse te plaira !

Je profite également de ce paragraphe pour remercier Thierry, qui a fait sa quarantième moisson avec nous et qui prend soin de notre ferme. Je n'aurais pas pu faire cette thèse si tu n'avais pas été là.

Je remercie également ma sœur, Cathy et mon beau-frère, Michael, ainsi que ma belle-maman, Marie et mon beau-papa, Stéphane, pour leur bienveillance et pour tous ces bons repas.

A Teddy, mon amoureux qui m'a toujours soutenue dans les bons comme dans les mauvais moments. Je ne suis pas certaine que j'aurais fini cette thèse si tu n'avais pas été là. Je te note quelques paroles d'une chanson des Cowboys Fringants que tu connais bien :

« Ça fait que si à' soir t'as envie de rester
Avec moi, la nuit est douce, on peut marcher
Et même si on sait ben que tout' dure rien qu'un temps
J'aimerais ça que tu sois pour un moment
Mon étoile filante »

J'ai également une tendre pensée pour mes petits compagnons à quatre pattes, Dean et Snoopy. Vous êtes de bons collègues lors des journées de télétravail, malgré vos bêtises multiples.

A tous ceux qui sont partis trop tôt

Aux enterrements, il est souvent dit que la personne est partie trop tôt. C'est vrai que pour nous qui restons ici-bas, vous partez toujours trop tôt, mais vous demeurez à jamais dans nos cœurs et dans nos pensées. Je dédie ce paragraphe à tous mes aïeux et tous mes proches qui ne sont plus là aujourd'hui, mais qui veillent toujours sur nous. J'espère que vous serez fiers de moi depuis là-haut.

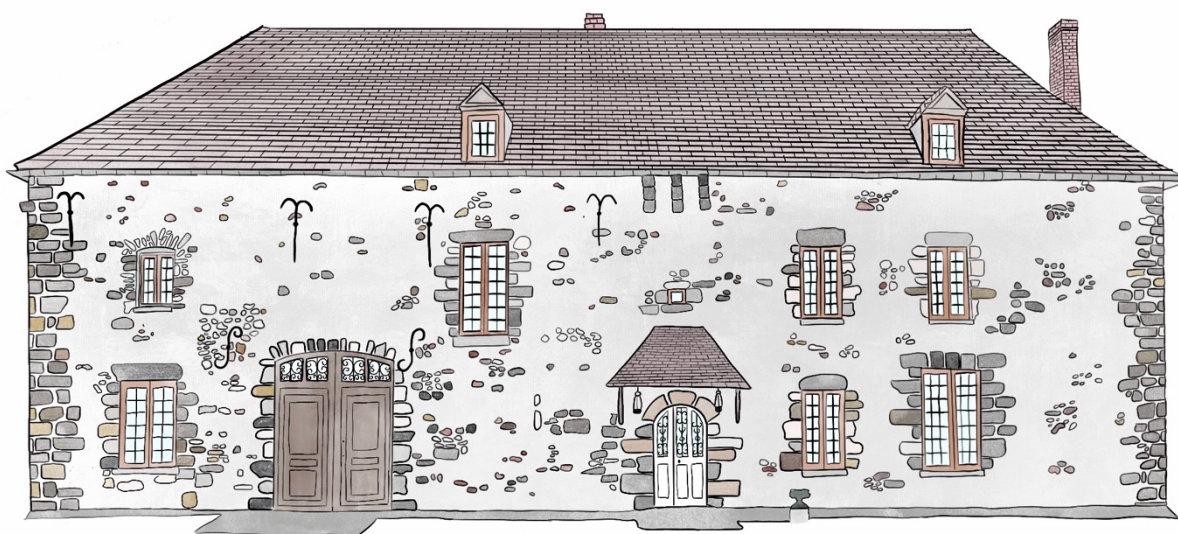


A ma Mamie, l'une des femmes les plus courageuses que j'ai pu connaître.

Aux vieilles pierres qui se tenaient là avant nous et qui demeureront après nous

J'ai toujours aimé les vieilles pierres, et les vieilles choses en général, car elles portent en elles beaucoup d'histoires. Cet amour puise sans nul doute son origine dans ma famille, des paysans depuis des générations, attachés à préserver leur ferme et leurs terres. Notre ferme veille sur ses terres, du haut de sa colline, depuis bientôt cinq cents ans. Cependant, nous n'y habitons que depuis cinq générations. Elle a ainsi protégé ma famille lors de périodes très mouvementées de notre Histoire. Réciproquement, il est possible de dire que notre famille la chérit, en la préservant et l'entretenant. Elle est le lien entre nos générations : chacun y laisse « sa patte », puis la transmet à la génération suivante, chaque nouvelle génération racontant les histoires de celles qui l'ont précédée.

Dans ce paragraphe, je souhaiterais également parler du château de Grignon, qui a une place si importante dans l'histoire de l'agronomie. Enfant, mon père me parlait souvent de « l'école royale d'agriculture de Grignon ». Ce n'est pas tout à fait le nom que cette école a porté à ses débuts, ni l'un de ceux qu'elle porta ensuite, mais il est facile de savoir de quelle école il s'agit. Je n'y ai pas fait mon cursus d'ingénieur agronome, que j'ai fait à Nancy. Heureusement, j'ai pu y faire mon stage d'ingénieur et une grande partie de ma thèse, pour le plus grand bonheur de mon père. Ce fut un déchirement de quitter ce lieu historique pour Palaiseau. Je suis bien triste d'en avoir connu la fin et j'espère que son destin ne sera pas trop cruel.



Dessin de la ferme familiale, par Justine Pigot

Sommaire

AVANT-PROPOS	11
REMERCIEMENTS	17
SOMMAIRE	25
INTRODUCTION	29
I. Un système intensif remis en cause	31
II. L'émergence de systèmes de culture alternatifs en grande culture	34
III. Vers une approche agroécologique de la protection des cultures	39
IV. Comment favoriser les ennemis naturels qui participent à la régulation des ravageurs en grande culture, tout en limitant la présence de ces derniers ?	46
V. L'organisme d'étude : l'altise d'hiver ou grosse altise, un ravageur du colza	59
VI. Questions traitées dans la thèse et hypothèses de recherche	63
VII. Organisation du manuscrit	65
MATERIELS ET METHODES DE LA THESE	69
I. Un dispositif expérimental fondé sur un réseau de parcelles où ont été implantées des bandes fleuries	71
II. Accéder aux effets directs et indirects des pratiques en place sur la gestion des ravageurs, tout en considérant les éléments du paysage	77
III. Méthodes d'échantillonnage des invertébrés	80
IV. Annexes	82
CHAPITRE 1 : COMMENT LES PRATIQUES AGRICOLES INFLUENCENT-ELLES, DIRECTEMENT ET INDIRECTEMENT, LES POPULATIONS DE LARVES D'ALTISES D'HIVER PRESENTES DANS LES PARCELLES DE COLZA ET LES RISQUES QU'ELLES REPRESENTENT ?	89
I. Résumé du chapitre	91
II. Introduction	96
III. Matériel et méthodes	101
IV. Résultats	121
V. Discussion	152
VI. Annexes	162
CHAPITRE 2 : CONTRAIREMENT AUX LISIERES DE BOIS, LES BANDES FLEURIES NE CONSTITUENT PAS UN REFUGE POUR L'ESTIVATION DES ALTISES D'HIVER	183
I. Résumé du chapitre	185
II. Abstract	188
III. Introduction	189
IV. Materials and methods	191
V. Results	196
VI. Discussion	199
VII. Conclusion	201
VIII. Annexes	202

DISCUSSION GENERALE	215
I. Avons-nous réussi à atteindre, au moins partiellement, les objectifs de la thèse ?	218
II. Quels sont les avantages et limites du travail en parcelles agricoles que nous avons identifiés ?	223
III. Comment et pourquoi capter la diversité de pratiques présente au sein des systèmes ?	225
IV. Pourquoi implanter des bandes fleuries à proximité des parcelles cultivées ?	228
V. Quelles sont les perspectives de recherche que nous avons identifiées à la fin de ce travail ?	231
VI. Conclusion générale	236
BIBLIOGRAPHIE	239

Introduction

« On m'a décrit jadis, quand j'étais un enfant
Ce qu'avait l'air le monde il y a très très longtemps
Quand vivaient les parents de mon arrière-grand-père
Et qu'il tombait encore de la neige en hiver

En ces temps on vivait au rythme des saisons
Et la fin des étés apportait la moisson
Une eau pure et limpide coulait dans les ruisseaux
Où venaient s'abreuver chevreuils et orignaux

Mais moi je n'ai vu qu'une planète désolante
Paysages lunaires et chaleur suffocante
Et tous mes amis mourir par la soif ou la faim
Comme tombent les mouches, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus rien »

Les Cowboys fringants, Plus rien



Photographie : Justine Pigot



I. Un système intensif remis en cause

A. Une agriculture « moderne » aux modes de production et aux paysages simplifiés

Après la seconde guerre mondiale, l'agriculture française a connu de profondes mutations afin d'être plus productive et d'ainsi pouvoir répondre à la demande alimentaire européenne. Comme dans de nombreux pays, elle parvient à une forte augmentation des rendements grâce à un usage important d'intrants de synthèse (produits phytosanitaires et engrais minéraux), à l'amélioration variétale et à la mécanisation (Matson *et al.*, 1997; Stoate *et al.*, 2001). Les systèmes de culture (Encadré 1) se simplifient grâce à des rotations plus courtes se concentrant sur des plantes à forte valeur ajoutée (Waligora, 2016). Les régions se spécialisent et certaines abandonnent l'élevage au profit de l'unique production végétale. Avec les politiques de remembrement, la taille moyenne des parcelles augmente. En contrepartie, les habitats non cultivés, comme les bois, les prairies ou les haies, se retrouvent morcelés ou disparaissent (Burel et Baudry, 1990; Stoate *et al.*, 2001; Tscharrntke *et al.*, 2005). Ainsi, les paysages changent de manière profonde. Cette spécialisation a fortement touché certaines régions françaises et notamment le Bassin parisien, qui est maintenant une région d'openfield (paysage ouvert) où la production de céréales, de colza et de betteraves est majoritaire dans la SAU (Agreste, 2020a).

B. Une façon de produire pointée du doigt

Cette agriculture intensive est de plus en plus remise en cause pour diverses raisons. Plus que jamais sa durabilité est pointée du doigt avec l'augmentation du coût des engrais de synthèse, notamment azotés, et des énergies fossiles. Mais elle fait aussi face à une baisse croissante de l'efficacité des produits phytosanitaires due à l'apparition de résistances, ce qui rend de plus en plus difficile la gestion des bioagresseurs (adventices et insectes ravageurs). L'agriculture contribue également à un certain nombre de problèmes sociétaux et environnementaux : pollutions de l'atmosphère et des eaux de surfaces et souterraines, par exemple via l'augmentation des taux de nitrates (Foster et Custodio, 2019) ; changements climatiques (Gregory *et al.*, 2002) ; érosion des sols et de la biodiversité (Figure 1) (Tilman *et al.*, 2002). Ces systèmes ont des effets néfastes sur la faune et la flore présentes dans et à proximité des parcelles (Chaplin-Kramer *et al.*, 2011). Par exemple, il a été montré que l'utilisation de produits phytosanitaires, et notamment les insecticides, pouvait être létale pour des organismes non cibles comme les carabes (Desneux *et al.*, 2007; Geiger *et al.*, 2010). La simplification des paysages agricoles (Figure 1) a également des effets néfastes sur ces communautés, car elle a transformé ou fait disparaître de nombreux habitats semi-naturels, comme les haies, dont ont besoin certaines espèces pendant leur cycle de vie (Keller et Häni, 2000; Benton *et al.*, 2003). Une large gamme d'espèces est touchée par ces différents impacts négatifs (Stoate *et al.*, 2001; Benton *et al.*, 2003; Henle *et al.*, 2008) et nous vivons en ce moment la sixième extinction de masse des espèces sur Terre.



Introduction

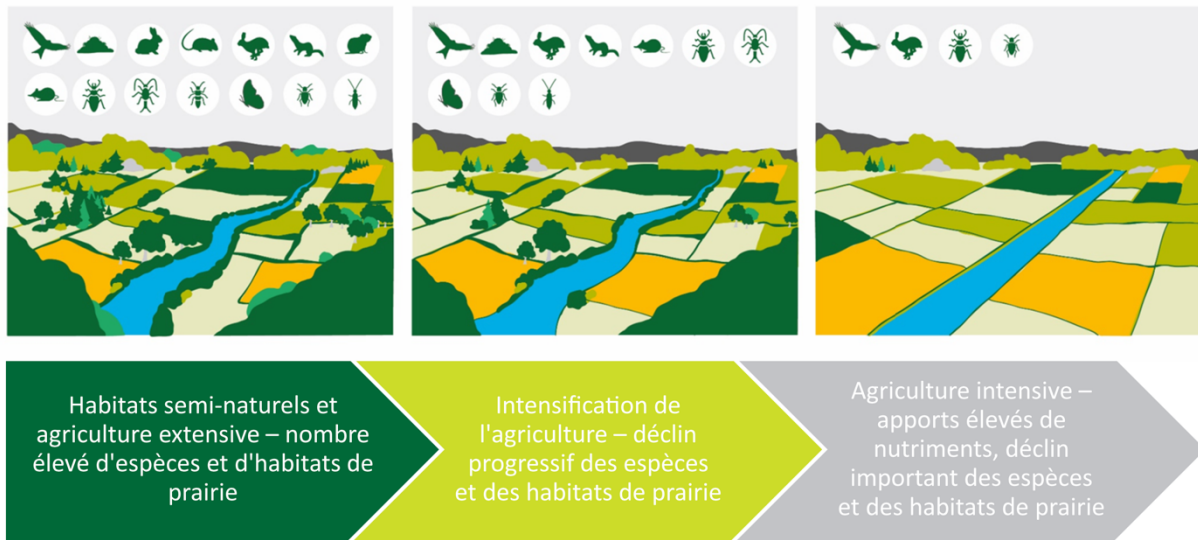


Figure 1 : Évolution des paysages agricoles et impacts sur la biodiversité présente (European Court of Auditors., 2020)

Ce déclin de la biodiversité met en danger le fonctionnement des écosystèmes et notamment des agroécosystèmes (Encadré 1). En effet, il limite la fourniture de services écosystémiques (Encadré 1) comme la pollinisation et la régulation biologique des bioagresseurs (Dirzo *et al.*, 2014). Or, ces services et notamment la régulation biologique pourraient permettre de réduire l'usage des produits phytosanitaires en agriculture. Cette réduction est une volonté sociétale, émanant des acteurs du monde agricole, des politiques et du reste de la population. En effet, il existe des risques liés à cet usage pour la santé humaine, pour les applicateurs (agriculteurs) et les consommateurs. Plusieurs substances actives sont impliquées dans le développement de certaines maladies, comme la maladie de Parkinson (Inserm, 2014; Kim *et al.*, 2017). Régulièrement, des produits ou des substances actives jugés dangereux sont retirés du marché. D'autres toujours en usage, comme le glyphosate, sont régulièrement pointés du doigt par les médias et les citoyens, même si les potentiels effets néfastes ne sont pas toujours évidents à démontrer (Andreotti *et al.*, 2018; Lacroix et Kurrasch, 2023; Muñoz *et al.*, 2023).



Encadré 1 : Quelques définitions

- ❖ **Système de culture et mode de production** : Sebillotte (1990) donne la définition suivante d'un système de culture : il s'agit de « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession », ainsi que par « les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés ». Les systèmes de culture peuvent être regroupés en grands modes de production. Les trois principaux en grande culture sont l'agriculture biologique, de conservation des sols et conventionnelle (Bond et Grundy, 2001; Badgley *et al.*, 2007; Wacker *et al.*, 2018; INRAE, 2020; INAO, 2022).
- ❖ **Agroécosystèmes** : écosystèmes cultivés correspondant généralement à l'unité spatiale qu'est l'exploitation agricole et dont résulte des biens agricoles et des services. L'agroécosystème est co-produit par l'Homme et la nature (Neyton *et al.*, 2018).
- ❖ **Services écosystémiques** : ils sont définis comme les biens et services que les Hommes peuvent tirer des écosystèmes de manière directe ou indirecte pour assurer leur bien-être (nourriture, qualité de l'eau, etc.). Dans les agroécosystèmes, ces services sont co-produits par la nature et les Hommes. Par exemple, le service d'approvisionnement (la production agricole) résulte d'activités humaines (pratiques dans les parcelles) et de processus écologiques, comme la pollinisation (Sirami *et al.*, 2016).



II. L'émergence de systèmes de culture alternatifs en grande culture

De nos jours, l'agriculture doit répondre à cinq grands challenges : (i) maintenir ou augmenter la production ; (ii) produire des aliments sains ; (iii) réduire les impacts négatifs de l'agriculture sur les écosystèmes et sur la santé humaine ; (iv) maintenir la viabilité économique des exploitations agricoles et (v) s'adapter au changement climatique (Deguine *et al.*, 2023).

A. Une agriculture en pleine mutation

Depuis quelques décennies, de nouveaux modes de production émergent, comme l'agriculture biologique (AB) ou l'agriculture de conservation des sols (ACS). Cette émergence résulte de la réaction de certains agriculteurs face à des systèmes et des pratiques qui ne leur convenaient plus, comme l'utilisation de produits phytosanitaires ou le travail intensif du sol. Ces nouveaux modes de production auxquels sont associés de nouveaux systèmes de culture tentent également de répondre à une population de plus en plus soucieuse de l'impact de l'agriculture sur la santé et l'environnement. La demande croissante de produits de qualité, de terroir ou biologiques permet à des agriculteurs d'opérer des mutations de pratiques au sein de leurs exploitations. Ainsi, 6,5 % de la surface en grande culture est aujourd'hui menée en agriculture biologique et son essor continue malgré un léger recul récent des ventes de produits alimentaires bio (Agreste, 2022). De même, les politiques publiques sont engagées en faveur de certaines pratiques comme la réduction des produits phytosanitaires via le plan Ecophyto 2018, proposé par le Grenelle de l'environnement en 2007. Une des mesures phares de ce plan visait à réduire de moitié l'utilisation des produits phytosanitaires en France d'ici 2018, si possible. Ce plan a également promu une utilisation plus vertueuse et sécurisée des produits phytosanitaires via la mise en place de nombreuses actions. Ainsi, depuis 2015, les agriculteurs doivent posséder un Certiphyto, un certificat individuel pour l'usage des produits phytopharmaceutiques qui atteste des connaissances de l'utilisateur (FranceAgriMer, 2022). Le plan a également permis la mise en place du réseau DEPHY (FERME et EXPE) géré par les chambres d'agriculture. Ce réseau s'appuie sur des agriculteurs volontaires et étudie les pratiques et systèmes permettant de réduire l'usage des phytosanitaires (EcophytoPIC, 2022). Le plan initial a subi une révision en 2014 et est devenu Ecophyto II. Il visait à réduire de 25 % l'usage des produits phytosanitaires en 2020 et de 50 % en 2025. Il a été mis à jour en 2018, devenant Ecophyto II+, afin d'ajouter une sortie du glyphosate d'ici 2022 (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022a; Chambres d'agriculture, 2022). Cependant, les effets de ces plans sont mitigés, car le NODU (nombre de doses unités) agricole a augmenté de 20 % entre 2009 et 2017 (Dufour *et al.*, 2021). Les ventes de produits phytosanitaires connaissent néanmoins de fortes fluctuations selon les contextes climatiques et politiques : la hausse en 2018 par exemple est probablement due au climat et à des achats anticipés vis-à-vis de l'annonce de la hausse de la redevance pour pollutions diffuses (Agreste, 2022). Aujourd'hui, les ventes de produits conventionnels (non utilisables en agriculture biologique) demeurent stables (Lamy-Grandidier, 2022; Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2022b).



B. L'émergence de deux nouveaux modes de production

Les systèmes de culture sont souvent regroupés selon des grands modes de production (Encadré 1). L'agriculture dite conventionnelle regroupe des agriculteurs qui se basent sur des interventions mécaniques et chimiques, tout en respectant les bonnes pratiques environnementales imposées par la législation (Néron et Le Chatelier, 2014). Nous pouvons distinguer deux autres modes de production : l'agriculture biologique (AB) qui notamment se passe d'intrants de synthèse et l'agriculture de conservation (ACS) qui notamment limite le travail du sol.

1. *L'agriculture biologique (AB), une agriculture qui limite fortement les intrants de synthèse*

L'agriculture biologique (AB) peut être vue et définie de plusieurs manières. Une définition actuelle et à valeur internationale peut se trouver dans le Codex alimentarius (Commission mixte FAO-OMS du codex alimentarius, 2007). Il s'agit d'un « système de gestion holistique de la production qui favorise la santé de l'agrosystème, y compris la biodiversité, les cycles biologiques et l'activité biologique des sols. Elle privilégie les pratiques de gestion plutôt que les facteurs de production d'origine extérieure, en tenant compte du fait que les systèmes locaux doivent s'adapter aux conditions régionales. Dans cette optique, des méthodes culturales, biologiques et mécaniques sont, dans la mesure du possible, utilisées de préférence aux produits de synthèse, pour remplir toutes les fonctions spécifiques du système. Un système de production biologique est conçu pour :

- a) augmenter la diversité biologique dans l'ensemble du système ;
- b) accroître l'activité biologique des sols ;
- c) maintenir la fertilité des sols à long terme ;
- d) recycler les déchets d'origine végétale et animale afin de restituer les éléments nutritifs à la terre, réduisant ainsi le plus possible l'utilisation de ressources non renouvelables ;
- e) s'appuyer sur les ressources renouvelables dans les systèmes agricoles organisés localement ;
- f) promouvoir le bon usage des sols, de l'eau et de l'air et réduire le plus possible toutes les formes de pollution que les pratiques culturales pourraient provoquer ;
- g) manipuler les produits agricoles, en étant notamment attentif aux méthodes de transformation, afin de maintenir l'intégrité biologique et les qualités essentielles du produit à tous les stades ;
- h) être mis en place sur une exploitation existante après une période de conversion, dont la durée est déterminée par des facteurs spécifiques du site, comme par exemple l'historique de la terre et les types de culture et d'élevage à réaliser. »

Le Codex alimentarius ne constitue pas une réglementation, mais est un guide pour l'établissement de réglementations locales. En effet, toutes les réglementations ne sont pas équivalentes et cela pose problèmes dans les échanges internationaux. En Europe, c'est un règlement du Conseil (n° 2018/848) qui fixe les réglementations de l'agriculture biologique européenne (Doré, 2019).

Ainsi, l'agriculture biologique promeut une agriculture durable aux pratiques respectueuses de l'environnement, de la biodiversité, du bien-être animal et préservant les ressources naturelles (INAO, 2022). Elle favorise des pratiques comme l'épandage de matières organiques (d'origine biologique) ou la présence d'une diversité végétale via l'allongement des rotations. Cependant, la présence de cultures intermédiaires, culture implantée entre la récolte d'une culture principale et le semis de la suivante, est limitée par le travail du sol fréquent afin de contrôler les adventices (Bond et Grundy, 2001; Badgley *et al.*, 2007). Pour être labélisée en AB, une exploitation doit respecter un cahier des charges. Il régit notamment les pratiques interdites, comme par exemple l'usage d'organismes génétiquement modifiés (OGM) (INAO, 2022). Ainsi, ce cahier des charges a des conséquences sur les



Introduction

pratiques des agriculteurs et notamment sur le travail du sol, qui a tendance à augmenter. En effet, l'interdiction d'usage d'herbicides de synthèse est souvent compensée par un travail du sol important avec des faux-semis et des désherbages mécaniques fréquents (Bond et Grundy, 2001).

Les évaluations globales de la durabilité de l'agriculture biologique ont souvent conclu à un plus fort équilibre social, économique et environnemental de ce système, cependant il est souvent également constaté une augmentation de la variabilité des rendements et des valeurs moyennes plus faibles (Smith *et al.*, 2019).

2. *L'Agriculture de Conservation des Sols (ACS) et les systèmes sans labour : des systèmes qui ont abandonné le travail du sol pour préserver ce dernier*

De nouveaux systèmes sont apparus suite à des problèmes d'érosion du sol constatés dans des régions pouvant subir des phénomènes météorologiques peu cléments, comme des tempêtes ou de fortes pluies. C'est notamment le cas en Amérique du Nord depuis l'épisode du *Dust Bowl* dans les années 1930, mais ces systèmes sont également très présents en Amérique du Sud et en Australie (Kassam *et al.*, 2019). Ces nouveaux modes de productions sont fondés sur une suppression du travail du sol qui peut être érosif, notamment le labour. Depuis, un système bien défini a été formalisé : il s'agit de l'Agriculture de Conservation des Sols (ACS). Elle repose sur trois grands piliers qui ont été définis par la FAO en 2001 et qui doivent être appliqués simultanément (INRAE, 2020). Le premier est une absence de tout travail du sol et seule une perturbation de la ligne de semis est tolérée : c'est le semis direct. Les sols doivent également bénéficier d'une couverture maximale par des résidus de cultures et/ou des plantes de couverture, c'est le second pilier. Enfin, le dernier s'appuie sur la diversification des espèces cultivées dans le temps (échelle de la succession) et dans l'espace (associations végétales). Ces différents piliers ont pour vocation de limiter l'érosion et la perte de fertilité des sols. Ces éléments sont la principale motivation de certains agriculteurs, tandis que d'autres y voient surtout un gain de temps, car ce mode de production demande moins de passages au champ (Zanella, 2008). En plus de ces intérêts, l'ACS pourrait également permettre de préserver et améliorer les services écosystémiques rendus par les agroécosystèmes, comme la séquestration de carbone ou une plus forte biodiversité pouvant conduire à une meilleure régulation biologique (Palm *et al.*, 2014).

Cependant, en réalité, peu d'agriculteurs respectent de façon stricte les trois piliers de l'ACS. Il existe ainsi de nombreux systèmes proches de l'ACS, respectant *a minima* une forte réduction du travail du sol, avec un arrêt du labour : ce sont les Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) (Wacker *et al.*, 2018). C'est par exemple le cas des Techniques Culturelles Simplifiées (TCS) où un travail superficiel est autorisé. Au niveau agronomique, les TCS ont trois objectifs : (i) augmenter le taux de matière organique dans l'horizon de surface et ainsi (ii) améliorer la stabilité structurale du sol pour limiter l'érosion et la battance ; (iii) perturber le moins possible la biodiversité et ainsi favoriser les services écosystémiques (Wacker *et al.*, 2018).

L'ACS, et sur certains points les TCSL, restent malgré tout controversées, car, notamment, ces systèmes peuvent être difficiles à mettre en place et manquent de solutions durables pour la gestion des adventices sans herbicides (Kassam *et al.*, 2019). En effet, les TCSL, et en particulier l'ACS, compensent l'absence de gestion mécanique des adventices par la lutte chimique et un usage plus important d'herbicides, notamment du glyphosate. Ainsi, selon le rapport de Reboud *et al.* (2017) « Usage et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française », 40 % des surfaces en TCS et plus de 60 % des surfaces en semis directs ont eu des applications de glyphosate en 2010-2011, contre moins de 20 % des surfaces en labour systématique à occasionnel (moins d'un an sur deux). Cependant il est à noter que la majorité des surfaces étant labourées, de façon systématique ou occasionnelle, près de deux tiers des surfaces ayant eu une application de glyphosate ont également été labourées au moins



occasionnellement dans les six années précédant les études du rapport (Reboud *et al.*, 2017). De plus, les résultats des études sont souvent inconstants, ce qui est lié au type de sol et au climat (Palm *et al.*, 2014). Des solutions alternatives sont à l'étude, comme par exemple la désherbeuse à disque Orbis qui lacère les adventices présentes (Tiers, 2020).

Malgré ces obstacles, l'ACS continue de s'étendre à travers le monde : elle représentait 7,5 % de la SAU mondiale en 2008/2009, avec 106 M ha, et 12,5 % en 2015/2016, avec 180 M ha, soit une augmentation de 74 M ha en sept ans (Kassam *et al.*, 2019). Ces augmentations sont notamment dues au maintien d'une bonne productivité tout en réduisant les coûts de production, en limitant l'érosion des sols et en ayant une meilleure résilience face aux stress biotiques et abiotiques (Kassam *et al.*, 2019).

Ces systèmes ne bénéficient pas de labels similaires à celui de l'AB, mais l'APAD (Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable) a créé un label « Au cœur des sols » qui cherche à reconnaître les agriculteurs en ACS et à leur offrir une valeur ajoutée vis-à-vis des risques qu'ils prennent en modifiant leurs pratiques. Ce label a également une vocation de lien social (APAD, 2022).

Dans la suite de la thèse, nous utiliserons uniquement le terme « Agriculture de Conservation des Sols (ACS) » au sens large, afin de parler des systèmes de culture où le labour est absent.



Ce qu'il faut retenir

- ⇒ L'agriculture est en pleine mutation et de nouveaux modes de production se développent, dont notamment l'**agriculture biologique** (AB) et l'**agriculture de conservation des sols** (ACS).
- ⇒ Ces nouveaux modes de production résultent de la réaction de certains agriculteurs et peuvent contribuer à répondre à des attentes sociétales. C'est notamment le cas de l'agriculture biologique.
- ⇒ Ces deux modes de production reposent sur différents principes, qui peuvent être communs entre eux et avec l'agriculture conventionnelle (Figure 2). Par exemple :
 - L'agriculture biologique s'affranchit des intrants chimiques (engrais et produits phytosanitaires) au profit d'épandage de matières organiques (d'origine biologique).
 - L'agriculture de conservation des sols repose sur une absence de labour et une limitation du travail du sol, ainsi que sur une couverture permanente des sols (par un couvert végétal et via la présence de litière).

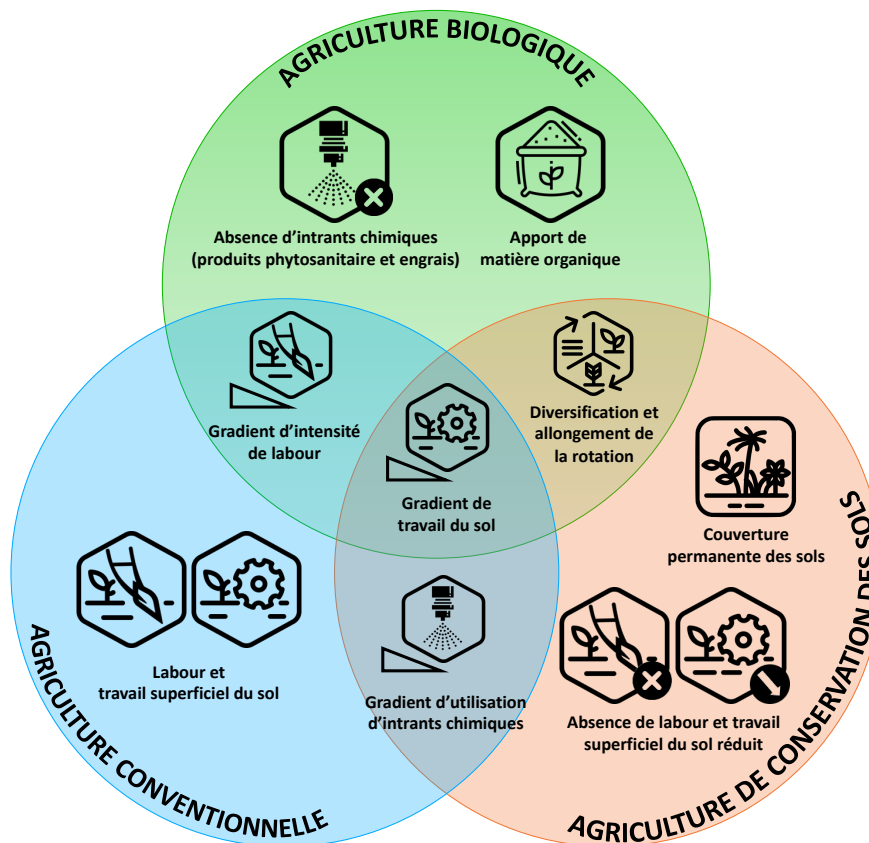


Figure 2 : Schéma représentant les trois grands modes de production utilisés dans la thèse : l'agriculture biologique, l'agriculture de conservation des sols et l'agriculture conventionnelle, avec une liste non-exhaustive de grands principes propres à chaque mode de production ou communs à plusieurs (intersections des cercles).

Les différents systèmes de culture existant dans les plaines agricoles peuvent être regroupés dans ces différents modes de production. Cependant, chaque système de culture étant quasiment unique, il existe une diversité au sein de chaque mode de production (pratiques appliquées en termes de nature, fréquence et intensité).



III. Vers une approche agroécologique de la protection des cultures

Selon Hazard *et al.* (2016), l'agroécologie se présente comme une alternative à une agriculture intensive fondée sur l'artificialisation des cultures par l'usage d'intrants de synthèse et d'énergie fossile. Elle promeut « des systèmes de production agricole valorisant la diversité biologique et les processus naturels (cycle de l'azote, du carbone, de l'eau, équilibres biologiques entre organismes ravageurs et auxiliaires des cultures, etc.) ». Elle consiste en une approche transdisciplinaire qui intègre « les concepts et les méthodes d'une diversité de disciplines, dont l'agronomie, l'écologie, l'économie, la sociologie ». Ainsi l'agroécologie est à la fois une science, un ensemble de pratiques et un mouvement social (Wezel *et al.*, 2018). De l'agroécologie ont émergé de nouvelles approches de la protection des cultures comme la Protection AgroEcologique des Cultures (PAEC), approche plus récente et plus globale que la Protection Intégrée de Culture (PIC).

A. La Protection Intégrée des Cultures (PIC)

L'émergence de systèmes de culture qui limitent certaines pratiques comme l'usage des produits phytosanitaires en agriculture biologique ou le travail du sol dans les systèmes sans labour, demande aux agriculteurs de repenser leur gestion des bioagresseurs. Ils doivent ainsi répondre à l'enjeu d'une gestion durable et efficace, tout en restant économiquement viables. Ainsi est apparue la Protection Intégrée des Cultures (PIC), connue en anglais sous le nom d'*Integrated Pest Management* (IPM) (Stenberg, 2017). Tout d'abord définie comme un contrôle des ravageurs intégrant et combinant de la lutte biologique et chimique (Stern *et al.*, 1959), elle est aujourd'hui souvent définie plus largement comme une approche ou une stratégie holistique pour lutter contre les bioagresseurs des plantes en utilisant tous les moyens disponibles et en limitant l'usage des produits phytosanitaires (Stenberg, 2017). Elle repose ainsi sur une gestion préventive des bioagresseurs via la mise en place d'une diversité de leviers agronomiques comme la rotation des cultures ou l'utilisation de variétés résistantes, ainsi qu'en s'appuyant sur le contrôle biologique via les auxiliaires (Barzman *et al.*, 2015). Le but de la PIC n'est pas d'éradiquer les bioagresseurs, mais de maintenir les populations en dessous d'un seuil économique qui reste viable pour les agriculteurs (Stenberg, 2017). C'est la grande différence entre la suppression des ravageurs et leur contrôle : la suppression est une réduction significative des ravageurs, alors que le contrôle est le maintien de la population sous un seuil qui ne causera pas de dégâts économiques (Schellhorn *et al.*, 2015).

D'après Barzman *et al.* (2015), la PIC repose sur huit principes présentés sur la Figure 3.

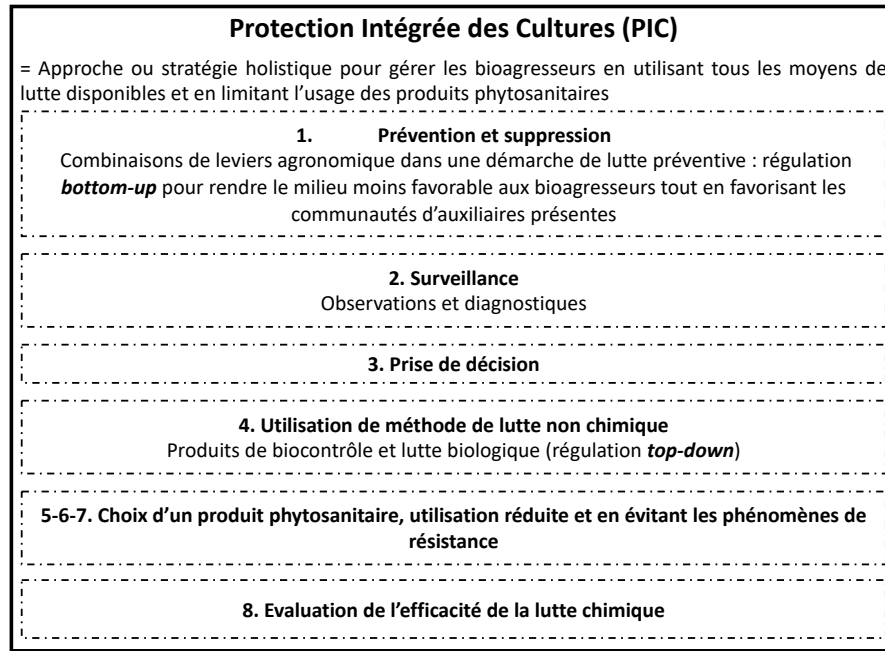


Figure 3 : Les huit principes de la protection intégrée des cultures selon Barzman et al. (2015)

Ainsi, la PIC intègre une approche de régulation *top-down* et *bottom-up* (Figure 3 et 4) (Gurr et al., 2005). La régulation *bottom-up*, qui entre dans le premier principe de la PIC, est une réponse ascendante qui s'appuie sur les caractéristiques du couvert végétal et du milieu de vie afin de limiter le développement des insectes phytophages et leurs dégâts sur la culture présente sur une parcelle. Elle est dépendante de l'impact des pratiques au sein de la parcelle (par exemple : travail du sol, diversité végétale semée) et à proximité de la parcelle (par exemple : implantation et préservation des habitats semi-naturels présents). La régulation *top-down* est une réponse descendante qui entre dans le quatrième principe de la PIC. Elle s'appuie sur une cohorte d'antagonistes présents au sein ou à proximité d'une parcelle pour réguler les ravageurs.

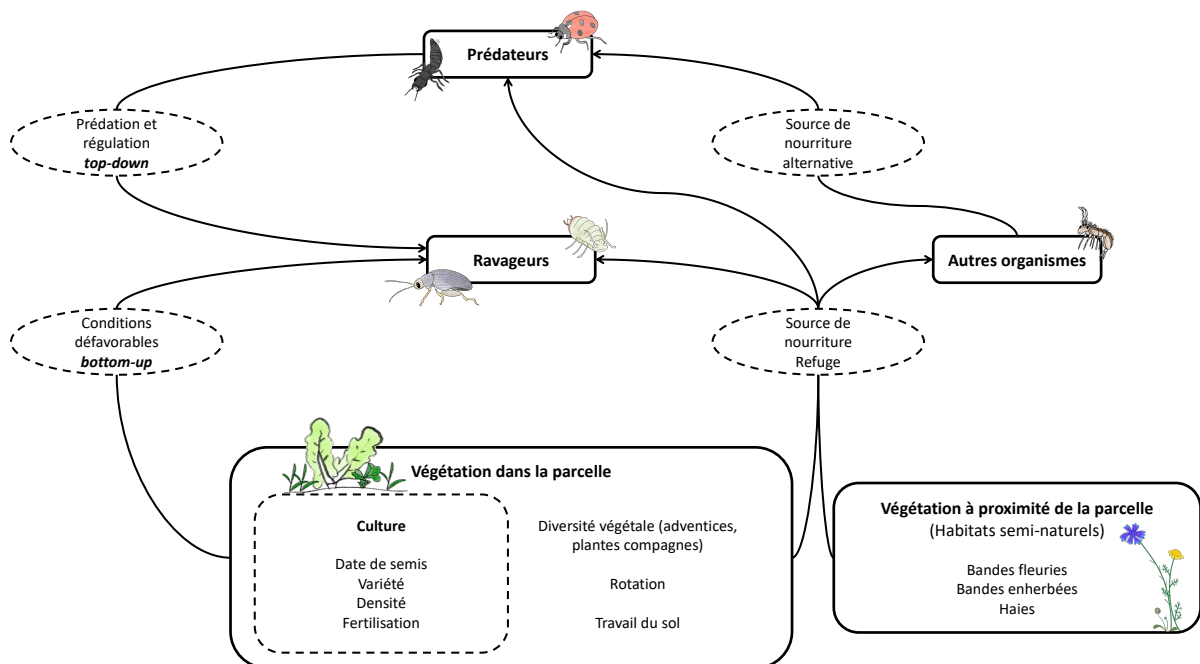


Figure 4 : Régulations top-down et bottom-up à l'échelle d'une parcelle. Illustration inspirée de Gurr, Wratten et Luna (2003), dessins de Justine Pigot.



Dans ses premier et quatrième principes, la PIC implique et combine des « luttes » qui mobilisent les interactions plantes-bioagresseurs comme la lutte culturale, mécanique, génétique ou encore différentes formes de luttes biologiques.

Il existe trois grands types de lutte biologique (Eilenberg *et al.*, 2001) :

- La **lutte biologique par acclimatation** pour gérer les ravageurs exotiques en introduisant leurs ennemis naturels (prédateurs, parasites ou pathogènes) depuis leur habitat d'origine ;
- La **lutte biologique par inondation ou inoculation** qui consiste à introduire en grand nombre l'ennemi naturel d'un ravageur donné par un ou plusieurs lâchers ;
- La **lutte biologique par conservation** qui consiste à protéger et favoriser les populations d'ennemis naturels spontanément présentes (Berger et Delval, 2018). Cela passe par l'amélioration des habitats potentiels au sein de la parcelle via des pratiques favorables à ces derniers, comme un usage réduit d'insecticides. Mais également par les habitats à l'extérieur de la parcelle, en préservant les habitats semi-naturels existants ou via l'implantation de nouveaux (Landis *et al.*, 2000a; Rusch *et al.*, 2010). Ces améliorations et aménagements sont faits dans l'optique de maintenir les populations d'ennemis naturels sur le long terme et que ces derniers soient capables de coloniser les parcelles rapidement afin de gérer efficacement les ravageurs (Ehler, 1998 ; Tscharrntke *et al.* 2007).

En grande culture, les luttes biologiques par acclimatation et par inondation sont difficiles à mettre en place en grande culture car il faut produire les ennemis naturels en grand nombre puis les lâcher en espérant que les individus introduits restent sur la parcelle. En revanche, il est possible de faire de la lutte par conservation. En effet, les agriculteurs peuvent favoriser l'abondance, la diversité et l'activité des ennemis naturels présents dans les parcelles en modifiant l'environnement et le micro-environnement afin de répondre à leurs exigences écologiques (Fauvergue *et al.*, 2020).

La PIC a profité d'un enthousiasme marqué et d'une promotion dans les politiques publiques de différents pays de l'Union Européenne (Barzman *et al.*, 2015; Rossi *et al.*, 2019). C'est par exemple le cas avec les plans Ecophyto en France. Cependant, la plupart des cultures s'appuient toujours aujourd'hui sur un fort usage des produits phytosanitaires. La PIC présente pourtant de nombreux bénéfices comme l'augmentation de la résilience des fermes et la préservation de la fourniture de services écosystémiques. Cela est peut-être dû au fait que les agriculteurs perçoivent souvent la PIC comme complexe à mettre en place et gourmande en temps et en travail. Il existe également de nombreux verrous socio-techniques en amont et en aval de la production (Meynard *et al.*, 2013). Par exemple, le secteur des semences ne s'occupe pas beaucoup de l'implantation d'habitats semi-naturels, comme une bande fleurie. Ainsi, la mise en place d'une telle infrastructure est délicate, car elle nécessite de trouver des fournisseurs de graines parfois peu disponibles sur le marché. De même, des demandes de la part des transformateurs et donc des collecteurs de matières premières agricoles répondant à des standards obligent souvent les agriculteurs à une gestion stricte des bioagresseurs.

Même une fois en place, les résultats sont imprévisibles, en comparaison à l'agriculture conventionnelle ou l'agriculture biologique (Rossi *et al.*, 2019), et sont parfois moindre qu'escomptés. De plus, la mise en place de la PIC par les agriculteurs demande de bonnes connaissances des effets des leviers agronomiques et de leurs combinaisons. Cependant, peu d'études ont une approche interdisciplinaire qui intègre plus d'une méthode de lutte ou plus d'un bioagresseur. Or, de telles études sont nécessaires afin d'identifier des combinaisons de leviers efficaces qui pourront être adaptées à des échelles locales (Barzman *et al.*, 2015; Stenberg, 2017).



B. La Protection Agroécologique des Cultures (PAEC), une vision plus systémique de la protection des cultures

Plus récemment le concept de Protection Agroécologique des Cultures (PAEC) a vu le jour et cherche à adopter une logique plus systémique encore du champ cultivé. Il s'agit de la déclinaison de l'agroécologie à la protection des cultures. Comme elle, la PAEC est à la fois une science, une stratégie ordonnée de pratiques agricoles et un champ d'interactions sociales. Ainsi, la PAEC a pour objectif de favoriser et de préserver la « santé » des agroécosystèmes pour les rendre moins sensibles aux bioagresseurs. Elle s'appuie sur des approches scientifiques systémiques, intégratives et participatives, mais également sur une dimension agronomique via la mise en œuvre d'un ensemble de pratiques combinées de manière logique et ordonnée (respect des réglementations, gestion de l'échelle paysagère à l'échelle de la parcelle). La PAEC favorise les mesures préventives et limite les pratiques curatives en dernier recours. Le fait qu'elle représente également un champ d'interactions sociales permet de promouvoir des stratégies multi-acteurs et de reconcevoir les systèmes de production « du champ à l'assiette » (Deguine *et al.*, 2020).

La PAEC intègre des principes tirés de l'écologie, de l'agroécologie, de la protection intégrée des cultures (PIC), de l'agriculture biologique et de la permaculture. Ainsi, elle tente d'éviter les impasses rencontrées par la PIC, tout en s'inspirant de l'agriculture biologique (non-usage d'intrants de synthèse et coordination des acteurs) et de la permaculture (design des systèmes agricoles en partant des objectifs de production, jusqu'au système de culture et à la protection des cultures) (Deguine *et al.*, 2021; 2023). Finalement, la PAEC intègre une vision plus large où les chercheurs doivent passer de l'échelle parcellaire avec l'étude d'une seule culture à l'échelle d'un agroécosystème dans son ensemble en intégrant les différentes échelles intermédiaires et des dimensions fonctionnelles et temporelles (Garland *et al.*, 2021 ; Deguine *et al.*, 2023). De plus, l'un des principes majeurs de la PAEC est de travailler avec la nature plutôt que de la contraindre.

La PAEC se base sur trois grands axes qui sont (i) la prévention des infestations de ravageurs, (ii) la conservation de la biodiversité pour garder un haut niveau d'abondance et de diversité des ennemis naturels et (iii) préserver la santé des sols car le sol joue un rôle crucial pour le fonctionnement des écosystèmes. Ces trois axes sont complémentaires et permettent de favoriser et préserver la « santé » des agroécosystèmes afin de les rendre moins sensibles aux bioagresseurs (Deguine *et al.*, 2020; 2023).

Selon Deguine *et al.* (2023), la PAEC repose sur sept grands principes :

- (i) Les processus écologiques et fonctionnels sont à la base de la stratégie
- (ii) La reconception des systèmes aux échelles parcellaires, paysagères et régionales est privilégiée par rapport à la mise en place de leviers agronomiques (par exemple : agriculture de précision ou produits de biocontrôle).
- (iii) L'approche est systémique et participative : le « redesign » aux différentes échelles prend en compte l'organisation sociale (par exemple : exploitation agricole) et le paysage socio-écologique (acteurs, marchés disponibles).
- (iv) Les leviers agronomiques et paysagers doivent être mis en place dans un ordre donné : (i) mesures de régulation, (ii) leviers agronomiques et paysagers, (iii) management à l'échelle de l'exploitation agricole, (iv) surveillance, (v) pratiques préventives à l'échelle de l'agroécosystème et (vi) en dernier recours, la lutte curative.
- (v) La priorité est donnée aux mesures préventives plutôt qu'aux curatives. Certaines mesures préventives n'ont pas des effets immédiats (par exemple : implantation de haies).
- (vi) La PAEC résulte d'interactions entre les différents acteurs (dont agriculteurs, techniciens, chercheurs, semenciers) du monde agricole : de la production jusqu'à la transformation-vente des denrées.
- (vii) Utilisation des techniques agroécologiques classiques ou plus récentes comme les drones.



Ces grands principes sont également présentés sur la Figure 5.

En intégrant une dimension sociale, la PAEC permet de co-construire des systèmes de culture avec les agriculteurs qui ont de bonnes connaissances de leurs agroécosystèmes et qui, par le biais d'observations, ont pu identifier des leviers pour la gestion des bioagresseurs. Cela souligne l'importance de travailler en lien avec des agriculteurs et de faire des recherches sur leurs parcelles afin de prendre en compte la diversité de pratiques qui peut exister dans le monde agricole. En effet, les pratiques mises en place sur les parcelles résultent de choix des agriculteurs face aux contraintes qui existent dans leurs parcelles (texture du sol, salissement par les adventices, etc.) et en réponse à leurs objectifs (comme réduire le travail du sol ou l'usage des produits phytosanitaires). On peut constater que certains modes de production décrits plus haut partagent largement certains principes et mises en pratiques agricoles de la PAEC (AB et ACS dans la Figure 2).

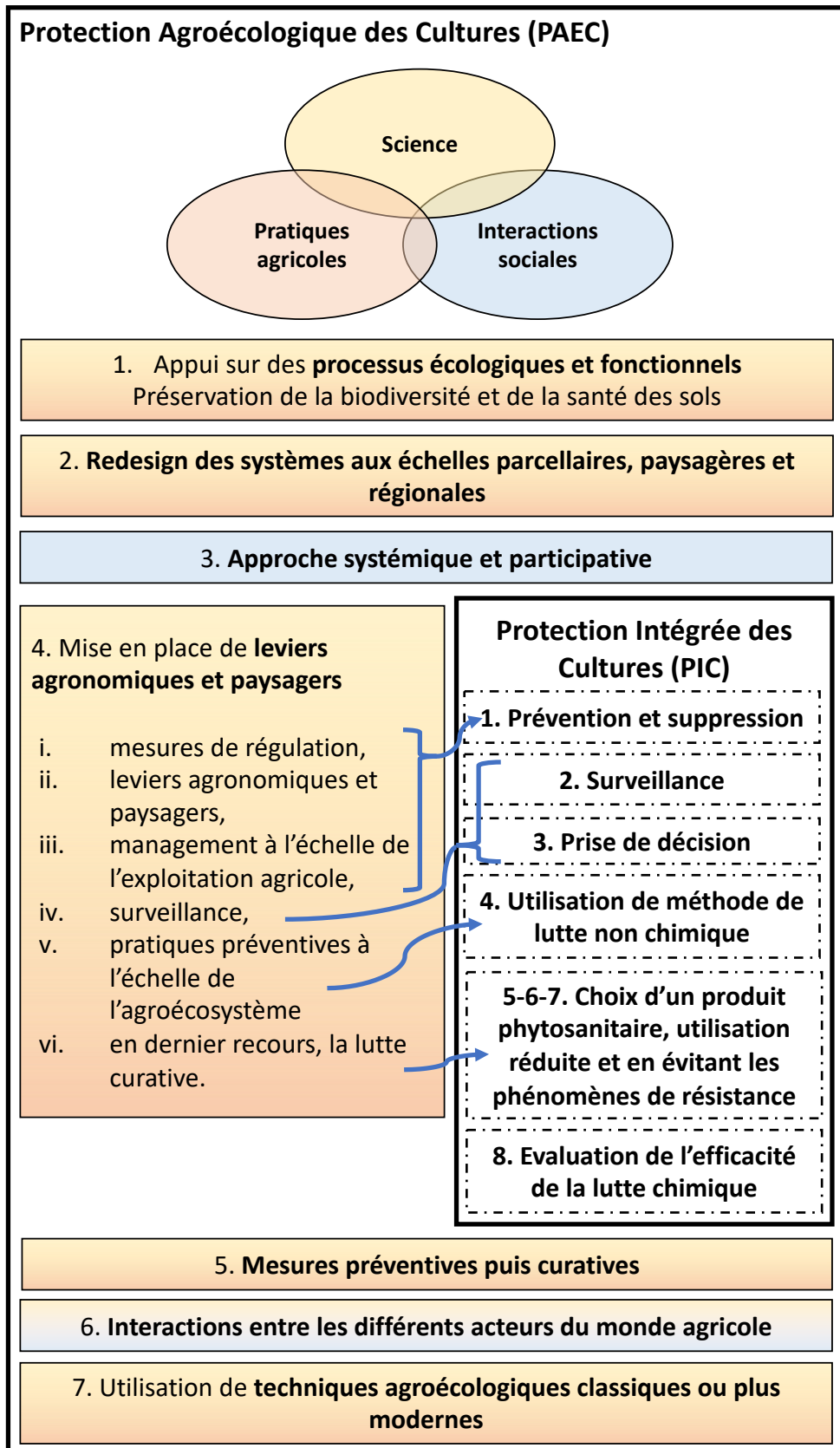


Figure 5 : La protection agroécologique des cultures (PAEC), qui est à la fois une science, une stratégie de pratiques agronomiques et un champ d'interactions sociales, et ses sept grands principes (Deguine et al., 2023). La PAEC intègre la protection intégrée des cultures (PIC) dans une vision plus large.



Ce qu'il faut retenir

L'agroécologie est de plus en plus présente dans le paysage agricole. Elle a fait émerger de nouvelles approches de protection des cultures comme la **Protection Intégrée des Culture (PIC)** et plus récemment, la **Protection AgroEcologique des Culture (PAEC)**, une approche plus globale.

- ⇒ La **PIC** repose sur une gestion préventive des bioagresseurs, via la mise en place de leviers agronomiques et le contrôle biologique, et ne cherche pas à éradiquer les bioagresseurs, mais à les réguler. Elle intègre ainsi une approche de régulation **top-down** et **bottom-up**.
- ⇒ La **PAEC** est à la fois une science, une stratégie de pratiques agricoles et un champ d'interactions sociales. L'intégration d'une dimension sociale permet de co-construire des systèmes de culture avec les acteurs du monde agricole. La PAEC intègre des principes tirés de l'écologie, de l'agroécologie, de la PIC, de l'agriculture biologique et de la permaculture. Elle se base sur trois grands axes :
 - La prévention des infestations de ravageurs ;
 - La conservation de la biodiversité ;
 - La préservation de la santé des sols.



IV. Comment favoriser les ennemis naturels qui participent à la régulation des ravageurs en grande culture, tout en limitant la présence de ces derniers ?

A. Identifier les prédateurs qui participent effectivement à la régulation des ravageurs

De nombreux prédateurs sont présents dans les parcelles, mais tous ne participent pas activement à la régulation biologique d'un ravageur donné : certains sont spécialistes d'un ravageur et d'autres ont un régime alimentaire varié, et souvent opportuniste, qui peut limiter la consommation des ravageurs. Enfin, au sein d'une cohorte de prédateurs présents dans une parcelle, il existe des interactions qui peuvent impacter la régulation biologique.

1. *Des prédateurs généralistes et spécialistes à l'origine d'une régulation top-down des ravageurs*

a. *Prédateurs généralistes versus prédateurs spécialistes*

Une cohorte de prédateurs est présente au sein des parcelles cultivées, mais tous ne participent pas activement à la régulation d'un ravageur donné. En effet, il existe deux types de prédateurs : (i) les prédateurs spécialistes d'un ravageur, comme les coccinelles aphidiphages et (ii) les prédateurs généralistes à l'alimentation variée, comme la plupart des carabes et des staphylins ou encore les araignées. Les premiers, les spécialistes, se concentrent sur une seule proie et ont donc des besoins peu flexibles en termes de ressources alimentaires. Ainsi, ils ont besoin que leurs proies ou leurs hôtes soient présents dans les parcelles avant de pouvoir s'y établir (Gurr *et al.*, 2012). Les seconds, les généralistes, sont souvent présents dans les parcelles avant l'arrivée des ravageurs. Ils peuvent, en effet, se nourrir d'une diversité de proies, parfois même de graines, afin de maintenir leurs populations (Symondson *et al.*, 2002; Gurr *et al.*, 2012; Gailis et Turka, 2013).

Dans leur synthèse bibliographique, Symondson *et al.*, (2002) notent que pour participer efficacement à la régulation des ravageurs, les prédateurs doivent être capables (i) de coloniser rapidement les parcelles dans le temps et dans l'espace, (ii) de maintenir leurs populations lorsque la population de ravageurs décroît et (iii) d'avoir des habitudes alimentaires variées qui leurs permettent de rapidement exploiter une ressource alimentaire et donc de gérer les nouvelles attaques de ravageurs. Les deux derniers points correspondent bien aux caractéristiques des prédateurs généralistes. Leur régime alimentaire varié rend les prédateurs généralistes très intéressants pour la régulation biologique, car il leur permet de survivre dans les parcelles en l'absence de ravageurs et donc d'être présents avant l'arrivée de nouveaux ravageurs. Ainsi, ils permettent la gestion des ravageurs sur le long terme, car ils ont tendance à attaquer les proies disponibles les plus abondantes et ce sont souvent les ravageurs (Symondson *et al.*, 2002). Cependant, ce régime alimentaire varié présente également des inconvénients. En effet, leur large spectre de proies peut limiter la prédation d'un ravageur donné et peut conduire à de la prédation intraguilde qui peut nuire au contrôle biologique (Duffy *et al.*, 2007). L'impact des proies alternatives varie selon leur synchronisation temporelle et spatiale avec les prédateurs. Elles peuvent augmenter (Evans *et al.*, 1999; Harwood et Obrycki, 2005; Harwood *et al.*, 2009) ou diminuer (Koss *et al.*, 2004; Koss et Snyder, 2005; Cuthbert *et al.*, 2020) l'efficacité de la régulation biologique des ravageurs. L'impact de la prédation intraguilde est détaillé dans une partie ultérieure (III.A.2).



Ainsi, bien qu'il soit communément admis que prédateurs généralistes et spécialistes jouent un rôle important dans la régulation biologique, le rôle des prédateurs généralistes a longtemps été remis en question (Symondson *et al.*, 2002; Gurr *et al.*, 2012). En effet, l'impact d'un prédateur spécialiste est plus facilement observable, car il ne prédate que le ravageur et n'est pas influencé par la présence de proies alternatives, comme peuvent l'être les prédateurs généralistes. Ainsi, la participation des prédateurs généralistes à la régulation des ravageurs est plus complexe à observer et à étudier, car il est nécessaire de prendre en compte les ravageurs et les prédateurs, mais également les possibles proies alternatives et toutes les interactions pouvant exister entre ces trois groupes. Cela nécessite également une bonne connaissance de la biologie des espèces présentes et des interactions pouvant exister entre les différents invertébrés présents.

b. Les carabes, des prédateurs généralistes phares du milieu agricole

Les carabes ou Carabidae sont des coléoptères très présents dans le monde avec 35 000 espèces décrites. Cette famille est l'un des taxons les mieux connus en entomologie (Kotze *et al.*, 2011). En effet, les carabes sont très étudiés depuis longtemps, ce qui a permis d'avoir aujourd'hui une bonne connaissance de leur écologie (Kromp, 1999). De plus, l'identification à l'espèce est plus aisée que pour d'autres groupes de prédateurs comme les staphylins ou les araignées.

La majorité des carabes adultes sont des prédateurs généralistes qui peuvent consommer une diversité de proies animales et végétales (Thiele, 1977; Lövei et Sunderland, 1996; Kromp, 1999). Ce sont des polyphages opportunistes qui ont une alimentation variée avec des arthropodes, comme les pucerons, ou des mollusques, comme les limaces (Holland et Luff, 2000), mais également des graines d'adventices (Holland et Luff, 2000; Honek *et al.*, 2003; Petit *et al.*, 2015). Ainsi, ils sont les ennemis naturels de nombreux insectes ravageurs, mais également d'adventices (Kromp, 1999).

Une majorité des espèces est polyphage, il existe donc un gradient allant des granivores stricts, comme certaines espèces d'*Ophonus* (Talarico *et al.*, 2016) aux carnivores stricts, comme *Loricera pilicornis* (Fabricius, 1775) qui ne se nourrit que de collemboles (Hintzpeter et Bauer, 1986). La taille et la forme des mandibules sont souvent caractéristiques du régime trophique. Ainsi, un granivore a des mandibules courtes et larges et un carnivore des mandibules plus longues (Ingerson-Mahar, 2014). Le régime alimentaire des larves est moins étudié, mais il est communément admis que la plupart des larves sont carnivores (Lövei et Sunderland, 1996).

De par leur régime alimentaire varié, toutes les espèces de carabes ne contribuent pas dans la même proportion à la régulation des ravageurs présents dans les parcelles. Ainsi, lorsqu'ils sont étudiés dans une optique de régulation biologique, il est intéressant d'affiner ce groupe de prédateurs en prenant en compte le stade (larve ou adulte) et le régime alimentaire (par exemple le pourcentage de zoophagie). C'est une chose qui n'est pas toujours faite dans les études.

c. Des prédateurs généralistes moins étudiés que les carabes, mais qui participent également à la régulation des ravageurs

D'autres prédateurs généralistes peuvent être présents dans les parcelles, mais sont moins étudiés que les carabes. C'est par exemple le cas d'une autre famille de coléoptères, les staphylins, mais également des araignées (Lami *et al.*, 2023) ou encore des forficules, également connus sous le nom de « perce-oreilles » (Azevedo *et al.*, 2023). En effet, la reconnaissance de ces organismes à l'espèce est plus difficile que pour les carabes et ils sont souvent moins nombreux dans les parcelles. Ce manque d'études peut également conduire à des manques concernant la biologie de ces organismes (cycles de vie, régime alimentaire, etc.).



Introduction

Cependant, ils peuvent participer activement à la régulation des ravageurs de grande culture, tout comme les carabes. Par exemple, Boreau De Roince *et al.* (2013) ont montré que les araignées étaient des prédateurs très actifs des pucerons présents dans les vergers de pommiers, notamment en début de colonisation. En effet, certaines espèces d'araignées peuvent être présentes dans la canopée et y chasser pendant l'hiver, lorsque que d'autres prédateurs sont absents. Il est donc important de considérer les cohortes de prédateurs présents lors des études sur la régulation biologique de ravageurs : les différents prédateurs peuvent avoir des effets complémentaires dans le temps et l'espace.

2. *Diversité et abondance conduisent-elles à une meilleure régulation ?*

Une relation positive est souvent attendue entre la diversité et l'abondance des ennemis naturels et la régulation biologique des ravageurs présents dans les parcelles agricoles. Ainsi, une forte abondance des ennemis naturels est souvent associée à une régulation biologique plus forte (Eveleigh et Chant, 1982; Stiling et Cornelissen, 2005) et des études montrent qu'il existe une relation positive entre la diversité des ennemis naturels et la régulation biologique dans les parcelles (Cardinale *et al.*, 2012; Tilman *et al.*, 2014). De plus, une diversité d'ennemis naturels peut participer à la stabilité du contrôle biologique dans le temps et face aux perturbations environnementales (Cottingham *et al.*, 2001; Loreau *et al.*, 2002; Griffin et Silliman, 2011). En effet, une grande diversité signifie que des espèces sont fonctionnellement redondantes et peuvent ainsi, être complémentaires pour assurer la continuité d'un processus écologique, comme la régulation biologique, dans le temps et l'espace (Lehman et Tilman, 2000; Cottingham *et al.*, 2001; Loreau *et al.*, 2001; 2002).

Cependant, le sens de la relation entre la diversité et l'abondance des ennemis naturels d'une part et la régulation biologique d'autre part peut être variable. En effet, cette relation dépend de caractéristiques de la communauté d'ennemis naturels (besoins de chaque espèce la composant), des caractéristiques des proies disponibles et des conditions environnementales. Ainsi, lorsque les ennemis naturels prédatent un ravageur à différents stades, ils ont un effet complémentaire. Cet effet complémentaire peut atteindre un plateau (relation additive asymptotique). De même, lorsque la présence d'une espèce d'ennemi facilite la capture des proies par une autre espèce, ils ont un effet synergique (Letourneau *et al.*, 2009). En revanche, des effets négatifs peuvent apparaître et limiter la régulation : prédation intragilde, hyper-parasitisme ou changements de comportements des prédateurs (Finke et Denno, 2004; Letourneau *et al.*, 2009). Enfin, il peut ne pas y avoir d'interactions entre les ennemis naturels et donc ne pas y avoir d'impact sur la régulation des ravageurs, c'est une relation neutre (Letourneau *et al.*, 2009). Les différentes relations (non exhaustives) pouvant exister entre la diversité des ennemis naturels et la régulation biologique, sont présentées sur la Figure 6.

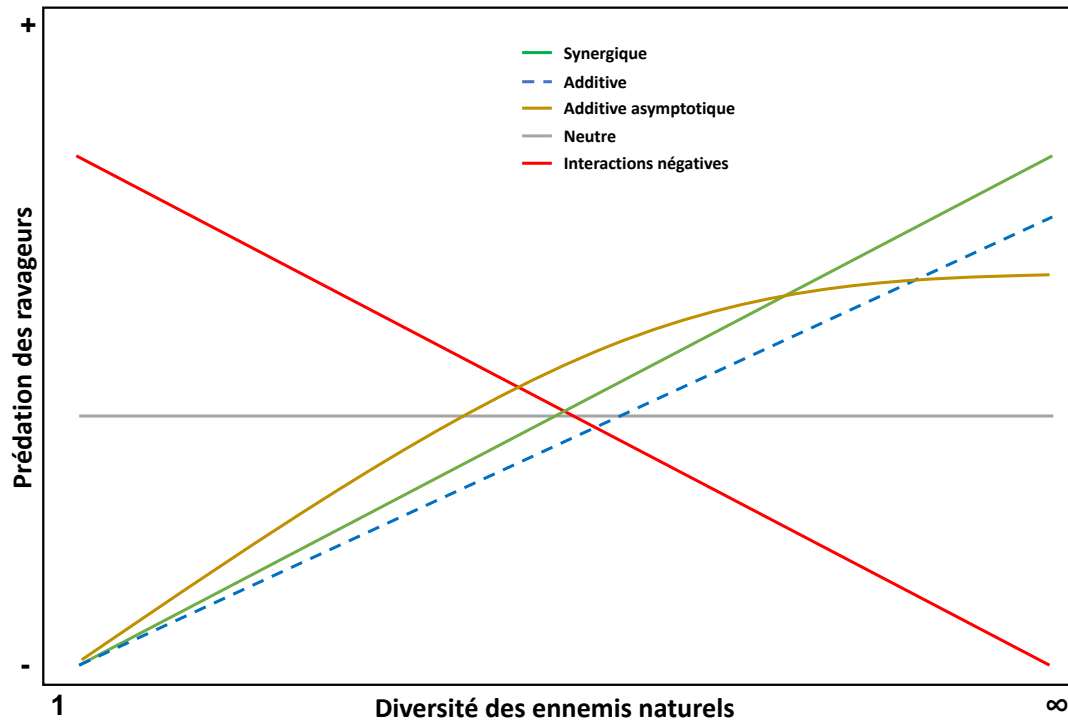


Figure 6 : Relations pouvant exister entre la diversité des ennemis naturels et la prédation des ravageurs. Ces relations peuvent être positives : synergique (en vert), additives (pointillés bleus) ou additives asymptotiques (marron). Mais également neutres (gris) ou négatives (rouge), notamment lorsqu'il y a de la prédation intragilde. Figure adaptée de (Letourneau et al., 2009).



Ce qu'il faut retenir

De nombreux prédateurs sont présents dans les parcelles et peuvent participer à la régulation des ravageurs :

- ⇒ Certains sont **spécialistes** et ne s'attaquent qu'à un seul type de proies. D'autres sont **généralistes**, ils ont un régime alimentaire varié et s'attaquent à de nombreuses proies.
- ⇒ Une grande diversité et abondance de prédateurs est souvent associée à une meilleure régulation des ravageurs : les prédateurs peuvent avoir des effets synergiques et additifs.

Cependant, il est nécessaire de prendre en compte des éléments qui peuvent limiter la régulation :

- ⇒ Les prédateurs peuvent avoir des interactions négatives, comme de la prédation intraguilde qui peut être limitée par la complexité structurale du milieu (Finke et Denno, 2004).
- ⇒ Les prédateurs généralistes s'attaquent à une diversité de proies et peuvent donc être perturbés par la présence d'autres arthropodes que les ravageurs, les **proies alternatives**.
- ⇒ Tous les prédateurs généralistes ne sont pas zoophages, à l'instar des carabes. Il est donc important de prendre en compte le régime alimentaire de façon plus précise, en considérant les pourcentages de zoophagie. Cependant, cela nécessite une connaissance fine de la biologie des prédateurs.

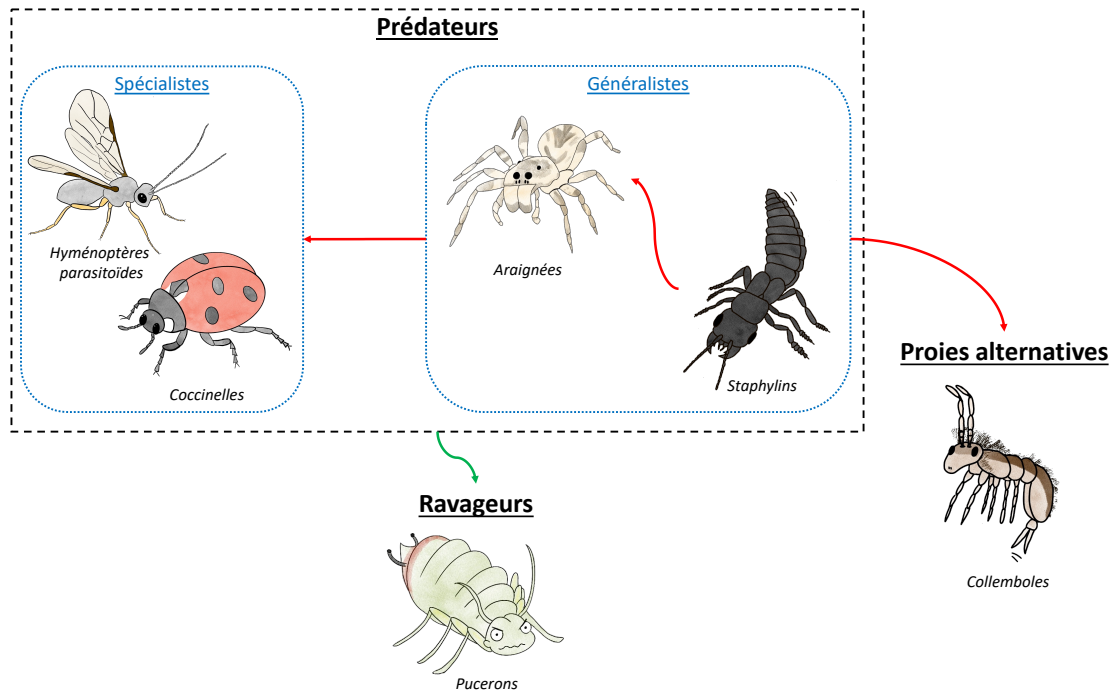


Figure 7 : Schéma simplifié d'un réseau trophique présentant les interactions positives (flèche verte) et négatives (flèche rouge) pouvant exister entre les différents invertébrés présents dans les parcelles, dans le cadre de la régulation biologique des ravageurs. Les prédateurs spécialistes ne seront pas étudiés dans la thèse. (@Dessins de Justine Pigot)



B. Des pratiques agricoles plus ou moins favorables aux arthropodes présents dans les parcelles

Les pratiques agricoles peuvent avoir des effets directs sur les organismes présents dans les parcelles cultivées, comme les effets létaux et sub-létaux des insecticides qui peuvent toucher les ravageurs, mais également d'autres arthropodes non cibles au sein des parcelles. L'intensité de l'impact des pratiques est variable selon la période à laquelle la pratique intervient dans la parcelle et la fréquence d'intervention, et donc selon les systèmes de culture en place. Les pratiques peuvent également avoir des effets indirects, en changeant le milieu de vie présent au sein des parcelles et en créant des conditions plus ou moins favorables. Ces changements au niveau du milieu de vie peuvent conduire à de la régulation *bottom-up*, en créant un milieu défavorable aux ravageurs, et à de la régulation *top-down*, en favorisant la présence des prédateurs.

1. *Une diversité de systèmes de culture résultant des différentes pratiques en place sur les parcelles cultivées*

L'agriculture moderne traditionnelle, ou conventionnelle, est souvent associée à un déclin de la biodiversité des agrosystèmes (Petit *et al.*, 2020; Uhler *et al.*, 2021). L'arrivée de systèmes alternatifs comme l'agriculture biologique (AB) ou l'agriculture de conservation des sols (ACS) pourrait inverser cette tendance (Petit *et al.*, 2020). Cependant, la compréhension des effets de ces systèmes de culture sur la biodiversité reste limitée (Shennan *et al.*, 2017). Par exemple, dans leur synthèse bibliographique, Lee *et al.*, (2019) avaient constaté que parmi tous les services potentiellement favorisés par des systèmes ayant une réduction du labour, le biocontrôle des ravageurs était l'un des moins documentés. En effet, la plupart des études se concentrent sur les infestations en adventices, car c'est l'une des plus grandes problématiques de ces systèmes (Petit *et al.*, 2020).

De plus, un système de culture résulte des pratiques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Ainsi, il existe donc probablement autant de systèmes de culture qu'il y a d'agriculteurs et même plus, car un agriculteur peut moduler ses pratiques selon ses parcelles, souvent selon la nature du sol. L'usage de grands types de systèmes de culture, comme l'AB, l'ACS ou l'agriculture conventionnelle, dans lesquels sont regroupés les agriculteurs et leurs exploitations peut donc être limité. En effet, au sein de ces grands types se trouvent une grande variabilité de pratiques concernant, par exemple, les degrés de travail du sol, allant du labour systématique au semis direct sous couvert végétal, la durée et la diversité des rotations (Chabert et Sarthou, 2017), ou encore l'usage des produits phytosanitaires. De plus, au sein d'un système, des pratiques agricoles peuvent avoir des effets antagonistes, comme une diminution de l'usage de produits phytosanitaires qui est compensée par une augmentation du travail du sol.

Ces constats montrent la limite des études se basant sur les grandes catégories de systèmes connues et l'importance de travailler au plus près des agriculteurs afin de caractériser et prendre en compte la diversité des pratiques agricoles en place dans les parcelles agricoles françaises. Ce point avait également été soulevé par Roger-Estrade *et al.* (2010), qui suggéraient, pour les futures études, d'étudier l'impact des pratiques agricoles (nature et date) sur les ravageurs et leurs prédateurs, plutôt que de comparer des systèmes de culture.

Ainsi, nous nous proposons d'étudier l'effet d'une diversité de systèmes de culture sur les communautés de ravageurs. Ces effets pourront être directs, *via* les pratiques, ou indirects, *via* une modification des états du milieu.



Introduction

2. *La nécessité d'une étude plus fine des pratiques agricoles mises en place au sein des systèmes de culture et de leurs effets sur les invertébrés du sol*

a. *L'usage de produits phytosanitaires*

L'impact de l'usage de produits phytosanitaires sur les invertébrés est très variable, selon la nature du produit (insecticides, herbicides, etc.), la substance active, la dose appliquée ou encore les espèces d'invertébrés présentes dans la parcelle. Par exemple, Muneret *et al.* (2022) ont observé une réponse variable des différentes espèces de carabes aux produits phytosanitaires.

Les insecticides sont les produits qui peuvent avoir le plus d'impacts directs sur les invertébrés, en causant leur mort. Ils peuvent, par exemple, causer la mort de carabes. L'effet des insecticides sur les staphylins est moins renseigné, mais ils pourraient impacter leur abondance négativement (Gailis et Turka, 2013). Ils peuvent également impacter le développement, la fécondité ou encore le comportement des arthropodes (Desneux *et al.*, 2007). Ce constat peut être valable pour la plupart des insecticides qui peuvent impacter des organismes non cibles. En effet, Bahlai *et al.* (2010) ont montré que certains insecticides d'origine organique pouvaient être aussi néfastes pour les ennemis naturels que ceux d'origine synthétique.

Les produits phytosanitaires peuvent également avoir des effets indirects sur les arthropodes présents dans les parcelles. En effet, leurs applications modifient le milieu de vie au sein des parcelles et peuvent le rendre moins favorable : perte de ressources alimentaires (graines, proies) et changement rapide au niveau du micro-climat du sol (Gailis et Turka, 2013). Ainsi, même s'ils ne causent pas la mort d'un prédateur donné, les insecticides peuvent impacter négativement son état nutritif, en causant la mort de proies pouvant être consommées (Muneret *et al.*, 2022). De même, les herbicides peuvent impacter négativement les arthropodes en simplifiant le couvert végétal, ce qui conduit à la perte de niches et potentiellement à une augmentation des interactions négatives entre prédateurs, comme de la prédation intragilde (Finke et Denno, 2002). Les herbicides peuvent également favoriser les infestations de ravageurs et donc augmenter les dégâts causés aux cultures, en limitant la présence d'adventices. En effet, Petit *et al.* (2020) ont démontré que la présence d'une grande diversité d'adventices participe à la complexification des habitats au sein des parcelles : cela crée des barrières physiques, en rendant les déplacements plus complexes, mais également chimiques, en masquant les potentiels stimuli chimiques qui permettent aux ravageurs de localiser les plantes hôtes.

b. *Les effets du travail du sol*

L'effet du travail du sol, et en particulier du labour, sur les invertébrés du sol a fait l'objet de nombreuses études. En effet, les labours fréquents et intensifs peuvent avoir des effets négatifs sur le sol et les organismes qui y vivent, comme une augmentation de l'érosion des sols, de l'oxydation de la matière organique et une perturbation des organismes vivants (Lal *et al.*, 2007; United States Department of Agriculture, 2015). Cependant, c'est encore une pratique toujours très utilisée pour préparer les semis et gérer les bioagresseurs, notamment les adventices (Lal *et al.*, 2007). Les agriculteurs limitant l'usage du labour peuvent faire face à des problèmes de ravageurs, mais peuvent également favoriser la présence de prédateurs et donc la régulation biologique. C'est en effet un constat qu'avaient fait Petit *et al.* (2020) : dans les systèmes sans labour ou avec labour réduit, l'abondance des ennemis naturels et l'intensité de prédation des ravageurs apparaissent plus importants, en comparaison à des systèmes classiques. Dans leur méta-analyse, Rowen *et al.* (2020) ont constaté que les arthropodes du sol capturés dans les systèmes sans labour ou labour réduit ont tendance à être plus abondants et plus diversifiés que dans les systèmes classiques.



Cependant, Holland et Luff (2000) avaient observé des résultats variables dans des études s'intéressant à l'effet du labour, en comparaison à l'absence du labour. En effet, les perturbations du milieu provoquées par le labour et le travail du sol en général (semis, déchaumage, désherbage mécanique, etc.) peuvent avoir des impacts différents selon leurs caractéristiques (profondeur de labour par exemple), leur temporalité ou encore leur fréquence (dans l'itinéraire technique et dans la rotation). Par exemple, Purvis et Fadl (1996) ont constaté que la sensibilité des carabes au travail du sol dépendait du stade de développement. Ainsi, les labours d'automne semblent moins nuisibles à *Pterostichus melanarius* que le travail du sol au printemps, ce qui peut être dû au fait que les jeunes larves sont moins sensibles que les plus âgées et les nymphes.

Le labour, et le travail du sol en général, peuvent impacter les invertébrés de façon directe les blessant, parfois mortellement (Holland et Luff, 2000; Gailis et Turka, 2013; Blubaugh et Kaplan, 2015). Par exemple, Gailis et Turka (2013) ont constaté que le labour éliminait les grands carabes des agroécosystèmes, ainsi les *Carabus* spp. ne vivent pas dans les parcelles agricoles (Holland et Luff, 2000). Plus globalement, le travail du sol peut notamment impacter les organismes qui passent tout ou une partie de leur cycle au niveau du sol. Ainsi, ces derniers ont tendance à être plus abondants dans les systèmes sans labour (Rowen *et al.*, 2020). Thorbek et Bilde (2004) avaient observé que les pratiques plus intensives, comme le labour ou le décompactage, n'étaient pas plus létales pour les arthropodes qu'un travail du sol plus superficiel, comme le déchaumage, ou même qu'une fauche. En effet, par exemple, la fauche oblige les araignées et les staphylins à sortir des parcelles, sauf si les résidus sont laissés au sol. Ce constat démontre un effet différé du travail du sol et des pratiques en générale, qui peut être tout aussi impactant que la pratique elle-même.

Le travail du sol peut également impacter les invertébrés présents dans les parcelles de façon indirecte, en modifiant le milieu de vie au sein de la parcelle. Les perturbations mécaniques du sol peuvent causer des pertes d'habitats favorables (Holland et Luff, 2000; Gailis et Turka, 2013). En revanche, la réduction ou l'absence de travail du sol, et notamment du labour, peut participer à complexifier l'habitat présent au niveau du sol, ce qui peut réduire la compétition intragilde, augmenter la disponibilité des proies alternatives et créer des microclimats favorables pour les ennemis naturels (Landis *et al.*, 2000a). Par exemple, Holland et Luff (2000) ont noté qu'un semis sous couvert pouvait favoriser les carabes via la présence d'un micro-habitat favorable, permis par une augmentation de la couverture du sol. De plus, les systèmes sans labour tendent à être des systèmes peu perturbateurs, ce qui rend l'habitat stable au sein des parcelles, participe à limiter la sensibilité des plantes et à augmenter le contrôle biologique *top-down* et *bottom-up* (Rowen *et al.*, 2020). En effet, la présence plus importante d'habitats stables et des proies alternatives disponibles favorisent les prédateurs (Roger-Estrade *et al.*, 2010), qui sont alors plus présents et de façon plus durable dans le temps. Ainsi l'absence de labour maintient un horizon organique à la surface du sol, ce qui peut augmenter la présence d'adventices. Ces deux éléments attirent des organismes détritivores et granivores, qui attireront eux-mêmes des organismes carnivores qui les consomment. La présence d'adventices permet également de créer un microclimat favorable aux carabes (Holland et Luff, 2000; Thorbek et Bilde, 2004). De plus, une plus grande abondance d'adventices peut complexifier et densifier le couvert végétal, et ainsi limiter la reconnaissance des plantes hôtes par les ravageurs, en diminuant le contraste de couleurs entre la culture et le sol (Shenk et Saunders, 1984; Rowen *et al.*, 2020).

Tous les organismes ne réagissent pas de la même manière au labour. Thorbek et Bilde (2004) avaient par exemple constaté que les araignées semblaient plus vulnérables face au travail du sol que les carabes et les staphylins, ces derniers semblant être plus robustes. Cependant, il est possible que les larves de ces derniers soient plus fragiles et donc plus impactées que les adultes. De plus, le labour et le travail du sol peuvent également participer à la régulation de ravageurs, notamment ceux qui vivent au niveau du sol, comme les limaces (Roger-Estrade *et al.*, 2010).



Introduction

c. *L'apport ou non-export de matière organique et la fertilisation minérale*

La matière organique présente au niveau du sol peut provenir d'un apport de matières organiques ou du non-export de résidus, notamment la paille. Elle constitue une nourriture pour la faune du sol détritivore, comme les collemboles. Ces organismes permettront de maintenir les populations de prédateurs généralistes lorsque les ravageurs ne sont pas présents et donc de potentiellement augmenter le contrôle biologique des ravageurs (Landis *et al.*, 2000a; Riggi et Bommarco, 2019), même si ce sont des proies alternatives qui peuvent détourner les ennemis naturels des ravageurs (Chailleux *et al.*, 2014). De plus, cela peut conduire à une plus grande abondance des prédateurs généralistes au sein des parcelles (Roger-Estrade *et al.*, 2010). De plus, plusieurs études suggèrent que la présence d'un mulch peut perturber les ravageurs lors de la localisation des plantes hôtes, en créant des barrières physiques, mais aussi chimiques, via la libération de substances provenant d'un mulch en décomposition ou vivant (Kalinova, 2010; Kennedy *et al.*, 2010; Rehman *et al.*, 2019). Cependant, peu d'études ont démontré que ce mulch conduisait à une régulation efficace des ravageurs.

L'usage de fertilisants organiques et inorganiques favorise la présence, la densité et le développement des plantes (cultures et adventices). Cela impacte le micro-climat au sol, il est plus ombragé, donc plus frais et plus humide, crée plus d'abris pour les invertébrés épigés, mais peut également attirer plus d'organismes herbivores, dont font partie les ravageurs (Holland et Luff, 2000). La fertilisation peut ainsi impacter le développement du couvert végétal et notamment sa hauteur, ce qui peut avoir des effets variables sur les organismes. Muneret *et al.* (2022) ont observé qu'un couvert végétal bien développé était favorable pour l'hivernation des carabes. Cependant, lorsqu'il est trop haut, il peut devenir défavorable en entravant leurs mouvements ou en créant de la compétition avec d'autres prédateurs comme les araignées. Finalement, il n'y a pas de consensus sur les effets des fertilisants qui peuvent parfois être positifs et parfois négatifs.

d. *La diversification végétale dans l'espace et dans le temps*

La diversification végétale au sein des parcelles peut se faire dans l'espace à une année donnée, via par exemple, l'implantation d'une autre espèce végétale en plus de la culture. Elle peut également se faire dans le temps, avec des rotations plus ou moins longues et diversifiées.

La diversification végétale dans l'espace peut impliquer des espèces florales végétales qui peuvent attirer ou éloigner les ravageurs des cultures. Dans leur synthèse bibliographique, Letourneau *et al.* (2011) ont constaté que la régulation des ravageurs et la présence des ennemis naturels étaient plus importants dans les cultures avec une diversité d'espèces végétales, que dans des monocultures ou des cultures avec peu de diversité. Ainsi, la diversification végétale pourrait participer à la régulation des ravageurs, à favoriser la présence des ennemis naturels et ainsi limiter les dégâts sur les cultures. En effet, de façon similaire à ce qu'avait démontré Petit *et al.* (2020) pour la présence d'une diversité d'adventices, la présence d'une diversité végétale, notamment au sein des parcelles, permet de complexifier l'habitat. De même, la présence de cette diversité peut également créer des barrières physiques et chimiques. Cependant, l'effet est variable selon le climat, le cycle de vie des cultures (annuelle ou pérenne) ou encore les méthodes de diversification (bandes fleuries en dehors des parcelles, plantes associées, bandes de cultures pièges, etc.). De plus, une diversification au sein des parcelles peut conduire à une perte de densité en limitant la densité de la culture ou en induisant de la compétition entre la culture et les autres espèces végétales implantées (Letourneau *et al.*, 2011).

A l'échelle de la rotation, une diversification peut participer à la progression des prédateurs et leur régulation des ravageurs en limitant la fréquence de retour d'une culture au niveau d'une parcelle, mais également au niveau du paysage (Delaune *et al.*, 2021). Cela peut également impacter l'implantation et la productivité de la culture suivante : par exemple, un colza implanté après une



légumineuse est plus productif qu'après une orge (Hegewald *et al.*, 2018). Holland et Luff (2000) ont noté que plusieurs études démontraient que le type de culture impactait les carabes. Cependant, cet effet est probablement lié aux pratiques agricoles associées à une culture, notamment le travail du sol, plutôt qu'à une préférence pour une culture en elle-même. Ainsi, au-delà de la culture elle-même, il est nécessaire de considérer également toutes les pratiques qui sont liées à son implantation et à sa croissance.

Ensemble, la diversification des cultures (dans l'espace) et les rotations semblent réduire ou avoir un effet neutre sur l'abondance des ravageurs. L'effet de la diversification des cultures sur la régulation des ravageurs nécessite encore des études afin d'assurer sa compréhension (Petit *et al.*, 2020).

e. Bilan – Ce qu'il faut retenir

Il existe une diversité de systèmes de culture résultant de la mise en place d'un ensemble de pratiques agricoles diversifiées aux effets parfois antagonistes vis-à-vis des invertébrés présents dans les parcelles, notamment les ravageurs et leurs ennemis naturels. Ainsi, il nous semble nécessaire d'aller au-delà des systèmes de culture afin d'étudier leurs effets sur la régulation biologique des ravageurs. Les pratiques peuvent avoir des effets directs et indirects.

L'utilisation des pratiques agricoles plutôt que des systèmes de culture était suggérée par Roger-Estrade *et al.* (2010) pour les futures études, afin d'améliorer la compréhension des effets des pratiques et des systèmes de culture sur la régulation biologique des ravageurs. Concernant l'utilisation des états du milieu, à notre connaissance, ils demeurent peu utilisés dans les études. Ils pourraient cependant aider à la compréhension des effets indirects, notamment lié à la modification du milieu de vie.

Les effets des pratiques observés dans la littérature et sur lesquels nous appuierons nos hypothèses sont présentés sur la Figure 8. Certaines pratiques peuvent avoir des effets directs comme l'utilisation d'insecticides ou une forte densité de semis qui peuvent contribuer à limiter l'impact des ravageurs. D'autres pratiques ont des effets plus indirects, comme l'absence de travail du sol qui favorise la présence de litière à la surface du sol et qui conduit ainsi à la présence de niches et de ressources alimentaires pour les prédateurs.

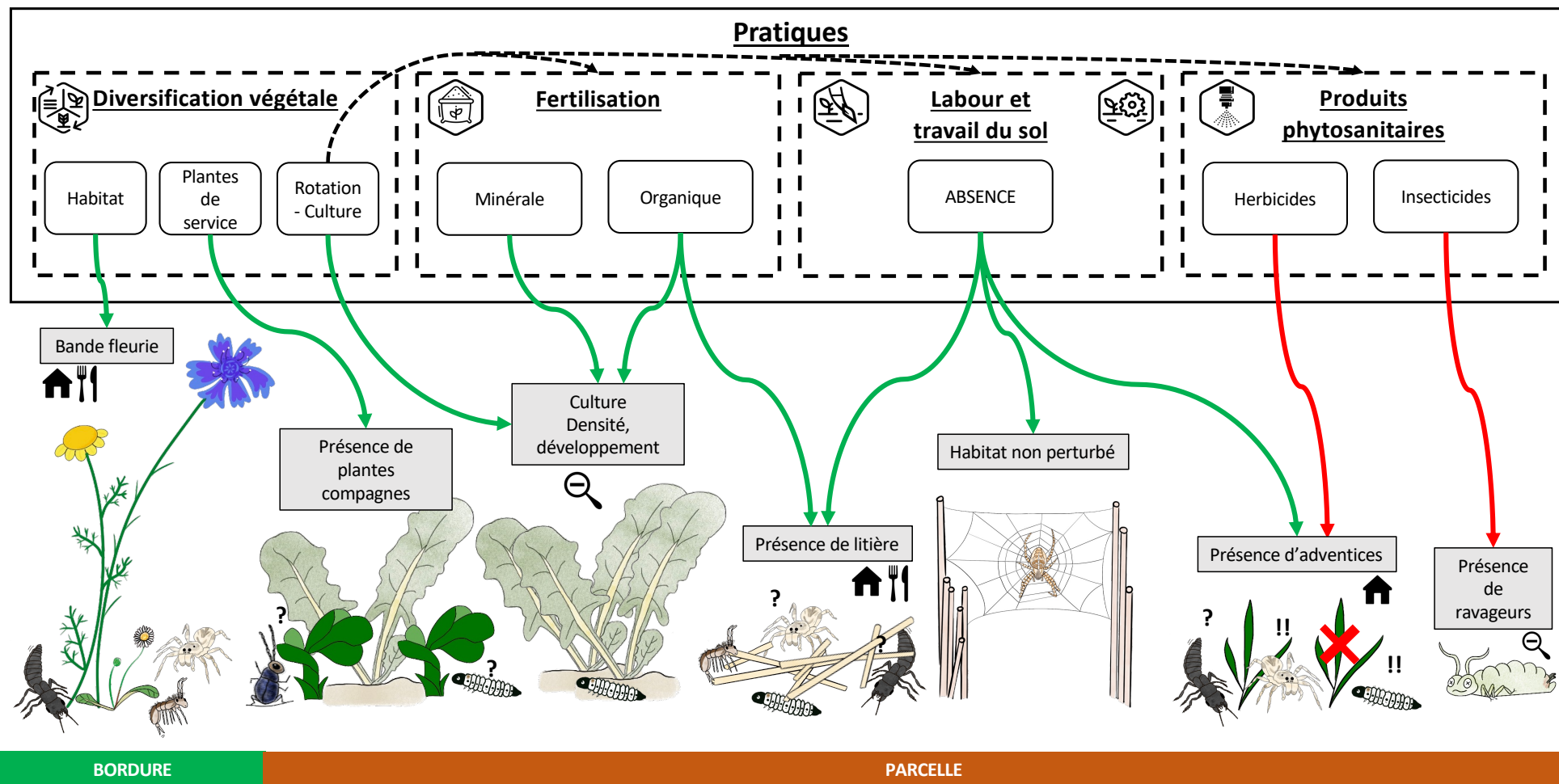


Figure 8 : Schéma bilan résumant les effets directs et indirects de pratiques agricoles pouvant être mises en place au sein ou à proximité des parcelles en grande culture. Les flèches rouges correspondent à des effets négatifs et les vertes à des effets positifs. Les impacts potentiels sur les organismes sont représentés par des icônes, expliqués dans la légende. (©Dessins de Justine Pigot)



C. L'implantation d'infrastructures agroécologiques comme les bandes fleuries pourrait-elle être bénéfique aux ravageurs ?

L'aménagement de l'habitat contribue à créer des infrastructures écologiques favorables aux ennemis naturels au sein des paysages agricoles. Ces infrastructures pourront ainsi fournir des ressources comme de la nourriture, des proies ou des hôtes alternatifs, mais également constituer un abri lors de conditions de vie moins favorables (Landis *et al.*, 2000a).

Les habitats semi-naturels (HSN) peuvent être de différentes natures : haies, bandes enherbées ou fleuries. Ils peuvent servir de lieu de ponte ou d'hivernation, ou encore fournir des ressources alimentaires. L'utilisation des HSN par les organismes varie donc selon leur biologie et leur écologie, ainsi que selon la qualité des habitats disponibles dans l'environnement dans lequel ils vivent (Landis *et al.*, 2000a; Labruyere *et al.*, 2016). Il est communément admis que les écosystèmes régulièrement et fortement perturbés, comme les agroécosystèmes, constituent des environnements défavorables, notamment pour les ennemis naturels (Landis *et al.*, 2000a). En effet, 90 % des ennemis naturels aurait besoin d'un HSN au cours de leur vie, contre 50 % des ravageurs (Keller et Häni, 2000).

Les HSN sont, le plus souvent, favorables à des espèces d'arthropodes bénéfiques, mais ils peuvent également l'être pour des ravageurs (Rusch *et al.*, 2010; Tschardtke *et al.*, 2016). Notamment pour les ravageurs qui ont besoin d'un habitat stable pour survivre durant des périodes difficiles, comme l'hivernation ou l'estivation. Par exemple, dans leur synthèse bibliographique, Petit *et al.* (2020) ont constaté que dans quelques études, une augmentation de l'abondance des ravageurs présents dans la parcelle adjacente a été observée, mais ce constat est limité à des HSN boisés ou herbacés, et non dans les bandes fleuries. Cependant, nous manquons encore d'études qui s'intéressent à cette question pour une grande partie des ravageurs de grande culture. Cette question demeure très importante, notamment dans une politique de promotion de l'implantation d'HSN dans les paysages agricoles.

Lors de l'implantation ou de la gestion d'un HSN, il est donc important d'identifier les besoins des ennemis naturels qui peuvent participer à la régulation du ou des ravageurs ciblés, mais aussi si cet habitat peut constituer un refuge pour des périodes défavorables, climatiques mais également dues à des perturbations au sein des parcelles (Landis *et al.*, 2000a).



Ce qu'il faut retenir

- ⇒ L'implantation d'HSN, comme des bandes fleuries ou des bandes enherbées, peut répondre aux besoins de certains arthropodes présents dans les parcelles : habitat pour des périodes défavorables, ressources alimentaires.
- ⇒ Dans une moindre mesure, les HSN pourraient également être favorables aux ravageurs.



D. La régulation biologique comporte encore beaucoup d'éléments incompris

Il est connu que des systèmes reposant sur un usage réduit des pesticides et du travail du sol, ainsi que sur une plus grande diversité végétale cultivée, permettent d'accroître la biodiversité dans les parcelles (Henneron *et al.*, 2015). Cependant leur contribution à la régulation des ravageurs reste mal connue. En effet, une augmentation de la biodiversité ne conduit pas toujours à une meilleure régulation des ravageurs, car les interactions entre prédateurs et entre prédateurs, ravageurs et proies alternatives peuvent être imprévisibles (Letourneau *et al.*, 2009). Les systèmes de culture peuvent également être composés de pratiques aux effets antagonistes envers la faune dans les parcelles. Par exemple, en agriculture biologique, l'usage de produits phytosanitaires chimique est absente, ce qui est favorable à la faune, mais en compensation, le travail du sol est souvent accru (notamment le labour), ce qui a des effets néfastes sur les arthropodes. *A contrario*, les systèmes où le travail du sol est simplifié s'appuient souvent sur une plus forte utilisation des pesticides et notamment des herbicides, qui peuvent parfois avoir des effets néfastes sur la faune (Wezel *et al.*, 2014; Chabert et Sarthou, 2017).

Les paramètres affectant l'efficacité des communautés d'ennemis naturels dans la régulation biologiques restent mal compris en raison de la complexité des systèmes (Tscharntke *et al.*, 2005).

Dans leur synthèse bibliographique, Rowen *et al.* (2019) soulignent l'importance, pour les futures recherches, de mesurer les populations d'herbivores, de quantifier les taux de prédatons (avec des proies sentinelles) et de caractériser toute la communauté de prédateurs. Cela est également pointé du doigt par Petit *et al.* (2020). Ces auteurs ont en effet constaté que la majorité des études se concentrait sur un ravageur ou un groupe d'ennemis naturels, dans un contexte donné. Ils ont également remarqué que peu d'études prenaient en compte les réseaux trophiques pouvant exister. De même, peu d'études utilisaient une approche fonctionnelle. Or, il y a un besoin d'études généralisées et fonctionnelles, afin d'améliorer la compréhension des effets des pratiques agricoles. De même, très peu d'études empiriques sont faites dans les parcelles agricoles. Or, une telle approche permettrait d'étudier l'effet des aménagement locaux sur la régulation des ravageurs.



V. L'organisme d'étude : l'altise d'hiver ou grosse altise, un ravageur du colza

A. Le colza, une plante dont la culture est en péril

Le colza (*Brassica napus* L.) est très cultivé en France et plus largement en Europe, notamment pour l'huile alimentaire et le biocarburant, le biodiesel (Yara, 2019). Cependant, les agriculteurs ont de plus en plus de difficultés à le cultiver, notamment à cause des attaques d'insectes ravageurs. En effet, le colza est la proie de nombreux ravageurs, comme l'altise d'hiver, également appelée grosse altise (Chrysomelidae : *Psylliodes chrysocephala*, Linnaeus, 1758) ou la méligèthe du colza (Nitidulidae : *Meligethes aenus*, Fabricius, 1775) (Williams, 2010a). Une lutte chimique contre ces insectes est possible, c'est d'ailleurs la seconde culture avec l'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement phytosanitaire) moyen le plus élevé après la pomme de terre (Agreste, 2022), mais est la première culture consommatrice d'insecticides avec un IFT 2,1 et 92 % des surfaces traitées en 2017 (Agreste, 2020b). Cependant, elle devient de plus en plus limitée. En effet, depuis 2013, les traitements de semence à base de néonicotinoïdes sont interdits. Cette interdiction a entraîné, par exemple, des dégâts d'altises d'hiver plus importants au Royaume-Uni (Dewar, 2017). Pour contrebalancer cette interdiction, les agriculteurs ont eu recours à une utilisation plus intensive d'insecticides à base de pyrèthrinoïdes. Ces insecticides étaient auparavant utilisés en complément du traitement de semence (Dewar, 2017). L'utilisation intensive de cette famille de substances actives a conduit à une apparition croissante de populations d'insectes ravageurs du colza résistants (Dewar 2017 ; Willis et al. 2020 ; Ortega-Ramos et al. 2022 ; Robert, Ruck 2022). Ainsi, les fortes pressions dues aux insectes ravageurs et le manque de substances actives pour un contrôle chimique ont conduit à un déclin des surfaces cultivées en colza en Europe (Zheng *et al.*, 2020; Andert *et al.*, 2021; Sauvage, 2022).

B. L'altise d'hiver, le principal ravageur du colza en automne et contre lequel la lutte est limitée, mais essentielle

Parmi la cohorte de ravageurs qui peut attaquer le colza, l'altise d'hiver est celui qui fait le plus de dégâts en automne et en hiver. Ce ravageur est également considéré comme la menace la plus importante pour la culture du colza en Europe (Ferguson *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2020).

L'altise d'hiver est une espèce univoltine, c'est-à-dire qu'elle se reproduit au rythme d'une génération par an. Au début de l'automne, de fin août à début septembre, les adultes migrent dans les colzas nouvellement semés. Les vols nécessitent une température supérieure à 16°C (parfois 20°C, selon la littérature), après une période de refroidissement, et un temps plutôt humide (Bonnemaison, Jourdheuil 1954 ; Auximore 2020). Ils peuvent s'effectuer sur deux à quatre kilomètres (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Ce sont des vols isolés et étalés dans le temps, sur 10 à 15 jours, et n'ont rien d'un caractère migratoire (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Une fois dans les colzas, les muscles servant au vol s'atrophient (Bonnemaison, 1965). Cela limite les vols et les adultes se déplacent alors au sol en marchant et en sautant (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Les populations sont très présentes en automne et déclinent pendant l'hiver jusqu'à quasiment disparaître en avril.

Lors de l'arrivée, les ovaires des femelles sont immatures et deviennent matures après une période de prise de nourriture de deux semaines (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). La reproduction commence alors, et dure pendant l'hiver (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Les femelles pondent les œufs dans les crevasses du sol, à proximité des plants de colza. Les œufs sont ovales, allongés (0,90 à 0,96 mm de long pour 0,40 à 0,43 mm de large) et d'une couleur orange pâle (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Les conditions optimales pour la ponte sont (i) une forte humidité et (ii) des



Introduction

températures comprises entre 4 et 16°C (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a) et la ponte cesse si la température est inférieure à 2°C (Auximore, 2020). Les femelles peuvent pondre jusqu'à 1000 œufs (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a).

Les premières larves commencent à être observées dans les plants de colza dès octobre (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Alford (1979) a calculé que l'éclosion des œufs nécessitait 240 degrés-jours au-dessus de 3,2°C. Après l'éclosion, la larve peut parcourir jusqu'à 50 cm pour trouver un plant de colza (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Elle entre ensuite dans la plante en passant par la surface adaxiale de la feuille la plus basse, c'est-à-dire la plus ancienne, près de la tige principale (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Les larves attaquent d'abord les pétioles des feuilles les plus anciennes, puis migrent progressivement vers les plus jeunes et finissent par entrer dans la tige principale. Le développement des larves se fait selon trois stades larvaires où la larve va grossir en passant de 1,2 mm de long, stade L1, à 8 mm, stade L3 (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a; Williams, 2010b). La croissance des larves s'arrête si les températures sont inférieures à 7°C. A la fin de l'hiver, les larves sortent des plantes pour nymphoser dans le sol, à 7-9 cm de profondeur (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). La nouvelle génération d'adultes émergera à la fin du printemps, fin mai – début juillet, après une nymphose de trois mois. Les nouveaux adultes restent quelques semaines dans les parcelles, puis migrent dans les lieux d'estivation qui sont majoritairement les lisières de forêts (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954a). Son cycle biologique est présenté sur la Figure 9.

L'altise d'hiver est surtout problématique en automne, car elle est à l'origine de deux types de dégâts qui peuvent limiter la survie du colza nouvellement implanté. Ces dégâts sont présentés sur la Figure 9. Le premier type de dégâts est provoqué par les adultes lorsqu'ils se nourrissent à leur arrivée sur les parcelles de colza. Cette prise de nourriture se traduit par la présence de trous de morsure caractéristiques au niveau des cotylédons et des jeunes feuilles (Williams, 2010a). Ces attaques peuvent fortement perturber le développement des plants de colza et peut même conduire à leur perte. L'ampleur des dégâts est accentuée par un climat sec et une croissance de colza lente. Les semis précoces sont souvent les plus impactés, mais un traitement insecticide est rarement nécessaire (Williams, 2010a). Le second type de dégâts est provoqué par les larves. Ce sont les plus préjudiciables et ils ne sont constatés qu'à la fin de l'hiver. En effet, après être entrés dans la plante, les larves vont miner les pétioles des feuilles puis entrer dans la tige principale. Cela peut conduire à une perte de vigueur lors de la reprise au printemps et ainsi provoquer des pertes de rendement de façon directe : présence d'un retard de floraison ou perte directe des plants pour les attaques les plus fortes ; ou indirecte en rendant les plants plus sensibles au gel par exemple. En effet, la présence de galeries permet à l'eau de s'infiltrer, ce qui provoque l'éclatement des tissus végétaux en période de gel (Breitenmoser *et al.*, 2020). Les plants peuvent alors être plus sensibles au phoma (*Leptosphaeria maculans* syn. *Phoma lingam*) en créant des points d'entrée pour le champignon (Schulz et Daebeler, 1984). Ainsi, Derron et Goy (1991) ont constaté une perte de rendement d'environ 40 kg/ha pour une densité moyenne d'une larve par plante (Breitenmoser *et al.*, 2020).

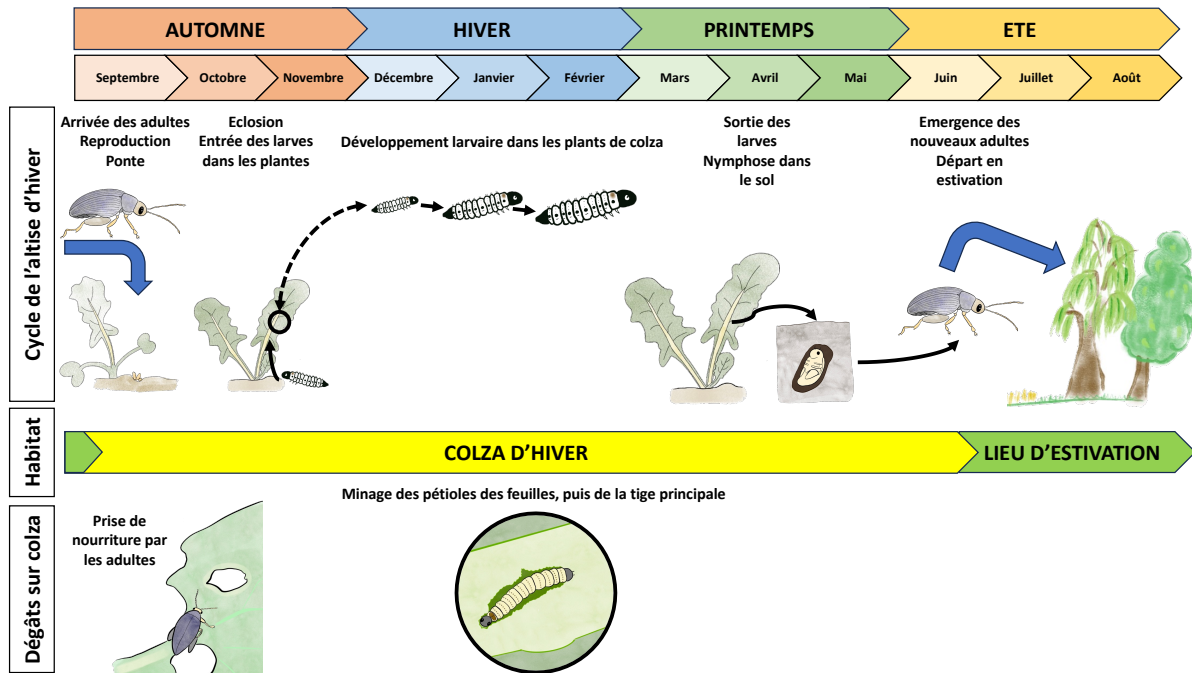


Figure 9 : Cycle biologique de l'altise d'hiver, *Psylliodes chrysocephala*, espèce univoltine et ravageur du colza d'hiver. Les habitats fréquentés au cours du cycle (les flèches bleues indiquent des changements d'habitats) et les dégâts causés aux plants de colza sont également présentés. (©Dessins de Justine Pigot)

Le contrôle des larves est donc primordial. La méthode actuelle se fonde sur l'application d'un insecticide à base de pyréthrianoïdes visant les premiers stades larvaires (1 et 2) (Arjaure et Vincent, 2011), mais son efficacité peut être fortement limitée si les populations d'altises d'hiver sont résistantes. Il est donc nécessaire de trouver une nouvelle façon de lutter contre l'altise d'hiver, afin de maintenir les populations sous des seuils tolérables pour les agriculteurs. En France, Terres Inovia, l'institut technique en charge des protéagineux et oléagineux, a défini les seuils suivants : cinq larves par pied en l'absence de risque agronomique (biomasse du colza, croissance en cours ou à l'arrêt et la précocité de reprise au printemps) et deux-trois larves en cas de risque agronomique identifié (Robert et Ruck, 2022a).

Le maintien des populations de larves sous un seuil acceptable passe par une lutte préventive qui peut reposer sur une régulation *top-down* et *bottom-up*. L'approche *bottom-up* permettrait de contrôler les populations d'adultes et de larves via le milieu de vie, en le rendant moins propice à leur établissement. Elle peut se coupler à une régulation biologique des larves entre leur éclosion et leur entrée dans un plant de colza (*top-down*). Par exemple, la présence de plantes compagnes pourrait limiter la reconnaissance des parcelles de colza par les adultes, en limitant la visibilité des colzas. De même, les larves pourraient mettre plus de temps à trouver une plante hôte et donc être plus exposées aux prédateurs présents dans les parcelles. Des recherches récentes ont été menées et ont prouvé qu'un contrôle des altises d'hiver fondé sur la protection intégrée des cultures était possible. Cependant, des recherches complémentaires sont nécessaires afin de bien cerner les moyens à mettre en œuvre et leur efficacité (Ortega-Ramos *et al.*, 2022).

Les altises adultes sont également très sensibles au paysage, notamment au moment de l'estivation. Des études, maintenant assez anciennes, comme celle de Bonnemaïson et Jourdeuil (1954) montrent que les altises estivent dans des zones humides et fraîches (haies, lisières de bois), généralement à l'abri sous le feuillage de diverses plantes sauvages. Depuis cette époque, de nouveaux habitats semi-naturels ont été implantés, comme les bandes fleuries. Même si ces habitats sont avant tout destinés à promouvoir les prédateurs naturels en fournissant des conditions favorables, il n'est pas à exclure qu'ils soient également utiles à des ravageurs (Tscharrntke *et al.*, 2016). Par exemple, les



Introduction

bandes fleuries pérennes pourraient fournir un lieu d'estivation humide et frais aux altises en été. Il nous apparaît donc nécessaire d'étudier un possible rôle de refuge des bandes fleuries pendant l'estivation des grosses altises. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à cette problématique.



Ce qu'il faut retenir

L'altise d'hiver est l'un des ravageurs majeurs du colza d'hiver. Les adultes colonisent les parcelles en automne, s'y reproduisent et y pondent. Même si la présence des adultes peut être préjudiciable, ce sont les larves qui provoquent le plus de dégâts dans les parcelles de colza. En effet, elles passent l'hiver à l'intérieur des plantes, ce qui les affaiblit et peut même conduire à la perte de certaines plantes.

La lutte contre l'altise d'hiver devient de plus en plus compliquée et il est donc nécessaire de trouver des moyens de lutte préventive afin de maintenir leurs populations sous des seuils tolérables, en s'appuyant notamment sur la régulation *top-down* et *bottom-up*.

En été, les nouvelles altises d'hiver adultes partent dans des lieux d'estivation. Les lisières de bois sont les principaux refuges identifiés dans la littérature. Cependant, l'insertion d'habitats semi-naturels dans le paysage, comme les bandes fleuries, pourrait leur être bénéfique pendant l'estivation.



VI. Questions traitées dans la thèse et hypothèses de recherche

Au cours de cette thèse, nous étudierons les altises d'hiver à deux périodes de leur cycle : (i) lorsqu'elles sont présentes dans les parcelles en automne et (ii) lorsqu'elles sont en estivation. Nous étudierons la régulation de ce ravageur et ses conséquences sur les dégâts provoqués aux cultures.

Les altises d'hiver, comme beaucoup d'insectes, peuvent être très influencés par le paysage dans lequel elles vivent et évoluent. Dans cette thèse, nous n'étudierons pas finement l'impact des éléments paysagers, mais les éléments qui peuvent influencer seront néanmoins pris en compte dans nos analyses.

Dans son ensemble la thèse relève de trois grandes questions de recherche, appliquées à l'altise sur colza :

- (A) Quels sont les effets des systèmes de culture, via l'étude des différentes pratiques et leurs effets directs et indirects, sur les communautés d'invertébrés présents dans les parcelles ?**
- (B) Quelle est l'ampleur de la régulation et quelles sont les conséquences sur les dégâts aux cultures ?**
- (C) Dans quelle mesure la présence d'une bande fleurie peut-elle impacter les ravageurs présents dans les parcelles ?**

Les hypothèses de recherche majeures, issues de la bibliographie, sont les suivantes :

- (i) Certaines pratiques ont des effets sur la régulation ascendante ou « *bottom-up* » des ravageurs, en agissant sur les états du milieu ;
- (ii) Des systèmes de culture favorables aux prédateurs conduisent à une meilleure régulation biologique des ravageurs via une régulation descendante ou « *top-down* » ;
- (iii) Les bandes fleuries implantées aux abords des parcelles ne constituent pas un refuge majeur pour des ravageurs.

Les éléments paysagers ne seront pas étudiés finement dans la thèse, mais seront pris en compte comme covariable.

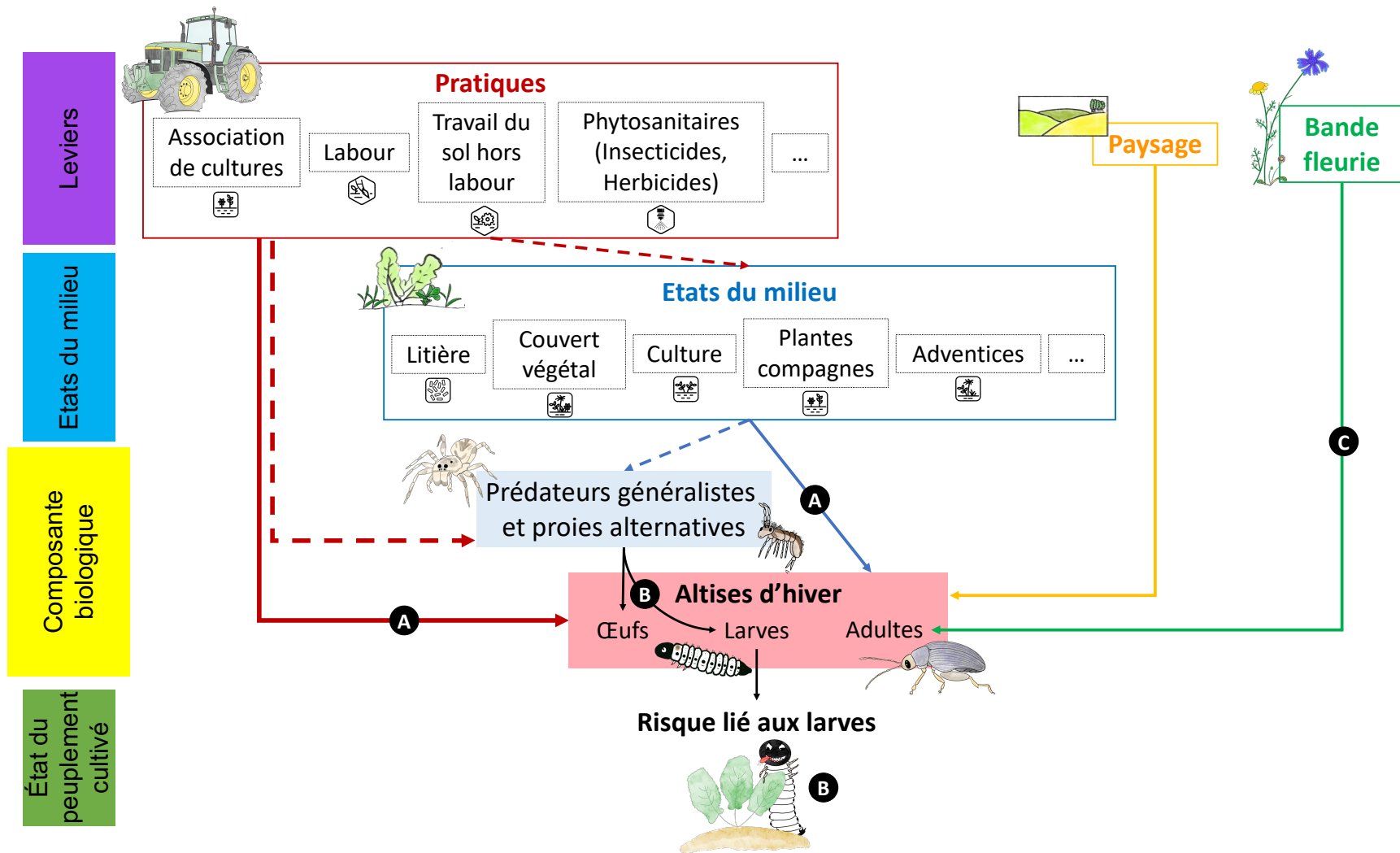


Figure 10 : Schéma récapitulatif de la thèse présentant les éléments étudiés (pratiques dans les parcelles, états du milieu résultant de ces pratiques, paysage, bande fleurie et organismes étudiés) et positionnant les grandes questions de recherche (A-B-C). Les flèche en pointillée illustre des relations qui existent, mais qui ne seront pas étudiées de façon approfondie dans la thèse. (©Dessins de Justine Pigot)



VII. Organisation du manuscrit

Ce manuscrit se compose de cinq parties, dont deux chapitres de résultats. Cette première partie introductive a permis de poser le contexte et d'amener à la problématique de la thèse. Elle sera suivie d'une seconde partie « Matériels et Méthodes » présentant le dispositif expérimental, la démarche générale et les méthodes employées.

Le premier chapitre de résultats s'intéressera à la régulation des larves d'altises d'hiver. Il explorera les effets directs et indirects des pratiques en place dans les parcelles, ainsi qu'une possible régulation *top-down* via les prédateurs présents. Il prendra également en compte les possibles effets d'éléments du paysage. Ce chapitre contribuera à répondre aux questions de recherche A et B.

Le second chapitre de résultats visera à tester un potentiel rôle bénéfique de la présence d'une bande fleurie lors de l'estivation des altises d'hiver. Ce chapitre contribuera à répondre à la question de recherche C.

Enfin, ce manuscrit se terminera sur une discussion générale qui apportera une vision plus globale des résultats et abordera les avantages et limites du dispositif expérimental, ainsi que les perspectives de recherche.

La Moisson chez les Pigot



Matériels et méthodes de la thèse

« Même si le chêne est géant,
Il fendra dans l'ouragan
Moi roseau par mauvais temps,
Je danse avec le vent »

Les Cowboys fringants, Chêne et Roseau



Photographie : Ivan Le Masson



I. Un dispositif expérimental fondé sur un réseau de parcelles où ont été implantées des bandes fleuries

Dans cette thèse, nous nous sommes appuyés sur un réseau d'agriculteurs afin de travailler sur des parcelles agricoles et d'y capter un maximum de diversité qui peut exister dans notre région d'étude, en termes de pratiques agricoles. Afin d'effectuer les études les plus complètes possibles, nous avons également choisi de prendre en compte les éléments du paysage qui peuvent impacter les organismes étudiés, et qui peuvent être plus ou moins variables selon les parcelles suivies.

A. Un réseau de parcelles situées chez une trentaine d'agriculteurs au sein du Bassin Parisien

Notre aire d'étude est une région agricole spécialisée dans les grandes cultures. Afin d'avoir accès à la diversité de pratiques mises en place par les agriculteurs de cette région, nous nous sommes fondés sur un réseau d'agriculteurs : le réseau SCARABEE. Il a été mis en place en 2018 en collaboration avec les chambres d'agriculture des Yvelines, de l'Essonne et de l'Eure-et-Loir. Il est constitué d'une trentaine d'agriculteurs dont les exploitations se trouvent dans les départements des Yvelines (78), de l'Essonne (91) et de l'Eure-et-Loir (28). En plus des agriculteurs du réseau, nous avons contacté trois autres agriculteurs pour les besoins de la thèse. Notre zone d'étude et les exploitations où des mesures ont été effectuées sont représentées sur la Figure 11.

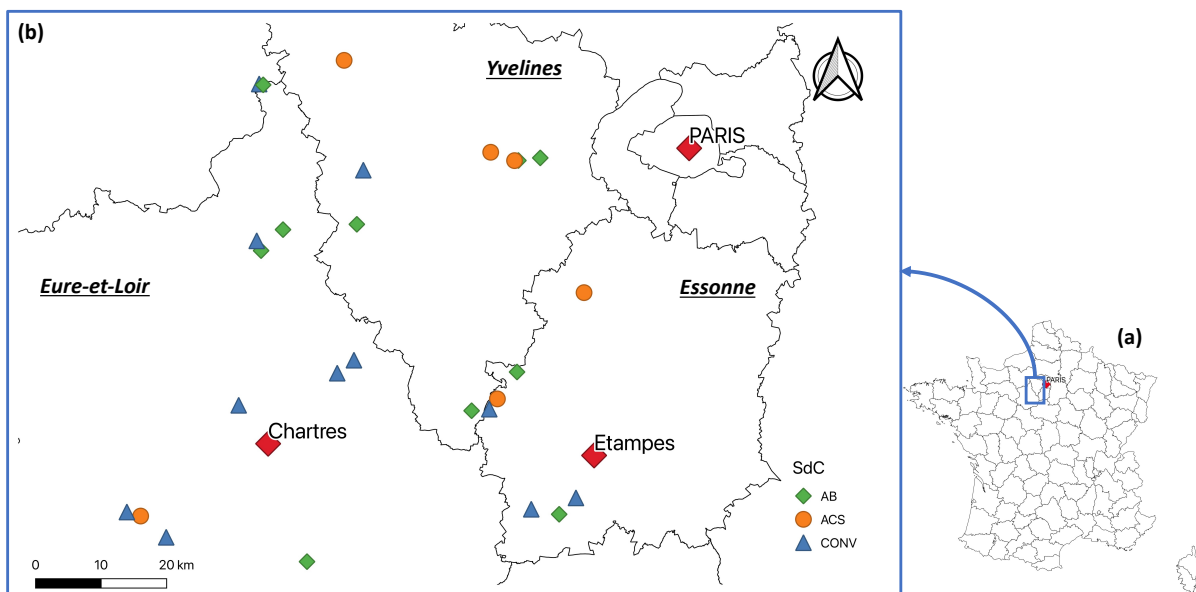


Figure 11 : Localisation de la zone d'étude (a) et répartition géographique des exploitations des agriculteurs du réseau, où au moins une parcelle a été suivie au cours de la thèse, selon les différents systèmes de culture en place (b) : Agriculture biologique (AB), Agriculture de Conservation des Sols (ACS) et Agriculture Conventuelle (CONV).



B. Types de sols des parcelles étudiées

Bien que nous n'ayons pas étudié l'effet du type de sol sur les différentes variables réponses présentes dans la thèse, nous avons tout de même vérifié que les types de sols de la zone d'étude étaient assez proches. Ainsi, les types de sols dominants pour chaque parcelle ont été identifiés sur la « carte des sols » réalisée par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) et le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires, accessible sur Géoportail. La majorité de nos parcelles présente un sol de type Luvisol ou Néoluvisol, qui sont tous deux très proches. Ce sont des sols épais (plus de 50 cm) et présentant une bonne fertilité agricole.

Des détails sur les types de sols rencontrés sur notre zone d'étude sont donnés en annexe (IV.), sur la Figure S.1 et dans le Tableau S.1.

C. Les températures moyennes dans notre région d'étude

Bien que nous n'ayons pas mesuré nous-mêmes la température au niveau de nos parcelles, nous sommes appuyés sur la température moyenne grâce à des données obtenues sur data.gouv.fr et produites par Open Data Réseaux Énergies (ODRE, 2023). Les températures moyennes observées sur notre région d'étude durant la période d'expérimentation sont présentées sur la Figure 12. Plus de détails sont donnés en annexe, dans le Tableau S.2.

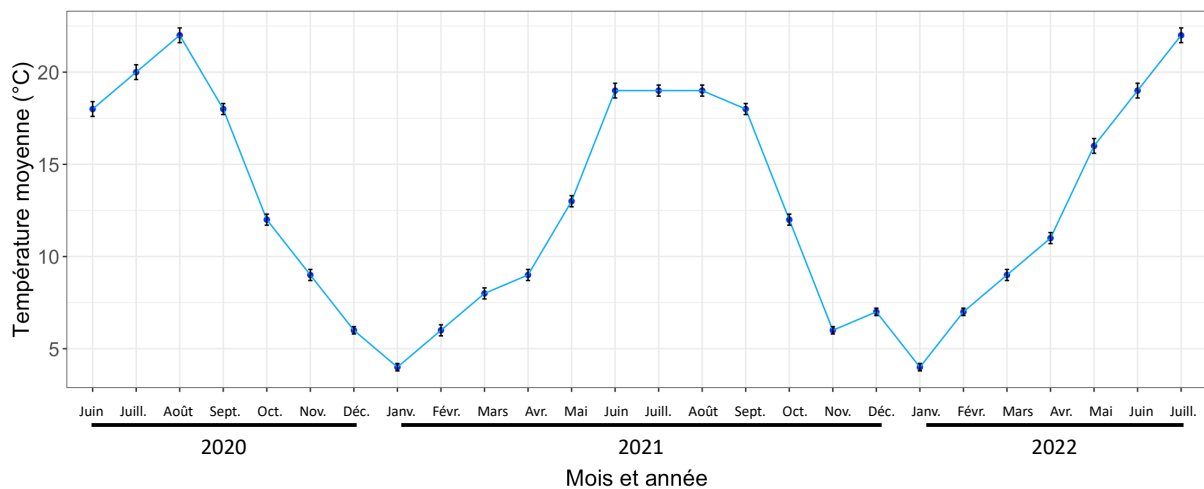


Figure 12 : Température moyenne observée dans notre région d'étude durant la période d'expérimentation, selon le mois et l'année. Les barres d'erreur type sont présentes. Les données proviennent de l'Open Data Réseau Énergies (ODRE, 2023).



D. La mise en place de bandes fleuries pérennes au sein du réseau

Une bande fleurie pérenne a été semée chez 25 agriculteurs du réseau à l'automne 2018. Certaines, ayant mal levé, ont dû être ressemées à l'automne 2019 ou au printemps 2020. Les deux tiers des bandes sont intra-parcellaires et leur présence est associée à un découpage de la parcelle en deux nouveaux îlots. Les autres bandes sont situées en bord de chemin ou de fossé. Les bandes mesurent 3 à 6 m de large et 200 à 800 m de long environ.

Ces bandes fleuries pérennes ont été conçues suite à des expérimentations menées sur la ferme expérimentale d'AgroParisTech à Grignon entre 2013 et 2017 par Antoine GARDARIN (Gardarin et Valantin-Morison, 2022). Dans ces essais étaient testés différents mélanges dont la composition botanique variait selon deux gradients : diversité fonctionnelle des traits essentiellement liés à la fourniture de ressources trophiques pour les insectes volants (période de floraison, morphologie des fleurs, etc.) et richesse spécifique. En effet, en prenant en compte les traits fonctionnels dans le choix des espèces, il est possible de créer des bandes capables de fournir des ressources alimentaires sur de longues périodes et à une diversité d'insectes auxiliaires. Un des résultats de ces essais est que les mélanges qui présentent initialement le plus grand nombre d'espèces sont ceux qui restent les plus diversifiés sur une période de quatre ans (Gardarin et Valantin-Morison, 2022). Ainsi, dans ce réseau il a été choisi d'implanter les bandes fleuries les plus diversifiées : chez ces agriculteurs elles sont composées de 42 espèces végétales, afin de fournir des ressources en nectar étalées dans le temps et à une diversité d'insectes. Les espèces choisies sont indigènes, majoritairement pérennes et ne se propagent *a priori* pas dans les cultures adjacentes. Les espèces composant les bandes sont présentées dans le Tableau 1. Les bandes sont gérées par les agriculteurs qui les broient au maximum une fois par an en hiver.



E. Bien choisir les parcelles d'étude afin de couvrir une diversité de systèmes de culture

Dans le cadre de nos différentes expérimentations, nous avons choisi les parcelles que nous allions suivre de façon à capter un maximum de diversité. Pour cela, nous avons accordé une grande importance à identifier au moins un agriculteur de chaque mode de production (agriculture biologique, de conservation des sols et conventionnelle) ayant au moins une parcelle de la culture d'intérêt dans chaque zone de la région d'étude. Les zones sont représentées en annexe, sur la Figure S.2. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous avons ajouté trois agriculteurs à notre réseau.

Une fois que nous avons identifié les agriculteurs et les parcelles qui peuvent être suivies, il nous a fallu choisir les parcelles que nous allions suivre. Pour cela, nous avons décidé de favoriser les parcelles facilement accessibles en automne : proches de la route et avec des chemins praticables.



II. Accéder aux effets directs et indirects des pratiques en place sur la gestion des ravageurs, tout en considérant les éléments du paysage

S'appuyer sur ce réseau nous a permis d'avoir accès à des systèmes de culture très contrastés avec par exemple des durées de rotation plus ou moins longues, ou encore un fort gradient de travail du sol. Les motivations des agriculteurs pour la conception de leurs systèmes de culture sont également très diverses : intérêts pour la biodiversité, maximisation de la marge, volonté de réduction des phytosanitaires, etc. Une partie de ces agriculteurs fait partie de groupes DEPHY animés par les chambres d'agriculture. L'objectif de ces groupes est de diminuer l'usage des produits phytosanitaires des exploitations, tout en maintenant les performances économiques, sociales et environnementales (EcoPhytoPIC, 2022).

Il est possible de regrouper les agriculteurs du réseau en différentes catégories de systèmes de culture, comme « l'agriculture conventionnelle », « l'agriculture de conservation des sols » ou « l'agriculture biologique ». C'est d'ailleurs en se fondant sur ces catégories que nous avons choisi les parcelles d'études pour les différentes expérimentations de la thèse. Cependant, derrière ces appellations, il peut exister beaucoup de variabilité en termes de pratiques. Ainsi, dans les analyses, nous souhaitons utiliser les détails des pratiques. Pour accéder à ces détails, nous avons réalisé des enquêtes annuelles, au cours desquelles nous collectons les itinéraires techniques des parcelles suivies. En plus de ces enquêtes, nous avons décrit les états du milieu observés au sein des parcelles, qui résultent des pratiques en place. Ces observations permettent de combler des manques pouvant exister dans les itinéraires techniques, mais permettent surtout d'offrir un regard sur les effets indirects des pratiques sur la gestion des ravageurs (par exemple via la modification du milieu de vie), car une technique donnée peut résulter en des états du milieu différents selon les conditions de sa mise en œuvre.

Les pratiques et les états du milieu observés au sein des parcelles sont très variables entre les parcelles. Cette variabilité au sein des parcelles est présentée dans des tableaux en annexe du Chapitre 1 (Tableaux S.1.1 et S.1.2).

A. Accéder aux itinéraires techniques afin d'étudier les conséquences des pratiques des agriculteurs sur la gestion des ravageurs

Chaque hiver, nous avons enquêté les agriculteurs chez qui nous avons suivi au moins une parcelle, afin de collecter les itinéraires techniques. Lors de ces entretiens, nous demandions des informations sur :

- Le précédent et le devenir des résidus ;
- L'interculture (présence ou absence, nature, date d'implantation, hauteur à la destruction) ;
- Le semis (date, variété, densité, présence d'un traitement de semence, semence de ferme ou achetée) ;
- La fertilisation (engrais minéraux et amendements organiques avec date et dose) ;
- Les interventions phytosanitaires (herbicides, insecticides, fongicides et molluscicide : date, produit et dose appliquée) ;
- Le travail du sol (labour, déchaumage, etc. : date, nature et profondeur de travail) ;
- La récolte (date et rendement).



Matériels et Méthodes

Dans nos analyses, les données pouvaient être utilisées directement ou via des indices, comme l'Indicateur de Fréquence de Traitement phytosanitaire (IFT). Chez la plupart des agriculteurs, les informations étaient complètes et précises, notamment en ce qui concerne la fertilisation et les interventions phytosanitaires. Pour le travail du sol, les informations pouvaient être plus approximatives. Ainsi, en plus des itinéraires techniques, nous nous sommes fondés sur l'observation des états du milieu au sein des parcelles, résultant des pratiques en place.

B. Observer les états du milieu résultant des pratiques en place au sein des parcelles

Les observations ont été faites au moment des prélèvements de plantes et d'insectes et réalisées de manière à disposer d'un maximum d'informations. Chaque observation a été faite dans un quadrat de 50 x 50 cm. Les éléments observés sont présentés dans le Tableau 2. Pour estimer les pourcentages de surface, nous nous sommes inspirés de l'échelle de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1932; 1964).

En plus de la description au champ, des photographies de chaque quadrat ont été prises. Nous avons également noté les conditions météorologiques au moment des prélèvements : température, ensoleillement, présence de pluie, présence de vent et l'humidité du sol estimation qualitative. Cependant, ces données n'ont pas été utilisées par la suite car elles étaient difficilement exploitables (informations manquante, fort effet observateur).

Tableau 2 : Différentes variables mesurées dans le quadrat (50 x 50 cm) au moment des prélèvements afin de décrire les états du milieu. Une échelle pour la rugosité de la surface du sol est présente en annexe dans le Tableau S.3.

Catégorie	Variable	Échelle ou unité
Surface du sol	Rugosité de la surface du sol	Classes : 1 = Lisse ; 2 = Granuleux ; 3 = Motteux ; 4 = Grosses mottes prédominantes
	Croûte de battance	Pourcentage de surface
	Surface couverte par les cailloux	Pourcentage de surface
Litière – Résidus	Taille des cailloux	Classe de taille (0-5 cm ; 5-10 cm ; > 10 cm)
	Surface couverte par les résidus	Pourcentage de surface
	Nature des résidus	Espèces concernées
	Présence de chaumes droits* (éteules)	OUI ; NON
Couverture végétale -culture	Surface couverte par la végétation	Pourcentage de surface
	Surface couverte par la culture	Pourcentage de surface
	Nombre de rangs	
-plantes compagnes	Nombre de plantes	
	Stade phénologique	Échelle BBCH
	Espèces présentes	
-adventices	Surface couverte par les plantes compagnes	Pourcentage de surface
	Espèces principales présentes	
	Surface couverte par les adventices	Pourcentage de surface

*Nous appelons ici « chaumes » tous les résidus qui sont restés droits / en place après le semis

Dans le cadre de l'étude de l'estivation des altises d'hiver (Chapitre 2), l'observation des états du milieu a été faite dans le même esprit, mais a été adaptée afin de mieux décrire des habitats plus complexes que les parcelles agricoles (les lisières de bois et les bandes fleuries).

Dans les analyses, toutes les variables décrites n'ont pas été utilisées, car toutes ne sont pas toujours pertinentes. Les variables utilisées sont précisées dans les « Matériels et Méthodes » des chapitres.



C. Prendre en compte les éléments du paysage

Dans nos études, nous avons pris le soin de prendre en compte les éléments du paysage pouvant impacter les variables réponses, de façon directe ou en passant par des indices, afin d'être les plus complets possibles. Nous avons ainsi considéré les pourcentages d'habitats (refuge d'estivation, culture cible) à différents rayons. Pour obtenir ces éléments, nous avons utilisé le logiciel QGIS.

Les gammes de valeurs des différents éléments du paysage pris en compte sont présents dans les annexes des chapitres de résultats (Tableaux S.1.5 et S.2.6).



III. Méthodes d'échantillonnage des invertébrés

Dans nos études, nous nous sommes intéressés à différents organismes : à des ravageurs de culture, à différents stades de vie, mais également à leurs ennemis naturels et aux proies alternatives pouvant être présents. Ces organismes présentent des biologies et des comportements différents, ce qui demande donc des méthodes d'échantillonnages adaptés en fonction des organismes et des groupes d'organismes.

A. Échantillonnage des ravageurs présents

Des méthodes adaptées à chaque organisme ont été utilisées afin d'échantillonner les ravageurs présents dans les parcelles et dans les habitats (bandes fleuries et lisières de bois). Ainsi, pour accéder aux populations d'altises d'hiver estivant dans les différents habitats étudiés, nous nous sommes appuyés sur des tentes à émergence posées pendant toute la période de sortie supposée. Pour les populations de larves d'altises d'hiver qui sont présentes dans les plants de colza, nous avons effectué un échantillonnage avec la méthode Berlèse, à la fin de l'hiver.

Ces méthodes sont décrites dans les « Matériels et Méthodes » de chaque chapitre.

B. Échantillonnage des arthropodes actifs dans les parcelles qui peuvent impacter la régulation des ravageurs

1. *Échantillonnage des arthropodes actifs : un accès aux prédateurs et aux proies alternatives présents*

Afin d'échantillonner les arthropodes actifs à la surface des parcelles, nous avons utilisé des pièges Barber (Figure 13). Le piège Barber consiste à enterrer un pot en plastique (\varnothing 85 mm, h = 70 mm) contenant une solution de piégeage qui n'est pas attractive pour les arthropodes présents. La solution de piégeage utilisée était composée de 50 g de sel et de 2 cl de liquide vaisselle inodore par litre d'eau. Les pièges ont été laissés une semaine. Les pots ont été protégés des intempéries, notamment de la pluie, par un toit fait à partir de plexiglas transparent, ce qui limite la présence d'un ombrage au-dessus du piège qui pourrait attirer les arthropodes.

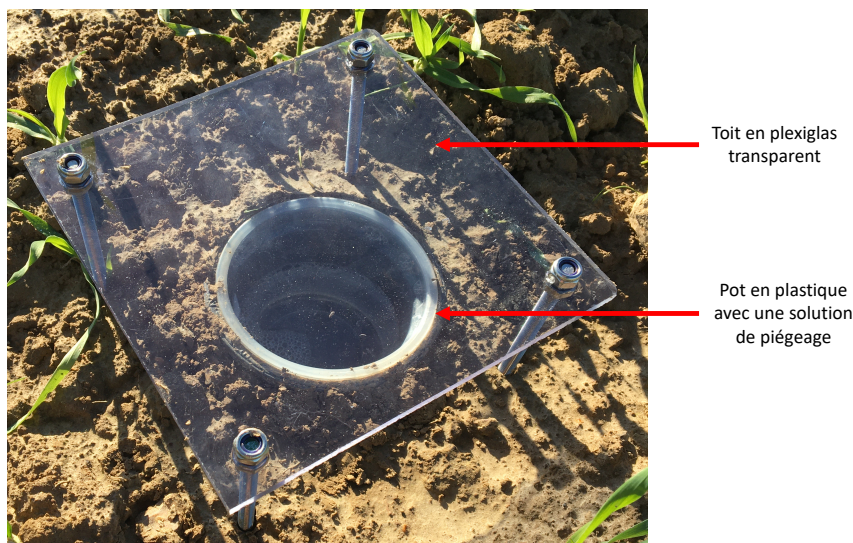


Figure 13 : Photographie annotée d'un pot Barber installé pendant le travail de thèse (© Justine Pigot)



2. Nettoyage et identification des arthropodes piégés

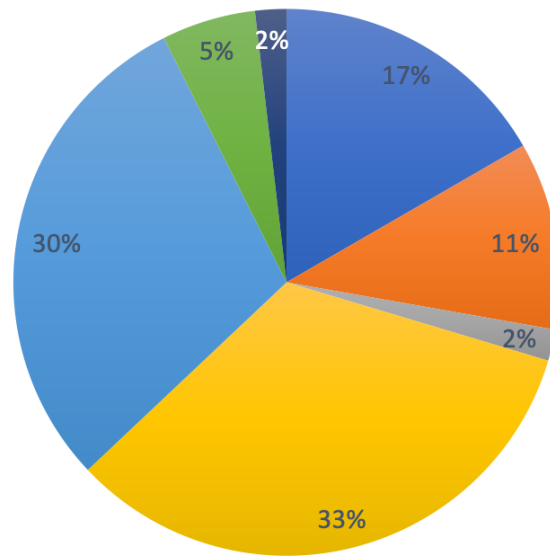
Les pièges sont nettoyés au laboratoire à l'aide d'un tamis de maillage 0,15 mm (®JBL Artemio 4), afin de retirer le maximum de terre et de débris végétaux. Les organismes sont ensuite conservés dans de l'éthanol à 70° pour être identifiés ultérieurement.

Les organismes ont été identifiés à différents degrés de précision, selon la facilité d'identification et la pertinence pour l'étude. Seuls les individus épigés étaient identifiés dans les pièges Barber.

Les carabes ont été identifiés à l'espèce à l'aide de la clé d'identification « Clé de détermination des carabidés, paysages agricoles du Nord-Ouest de la France » de J.-L. Roger *et al.* (Roger *et al.*, 2016). Les individus des genres *Amara*, *Harpalus* et *Microlestes* ont été vérifiés par le laboratoire d'écotoxicologie d'Orléans.



IV. Annexes



■ Brunisol ■ Calcosol ■ Fluvisol ■ Luvisol ■ Néoluvisol ■ Planosol ■ Rendosol

Figure S. 1 : Diagramme circulaire présentant les types de sols dominants de nos parcelles d'étude et leurs pourcentages. Les données ont été obtenues grâce à la « carte des sols » réalisée par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) et le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires et accessible sur Géoportail.

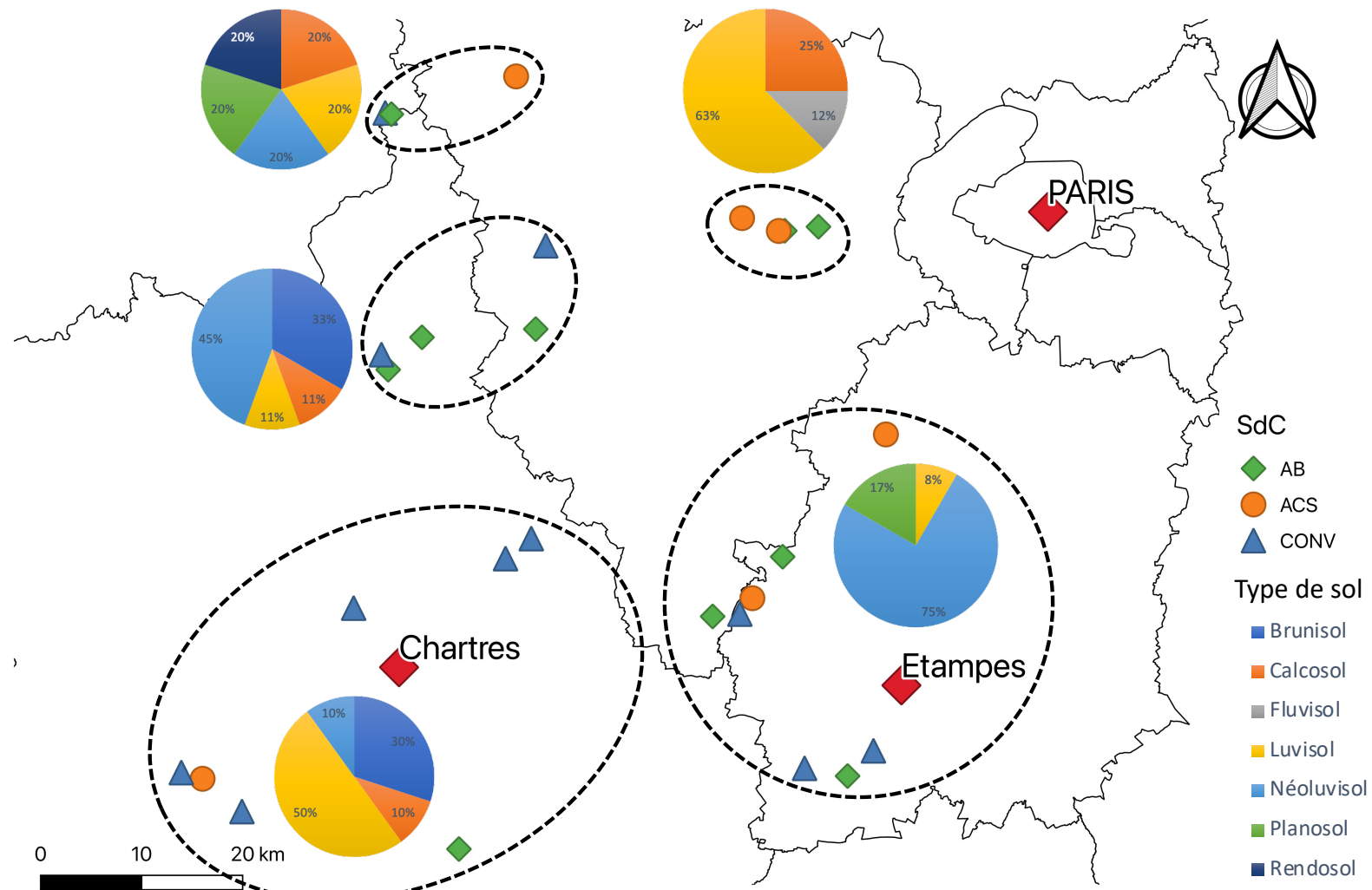


Figure S. 2 : Localisation des exploitations agricoles où au moins une parcelle a été suivie avec des diagrammes circulaires présentant les types de sols dominants et leurs pourcentages, selon les zones de la région d'étude (cercle en pointillés). Les données ont été obtenues grâce à la « carte des sols » réalisée par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) et le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires et accessible sur Géoportail.



Matériels et Méthodes

Tableau S. 1 : Informations sur les types de sols issues de fiches associées à la « carte des sols », réalisées par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) et le Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires et accessibles sur Géoportail

Type de sol dominant	Caractéristique du sol
Brunisol	Les brunisols sont des sols ayant des horizons relativement peu différenciés (textures et couleurs très proches), moyennement épais à épais (plus de 35 cm d'épaisseur). Ces sols sont caractérisés par un horizon intermédiaire dont la structure est nette (présence d'agrégats ou mottes), marquée par une forte porosité. Les brunisols sont des sols non calcaires. Ils sont issus de l'altération in situ du matériau parental pouvant être de nature très diverse.
Calcosol	Les calcosols sont des sols moyennement épais à épais (plus de 35 cm d'épaisseur), développés à partir de matériaux calcaires. Ils sont riches en carbonates de calcium sur toute leur épaisseur, leur pH est donc basique. Ils sont fréquemment argileux, plus ou moins caillouteux, plus ou moins séchants, souvent très perméables. Ils se différencient des calcisols par leur richesse en carbonates.
Fluvisol	Les fluvisols sont des sols issus d'alluvions, matériaux déposés par un cours d'eau. Ils sont constitués de matériaux fins (argiles, limons, sables) pouvant contenir des éléments plus ou moins grossiers (galets, cailloux, blocs). Situés dans le lit actuel ou ancien des rivières, ils sont souvent marqués par la présence d'une nappe alluviale et sont généralement inondables en période de crue.
Luvisol	Les luvisols sont des sols épais (plus de 50 cm) caractérisés par l'importance des processus de lessivage vertical (entraînement en profondeur) de particules d'argile et de fer essentiellement, avec une accumulation en profondeur des particules déplacées. La principale conséquence de ce mécanisme est une différenciation morphologique et fonctionnelle nette entre les horizons supérieurs et les horizons profonds. Les luvisols présentent une bonne fertilité agricole malgré une saturation possible en eau dans les horizons supérieurs en hiver.
Néoluvisol	Les néoluvisols sont des sols proches des luvisols mais dont les processus de lessivage vertical (entraînement en profondeur) d'argile et de fer essentiellement sont moins marqués.
Planosol	Les planosols sont des sols caractérisés par un contraste très important entre les horizons supérieurs perméables et les horizons profonds dont la perméabilité est très faible ou nulle du fait d'une teneur en argile élevée. Il en résulte que les horizons supérieurs sont saisonnièrement gorgés d'eau, donc hydromorphes, et marqués par une coloration bariolée.
Rendosol	Les rendosols sont des sols peu épais (moins de 35 cm d'épaisseur), reposant sur une roche calcaire très fissurée et riche en carbonates de calcium. Ce sont des sols au pH basique, souvent argileux, caillouteux, très séchants et très perméables. Ils se différencient des rendisols par leur richesse en carbonates.







Tableau S. 2 : Températures moyennes observées dans la région d'étude, selon les années, les mois et les départements.

Année	Mois	Essonne	Eure-et-Loir	Yvelines
2020	Juin	19	17	18
	Juillet	21	20	20
	Août	23	21	22
	Septembre	19	18	18
	Octobre	13	12	12
	Novembre	10	9	9
	Décembre	7	6	6
2021	Janvier	5	4	4
	Février	7	6	6
	Mars	8	7	8
	Avril	9	9	9
	Mai	13	12	12
	Juin	20	19	19
	Juillet	20	19	19
	Août	19	18	18
	Septembre	19	18	18
	Octobre	13	12	12
	Novembre	7	6	6
	Décembre	7	6	6
2022	Janvier	5	4	4
	Février	8	7	7
	Mars	10	9	9
	Avril	12	11	11
	Mai	17	16	16
	Juin	20	18	19
	Juillet	22	21	21

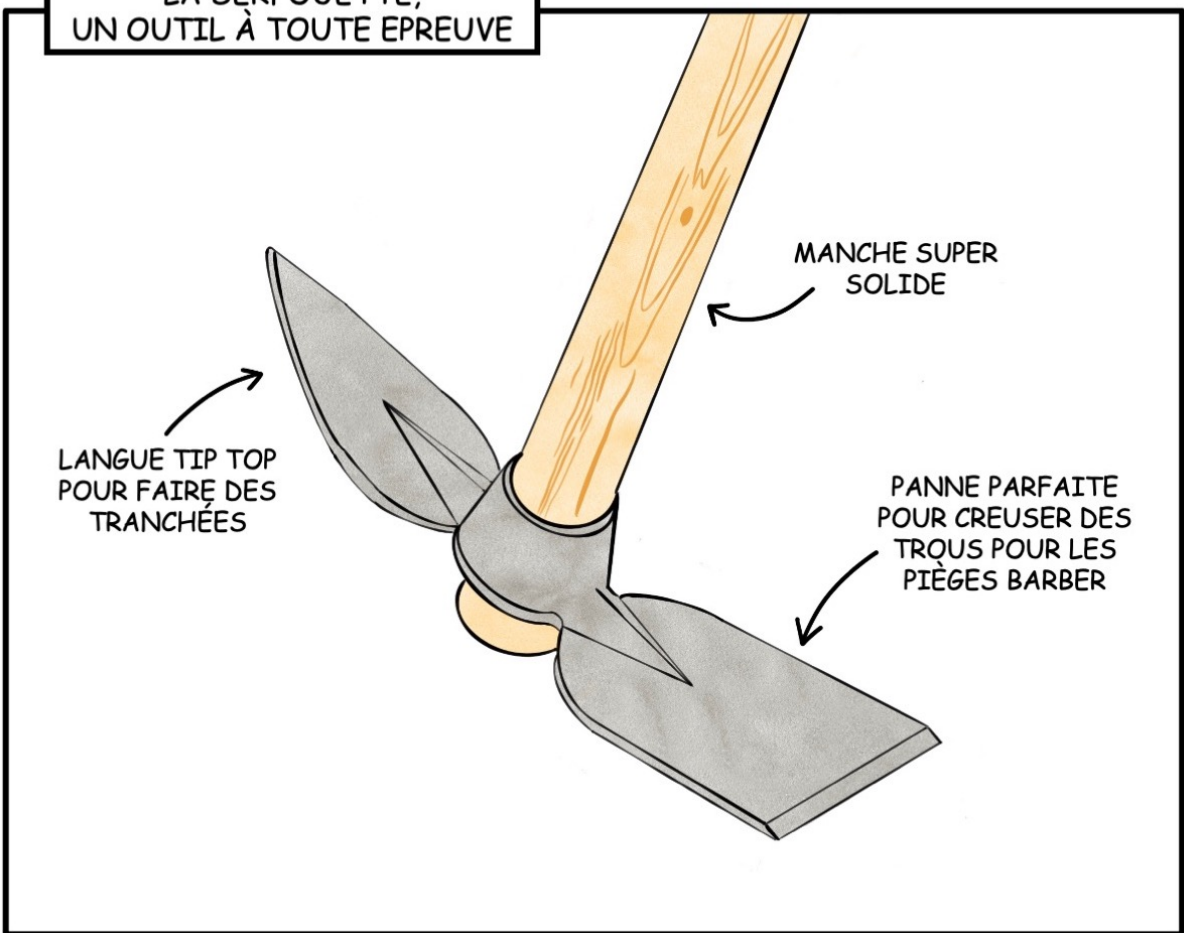


Matériels et Méthodes

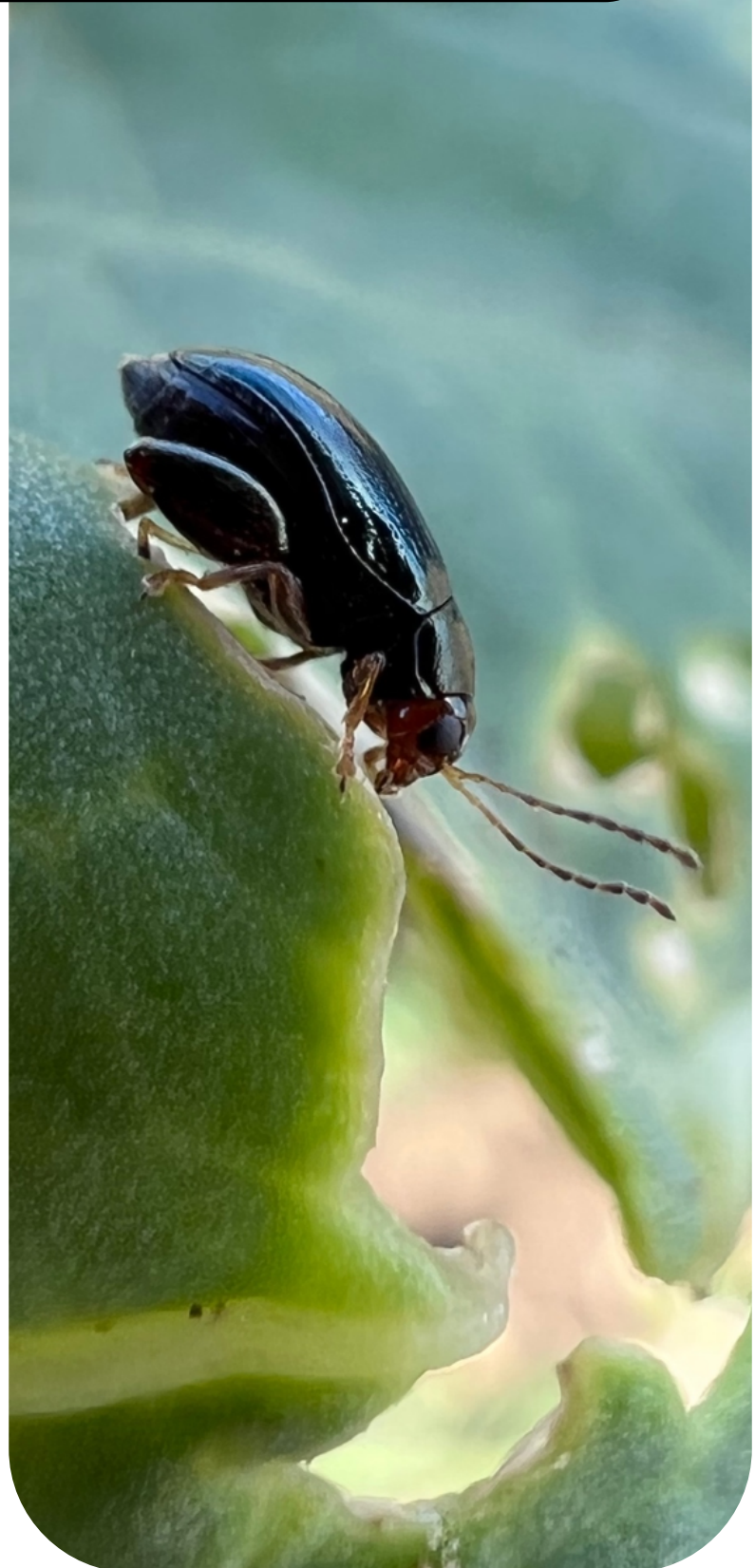
Tableau S. 3 : Exemple d'échelle pour caractériser la rugosité de la surface du sol. Les photographies ont été faites sur le terrain par Justine PIGOT.

Rugosité du sol	Photographie	
1 : Lisse (terre battue)		
2 : Granuleux (présence de turricules, cailloux)		
3 : Motteux (petites structures)		
4 : Grosses mottes prédominantes		

LA SERFOUËTTE,
UN OUTIL À TOUTE ÉPREUVE



Chapitre 1 : Comment les pratiques agricoles influencent-elles, directement et indirectement, les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles de colza et les risques qu'elles représentent ?



« Et octobre vient de passer en coup d'vent
Une autre année où je n'ai pas pris le temps
De voir l'automne s'effeuiller tranquillement »

Les Cowboys fringants, Octobre

Photographie : Justine Pigot



I. Résumé du chapitre

Contexte

Le colza (noté « CZH » dans les schémas) est une des cultures majoritaires en France et en Europe. Cependant, sa production est menacée. En effet, les agriculteurs rencontrent aujourd'hui des impasses vis-à-vis de la lutte chimique, notamment avec l'apparition croissante de populations d'insectes ravageurs résistants et le peu de substances actives efficaces disponibles sur le marché. Il est donc nécessaire de rechercher d'autres moyens de gestion, notamment préventifs. L'un des insectes ravageurs majeurs est l'altise d'hiver, qui arrive en automne dans les parcelles. Ce ne sont pas les adultes qui font les dégâts les plus importants, mais les larves qui minent les plants de colza durant l'hiver. Certaines études ont montré que la présence d'altises dans les parcelles dépendait de différents facteurs, comme les pratiques agricoles en place dans les parcelles ou encore les prédateurs présents. Cependant, des recherches restent nécessaires afin de comprendre les effets directs et indirects de ces différents éléments sur les populations d'altises présentes.

Questions de recherche et objectifs

Dans ce chapitre, nous cherchons à répondre à la question suivante : comment les pratiques agricoles influencent-elles les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles de colza d'hiver ? Nous étudierons également le risque qui leur est lié en termes de dégâts et nous affinerons l'analyse des populations en nous intéressant à la proportion de larves au stade L3 présentes.

Ainsi, nous tenterons de comprendre :

- Les effets directs (par exemple la date de semis) et indirects, par l'analyse des états du milieu, (par exemple la couverture du sol par les résidus jouant sur les états du sol) des pratiques agricoles ;
- L'impact des prédateurs généralistes présents dans les parcelles, tout en prenant en compte les proies alternatives potentiellement présentes ;
- L'influence de la composition du paysage à l'année d'étude (n) et l'année précédente (n-1) sur les populations, via des indices de pression. L'effet potentiel de la surface des parcelles suivies sera également pris en compte.

Schéma résumé de la question de recherche et des objectifs

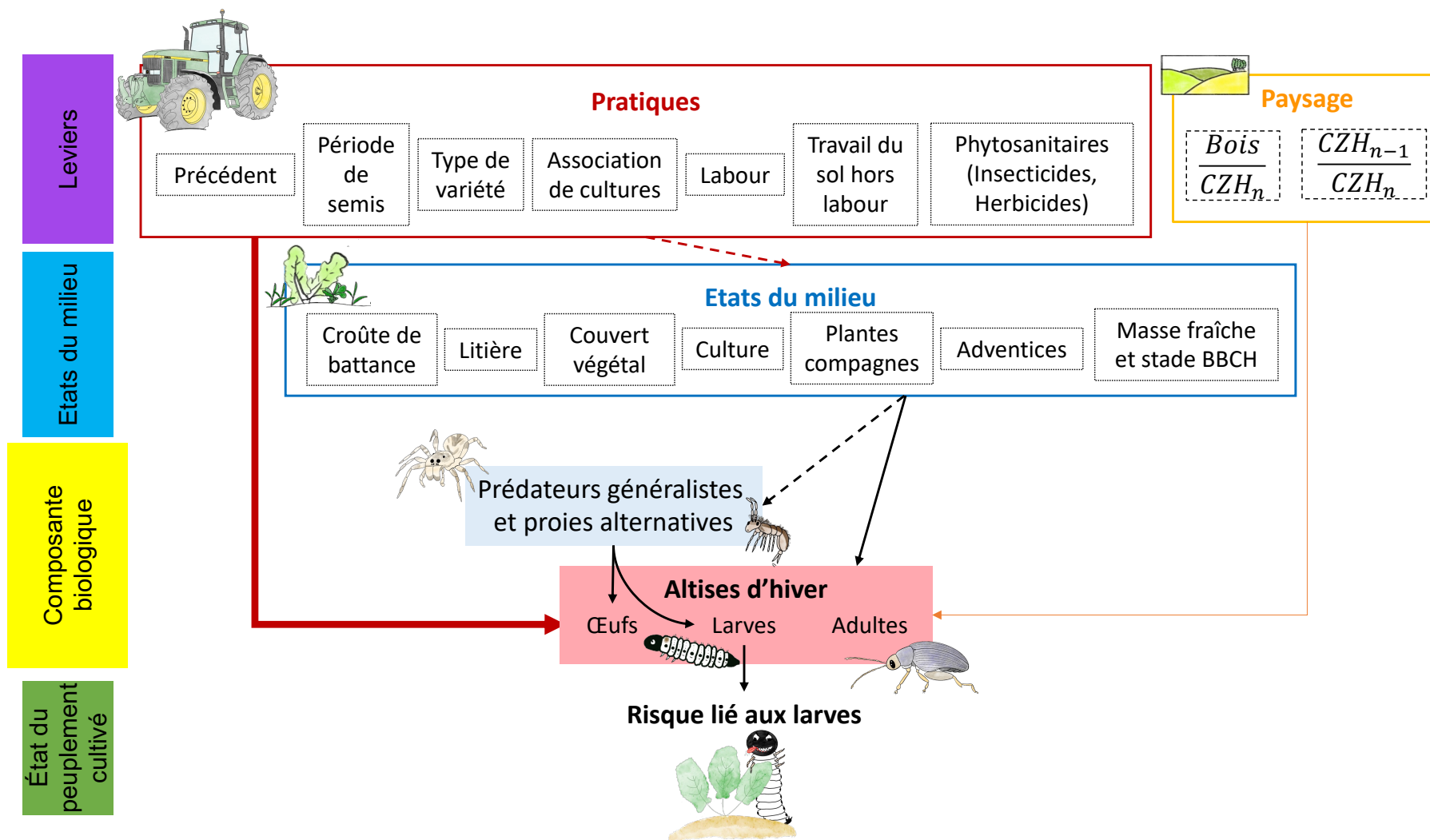


Figure 1. 1 : Schéma résumé des éléments étudiés dans le Chapitre 1 (©Dessins de Justine Pigot)



Méthodologie

Nous avons suivi 29 parcelles de colza en 2021 et 25 en 2022. Sur ces parcelles, nous avons quantifié les populations de larves d'altises d'hiver (et leur stade) à trois distances du bord de la parcelle à la mi-janvier à l'aide de pièges Berlèse. L'automne précédent, aux trois distances, nous avons piégé les prédateurs et proies alternatives à l'aide de pièges Barber. Nous avons également décrit les états du milieu observables (par exemple la couverture végétale) au sein de quadrats de 50 cm x 50 cm. Les pratiques agricoles dans les parcelles ont été recueillies grâce à des questionnaires auprès des agriculteurs. Nous avons également considéré la composition du paysage via l'utilisation d'indices à différents rayons allant de 250 à 3000 m.

Résultats principaux

A l'aide de différents modèles, nous avons pu observer de nombreux effets et tendances sur les différentes variables réponses étudiées (Figure 1.2).

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au nombre de larves d'altises d'hiver et au risque lié. Nous avons constaté un effet de l'année de suivi : les populations de larves et le risque lié étaient plus forts en 2021 qu'en 2022. En revanche, le paysage a un effet assez limité : seul l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 a un effet. Pour affiner la classification classique des systèmes de culture, nous nous sommes fondés sur une analyse plus fine des pratiques au champ et sur une observation des états du milieu qui en résultent. Nous avons ainsi constaté un fort effet négatif des traitements insecticides, un impact positif du labour et une relation négative entre le précédent « non légumineuses » et le nombre moyen de larves par plante. Concernant les états du milieu, nous avons observé des effets négatifs d'éléments caractéristiques de la végétation en place. Ainsi, une augmentation du pourcentage de couverture végétale est associée à une diminution du nombre de larves et au risque associé. Cet effet pourrait être lié à la végétation dans sa totalité : le pourcentage de colza, ainsi que des autres espèces végétales présentes, notamment les adventices. Enfin, la régulation *top-down* est apparue très limitée, le seul effet qui a été observé est celui des araignées qui contribuent à diminuer le nombre de larves.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3, qui correspondent aux premières larves présentes dans les parcelles, donc à une attaque précoce potentiellement plus nuisible. L'année et le paysage ont eu des effets très limités sur cette proportion. De même, en analysant les itinéraires techniques, nous n'avons observé qu'une tendance du type de variété semée : les variétés de type « Lignée » avaient tendance à avoir une proportion plus forte de larves au stade L3 que les variétés de type « Hybride » et donc avaient tendance à subir des infestations plus précoces. Contrairement aux deux autres variables, nous n'avons pas d'effet d'un traitement insecticide. Concernant les états du milieu, nous avons observé deux effets positifs : celui du pourcentage surfacique de la culture présente et celui de la masse fraîche.

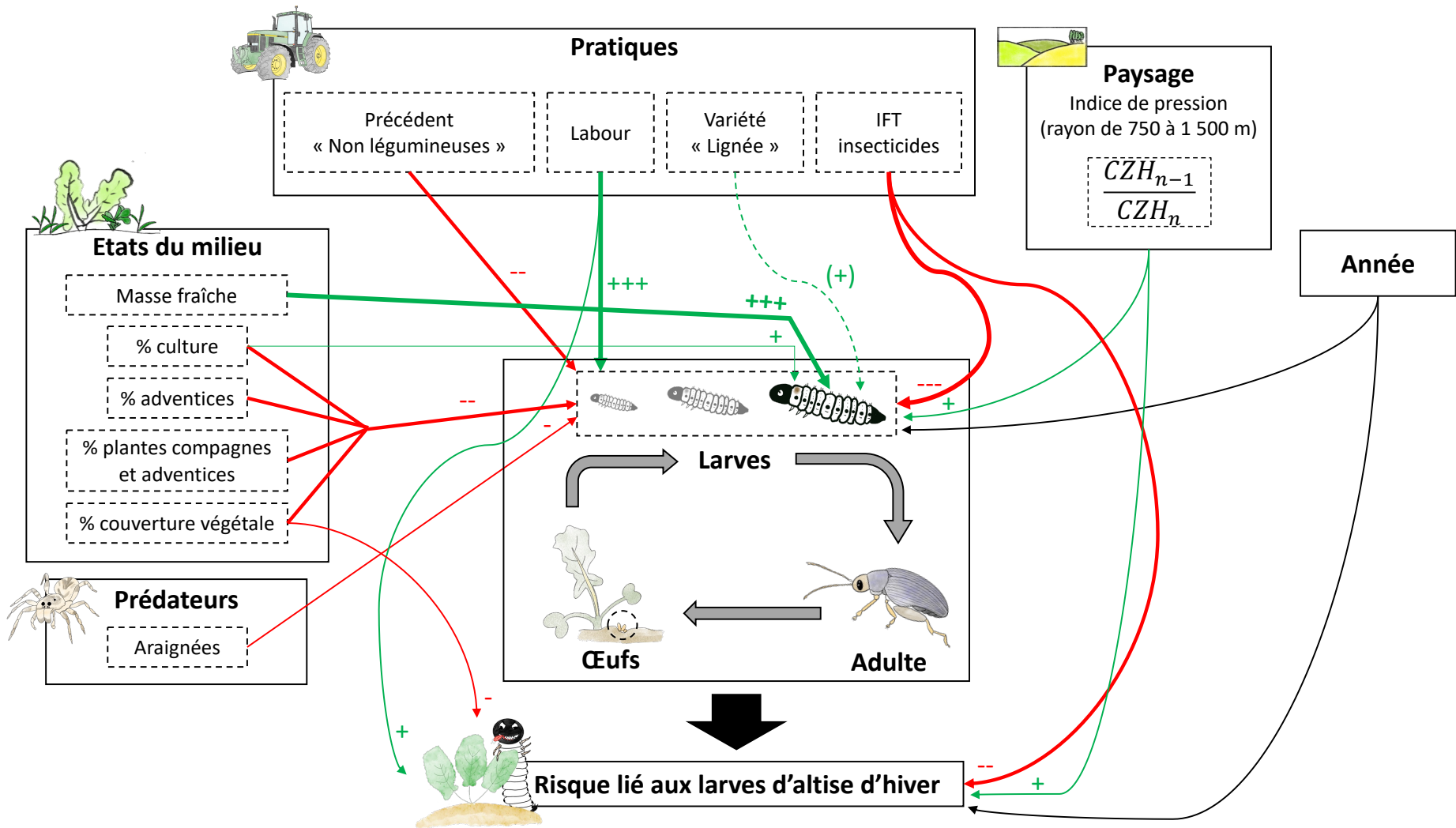


Figure 1. 2 : Schéma récapitulatif des relations observées entre des variables explicatives et les différentes variables réponses étudiées : (i) le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante, (ii) la proportion de larves au stade L3 par plante et (iii) le risque lié aux larves. La couleur des flèches correspond au sens des effets : rouge pour un effet négatif et vert pour un effet positif. L'épaisseur des flèches correspond à l'importance de l'effet observé (la flèche en tiret correspond à une tendance). (©Dessins de Justine Pigot)



Valorisation du chapitre

Ce chapitre a fait l'objet d'une présentation sous forme de poster lors du meeting SFE² GfÖ EEf qui a eu lieu à Metz du 21 au 25 novembre 2022. Le poster est présent en annexe : Figure S.1.1.



Ce qu'il faut retenir

Concernant les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles et le risque associé :

- ⇒ Ils sont influencés par le couvert végétal en place, notamment dû au développement du colza et à la présence d'autres espèces végétales.
- ⇒ Ils sont également fortement impactés par la présence d'un labour avant semis, mais surtout par les insecticides qui demeurent donc un levier efficace.
- ⇒ L'effet de la régulation top-down apparaît très limité : seules les araignées impactent les populations de larves.
- ⇒ La composition paysagère a un effet très limité.
- ⇒ L'année de suivi a un effet : les populations et le risque sont plus importants en 2021 qu'en 2022. Cet effet est probablement lié aux conditions climatiques plus fraîches en 2022.

Concernant la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3, traduisant la précocité d'infestation des parcelles :

- ⇒ Les colzas bien développés semblent infestés de façon plus précoce : la pourcentage de culture dans la parcelle et la masse fraîche ont une relation positive avec la proportion de larves au stade L3.
- ⇒ Les effets des pratiques, de la régulation *top-down*, du paysage et de l'année de suivi sont absents ou limités à des tendances.



II. Introduction

A. L'altise d'hiver, la menace la plus importante sur colza en automne et contre laquelle la lutte chimique a des effets limités

Le colza (*Brassica napus* L.) est attaqué par une cohorte de ravageurs, dont fait partie l'altise d'hiver, également appelée grosse altise (Chrysomelidae : *Psylliodes chrysocephala*, Linnaeus, 1758). Au début de l'automne, de fin août à mi-septembre, ce ravageur arrive sur les parcelles de colza après avoir estivé, notamment dans les lisières de bois (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b; Pigot *et al.*, 2023). Une fois dans les parcelles, les muscles servant au vol s'atrophient (Bonnemaison, 1965). Cela limite les moyens de déplacement des adultes qui privilégient alors la marche ou le saut (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b). Après une prise de nourriture de deux semaines (*ibid.*), la reproduction commence et dure tout au long de l'hiver. Les œufs sont pondus dans les crevasses du sol, à proximité des plants de colza (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b). Après l'éclosion, la larve peut parcourir jusqu'à 50 cm pour trouver un plant de colza. Elle entre ensuite dans la plante dans laquelle elle va se nourrir et passer l'hiver (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b).

Ainsi, l'altise d'hiver est à l'origine de deux types de dégâts. Les premiers dégâts observés sont ceux causés par les adultes à leur arrivée en automne. Les adultes se nourrissent des cotylédons et de jeunes feuilles de colza, laissant des trous de morsure caractéristiques (Williams, 2010a). Cette prise de nourriture perturbe fortement les plants de colza dont le développement sera retardé et dans les cas les plus extrêmes, elle peut conduire à la perte de plants. Les dégâts peuvent être très importants si le climat est sec et que la croissance du colza est lente. Des semis précoces, sous réserve de disponibilité en eau et en azote, peuvent permettre d'avoir une bonne implantation des colzas avant l'arrivée des altises d'hiver, et ainsi réduire la vulnérabilité des colzas (Valantin-Morison *et al.*, 2007; Ortega-Ramos *et al.*, 2022).

Les seconds sont provoqués par les larves présentes dans les plants et sont constatés à la fin de l'hiver. Ce sont ces derniers qui sont les plus préjudiciables. En effet, les larves minent les pétioles des feuilles et la tige principale. Cela peut conduire à une perte de vigueur lors de la reprise de végétation au printemps, induisant une perte de rendement. Pour les attaques les plus fortes, cela peut conduire à un retard de floraison et même à la perte des plants. La présence des galeries rend également les plants plus sensibles au gel (Williams, 2010b) : l'eau s'infiltre dans les galeries et provoque l'éclatement des tissus végétaux en période de gel (Breitenmoser *et al.*, 2020). De plus, cela rend également les plants plus sensibles au phoma (*Leptosphaeria maculans* syn. *Phoma lingam*) en créant des points d'entrée pour le champignon (Schulz et Daebeler, 1984). Ainsi, Derron et Goy (1991) ont constaté une perte de rendement d'environ 40 kg/ha pour une densité moyenne d'une larve par plante. Le contrôle de l'infestation larvaire peut se faire via une application d'un insecticide à base de pyréthrianoïdes visant les premiers stades larvaires (1 et 2) (Arjauré et Vincent 2011), mais son efficacité peut être fortement limitée si les populations d'altises d'hiver sont résistantes.

B. La nécessité de trouver une autre façon de faire face à l'altise d'hiver et à ses dégâts

La lutte curative contre l'altise d'hiver étant limitée, des recherches se sont intéressées à des moyens de lutte préventive. En France, Terres Inovia a proposé les seuils d'usage des pesticides suivants : cinq larves par pied en l'absence de risque agronomique (biomasse du colza, croissance en cours ou à l'arrêt et la précocité de reprise au printemps) et deux-trois larves en cas de risque agronomique identifié (Robert et Ruck, 2022a). Mais en raison d'une augmentation des résistances aux insecticides, la recherche d'une gestion plus préventive et agroécologique est nécessaire. Ainsi,



des recherches ont été effectuées afin d'identifier les pratiques agricoles pouvant (i) limiter les populations d'altises d'hiver, adultes et larves, et les maintenir sous des seuils tolérables vis-à-vis des dégâts, (ii) éviter ou retarder leur arrivée dans les parcelles ou (iii) atténuer leurs dégâts.

1. *Agir sur la date et la densité de semis, ainsi que sur les types de variétés semées afin d'éviter les vols d'altises ou limiter la sensibilité des colza et prendre en compte le paysage.*

A l'échelle de la parcelle, dans un premier temps, il est possible d'agir sur la date de semis. Généralement, le colza est semé entre mi-août et mi-septembre, mais cela peut coïncider avec les vols d'altises d'hiver (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Ainsi, Bonnemaïson (1965) suggérait d'ajuster les dates de semis selon les périodes de migration observées dans les régions. Il proposait de semer tardivement le colza (début à mi-septembre) dans le nord de la France afin d'éviter les vols. En effet, une fois les altises d'hiver adultes arrivées dans les parcelles, elles perdent leur capacité à voler suite à une atrophie des muscles (Bonnemaïson et Jourdeuil, 1954b) et ne peuvent donc plus migrer dans d'autres parcelles. Ainsi, les semis tardifs évitent la majorité des migrations. A l'inverse, Bonnemaïson (1965) préconisait des semis précoces dans les régions où les vols sont tardifs. Les semis précoces peuvent permettre une meilleure implantation du colza : il sera donc bien développé à l'arrivée des altises d'hiver et les impacts des attaques d'altises d'hiver adultes (prise de nourriture) seront limités (Alves *et al.*, 2015; White *et al.*, 2020). Une bonne implantation des colzas peut également limiter leur vulnérabilité vis-à-vis des larves. En effet, la présence de larves dans des « petits colzas » peut conduire à la mort des plants dans les cas les plus extrêmes (Arjaure et Vincent, 2011). Cependant, un semis précoce peut augmenter les risques face aux larves, car le colza est présent pendant toute la période de ponte. Conrad *et al.* (2021) ont montré grâce à une expérience contrôlée avec des cages que plus de larves sont présentes lorsque les altises adultes sont introduites début septembre que fin septembre. De même, White *et al.* (2020) et Ortega-Ramos *et al.* (2023) ont observé plus de larves dans les colzas semés en août que dans ceux semés en septembre. Ainsi, des recherches sont nécessaires pour comprendre les compromis entre l'implantation du colza (date de semis et conditions abiotiques), les populations de larves et les populations d'adultes (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). En effet, un semis précoce qui permet d'avoir un colza plus robuste face aux populations d'altises adultes peut être contrebalancé par une plus forte pression de la part des larves et le résultat pourrait être bien différent de celui attendu. Nous pouvons donc bien poser l'hypothèse que la date de semis a des effets ambivalents car elle entre en interaction avec d'autres pratiques, comme celles qui influencent l'implantation et la vigueur de la plante.

Dans la même optique de limitation de la sensibilité des colzas, un levier existe au niveau des variétés semées. En effet, il est souvent suggéré que les variétés s'implantant rapidement ou étant capables de compenser les dégâts par production de ramifications nombreuses, sont plus tolérantes aux altises d'hiver, au stade adulte comme larvaire. Ainsi, les colzas hybrides sont souvent présentés comme plus aptes à résister aux attaques d'altises d'hiver que les colzas de lignée. Cependant, les résultats ne sont pas toujours significatifs (Ortega-Ramos *et al.*, 2022).

Enfin, il a été montré qu'un « effet dilution » est possible au champ. En effet, une forte densité de semis limite les attaques des adultes et l'infestation des plants par les larves (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Cet effet dilution peut être également visible à l'échelle paysagère : Valantin-Morison, Meynard et Doré (2007) ont montré que le pourcentage de colza dans une région était négativement corrélé à la proportion de plantes avec des larves d'altises ou des dégâts. Cependant, il est possible que cet effet dilution soit limité dans des paysages avec une forte présence de colza et d'importantes populations d'altises (Ortega-Ramos *et al.*, 2022).



Enfin, à l'échelle paysagère, il est également important de prendre en compte la localisation des parcelles. En effet, il a été montré que des parcelles de colza proches de celles précédemment en colza sont souvent plus touchées que celles qui sont plus éloignées (Alves *et al.*, 2015). De plus, nous avons constaté dans une autre étude (Chapitre 2) que les altises d'hiver estivaient beaucoup dans les lisières de bois (Pigot *et al.*, 2023). Ainsi, les parcelles proches des bois ou dans un paysage avec un fort pourcentage surfacique en bois, pourraient être plus susceptibles d'être attaquées par les altises d'hiver adultes qui sortent d'estivation.

2. *Planter des plantes compagnes pour perturber l'insecte et protéger le colza*

Le colza peut être implanté avec d'autres espèces végétales qui peuvent perturber les insectes ravageurs et limiter leur impact. Ainsi, ces plantes doivent pousser rapidement, mais sans être compétitives avec le colza, en étant gélives par exemple (Verret *et al.*, 2019). Bien souvent, ce sont des fabacées, comme la féverole (*Vicia faba* L.), qui sont choisies, car elles apportent de l'azote au colza. Mais des espèces appartenant à d'autres familles botaniques sont également utilisées, comme le sarrasin (*Fagopyrum esculentum* Moench), la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.) ou le nyger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.) (Breitenmoser *et al.* 2020 ; Ortega-Ramos *et al.* 2022). La présence de ces plantes peut limiter les dégâts des adultes et l'infestation par les larves. En effet, la présence d'une ou plusieurs autres espèces végétales peut induire de la confusion visuelle et olfactive, créer des obstacles qui entravent le déplacement des insectes ou encore augmenter la présence des prédateurs (Cadoux *et al.*, 2015). Par exemple, les méligèthes utilisent des signaux visuels et olfactifs pour localiser leurs plantes hôtes (Cook *et al.*, 2007; 2013; Skellern *et al.*, 2017). L'utilisation de ces signaux est courante chez les insectes herbivores et semble primordiale pour la reconnaissance des plantes hôtes. Le test en laboratoire de Park *et al.* (2019) s'est intéressé à *Mogulones borraginis* (Fabricius, 1792, Coleoptera : Curculionidae) et à la distinction de sa plante hôte *Cynoglossum officinale* (L.) par rapport à une plante de la même famille, *Andersonglossum occidentale* (A. Grey). Lorsque les insectes ont accès à des signaux olfactifs et visuels, ils détectent plus rapidement la plante hôte que lorsqu'ils n'ont que l'un des deux. Lorsqu'ils n'ont aucun signal, ils ne parviennent plus à distinguer les deux espèces végétales.

Cadoux *et al.* (2015) ont constaté que la présence de légumineuses gélives avec le colza avait tendance à diminuer les dégâts automnaux causés par le charançon du bourgeon terminal, *Ceutorhynchus piciparsis* (Gyllenhal, 1837, Coleoptera : Curculionidae), un ravageur du colza, dont le cycle biologique est proche de celui de l'altise d'hiver (Pierre et Ollivier, 2017). Plus récemment, avec leurs essais en Suisse, Breitenmoser *et al.* (2020) ont montré un effet significatif du colza associé à des plantes compagnes (notamment trèfle et nyger) sur le nombre de plantes attaquées par les altises d'hiver adultes. Cependant, ils n'ont vu aucun effet sur le nombre de larves par plante. Alarcón-Segura *et al.* (2022) ont montré que la culture associée permettait d'augmenter le contrôle biologique et conduisait à une diminution de 20 % des populations de larves de méligèthes présentes dans les bandes de colza au printemps.

Ces recherches sont récentes, parfois faites sur de petits dispositifs et nécessitent donc des études complémentaires afin de comprendre le réel impact de la présence de plantes compagnes sur les altises d'hiver, et notamment sur les larves. En effet, leur présence pourrait par exemple limiter la reconnaissance des plants de colza par les adultes, ou entraver le déplacement des adultes et des larves au sein des parcelles. Ces recherches sont rarement réalisées en conditions réelles, en parcelles agricoles et sont souvent pensées sans tenir compte de l'ensemble du système de culture, mais nous faisons néanmoins l'hypothèse que ces plantes compagnes ou autres espèces que le colza peuvent avoir un effet perturbateur sur l'insecte et protecteur du couvert végétal.



3. Les effets directs et indirects des pratiques, comme le travail du sol, sur les altises d'hiver

Les pratiques dans les parcelles peuvent avoir des effets directs ou indirects, en modifiant le milieu de vie par exemple, sur les altises d'hiver et leurs prédateurs.

Les populations d'altises d'hiver sont encore majoritairement contrôlées grâce à l'utilisation d'insecticides, majoritairement à base de pyréthriinoïdes (Arjauré et Vincent 2011). Cependant, de plus en plus de cas de résistances sont détectées en France, notamment dans le nord-est (Robert et Ruck, 2022b). Ainsi, ce phénomène de résistance peut limiter la gestion de ce ravageur. De plus, l'utilisation d'insecticides peut avoir des effets létaux et sublétaux sur les organismes non-cibles, comme les carabes (Tooming *et al.*, 2014; Mužinić et Želježić, 2018) : diminution de la longévité et de la fertilité, impact négatif sur l'orientation dans le cas des insecticides neurotoxiques, etc. (Desneux *et al.*, 2007). Ces effets létaux possibles sur des prédateurs pourraient limiter la régulation biologique de ravageurs tels que les altises d'hiver.

Les insecticides ne sont pas les seuls produits phytosanitaires pouvant impacter les arthropodes présents dans les parcelles. Dans leur rapport, Holland et Oakley (2007) ont noté que plusieurs études avaient constaté une augmentation de l'abondance et/ou de la diversité des arthropodes en absence de traitements herbicides. Ces traitements peuvent notamment affecter les communautés d'arthropodes herbivores. Cet impact est probablement indirect. En effet, Taylor *et al.* (2006) ont observé un effet indirect des herbicides sur les arthropodes, dû à une modification des communautés végétales présentes.

Le travail du sol est connu pour ses effets souvent négatifs sur les arthropodes présents dans les parcelles. Ainsi, plusieurs études ont observé des populations de larves d'altises d'hiver moindres dans les systèmes de culture sans labour et avec un minimum de travail du sol (Valantin-Morison *et al.*, 2007; Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Cet impact pourrait être indirect, en étant par exemple dû au fait qu'en l'absence de travail du sol, et notamment d'un labour, des chaumes et de la paille peuvent être présents à la surface du sol. Or leur présence pourrait limiter les dégâts d'altises d'hiver en limitant la reconnaissance des colzas (chaumes) ou en conservant la fraîcheur au niveau du sol (paille) qui favorise l'implantation et la vigueur des plants de colza (Thomas, 2017; White *et al.*, 2020). La présence de résidus à la surface pourrait également entraver le déplacement des altises, adultes et larves, à la surface. De plus, l'étude de White *et al.* (2020) avait constaté que les altises d'hiver adultes pouvaient être attirées par les sols perturbés. Le travail du sol peut également impacter les prédateurs. Par exemple, Büchs (2003) a constaté qu'une réduction du travail du sol augmentait le nombre d'arthropodes prédateurs présents dans les colzas.

Ainsi, il apparaît important de comprendre les effets directs de ces pratiques, mais également les effets indirects. En effet, ces pratiques modifient les états du milieu (par exemple la présence de résidus) et donc la perception de leur environnement par les insectes. Nous faisons à nouveau l'hypothèse d'une perturbation mais cette fois visuelle et physique de l'absence du travail du sol : la présence de résidus comme celle d'une diversité végétale pourraient limiter la reconnaissance des plants de colza par les altises, notamment les femelles et les larves, et donc limiter ou retarder la colonisation des parcelles. De même, les résidus pourraient également entraver leurs mouvements.



4. S'appuyer sur la régulation biologique des altises d'hiver pour limiter les dégâts causés par les larves

En automne, une régulation biologique par prédation est possible. Elle s'appliquerait sur les œufs ou les larves d'altises d'hiver présents au sol et pouvant être prédatés par des prédateurs généralistes. Ces prédateurs peuvent être des carabes, des staphylins ou encore des araignées, qui sont les principaux prédateurs présents dans les parcelles de colza à cette période (Büchs, 2003; Williams *et al.*, 2010; Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Dans leur étude en automne (mi-septembre à fin octobre), au Royaume-Uni, Warner *et al.* (2003) ont observé trois espèces de carabes majoritaires : *Trechus quadristriatus* (Schrank, 1781, Coleoptera : Carabidae), *Pterostichus madidus* (Fabricius, 1775, Coleoptera : Carabidae) et *Nebria brevicollis* (Fabricius, 1792, Coleoptera : Carabidae). Avec des expérimentations au laboratoire, *T. quadristriatus* a été identifié comme un important prédateur potentiel d'œufs d'altises d'hiver. Dans les parcelles, une association significative entre la distribution de *T. quadristriatus* et celle des larves d'altises d'hiver a été observée au moment du pic de ponte. Une relation similaire a également été observée avec *P. madidus*. Ce qui semblerait indiquer un vrai potentiel de régulation des œufs et des larves d'altises d'hiver par ces espèces de carabes, et peut-être d'autres. Cependant, cette régulation pourrait être perturbée par la présence de proies alternatives ou d'autres prédateurs. Warner *et al.* (2003) ont observé une association spatiale entre les carabes et les collemboles, qui constituent des proies alternatives. Or l'impact des prédateurs, et notamment des prédateurs généralistes, peut être limité suite à des interactions entre prédateurs et entre prédateurs et proies alternatives (Letourneau *et al.*, 2009).

Hoarau *et al.* (2022), et de nombreux autres auteurs, pensent que les prédateurs comme les carabes (comme *Trechus quadristriatus*) pourraient constituer une bonne alternative à la lutte chimique. Cependant, des études sont encore nécessaires pour comprendre leur impact réel sur le biocontrôle des altises d'hiver à différents stades (Ortega-Ramos *et al.*, 2022; Hoarau *et al.*, 2022).

C. Question de recherche et objectifs

Nous avons résumé ci-dessus les principaux déterminants des attaques de l'altise d'hiver. Parmi eux les influences de pratiques agricoles telles que les dates de semis, le travail du sol la présence de plantes compagnes ont été plus ou moins récemment testés, nous permettant de faire des hypothèses sur leurs effets. Mais rares sont les études qui observent et décortiquent la combinaison de ces pratiques dans un même système de culture, dans des conditions agricoles et en interaction avec la mosaïque paysagère.

Dans ce chapitre, nous chercherons à **comprendre comment les pratiques agricoles en place dans les parcelles peuvent impacter directement ou indirectement les populations de larves d'altises d'hiver et leur dynamique de colonisation (obtenue via la proportion de larves au stade L3) et leurs prédateurs, ainsi que les risques qui sont liés à l'intensité de l'attaque.** Dans cette étude, le paysage sera également pris en compte car il peut avoir un impact non négligeable.

Pour les pratiques agricoles, nous regarderons les effets directs c'est-à-dire la nature et la fréquence du travail du sol, date de semis, mais également les effets indirects sur les états du milieu c'est à dire la couverture végétale, présence de résidus en surface. Nous nous intéresserons également à l'impact des prédateurs généralistes présents en automne dans les parcelles, ainsi qu'à celui de la présence de proies alternatives. Ces effets seront testés sur trois variables complémentaires : (i) les populations de larves d'altises d'hiver présentes, (ii) sur le risque de dégâts lié et (iii) sur la proportion de larves au stade L3 dans les populations, qui correspond aux premières larves présentes dans les parcelles.



III. Matériel et méthodes

A. Site d'étude

L'étude a été menée dans le Sud-Ouest du Bassin Parisien (Figure 1.3), dans les départements des Yvelines, de l'Essonne et de l'Eure-et-Loir. Elle a été menée durant deux ans, dans 29 parcelles de colza en 2021 et 25 en 2022, soit dans 54 parcelles au total. Ces parcelles ont été choisies afin d'étudier un gradient de pratiques, notamment en termes de travail du sol et de cultures implantées (colza seul ou avec des plantes compagnes). Pour le choix des parcelles, nous nous sommes également fondés sur des catégories de systèmes de cultures simples (agriculture conventionnelle, biologique ou de conservation), en essayant d'avoir un nombre de parcelles équilibré entre les catégories.

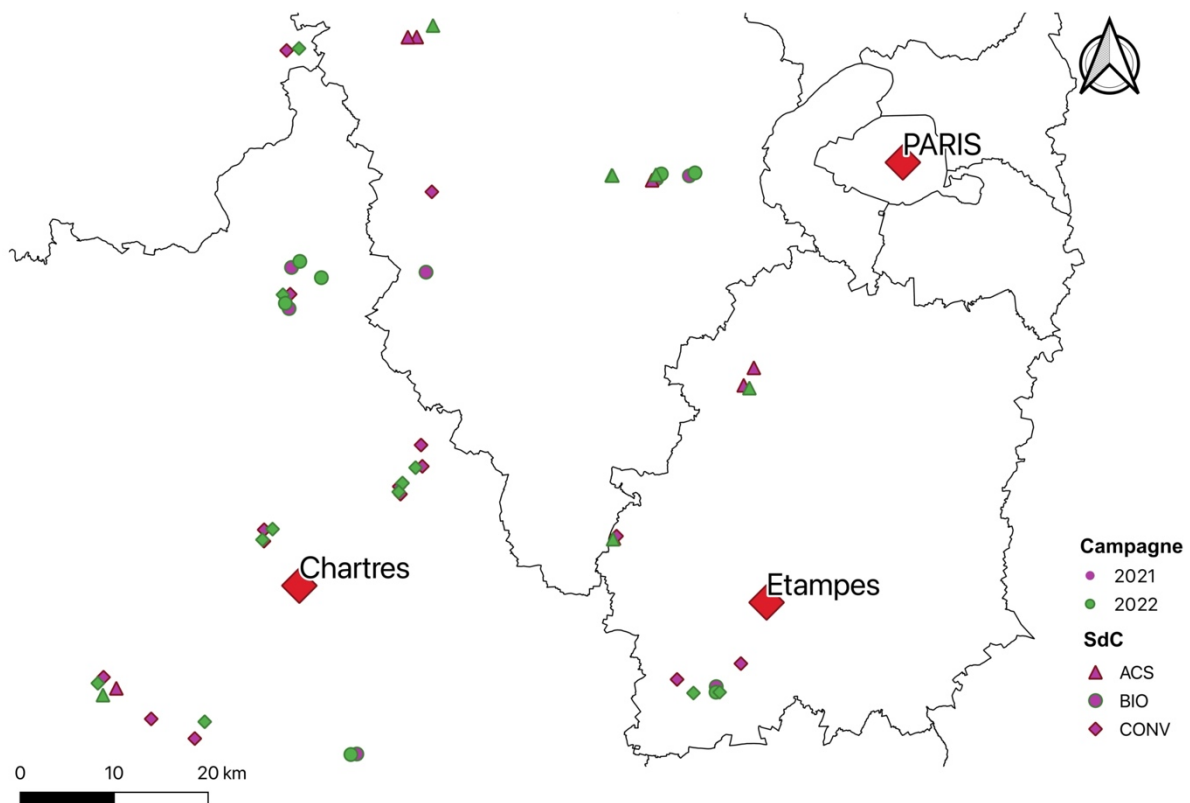


Figure 1. 3 : Carte des parcelles de colza suivies au sein du réseau de parcelles d'agriculteurs, selon les systèmes de culture en place

B. Quantifier les populations de larves d'altises d'hiver

Nous avons quantifié les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles à la mi-janvier (2021 et 2022). Cette période a été privilégiée car la majorité des œufs ont éclos et donc la majorité des larves se trouve dans les pieds de colza (Bonnemaison et Jourdeuil, 1954b; Williams, 2010b).

Pour quantifier les larves présentes dans chaque parcelle d'étude, nous avons récolté 10 pieds de colzas (coupés au collet) à trois distances en diagonale à partir du bord : 50, 100 et 150 m (Figure 1.4). A ces distances, nous évitons les « effets bords » possibles. Les échantillons ont été ramenés au laboratoire, où ils ont été pesés en l'état. Ensuite, le limbe des feuilles a été retiré afin de ne garder que la nervure principale. Ce procédé permettait un séchage plus rapide des plantes à l'air libre. Les



échantillons ainsi traités sont disposés dans des pièges Berlèse (voir Figure 1.5). Ce piège se compose d'un entonnoir contenant l'échantillon de colza, disposé au-dessus d'un flacon de collecte contenant un liquide de piégeage qui permet de conserver les larves piégées jusqu'à l'identification. En 2021, le liquide de piégeage utilisé était une solution salée (50 g/L de sel) avec du liquide vaisselle sans odeur (2 cL/L). Ce liquide ne permettant pas une conservation à long terme des larves, les solutions étaient changées toutes les semaines et les larves piégées étaient transférées dans de l'éthanol 70 %. En 2022, nous avons décidé de remplacer cette solution de piégeage par du propylène glycol (IUPAC : propane-1,2-diol) à 30 % avec du liquide vaisselle (2 cL/L). Cette solution permet une conservation sur le long terme, ainsi les flacons n'ont été relevés qu'une seule fois à la fin de l'expérimentation et les larves ont été identifiées dans la foulée. Nous supposons que ce changement de solution de piégeage a été sans impact car les deux solutions n'avaient pas d'odeur. De plus, dans les pièges Berlèses, les larves tombent dans les flacons collecteurs car elles fuient la dessiccation des plantes et non parce qu'elles sont attirées par la solution qu'ils contiennent. Les deux années, les pièges ont été laissés au séchage à l'air libre dans une pièce durant un mois.

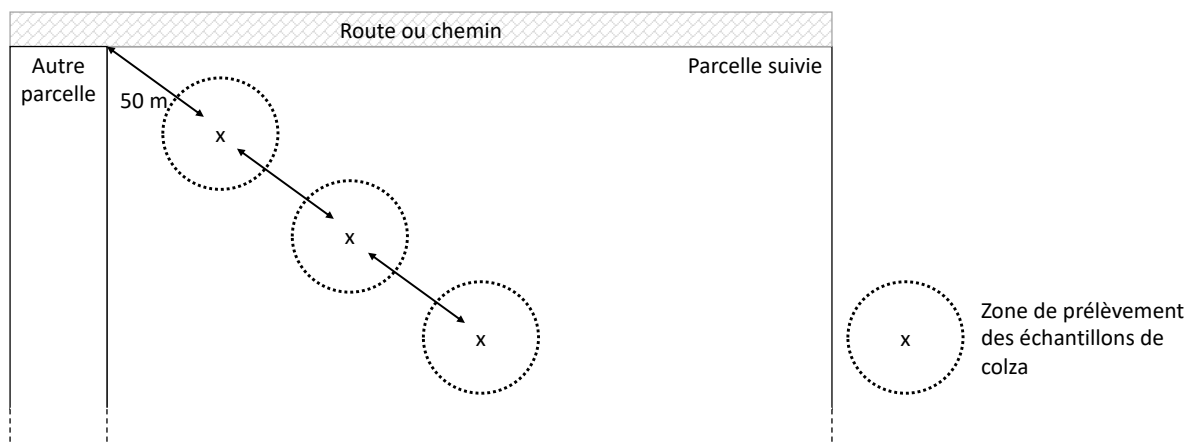


Figure 1. 4 : Schéma du placement des trois zones de prélèvement des colzas à 50, 100 et 150 m du bord de la parcelle suivie

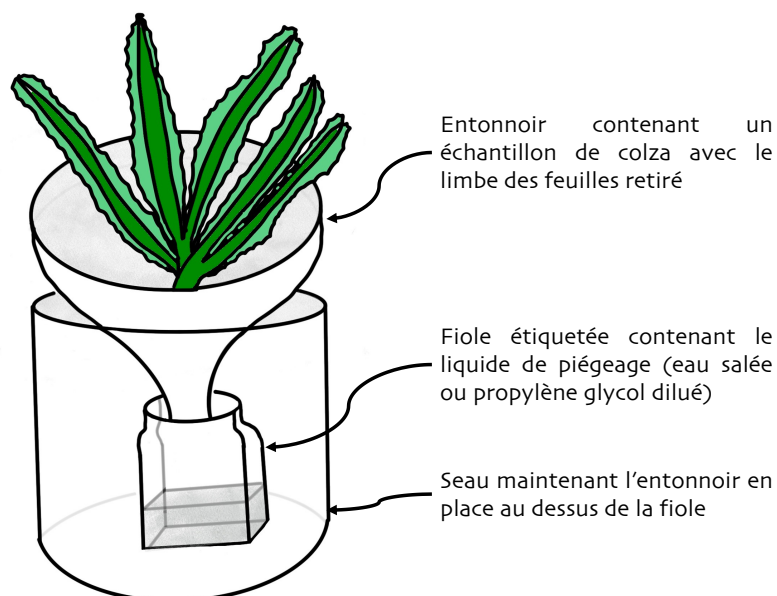


Figure 1. 5 : Schéma du dispositif Berlèse utilisé les deux années de suivi (@Dessin de Justine Pigot)

Les larves d'altises du colza ont été identifiées à l'aide d'un document qui peut être trouvé dans les bulletins de santé du végétal (BSV) et visible en annexe (Chapitre 1 : VI.) sur la Figure S.1.2. Afin



d'approximer une précocité d'attaque, nous avons classé les larves selon les stades larvaires (L1 : taille inférieure ou égale à 3 mm ou égal ; L2 : taille comprise en 3 et 6 mm et L3 : taille supérieure à 6 mm). En effet, les larves au stade L3 correspondent aux larves issues des premières pontes qui ont eu lieu dans les parcelles.

C. Le risque lié aux larves d'altises d'hiver

Pour évaluer le risque, nous nous sommes fondés sur la grille d'évaluation du risque « charançon du bourgeon terminal et larves d'altises d'hiver » élaborée par Terres Inovia (Terres Inovia, s.d.). L'évaluation du risque global se fait en trois étapes via un système de notes et est présenté sur le Tableau 1.1.

Tableau 1. 1 : Risque global lié aux larves d'altises d'hiver, résultant de la combinaison du risque agronomique et du risque lié à la pression des insectes. Le conseil de traitement donné par Terres Inovia est également présenté ici. Le détail de l'évaluation globale du risque est présenté sur le document de Terres Inovia : « Évaluation du risque charançon du bourgeon terminal et larves de grosses altises » (Terres Inovia, s.d.)

Risque agronomique	Risque pression insectes	Risque global et décision	Traitement conseillé
Fort	Fort (> 5 larves par plante)	Fort	OUI
Moyen		Fort	OUI
Faible		Moyen	OUI
Fort	Moyen (entre 2-3 et 5 larves par plante)	Fort	OUI
Moyen		Moyen	OUI
Faible		Faible	NON
Fort	Faible (< 2-3 larves par plante)	Faible	NON
Moyen		Faible	NON
Faible		Faible	NON

La 1^{ère} étape est une évaluation du risque agronomique présent au moment du prélèvement (mi-janvier) avec la prise en compte de trois éléments (Tableau 1.2) : la biomasse du colza, sa dynamique de croissance et la durée de l'arrêt de croissance hivernale. Nous avons mesuré la biomasse des colzas échantillonnés, nous pouvons donc facilement évaluer cet élément. Nous n'avons pas mesuré la dynamique de croissance, nous l'avons donc considérée comme constante (risque faible) dans toutes les parcelles étudiées. Enfin, la durée de l'arrêt de croissance hivernale est la même pour toutes les parcelles et correspond à un risque moyen : les conditions hivernales sont intermédiaires et la date de reprise est variable, la date de reprise historique étant courant février (Terres Inovia, s.d.). Dans notre cas d'étude, les risques agronomiques sont moyens ou faibles et sont présentés sur le Tableau 1.2.

Tableau 1. 2 : Évaluation du risque agronomique dans notre cas d'étude. Le risque agronomique résulte de la combinaison de trois éléments : le risque lié à la biomasse du colza, celui lié à la dynamique de croissance du colza et celui lié à la durée de l'arrêt de croissance hivernale. Dans notre cas d'étude, ces deux derniers risques sont ou sont considérés comme constants. Le risque agronomique est donc très lié au risque lié à la biomasse du colza.

Risque lié à la biomasse	Risque lié à la dynamique de croissance du colza	Risque lié à la durée de l'arrêt de croissance hivernale	Risque agronomique
Fort (< 30 g par plante)	Constante (FAIBLE)	Constante (MOYEN)	MOYEN
Moyen (30 – 45 g par plante)			MOYEN
Faible (> 45 g par plante)			FAIBLE



La deuxième étape est l'évaluation de la pression insecte et se base sur des seuils de population donnés par Terres Inovia (Terres Inovia, s.d.).

Enfin, la dernière étape est l'évaluation du risque global et la prise de décision dans les cas des agriculteurs utilisant cette grille d'évaluation. A partir de cette étape, nous avons élaboré un arbre de décision présenté sur la Figure 1.6.

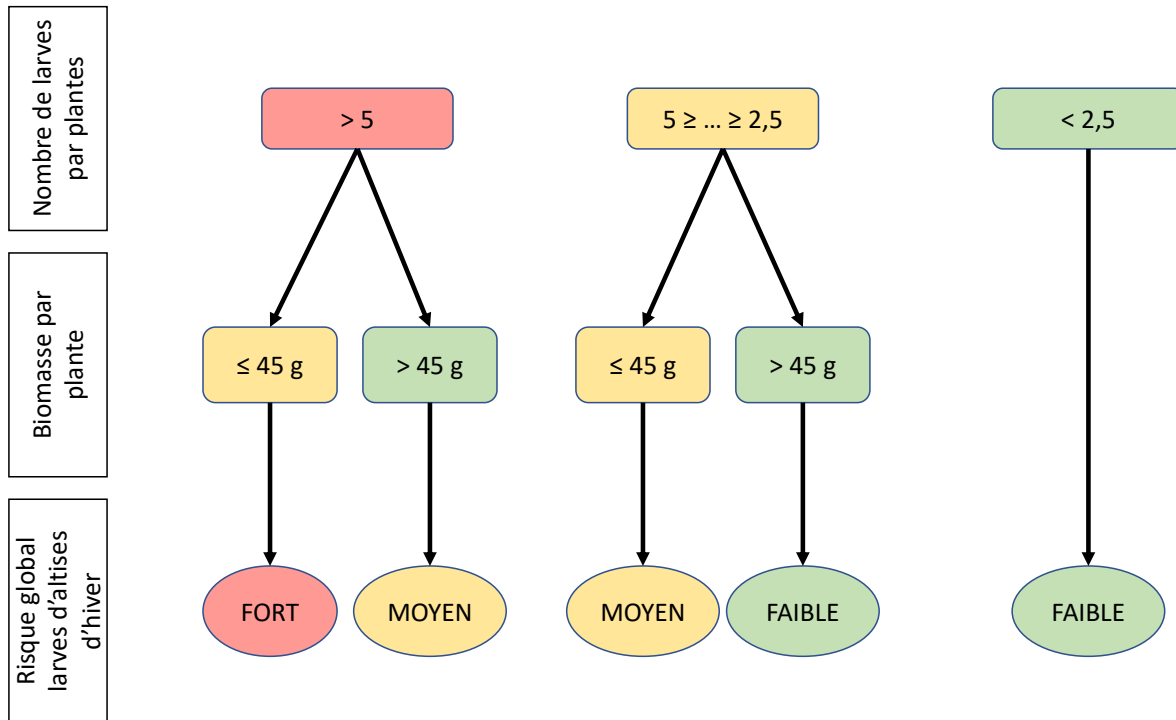


Figure 1. 6 : Arbre de décision utilisé dans notre étude pour évaluer le risque global lié aux larves d'altises d'hiver

D. Des populations potentiellement impactées par les pratiques en place dans les parcelles

En accord avec la littérature décrite ci-dessus, nous avons recueilli auprès des agriculteurs et pris en compte les pratiques réalisées dans les parcelles l'année de l'étude et pouvant impacter les populations d'altises d'hiver (adultes et larves). Ces pratiques concernent la succession culturale (par exemple le précédent cultural), le travail du sol (par exemple le labour) et les traitements phytosanitaires (par exemple l'IFT herbicides). Nous les avons regroupées selon deux grandes périodes où les pratiques ont des effets différents. Ce regroupement est présenté sur la Figure 1.7. La première période correspond à ce qu'il s'est passé avant l'arrivée des adultes, c'est-à-dire tout ce qui est relatif au précédent cultural, à la préparation du sol (travail du sol et désherbage) et au semis (par exemple date de semis). La seconde période correspond aux pratiques mises en oeuvre alors que les altises d'hiver sont présentes, sous forme d'adultes, d'œufs et de larves. Dans cette période se trouvent des pratiques liées au désherbage physique et chimique, ainsi qu'à l'utilisation d'insecticides pouvant être létaux pour les altises. Ces insecticides pouvaient être utilisés afin de lutter contre l'altise d'hiver, mais également contre d'autres coléoptères.

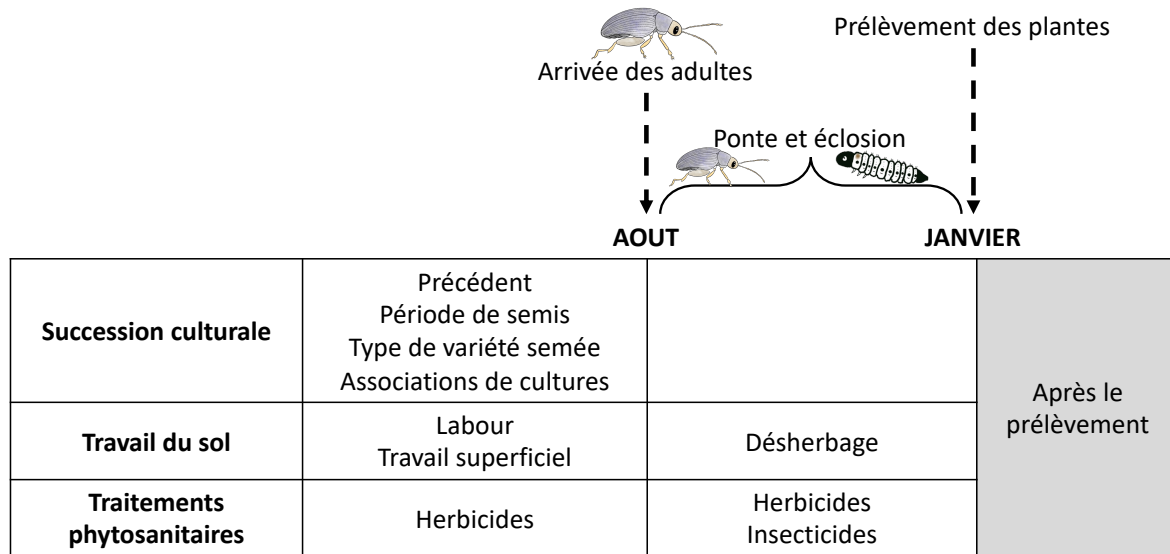


Figure 1. 7 : Schéma présentant le regroupement des pratiques dans les parcelles étudiées et pouvant impacter les populations d'altises d'hiver, selon la nature de la pratique et deux périodes temporelles. La première période correspond aux pratiques en place avant l'arrivée des adultes et la seconde à celles en place entre l'arrivée des adultes et le prélèvement des plants de colza. (@Dessins de Justine Pigot)

Dans l'esprit de Büchi *et al.* (2019), nous avons décidé de garder des indicateurs simples pour caractériser les pratiques. Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1. 3 : Tableau présentant les différents indicateurs pris en compte dans les itinéraires techniques afin de caractériser les pratiques. Les gammes de valeurs des indicateurs analysés (minimum, maximum et moyenne ou proportions) sont présentes en annexe, dans le Tableau S1.1.

Nature de la pratique	Indicateur	Description
Succession culturale	Précédent	Légumineuse (1) ou non légumineuse (0)
	Période de semis	Quinzaine (1 ou 2) du mois d'août
	Type de variété semée	Lignée (0) ou hybride (1)
	Associations de cultures	OUI (1) ou NON (0)
Travail du sol	Labour	Nombre de labours
	Travail du sol hors labour avant semis	Nombre d'interventions
	Travail du sol hors labour après semis	Nombre d'interventions
Traitements phytosanitaire	Herbicides avant semis	IFT herbicides
	Herbicides après semis	IFT herbicides
	Insecticides	IFT insecticides

Ces pratiques sont obtenues à partir des itinéraires techniques recensés auprès des agriculteurs. Le détail des recensements est donné dans la partie « Matériels et Méthodes de la thèse ».

E. Description des états du milieu

Les états du milieu présents dans les parcelles témoignent des pratiques mises en place. Afin d'étudier l'impact des états du milieu sur le nombre de larves présentes dans les colzas, nous les avons décrits en automne (septembre – octobre 2020 et 2021) à l'intérieur d'un quadrat d'une surface de 50 cm x 50 cm. Les variables mesurées sont présentées dans le Tableau 1.4. Nous avons fait des choix liés à la pertinence et à la variabilité des variables. En effet, certaines variables comme les listes d'espèces ou la taille des cailloux nous ont semblé être un degré de précision non nécessaire et pouvaient être incomplets. Le stade phénologique n'a pas été utilisé car il était très corrélé avec la surface couverte par la culture et comportait des manques. D'autres indicateurs étaient peu variables comme la présence de chaumes. Ainsi, toutes n'ont pas été utilisées dans les analyses : seules les



Chapitre 1

variables grisées en gras dans le Tableau 1.4 l'ont été. A ces variables est ajoutée une variable qui correspond à la somme des surfaces couvertes par les adventices et par les plantes compagnes. Dans chaque parcelle, les descriptions ont été faites au même endroit que pour le prélèvement des plantes pour la quantification des populations d'altises (Figure 1.8). Ceci a été permis grâce à la prise des positions GPS de chaque localisation.

Tableau 1. 4 : Tableau présentant les différentes variables mesurées dans le quadrat (50 cm x 50 cm) à chaque distance afin de décrire les états du milieu (*Nous appelons ici « chaumes » tous les résidus qui sont restés droits / en place après le semis). Les variables grisées en gras sont les variables qui ont été utilisées dans les Random Forest effectués avant les modèles. Les gammes de valeurs des variables mesurées (minimum, maximum et moyenne) sont présentes en annexe, dans le Tableau S1.2. Figurent également dans le tableau, les processus biologiques suspectés pour chaque variable utilisée.

Catégorie	Variable	Échelle ou unité	Processus biologiques suspectés dans l'influence pratiques-états du milieu-ravageurs ¹
Surface du sol	Surface couverte par de la croûte de battance	Pourcentage de surface	Facilité de déplacement des adultes et des larves Visibilité accrue des prédateurs Conditions de vie sèches et hydromorphie en hiver
	Surface couverte par les cailloux Taille de cailloux	Pourcentage de surface cm	
Litière	Surface couverte par la litière	Pourcentage de surface	Difficulté de déplacement des adultes et des larves Difficulté de reconnaissance pour les larves Visibilité limitée des prédateurs Conditions de vie favorables (humidité accrue lors des périodes pluvieuses)
	Nature de la litière Présence de chaumes droits*	Espèce(s) présente(s) YES ; NO	
Couvert végétal	Surface couverte par le couvert végétal	Pourcentage de surface	Diminution du contraste sol-plante pouvant limiter la reconnaissance des parcelles par les adultes
- culture	Surface couverte par la culture	Pourcentage de surface	Dilution des populations de larves Reconnaissance accrue de la plante hôte
- plantes compagnes	Nombre de rangs Nombre de plantes Stade phénologique Espèces présentes	Nombre de rangs Nombre de plantes Stade phénologique Liste des espèces présentes	
	Surface couverte par les plantes compagnes	Pourcentage de surface	Perturbation de la reconnaissance de la plante
- adventices	Principales espèces présentes	Liste des principales espèces présentes	
	Surface couverte par les adventices	Pourcentage de surface	Perturbation de la reconnaissance de la plante Compétition pour la culture limitant sa vigueur végétative

¹ En **rouge**, les processus défavorisant les populations d'altises d'hiver et les risques associés et en **vert**, les processus qui les favorisent



En plus de ces états du milieu décrits en automne, nous avons également pris en compte la biomasse et le stade phénologique (échelle BBCH) du colza au moment du prélèvement pour le dénombrement des populations de larves d'altises d'hiver présentes en janvier.

F. Quantification des prédateurs généralistes présents et des proies alternatives

Pour évaluer le rôle possible des prédateurs épigés sur la prédation des œufs ou des jeunes larves d'altises, nous avons également piégé les invertébrés épigés présents dans 42 des parcelles en automne. Pour cela, nous avons posé des pièges Barber pendant une semaine en septembre – octobre 2020 et 2021. Ces pièges étaient posés après la description des états du milieu, à un mètre du quadrat (Figure 1.8).

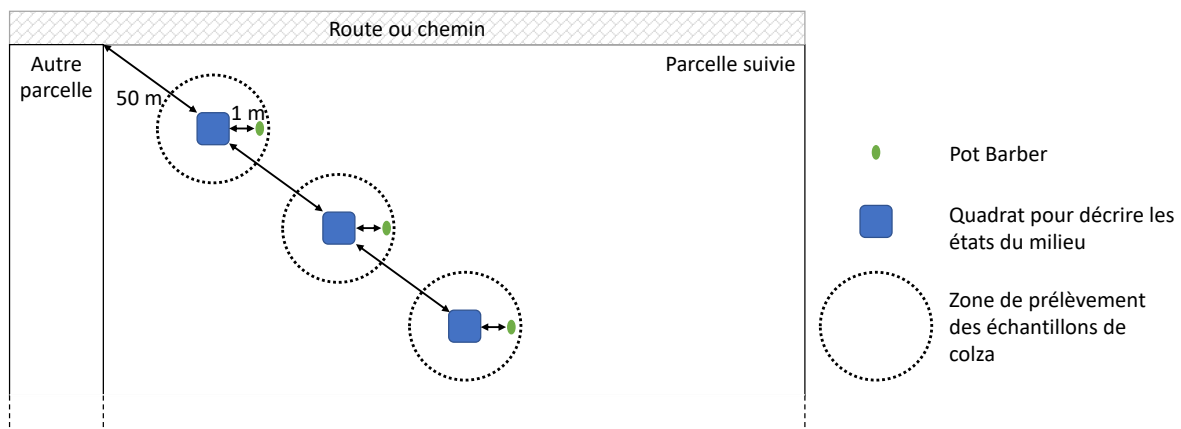


Figure 1.8 : Schéma du placement des pièges Barber utilisés en automne, par rapport aux quadrats utilisés pour la description des états du milieu. Les zones où sont prélevés les échantillons de colza en janvier sont également représentées.

Le détail de la méthode de piégeage et de l'identification des arthropodes présents est donné dans la partie « Matériels et Méthodes de la thèse ». Les organismes pris en compte dans l'étude de la régulation *top-down* sont présentés en annexe, dans le Tableau S.1.3. De même, les espèces de carabes identifiées et leurs caractéristiques (régime alimentaire et taille moyenne) sont présentés en annexe, dans le Tableau S.1.4.

G. Description du paysage

Les gammes de valeurs des différents éléments du paysage mesurés à différents rayons sont présentées en annexe, dans le Tableau S.1.5.

1. *Description des éléments du paysage qui peuvent impacter les populations de larves d'altises d'hiver*

Pour évaluer l'effet du paysage sur les populations de larves d'altises d'hiver, nous avons décrit la composition paysagère à différents rayons (250, 500, 1000, 1500 m, 2000 m et 3000 m) autour de la zone de prélèvement située à 100 m dans la parcelle, pour chaque parcelle et pour chaque année. Pour cela, nous avons utilisé le site internet Sentinel-hub (Sentinel-hub, 2023) et la description vectorielle BD TOPO® (occupation du sol ver. 3.0, 2020). Au sein du paysage, nous avons quantifié les pourcentages surfaciques de colza présent à l'année *n* et l'année *n-1*, ainsi que le pourcentage surfacique de bois (regroupant les bois de feuillus et de conifères, dans notre zone d'étude, les bois de



feuillus sont majoritaires). Nous avons également pris en compte la surface des parcelles d'étude (en m²).

2. *Mise en place d'indices pour considérer la pression exercée par les altises d'hiver sur les parcelles de colza nouvellement semées*

Nous avons défini deux indices représentant la pression exercée par les altises d'hiver adultes sur les parcelles de colza nouvellement semées au moment de leur sortie d'estivation. Les deux indices reposent sur ce modèle :

$$\text{Pression altise} = \frac{\text{Source}}{\text{Puits}}$$

Le puits correspond au pourcentage surfacique de colza présent l'année n. Il y a deux types de sources : (i) le pourcentage surfacique de colza présent l'année n-1, qui correspond au pool d'altises d'hiver présent dans un environnement donné et (ii) le pourcentage de surface de bois, qui constitue les lieux d'estivation. Ainsi nous obtenons ces deux indices :

$$(i) \frac{\text{Pourcentage de colza}_{n-1}}{\text{Pourcentage de colza}_n} ; (ii) \frac{\text{Pourcentage de bois}}{\text{Pourcentage de colza}_n}$$

H. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R version 4.0.4.

1. *Les variables réponses étudiées et leur modélisation*

a. *Présentation des variables réponses*

Dans nos analyses, nous avons trois variables réponses : (i) le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante, (ii) la proportion de larves au stade L3 calculé à l'aide de la fonction *cbind*, afin d'utiliser une loi binomiale dans les modèles et (iii) le risque associé aux larves d'altises d'hiver. Les deux premières variables sont quantitatives, la première suivant une loi binomiale négative et la seconde une loi binomiale. La dernière variable, le risque, était à l'origine une variable qualitative ordinaire avec trois catégories classées ainsi :

« FORT » > « MOYEN » > « FAIBLE »

Cependant, la catégorie de risque « FORT » étant peu représentée (15 % des placettes), nous avons décidé de la regrouper avec la catégorie de risque « MOYEN ». D'un point de vue agronomique, ces deux catégories de risque conduisent à la préconisation d'un traitement insecticide. Ainsi, la variable risque est une variable ordinaire avec deux catégories classées ainsi :

« FORT-MOYEN » > « FAIBLE »

Les trois variables réponse et leurs liens sont présentés dans le schéma conceptuel suivant (Figure 1.9).

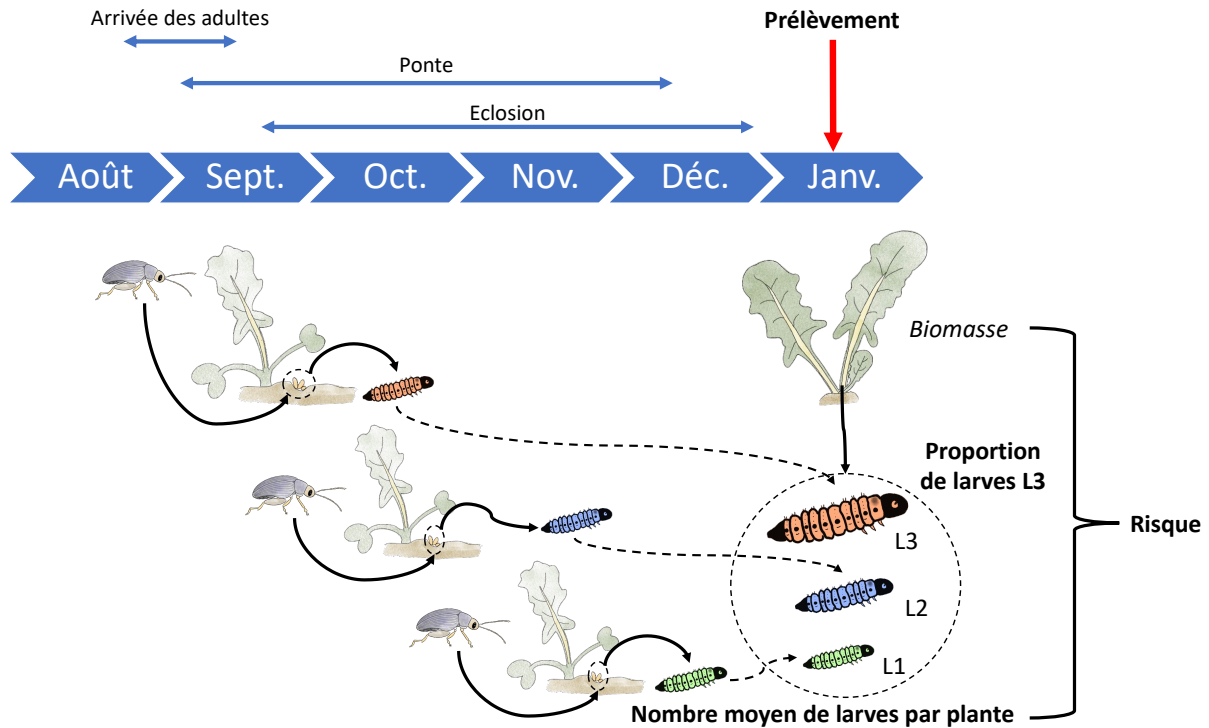


Figure 1. 9 : Schéma illustrant les trois variables réponses étudiées et les liens existant entre elles. La première variable, le « nombre total de larves par plante » correspond à la population de larves d’altises d’hiver présente au sein des parcelles. La seconde, le « risque » correspond à l’association de cette première variable avec la biomasse moyenne des plants de colza prélevé et représente le risque pour l’agriculteur. La troisième variable, la « proportion de larves au stade L3 » correspond aux larves issues des premières pontes et donne une indication de la précocité d’arrivée des adultes.

(©Dessins de Justine Pigot)

b. Modélisation des variables réponses

Pour les variables quantitative (nombre moyen de larves d’altises d’hiver par plante et proportion de larves au stade L3), nous avons fait tourner différents modèles linéaires généralisés en utilisant le package `glmmTMB` (Brooks *et al.*, 2017). Les modèles suivaient une distribution binomiale négative « `nbinom2` » pour la variable réponse « nombre moyen de larves d’altises d’hiver par plantes ». Pour la seconde variable, les modèles suivaient une distribution binomiale. Pour la variable qualitative, les modèles réalisés étaient des modèles mixtes à lien cumulatif, `clmm`, du package `ordinal` (Christensen, 2022).

La validité des modèles `glmmTMB` a été vérifiée à l’aide de la fonction `simulateResiduals` du package « `DHARMA` » (Hartig, 2020), afin de contrôler la présence de déviations significatives dans les « *residual plots* » (QQ plot et *residual vs. predicted*). La présence possible de corrélations entre les différentes variables explicatives est contrôlée grâce au calcul des facteurs d’inflation de la variance (*variance inflation factor* – VIF) à l’aide de la fonction `vif` du package « `car` » (Fox et Weisberg, 2019). Toutes les variables avec un VIF inférieur à 2,5 sont retenues. La validité des modèles `clm` et `clmm` est vérifiée à l’aide du conditionnement de la matrice hessienne (*cond.H*) dont la valeur doit être inférieure à 10^5 (Hervé, 2019). Pour les deux types de modèles, des tests de Wald (*Wald chi-squared tests*) de type II ont ensuite été effectués à l’aide de la fonction `ANOVA` du package « `car` » afin de calculer des *p*-values.

c. Précision sur les jeux de données utilisés

Le jeu de données initial comporte 54 parcelles ayant chacune trois réplicats de chaque mesure effectuée au champ, soit $n = 162$. L'analyse globale de l'effet des systèmes de culture (IV.B.1) et les analyses liées aux états du milieu sont fondées sur ce jeu de données. Les analyses où les itinéraires techniques sont nécessaires se fondent sur un sous-jeu de données de 53 parcelles ($n = 159$), car nous n'avons pas réussi à obtenir les itinéraires techniques d'une parcelle en 2022. Enfin, les analyses avec les piégeages Barber se fondent sur un sous-jeu de données de 42 parcelles. Dans ce dernier, trois parcelles n'ont que deux réplicats, soit $n = 123$, car pour deux d'entre elles, les pièges ont été détruits et pour la dernière, un piège comportait un extrême en ce qui concerne le nombre d'acariens gamases piégés et a été retiré.

Les différents jeux de données sont présentés sur la Figure 1.10.

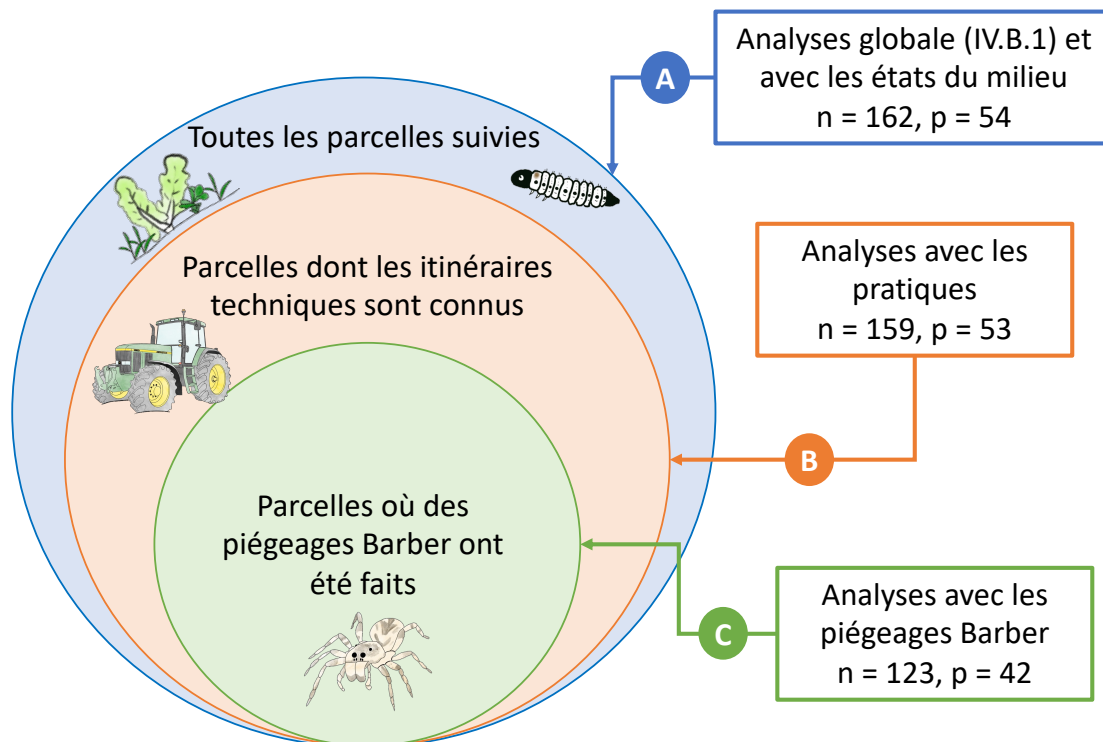


Figure 1. 10 : Schéma représentant les jeux de données (A, B et C) utilisés dans les différentes analyses réalisées dans ce chapitre. Dans les jeux de données, chaque parcelle comporte trois réplicats, sauf dans le jeu de données lié aux analyses avec les piégeages Barber où trois parcelles n'ont que deux réplicats car des problèmes ont été rencontrés.

(©Dessins de Justine Pigot)

2. Prise en compte la présence d'autocorrélation spatiale

Avant de débuter nos analyses, nous avons évalué la présence possible d'autocorrélation spatiale pour nos trois variables réponses. Pour cela, nous avons calculé le coefficient I de Moran pour chaque variable et chaque année d'étude. Dans cette analyse, la variable « Proportion de larves au stade L3 » correspond à une proportion et la variable « Risque » a été transformée en échelle : 1-FAIBLE et 2-MOYEN-FORT. Les résultats sont donnés dans le Tableau 1.5.

Nous avons détecté la présence d'autocorrélation spatiale pour les variables « Nombre moyen de larves par plante » (uniquement l'année 2022) et « Proportion de larves au stade L3 ». Elle sera donc prise en compte dans le cadre des analyses de ces variables, via l'ajout des coordonnées spatiales dans les modèles (latitude et longitude dans le système WGS84). La présence d'autocorrélation spatiale sera testée sur les résidus des modèles à l'aide de la fonction `testSpatialAutocorrelation` du package



DHARMa (Hartig, 2020). Les données autocorrélées sont représentées sur des cartes en annexe (Figure S.1.3 et Figure S.1.4).

Tableau 1. 5 : Résultats des indices I de Moran calculés pour chaque variable et pour chaque année d'étude, afin d'évaluer la présence possible d'autocorrélation spatiale. Les niveaux de significativité sont les suivants : $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras.

Année	Nombre moyen de larves par plante		Proportion de larves au stade L3		Risque	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Indice de Moran	-0.09	0.31	0.21	0.29	-0.09	0.005
Expected index	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.036	-0.04
Variance	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Z-score (Moran I statistic standard deviate)	-0.43	2.93	2.14	2.79	-0.48	0.39
p-value	0.669	0.003 **	0.032 *	0.005 **	0.633	0.696

3. L'effet du paysage

Pour l'étude de l'effet du paysage, les variables réponses sont moyennées aux parcelles (soit $n = 54$ parcelles).

Nous avons analysé les effets de la composition paysagère à l'aide des deux indices définissant la pression altise : le premier avec le pourcentage surfacique de colza l'année $n-1$ et le second avec le pourcentage surfacique de bois. Dans les modèles, nous prenons également en compte la surface des parcelles d'étude, ainsi que l'année d'étude et le traitement insecticide (OUI ou NON). Un modèle est fait pour chaque rayon étudié, soit un total de quatre modèles par variable réponse.

Pour les variables réponses quantitatives, les modèles effectués sont des modèles linéaires généralisés avec « *Template Model Builder* » sans effet aléatoire. Pour la variable qualitative, les modèles effectués sont des modèles à lien cumulatif, *clm*, du package ordinal (Christensen, 2022).

4. Affiner les types de systèmes de cultures en prenant en compte les pratiques en place sur les parcelles

Le regroupement de nos parcelles d'étude selon les systèmes de culture classiques, agriculture biologique, de conservation des sols ou conventionnelle, peut être limité. Ainsi, nous avons tenté de regrouper nos parcelles avec une classification ascendante hiérarchique sur une analyse en composantes principales (ACP) fondée sur les pratiques en place dans les parcelles. Les pratiques agricoles prises en compte étaient les suivantes : (1) le nombre de labours, (2) le nombre de travaux du sol hors labour avant et (3) après le semis, (4) la période de semis, (5) le type de variété semée (lignée ou hybride), (6) l'association des cultures (OUI ou NON), les (7) IFT herbicides avant et (8) après semis et (9) l'IFT insecticide. La classification a été faite à l'aide de la fonction HCPC du package FactoMineR (Husson *et al.*, 2022).

Cette analyse est ensuite comparée à l'ACP initiale représentant les parcelles selon les systèmes de culture classique. L'ACP est effectuée à l'aide de la fonction PCA du package FactoMineR (Husson *et al.*, 2022).



5. *Les effets des pratiques, des états du milieu et de la prédation, combinés à celui du paysage, sur les différentes variables réponses*

a. *Une pré-sélection de variables à l'aide de Random Forest pour les analyses des effets des itinéraires techniques et des états du milieu*

Avant de faire la sélection, nous avons tout d'abord testé la variabilité des variables de la façon suggérée par Ballot *et al.* (*in press*). Ainsi, nous ne prenons pas en compte les variables quantitatives dont le coefficient de variation est inférieur à 20 % et les variables qualitatives dont la catégorie majoritaire dépasse 80 % des individus.

Nous avons ensuite effectué une sélection de variables sur la base des modèles Random Forest grâce à la fonction `randomForest` du package « `randomForest` » (Cutler et Wiener, 2022). La méthode Random Forest repose sur un apprentissage par arbres de décision. Le résultat final correspond à la combinaison de tous ces arbres. Le nombre d'arbres doit être suffisant pour que la Random Forest soit stable. Dans notre étude, les Random Forest se basent sur 2000 arbres. Dans le cas des variables réponses quantitatives (population de larves d'altises d'hiver et proportion de larves au stade L3), le Random Forest utilise des régressions. Pour la variable réponse qualitative (risque), elle utilise une classification (Hastie *et al.*, 2009).

Le Random Forest permet de classer les variables explicatives selon leur importance, c'est-à-dire selon leur contribution à la performance totale du modèle. Pour cette classification, nous nous basons sur le Mean Decrease Accuracy, ou %IncMSE, qui correspond à la diminution de la précision du modèle lorsque la variable est retirée. Les variables les plus importantes sont celles avec les %IncMSE les plus élevés (Kuhn *et al.*, 2008).

Dans nos Random Forest, nous avons décidé de prendre en compte l'année de suivi et la présence d'un traitement insecticide (uniquement avec les états du milieu). En effet, ces deux éléments peuvent avoir des effets prépondérants sur les variables réponses, mais non visibles lorsque les pratiques et les états du milieu sont considérés seuls.

Cette pré-sélection de variables à l'aide d'un Random Forest n'a pas été conservée pour les analyses des effets de la prédation. En effet, après plusieurs tests, nous avons constaté que les résultats des Random Forest différaient beaucoup des résultats des modèles.

b. *Modélisation*

Pour chaque variable réponse, un ou plusieurs modèles ont été faits par catégorie : itinéraires techniques, états du milieu et prédateurs. Les variables explicatives présentes dans les différents modèles sont présentées dans le Tableau 1.6 où tous les modèles sont numérotés. La numérotation des modèles se retrouve également dans la partie Résultats. Pour l'étude des effets des états du milieu, nous avons fait trois modèles distincts car certains états du milieu étaient trop corrélés entre eux : la surface couverte par la culture, par les plantes compagnes, par les adventices, par le couvert végétal, ainsi que la somme des surfaces couvertes par les plantes compagnes et les adventices. Nous avons fait de même pour la prédation, selon le niveau de détails concernant les carabes.

Pour la variable réponse « Risque », le second modèle de la catégorie « États du milieu » n'a pas été utilisé car la variable correspondant à la somme des surfaces couvertes par les plantes compagnes et par les adventices n'est pas sélectionnée dans le Random Forest.

Pour la variable réponse « Nombre moyen de larves par plante », des modèles dits « de référence » ont été effectués (noté R1 à R5 dans le Tableau 1.6). Ces modèles nous ont permis de comparer les



Chapitre 1

différentes méthodes utilisées pour décrire les pratiques : via les systèmes de culture couramment utilisés, via les itinéraires techniques ou via les états du milieu.

Dans un second temps, les modèles sont simplifiés à l'aide d'une approche d'inférence multi-modèle (Harrison *et al.*, 2018). Les modèles sont classés selon leurs critères d'information d'Akaike corrigé (AICc). Lorsque les meilleurs modèles ont une différence d'AICc inférieure à 4 ($\Delta AICc < 4$), nous avons calculé un modèle moyen à l'aide de la fonction `model.avg` du package MuMin (Bartoń, 2022).

Tableau 1. 6 : Tableaux présentant les différentes variables explicatives utilisées dans les modèles utilisés pour chaque variable réponse et pour chaque catégorie. Les modèles sont numérotés (ligne orange). Les modèles « R » correspondent aux modèles de référence testant les systèmes de culture. Les variables en gris sont des variables générales qui peuvent être utilisées dans les modèles faits dans les différentes catégories. Chaque modèle est représenté par une colonne. Lorsque la variable explicative est dans le modèle, elle est marquée d'une croix. La colonne « Type » correspond au type de facteur (aléatoire « ALEA » ou fixe). SC signifie « Surface couverte ». Sous les différentes variables réponses se trouvent les types de modèles utilisés. Les jeux de données utilisés dans les différents modèles (A, B ou C présentés dans la Figure 1.10) se trouvent dans la dernière ligne (en bleu).

			Variables réponses															
			Nombre moyen de larves par plante (glmmTMB,nbinom2)															
Catégorie	Variable explicative	Type	Numéro du modèle															
			1	2	R1	3	4	5	R2	R3	R4	R5	6	7	8			
Généralités	Système de culture	FIXE	X		X					X								
	Parcelle	ALEA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
	Année	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Traitement	FIXE	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Paysage	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	FIXE																
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	FIXE		X	X	X	X	X	X	X	X	X						
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	FIXE																
Coordonnées GPS	Latitude	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Longitude	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pratiques	Précédent	FIXE		X														
	Période de semis	FIXE		X														
	Variété	FIXE		X														
	Association de cultures	FIXE		X														
	Labour	FIXE		X														
	Travail du sol hors labour avant semis	FIXE		X														
	Travail du sol hors labour après semis	FIXE																
	IFT herbicides avant semis	FIXE																
	IFT herbicides après semis	FIXE		X														
États du milieu	SC par la croûte de battance	FIXE				X	X	X			X	X	X					
	SC par la litière	FIXE				X	X	X			X	X	X					
	SC par le couvert végétal	FIXE						X					X					
	SC par la culture	FIXE				X	X				X	X						
	SC par les plantes compagnes	FIXE				X					X							
	SC par les adventices	FIXE				X					X							
	Somme des SC par les plantes compagnes et les adventices	FIXE					X					X						
Prédation $\log_{10}(x+1)$	Carabes	FIXE													X			
	Carabes adultes zoophages	FIXE														X		
	Petits carabes adultes zoophages	FIXE																X
	Grands carabes adultes zoophages	FIXE																X
	Carabes larves	FIXE														X	X	
	Staphylins	FIXE													X	X	X	
	Gamases	FIXE													X	X	X	
	Araignées	FIXE													X	X	X	
	Autres prédateurs	FIXE													X	X	X	
Proies alternatives	FIXE													X	X	X		
Jeu de données utilisé			A	B	B	A	A	A	A	B	B	B	C	C	C			



			Variables réponses						
			Risque (clmm)						
Catégorie	Variable explicative	Type	Numéro du modèle						
			9	10	11	12	13	14	
Généralités	Système de culture	FIXE	X						
	Parcelle	ALEA	X	X	X	X	X	X	
	Année	FIXE	X	X	X	X	X	X	
	Traitement	FIXE	X		X	X	X	X	
Paysage	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	FIXE							
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	FIXE							
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	FIXE		X	X	X			
Coordonnées GPS	Latitude	FIXE							
	Longitude	FIXE							
Pratiques	Précédent	FIXE							
	Période de semis	FIXE							
	Variété	FIXE		X					
	Association de cultures	FIXE							
	Labour	FIXE		X					
	Travail du sol hors labour avant semis	FIXE		X					
	Travail du sol hors labour après semis	FIXE							
	IFT herbicides avant semis	FIXE		X					
	IFT herbicides après semis	FIXE		X					
	IFT insecticides	FIXE		X					
États du milieu	SC par la croûte de battance	FIXE			X	X			
	SC par la litière	FIXE			X	X			
	SC par le couvert végétal	FIXE				X			
	SC par la culture	FIXE			X				
	SC par les plantes compagnes	FIXE							
	SC par les adventices	FIXE							
	Somme des SC par les plantes compagnes et les adventices	FIXE							
Prédation log10(x+1)	Carabes	FIXE					X		
	Carabes adultes zoophages	FIXE						X	
	Petits carabes adultes zoophages	FIXE							
	Grands carabes adultes zoophages	FIXE							
	Carabes larves	FIXE						X	
	Staphylins	FIXE					X	X	
	Gamases	FIXE					X	X	
	Araignées	FIXE					X	X	
	Autres prédateurs	FIXE					X	X	
	Proies alternatives	FIXE					X	X	
Jeu de données utilisé			A	B	A	A	C	C	



			Variables réponses																				
			Proportion moyenne de larves au stade L3 par plante (<i>glimmTMB</i> , binomiale)																				
Catégorie	Variable explicative	Type	Numéro du modèle																				
			15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25										
Généralités	Système de culture	FIXE	X																				
	Parcelle	ALEA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Année	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Traitement	FIXE	X																				
Paysage	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	FIXE		X	X	X	X	X	X	X	X												
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	FIXE																					
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	FIXE																					
Coordonnées GPS	Latitude	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Longitude	FIXE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pratiques	Précédent	FIXE																					
	Période de semis	FIXE		X																			
	Variété	FIXE		X																			
	Association de cultures	FIXE																					
	Labour	FIXE																					
	Travail du sol hors labour avant semis	FIXE		X																			
	Travail du sol hors labour après semis	FIXE		X																			
	IFT herbicides avant semis	FIXE																					
	IFT herbicides après semis	FIXE		X																			
IFT insecticides	FIXE		X																				
États du milieu	SC par la croûte de battance	FIXE			X	X		X	X														
	SC par la litière	FIXE			X	X	X	X	X	X													
	SC par le couvert végétal	FIXE					X				X												
	SC par la culture	FIXE			X	X		X	X														
	SC par les plantes compagnes	FIXE			X			X															
	SC par les adventices	FIXE			X			X															
	Somme des SC par les plantes compagnes et les adventices	FIXE				X				X													
Masse fraîche	FIXE			X	X	X																	
Prédation log10(x+1)	Carabes	FIXE															X						
	Carabes adultes zoophages	FIXE																			X		
	Petits carabes adultes zoophages	FIXE																				X	
	Grands carabes adultes zoophages	FIXE																					X
	Carabes larves	FIXE																				X	X
	Staphylins	FIXE																X	X	X			
	Gamases	FIXE																X	X	X			
	Araignées	FIXE																X	X	X			
	Autres prédateurs	FIXE																X	X	X			
Proies alternatives	FIXE																X	X	X				
Jeu de données utilisé			A	B	A ¹	A ¹	A ¹	A	A	A	A	C	C	C									

Note : Le jeu de données A¹ correspond au jeu de données A auquel une répétition a été enlevée car la masse fraîche était manquante.



6. Synthétiser les effets grâce à une PLS-PM

Afin de synthétiser les effets ayant été observés dans les différents modèles, nous avons effectué une PLS-PM (« *Partial Least Squares Path Modeling* »). Cette méthode statistique permet de modéliser des relations complexes entre des variables observées (manifestes) et des variables latentes qui ne peuvent pas être mesurées de façon directe et qui sont obtenues indirectement à l'aide de variables manifestes mesurables.

a. Modèle conceptuel et modèle de mesures

Un modèle PLS-PM correspond à un modèle conceptuel (*inner model*) et à un modèle de mesures (*outer model*).

Le premier modèle, le modèle conceptuel est structuré à partir des connaissances des relations possibles entre les différentes variables latentes (Figure 1.11). Les relations testées entre les différentes variables latentes et entre les variables manifestes et les variables latentes qu'elles composent, correspondent à des régressions linéaires (Sanchez, 2013; Puech *et al.*, 2015).

Dans notre modèle conceptuel, nous considérons six variables latentes : l'année de suivi, le paysage, les pratiques agricoles, les états du milieu, les prédateurs et la population de larves d'altises d'hiver. Nous supposons que les larves d'altises d'hiver peuvent être influencées par les autres variables latentes. Des effets indirects sont supposés être également présents : (i) les pratiques agricoles impactent les états du milieu et les prédateurs présents et (ii) les états du milieu eux-mêmes impactent les prédateurs présents.

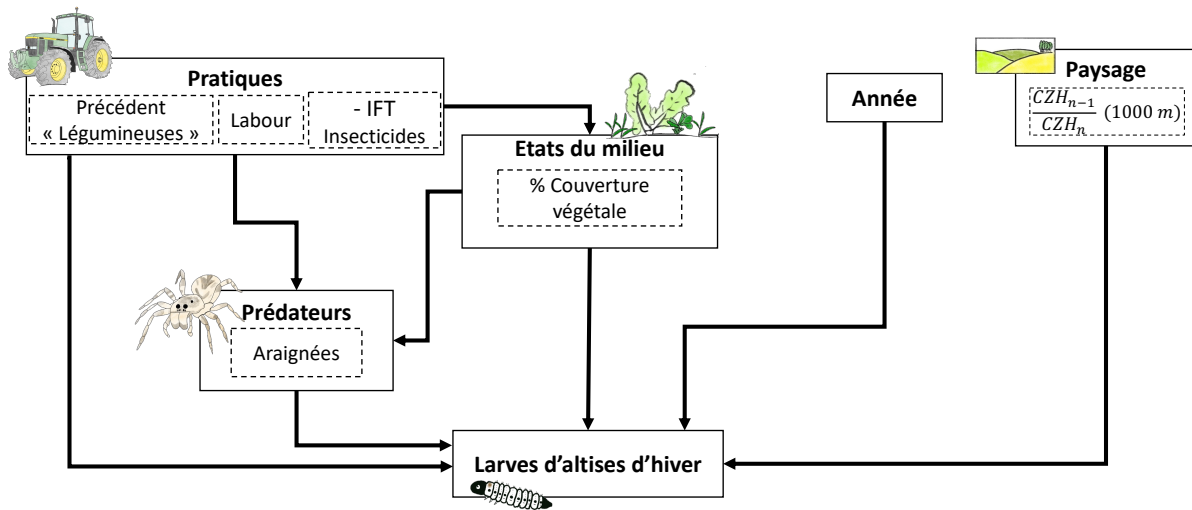


Figure 1. 11 : Modèle conceptuel présentant les différentes relations entre variables latentes testées. Les variables manifestes qui composent les variables latentes sont également présentes (encadrés en pointillés).
(©Dessins de Justine Pigot)

Le second modèle, le modèle de mesures (*outer model*) représente les liens existants entre les variables latentes et les variables manifestes qui les composent en formant un « bloc de variables ». Ces variables peuvent être liées à une variable latente de deux manières (Sanchez, 2013) :

- (i) La variable manifeste est causée par la variable latente ou la reflète, c'est la voie réflexive ;
- (ii) La ou les variables manifestes forment la variable latente, c'est la voie formative.



Dans notre analyse, nos variables latentes sont composées des variables manifestes suivantes :

- L'année (réflective) : l'année de suivi (2021 ou 2022)
- Le paysage (réflective) : l'indice de pression avec le pourcentage de colza présent l'année n-1 par rapport au pourcentage de colza présent l'année n dans un rayon de 1 000 m.
- Les pratiques agricoles (réflective) : la présence d'un labour, le précédent et l'IFT insecticide (en négatif, voir paragraphe suivant).
- Les états du milieu (réflective) : le pourcentage de couvert végétal
- Les prédateurs (formative) : les araignées piégées dans des Barber (activité-densité) placés à proximité des placettes
- Les larves d'altises d'hiver (formative) : le nombre moyen larves par plante, piégées dans les Berlèse (abondance) pour chaque placette

Les variables manifestes utilisées sont issues des modèles précédemment analysés : ce sont les variables qui ont une relation significative avec la variable réponse (nombre moyen de larves d'altises d'hiver).

Ces deux modèles doivent être analysés et interprétés : le modèle de mesure, puis le modèle conceptuel.

b. Analyse et vérification du modèle de mesures

La composition des blocs de variables manifestes doit respecter un certain nombre d'éléments, qui ont été vérifiés ici, afin de s'assurer qu'ils reflètent bien les variables latentes (Sanchez, 2013).

- (i) Les variables manifestes peu corrélées à la variable latente sont retirés : la valeur liée à la corrélation (« *loading* ») est inférieure à 0,5 (Puech *et al.*, 2015) ;
- (ii) Le signe des variables manifestes qui ont un poids (« *weight* ») négatif est changé afin de n'avoir que des variables manifestes positivement corrélées à la variable latente (Sanchez, 2013). C'est ce que nous avons fait pour l'IFT insecticide ;
- (iii) Les blocs doivent être unidimensionnels, pour cela, nous vérifions le Dillon-Goldstein's rho, qui doit être supérieur à 0,7 (Sanchez, 2013) ;
- (iv) Les variables manifestes doivent présenter une plus grande corrélation pour la variable latente avec laquelle elles sont associées que pour les autres variables latentes (« *cross-loadings* »).

c. Validation du modèle final

Après avoir validé le modèle de mesures, nous avons analysé le modèle final. Les coefficients de détermination (R^2) des différentes variables latentes endogènes peuvent être classés selon trois catégories (Sanchez, 2013) :

- Faible : $R^2 < 0,30$ (selon certains auteurs 0,20)
- Modéré : $0,30 < R^2 < 0,60$ (ou 0,20 et 0,50)
- Fort : $R^2 > 0,60$ (ou 0,50)

Sa performance de prédiction est obtenue à l'aide du Goodness-of-Fit (GoF). La robustesse du modèle est également testée à l'aide d'une validation bootstrap (200 *resamples*), dont nous retiendrons les paramètres estimés (« *path coefficient* »). Les paramètres estimés dont l'intervalle de confiance contient 0 sont considérés comme non significatifs à un intervalle de confiance de 5 % (Pollier, 2016).



7. Schéma résumant les analyses effectuées

L'étude des trois différentes variables réponses a été menée d'une façon similaire, et est résumée sur la Figure 1.12.

Dans un premier temps, la possible présence d'une autocorrélation spatiale était testée et prise en compte par la suite si besoin. Une analyse du paysage était également menée et les éléments ayant des effets ont été pris en compte dans la suite.

Dans un second temps, nous avons analysé en parallèle les effets des pratiques agricoles en place, des états du milieu et des prédateurs sur une variable réponse donnée. Pour les pratiques agricoles et les états du milieu, une pré-sélection des variables a été faite à l'aide de Random Forest. Cette pré-sélection n'est pas présente pour les prédateurs. Nous avons ensuite modélisé les effets à l'aide de modèles glmmTMB (suivant une distribution binomiale négative pour le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante ; binomiale pour la proportion de larves au stades L3) ou clmm (pour le risque, variable qualitative).

Enfin, uniquement pour la variable réponse « nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante », nous avons synthétisé les effets des pratiques, des états du milieu et des prédateurs, à l'aide d'une PLS-PM. Seuls les éléments ayant eu des effets significatifs dans les analyses de l'étape 2 (Figure 1.12) ont été pris en compte dans la PLS-PM.

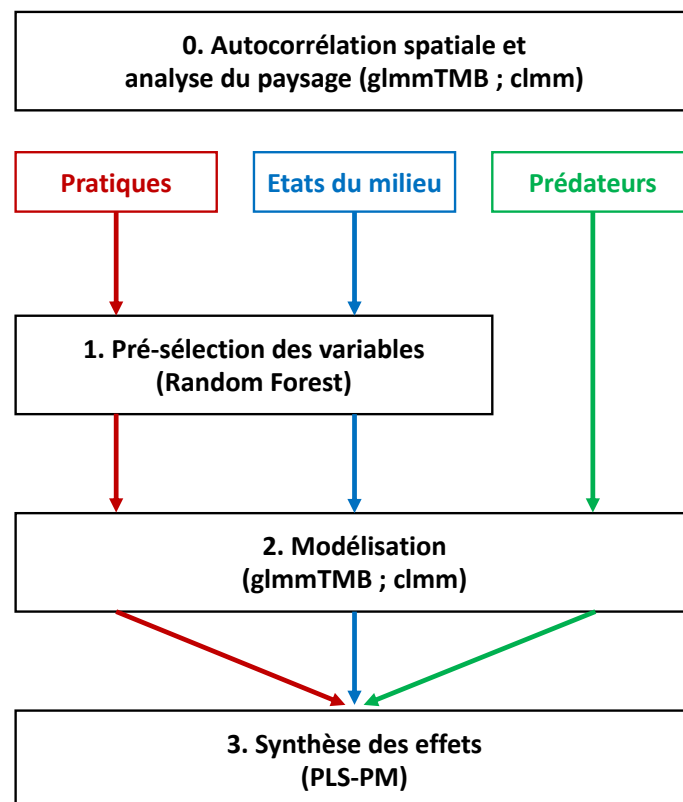


Figure 1. 12 : Schéma résumant les analyses effectuées dans le chapitre. Les analyses des effets des pratiques (en rouge), des états du milieu (en bleu) et des prédateurs (en vert) sur les variables réponses ont été menées en parallèle, sauf pour l'étape 3 qui est une étape de synthèse. Pour l'analyse des effets des prédateurs, l'étape 1 « Pré-sélection des variables » n'a pas été faite. Toutes les étapes ont été faites uniquement pour la variable réponse « Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante ». Pour les deux autres variables réponses, l'étape 3 « Synthèse des effets » n'a pas été faite : les analyses se sont arrêtées à l'étape 2 « Modélisation ».



IV. Résultats

Au cours de nos deux années d'expérimentation, nous avons dénombré un total de 12 320 larves : 8 389 larves en 2021 (29 parcelles suivies) et 3 931 larves en 2022 (25 parcelles suivies).

En moyenne, nous avons observé 10 ± 2 (erreur standard – SE) larves par plante et par parcelle en 2021 (min = 0 ; max = 61) et 5 ± 1 larves en 2022 (min = 0 ; max = 46).

A. Des insectes qui peuvent être impactés par le paysage environnant

Afin d'étudier les effets du paysage, nous nous sommes appuyés sur des indices de pression, qui correspondent à des ratios « sources – puits », ainsi que sur la surface des parcelles étudiées. Ces effets ont été testés à différentes échelles allant de 250 à 1 500 m. Pour cette variable réponse, les modèles aux rayons 2000 et 3000 m avaient des problèmes de corrélation entre variables explicatives et n'ont pas été gardés. Nous avons observé un effet positif significatif du ratio correspondant au pourcentage de colza présent l'année n-1 sur le pourcentage de colza présent l'année n aux rayons 750 et 1000 m (Tableau 1.7). Nous avons également constaté que la qualité des modèles, obtenue grâce au critère d'information d'Akaike corrigé (AICc), est meilleure à ces échelles. Aucun autre effet des indices de pression n'est observé aux autres échelles. De même, aucun effet des surfaces des parcelles d'étude n'est observé.

Dans tous les modèles, nous avons observé des effets de l'année de suivi (pression des larves d'altises plus élevée en 2021 qu'en 2022) et de l'application d'insecticide (effet négatif).

Dans la suite des analyses, nous avons choisi de garder l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 dans un rayon de 1000 m. En effet, bien que les deux modèles aient un même AICc, l'autocorrélation spatiale des résidus était significative dans le modèle à 750 m.



Tableau 1. 7 : Relations entre le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante et des variables paysagères à différentes échelles (glmmTMB : n = 54) : des indices de pression liés au pourcentage de colza présent l'année n-1 et au pourcentage de bois et la surface des parcelles suivies. Dans les modèles, d'autres variables explicatives sont prises en compte : la surface des parcelles étudiées, l'année de suivi et l'application d'un traitement insecticide. Les coordonnées géographiques sont ajoutées pour l'autocorrélation spatiale (résultats non présentés ici) : lorsqu'il subsiste une autocorrélation spatiale des résidus dans le modèle, un « ¹ » est annoté. Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs sont en gras. L'estimate correspond à la pente de chaque variable dans les régressions. Les degrés de liberté (d.f.) et le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) sont également mentionnés. Dans les modèles, l'année de référence est 2021 et la référence pour le traitement insecticide est « absence de traitement ».

Variable réponse	Radius	Variable explicative	d.f.	Estimate (± SEM)	P-value	χ ²	AICc
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante	250 m	% CZH _{n-1}	1	0.11 ± 0.16	0.473	0.51	337
		% CZH _n					
		% Bois	1	-0.07 ± 0.16	0.646	0.21	
		% CZH _n					
	500 m	Surface parcelle	1	0.08 ± 0.13	0.516	0.42	
		Année	1	-0.52 ± 0.25	0.042 *	4.13	
		Traitement	1	-0.89 ± 0.28	0.002 **	9.84	
		% CZH _{n-1}	1	0.11 ± 0.15	0.476	0.51	337
	750 m ¹	% CZH _n					
		% Bois	1	-0.04 ± 0.15	0.809	0.06	
		% CZH _n					
		Surface parcelle	1	0.09 ± 0.13	0.486	0.49	
	1 000 m	Année	1	-0.56 ± 0.25	0.024 *	5.09	
		Traitement	1	-0.89 ± 0.29	0.002 **	9.68	
		% CZH _{n-1}	1	0.30 ± 0.14	0.028 *	4.85	332
		% CZH _n					
1 500 m	% Bois	1	-0.05 ± 0.16	0.760	0.09		
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.16 ± 0.13	0.205	1.61		
	Année	1	-0.71 ± 0.25	0.005 **	7.95		
1 000 m	Traitement	1	-1.03 ± 0.29	0.0004 ***	12.64		
	% CZH _{n-1}	1	0.31 ± 0.14	0.030 *	4.70	332	
	% CZH _n						
	% Bois	1	-0.012 ± 0.17	0.943	0.01		
1 500 m	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.17 ± 0.13	0.208	1.59		
	Année	1	-0.61 ± 0.24	0.012 *	6.28		
	Traitement	1	-1.04 ± 0.29	0.0004 ***	12.64		
1 500 m	% CZH _{n-1}	1	0.19 ± 0.13	0.138	2.21	335	
	% CZH _n						
	% Bois	1	0.02 ± 0.15	0.869	0.027		
	% CZH _n						
1 500 m	Surface parcelle	1	0.08 ± 0.12	0.526	0.40		
	Année	1	-0.50 ± 0.25	0.044 *	4.04		
	Traitement	1	-1.02 ± 0.28	0.0003 ***	13.22		
	% CZH _{n-1}	1					

B. Comment aller au-delà d’une approche simpliste des effets des systèmes de culture ?

1. *Une présence de larves d’altise très impactée par l’application d’insecticide*

Nous avons tout d’abord testé l’effet des systèmes de culture, tout en prenant en compte l’application d’un insecticide et l’année de suivi (Tableau 1.6 : Modèle 1). Nous n’avons pas trouvé d’effet significatif des systèmes de culture sur le nombre moyen de larves d’altises d’hiver par plant de colza (glmmTMB¹ : n = 162, $\chi^2 = 2.19$, d.f = 2, p = 0.335). Cependant, l’application d’insecticide a un effet négatif significatif (glmmTMB¹ : n = 162, $\chi^2 = 10.35$, d.f = 1, p = 0.001). Cet effet est visible sur la Figure 1.13. Nous avons également observé un effet significatif de l’année de suivi (glmmTMB¹ : n = 162, $\chi^2 = 9.16$, d.f = 1, p = 0.002) : il y avait plus de larves d’altises d’hiver en 2021 qu’en 2022.

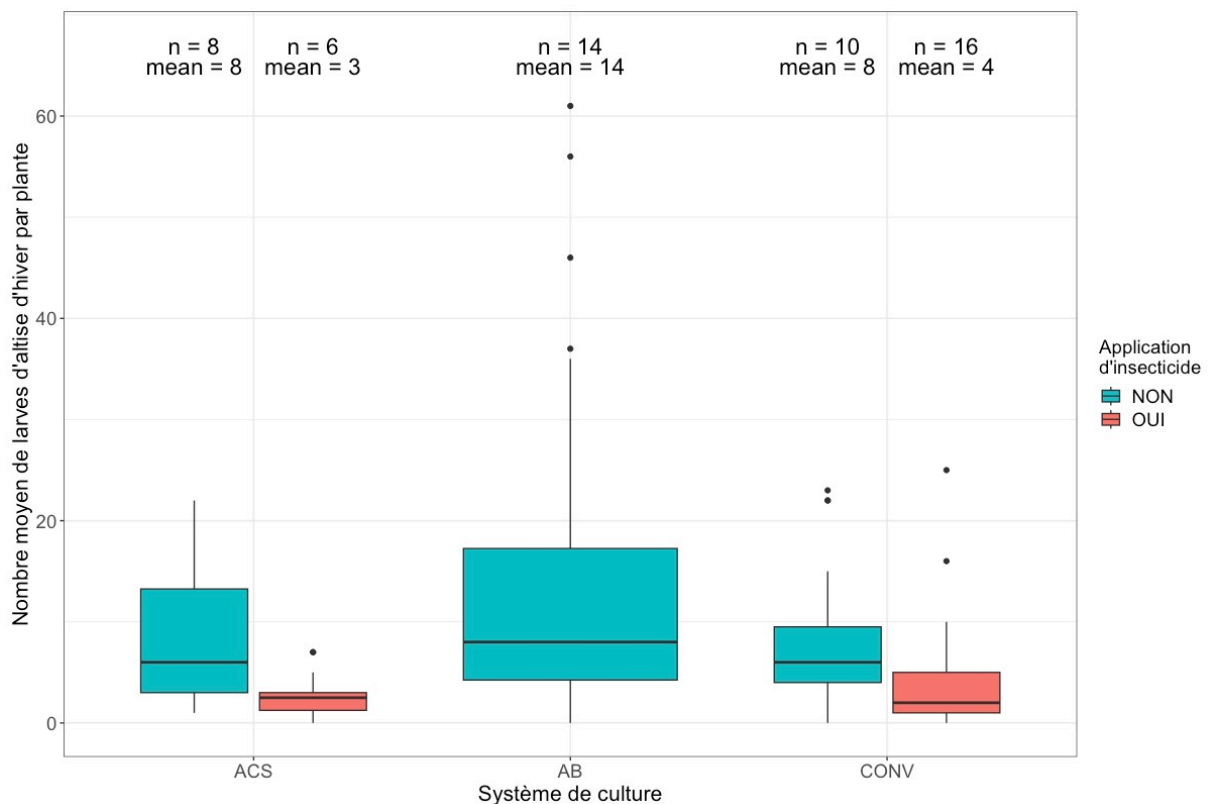


Figure 1. 13 : Nombre moyen de larves d’altises d’hiver par plant de colza échantillonné en janvier dans chaque système de culture et selon l’application d’insecticide. Le nombre d’observations et la moyenne de chaque élément (mean) sont annotés sur le graphique.

¹ Une autocorrélation spatiale des résidus est présente, malgré la présence des coordonnées GPS dans le modèle.



2. *Un nouveau regroupement par classification ascendante hiérarchique trop proche du regroupement initial*

La classification des systèmes de culture couramment utilisée, c'est-à-dire agriculture biologique, agriculture de conservation des sols et conventionnelle, peut être limitée. En effet, un agriculteur peut avoir une conduite bien différente de deux parcelles, selon la nature du sol par exemple. De plus, il existe une grande variabilité de pratiques au sein des groupes. Nous avons effectué une ACP sur les pratiques dans les parcelles suivies, dont le graphe des individus et le cercle des corrélations sont présentés sur la Figure 1.14 (a et c). Nous avons ensuite tenté de regrouper nos parcelles grâce à une classification ascendante hiérarchique sur composantes principales en se basant sur cette ACP. Cependant, nous avons constaté que le regroupement proposé était très proche de la classification initiale (Figure 1.14.b). En effet, seules quelques parcelles changent de groupe, comme la parcelle 36 initialement en agriculture conventionnelle et qui se trouve ensuite dans le groupe avec les parcelles initialement en agriculture biologique.

Lorsque nous analysons le graphe des individus en parallèle du cercle des corrélations, nous observons un fort impact du travail du sol et de l'utilisation de produits phytosanitaires. En effet, le premier axe oppose le labour et le travail du sol superficiel en période 2 (c'est-à-dire un désherbage mécanique après semis) à l'utilisation de produits phytosanitaires après semis (insecticides et herbicides). Cet axe distingue les agriculteurs qui n'utilisent pas de produits phytosanitaires et travaillent plus le sol (AB) de ceux qui limitent le travail du sol, mais utilisent des produits phytosanitaires (CONV et ACS). Le second axe discrimine les agriculteurs selon la gestion de l'enherbement avant semis : via l'utilisation d'herbicides (ACS) ou via des déchaumages (CONV). Cet axe montre également une opposition entre les agriculteurs semant des colzas de type « hybride » en monoculture, des agriculteurs semant des colzas de type « lignées » en association avec d'autres espèces (notamment des AB et des ACS).

Cette ACP nous permet également d'observer une forte variabilité des pratiques au sein de chaque système de culture. Ce constat suggère une nécessité d'analyser plus finement les systèmes de culture en s'appuyant sur les pratiques en place.

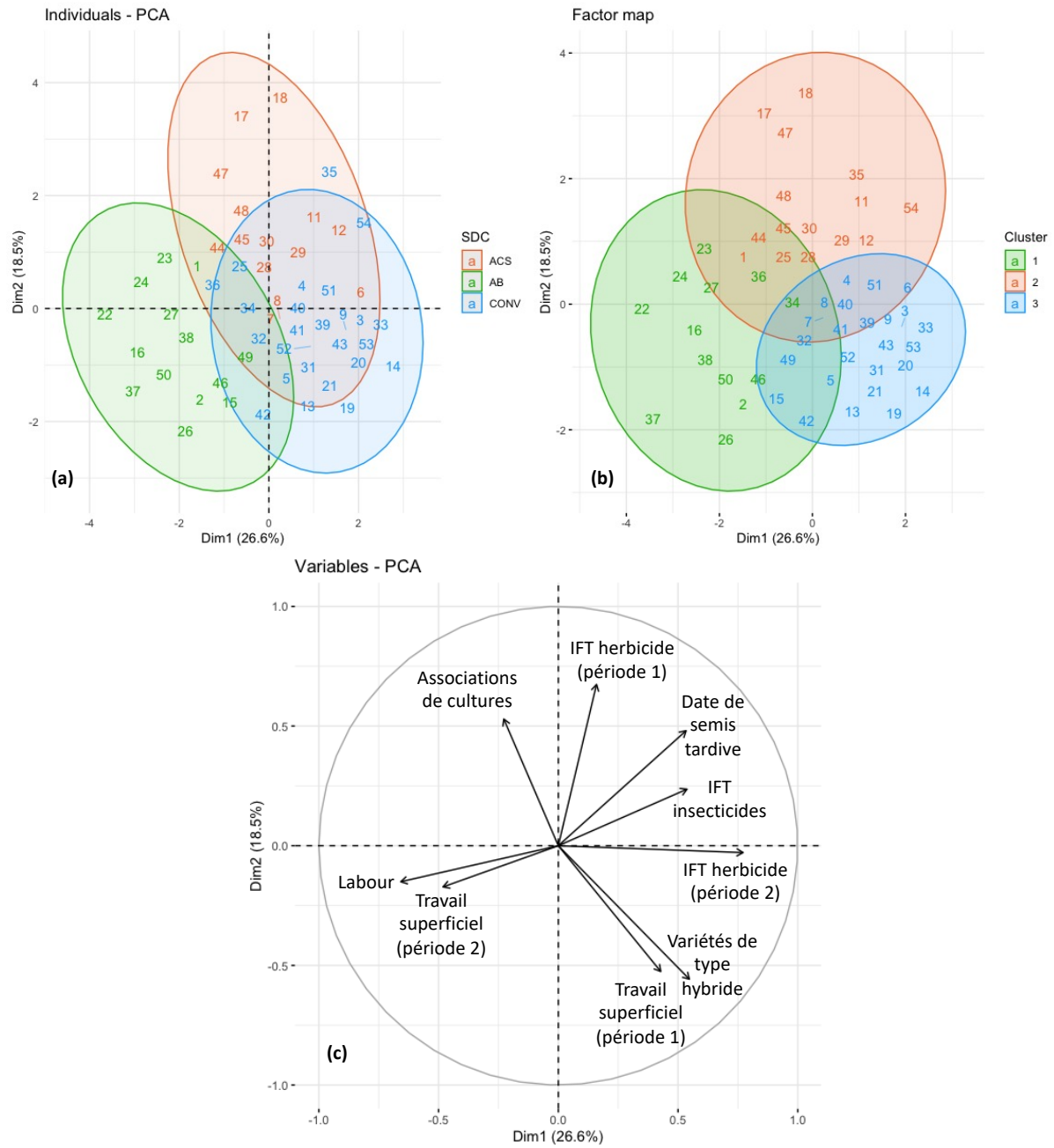


Figure 1. 14 : Analyses en composantes principales (ACP) réalisée sur les parcelles étudiées avec le plan des individus représentés en fonction des systèmes de culture classiques (a) et en fonction des clusters issus de la classification ascendante hiérarchique (b). Les pratiques agricoles considérées dans les analyses sont le nombre de labour, le nombre de travaux du sol hors labour avant et après le semis, la période de semis, le type de variété semée (lignée ou hybride), l'associations des cultures (OUI ou NON), les IFT herbicides avant et après semis et l'IFT insecticide. Le cercle des corrélations (c) est lié à l'ACP initiale (a).



3. Se passer des systèmes de culture en tenant compte des pratiques en place dans les parcelles qui peuvent avoir des effets directs sur les populations de larves d'altises d'hiver

Après une sélection des variables explicatives (pratiques agricoles) grâce à un Random Forest (Figure 1.15), nous avons utilisé un modèle de type glmmTMB. Ce modèle permet de tester l'effet de pratiques agricoles et de l'année sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Tableaux 1.6 : Modèle 2).

Le Random Forest (Figure 1.15) nous a permis d'éliminer trois pratiques qui ne semblent pas avoir beaucoup d'influence sur la variable réponse : le travail superficiel après semis, le type de variété et l'IFT herbicides avant semis.

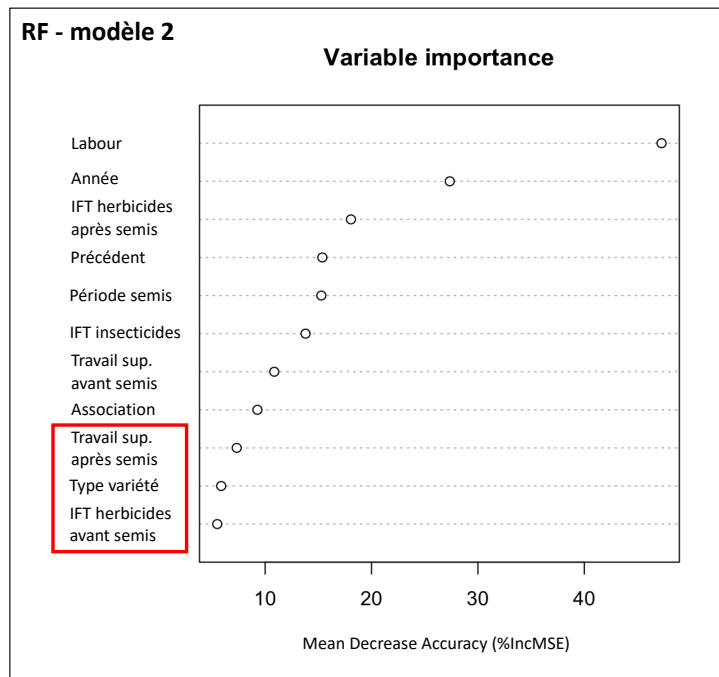


Figure 1. 15 : Importance des variables testées dans le Random Forest (2000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi est également prise en compte car elle peut avoir un effet non négligeable sur la variable réponse. Ce Random Forest a servi à sélectionner les variables pour le modèle 2 : les variables encadrées en rouge n'ont pas été intégrées dans le modèle.

Nous avons observé un effet négatif significatif de l'IFT insecticide sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Tableau 1.8). Nous avons également constaté une relation négative significative du précédent cultural lorsqu'il s'agissait d'un précédent non légumineuse, souvent une céréale d'hiver (Tableau 1.8, Figure 1.16.b). En revanche, la présence d'un labour a une relation positive significative sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Tableau 1.8, Figure 1.16.a). L'effet significatif de l'année est toujours présent. Les autres pratiques agricoles testées n'ont pas d'effet significatif. De même, le paysage n'a pas d'effet significatif.

Nous avons par la suite comparé ce modèle à un modèle de référence (Modèle R1, Tableau 1.6) testant l'effet des systèmes de culture classiques et prenant en compte les effets possibles d'un traitement insecticide, du paysage et de l'année sur le même jeu de données qui peuvent être prépondérants. Ce modèle de référence avait un AICc de 874, ce qui est bien supérieur à l'AICc du modèle prenant en compte les pratiques (AICc de 852), ce qui signifie que la prise en compte des pratiques plutôt que des systèmes de culture est plus informative.

Tableau 1. 8 : Effets des pratiques en place sur les parcelles suivies sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (glmmTMB : n = 159). Les résultats du modèle moyen (full average) issu de l'inférence multimodèle sont présentés. Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 2)	Intercept (Réf : Précédent « légumineuse », Non associée, Période de semis Q1, Année 2021)	2.41	0.22	0.23	10.65	< 0.001 ***		852
	Précédent	-0.63	0.22	0.22	2.87	0.004 **	1	
	Période de semis	0.12	0.20	0.20	0.60	0.551	0.41	
	Association	0.02	0.09	0.09	0.18	0.858	0.18	
	Labour	0.47	0.09	0.09	5.18	< 0.001 ***	1	
	Travail du sol hors labour avant semis	0.05	0.08	0.08	0.61	0.541	0.43	
	IFT herbicide après semis	0.01	0.06	0.06	0.26	0.797	0.19	
	IFT insecticide	-0.34	0.10	0.10	2.44	< 0.001 ***	1	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	0.05	0.08	0.08	0.60	0.547	0.42	
	Année	-0.91	0.18	0.19	4.92	< 0.001 ***	1	

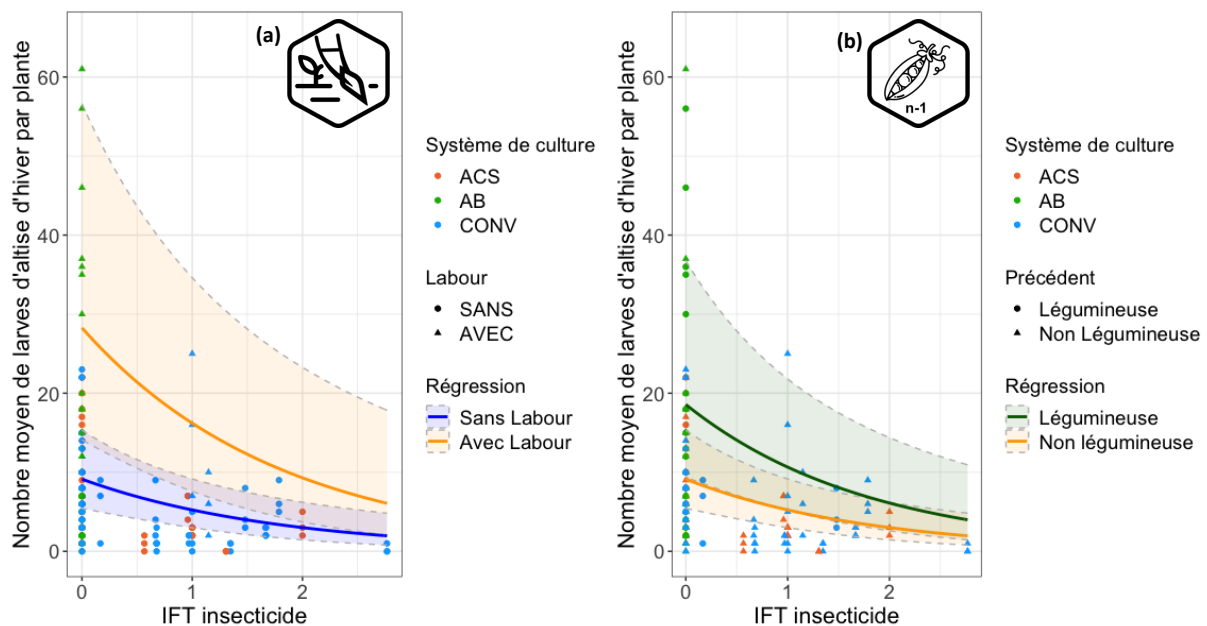


Figure 1. 16 : Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante selon l'IFT insecticide, le système de culture et (a) la présence ou l'absence de labour ou (b) le précédent cultural (légumineuses ou non). Les différents systèmes de culture sont distingués (couleurs des points). Les points sont les valeurs réelles. Les régressions et leurs intervalles de confiance sont issus du modèle et ont été obtenus à l'aide de visreg.



4. *Se passer des systèmes de culture en considérant les états du milieu qui résultent des pratiques en place sur les parcelles*

Les états du milieu peuvent être très variables d'une parcelle à l'autre et s'avèrent très diversifiés au sein des systèmes (Figure 1.17). En analysant en parallèle le graphe des individus et le cercle des corrélations, nous observons, sur le premier axe, une opposition entre la couverture du sol par des végétaux (culture, adventices) et la couverture par de la litière ou une absence de couverture (croûte de battance). Cependant, ces éléments ne discriminent pas les systèmes de culture et montrent ainsi l'existence d'une diversité de couverture, par la nature et l'importance (surfaces couvertes plus ou moins importantes), au sein de chaque système. Le second axe distingue un peu plus les systèmes, notamment l'ACS et l'AB – CONV, en opposant la surface couverte par la litière à celle couverte par la croûte de battance. Cette relation correspond en réalité au travail du sol : lorsqu'il n'est pas ou peu travaillé, il y a de la litière ; inversement, lorsqu'il est travaillé, de la croûte de battance peut plus facilement apparaître.

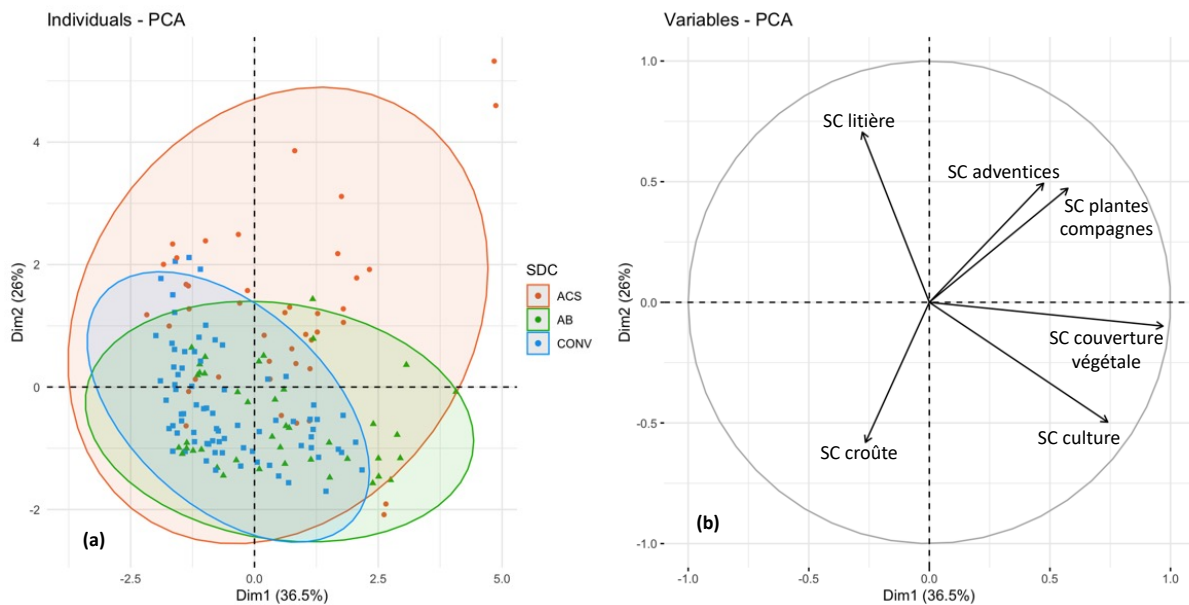


Figure 1. 17 : Analyses en composantes principales (ACP) réalisée sur les parcelles étudiées avec le plan des individus représentés en fonction des systèmes de culture classiques (a) et le cercle des corrélations (b). Les états du milieu considérés dans les analyses sont la surface couverte (SC) par la croûte de battance, par la litière, par les adventices, par les plantes compagnes, par la culture et par le couvert végétal.

Dans le même esprit que l'analyse précédente, nous avons testé les effets des états du milieu observés dans les parcelles et de l'année sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Tableau 1.4). En plus des états du milieu, nous prenons également en compte l'effet de l'application d'un traitement insecticide qui a un fort effet, mais dont la pratique n'a pas de conséquences visibles sur les états du milieu.

Les variables liées à la végétation étant fortement corrélées, nous avons effectué trois Random Forest et trois modèles (Tableaux 1.6 : Modèles 3 à 5). Les modèles ont des AICc quasiment similaires, ce qui signifie qu'ils sont aussi informatifs les uns que les autres.

Les résultats des Random Forest (importance des variables) sont présentés sur la Figure 1.18. Dans les trois Random Forest, les variables « Masse fraîche » et « Stade BBCH » ne semblent pas avoir beaucoup d'influence sur la variable réponse. Dans le Random Forest du modèle 3 (Figure 1.18.a), la

surface couverte par les plantes compagnes ne paraît pas importante, mais nous avons décidé de l'intégrer dans le modèle afin de comparer culture, adventices et plantes compagnes.

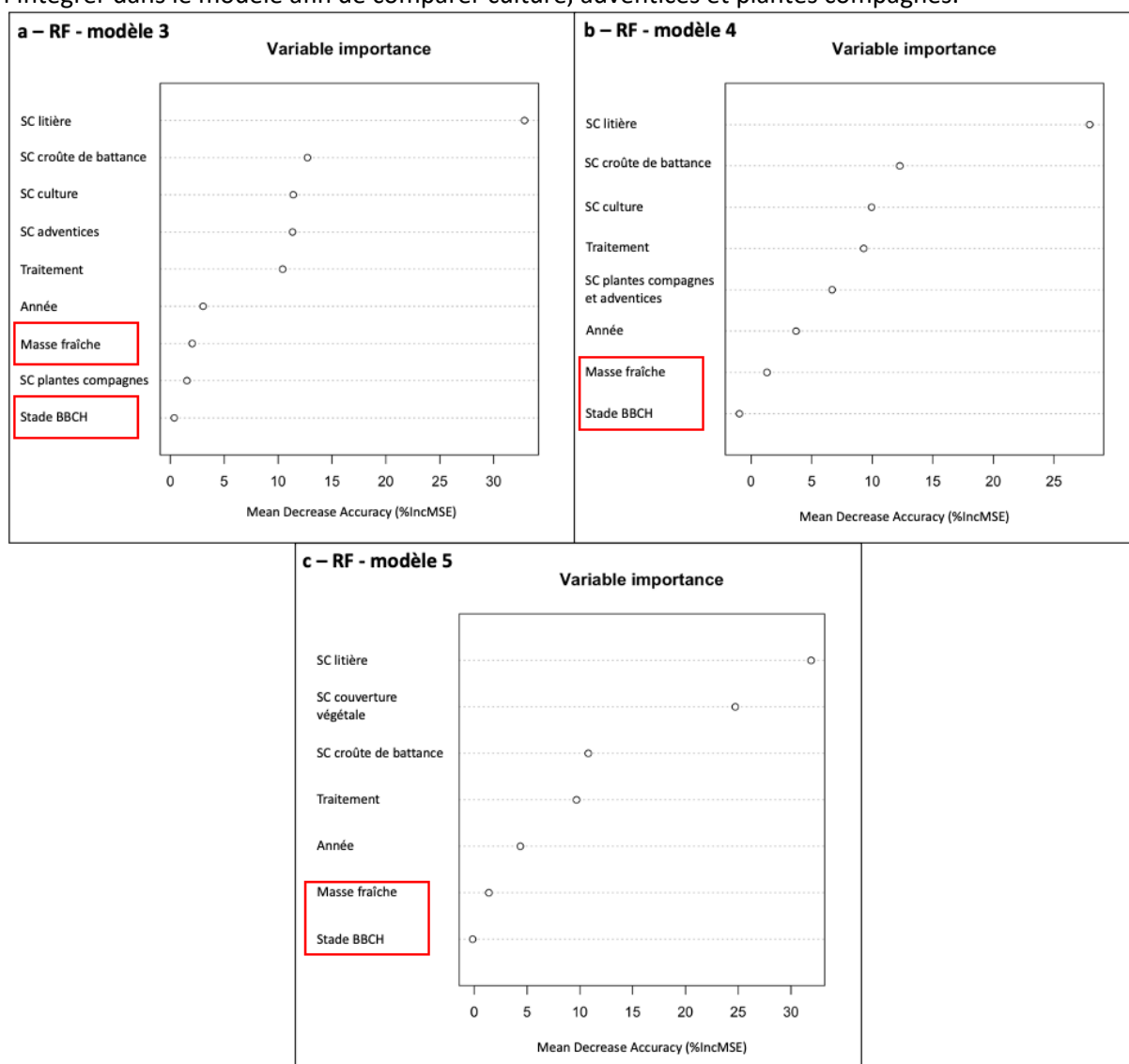


Figure 1. 18 : Importance des variables testées dans les Random Forest (2000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi et la présence d'un traitement insecticide sont également prises en compte, car ils peuvent avoir un effet non négligeable sur la variable réponse. Ce Random Forest a servi à sélectionner les variables pour les modèle 3 (a), 4 (b) et 5 (c) : les variables encadrées en rouge n'ont pas été intégrées dans les modèles.

Nous avons observé un effet négatif du pourcentage surfacique lié à la végétation : de la culture, des adventices, des plantes autres que la culture (adventices et plantes compagnes réunies) et plus globalement du couvert végétal. Les relations entre ces différents éléments (sauf les plantes autres que la culture) sont visibles sur la Figure 1.19. En revanche, nous n'avons observé aucun effet de la surface couverte par la litière, contrairement à ce que nous pouvions attendre suite aux Random Forest. Le graphique représentant le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante en fonction du pourcentage de litière est présenté sur la Figure 1.20. Dans les trois modèles, nous avons observé un effet de l'application d'un traitement insecticide, mais aucun effet du paysage. Seul le modèle 3 présente un effet significatif de l'année de suivi.

Ces modèles ont été comparés à un modèle de référence (Tableau 1.6 : Modèle R2) qui testait l'effet des systèmes de culture classiques et prenant en compte les effets possibles d'un traitement



Chapitre 1

insecticide, du paysage et de l'année sur le même jeu de données. Ce modèle de référence avait un AICc de 884, ce qui est supérieur à ceux des modèles qui testaient les effets des états du milieu. Les états du milieu apportent donc plus d'informations.

Dans un second temps, nous avons refait tourner ces modèles (Tableau 1.6 : Modèles R3 à 5) avec le jeu de données utilisé pour l'analyse des itinéraires techniques (Jeu de données « B » : $n = 159$) afin de comparer l'utilisation des pratiques à celle des états du milieu. Ces modèles ont des AICc supérieurs (respectivement 863, 862 et 863) à l'AICc du modèle avec les pratiques (AICc de 852). Ainsi, l'utilisation des pratiques semble donc une approche plus informative que l'utilisation des états du milieu.



Tableau 1. 9 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (glnmTMB : $n = 162$). Les résultats présentés sont issus de trois modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte (résultats non présentés ici) : lorsqu'il subsiste une autocorrélation spatiale des résidus dans le modèle, un « 1 » est annoté. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 3) ¹	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	2.22	0.16	0.16	14.07	< 0.001 ***		872
	SC croûte de battance	0.11	0.12	0.11	1.02	0.310	0.65	
	SC litière	-0.003	0.04	0.04	0.07	0.945	0.17	
	SC culture	-0.24	0.09	0.09	2.64	0.008 **	1	
	SC plantes compagnes	-0.02	0.05	0.05	0.36	0.721	0.25	
	SC adventices	-0.32	0.09	0.09	3.36	< 0.001 ***	1	
	Traitement OUI	-1.13	0.20	0.21	5.48	< 0.001 ***	1	
	Année 2022	-0.39	0.27	0.27	1.43	0.153	0.83	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	0.14	0.12	0.12	1.17	0.242	0.74	
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 4) ¹	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	2.20	0.16	0.16	13.6	< 0.001 ***		871
	SC croûte de battance	0.08	0.10	0.10	0.78	0.434	0.52	
	SC litière	-0.004	0.04	0.04	0.10	0.918	0.17	
	SC culture	-0.21	0.10	0.10	2.07	0.038 *	0.94	
	SC plantes compagnes et adventices	-0.34	0.10	0.10	3.43	< 0.001 ***	1	
	Traitement	-1.14	0.21	0.21	5.41	< 0.001 ***	1	
	Année 2022	-0.35	0.28	0.28	1.26	0.208	0.77	
		$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	0.15	0.12	0.12	1.24	0.216	0.76
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 5) ¹	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	2.22	0.16	0.16	14.06	< 0.001 ***		873
	SC croûte de battance	0.11	0.11	0.11	1.00	0.316	0.65	
	SC litière	-0.01	0.05	0.05	0.22	0.830	0.23	
	SC couvert végétal	-0.35	0.10	0.10	3.46	< 0.001 ***	1	
	Traitement OUI	-1.05	0.20	0.20	5.25	< 0.001 ***	1	
	Année 2022	-0.45	0.27	0.27	1.67	0.095 .	0.89	
		$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	0.10	0.11	0.11	0.92	0.355	0.62

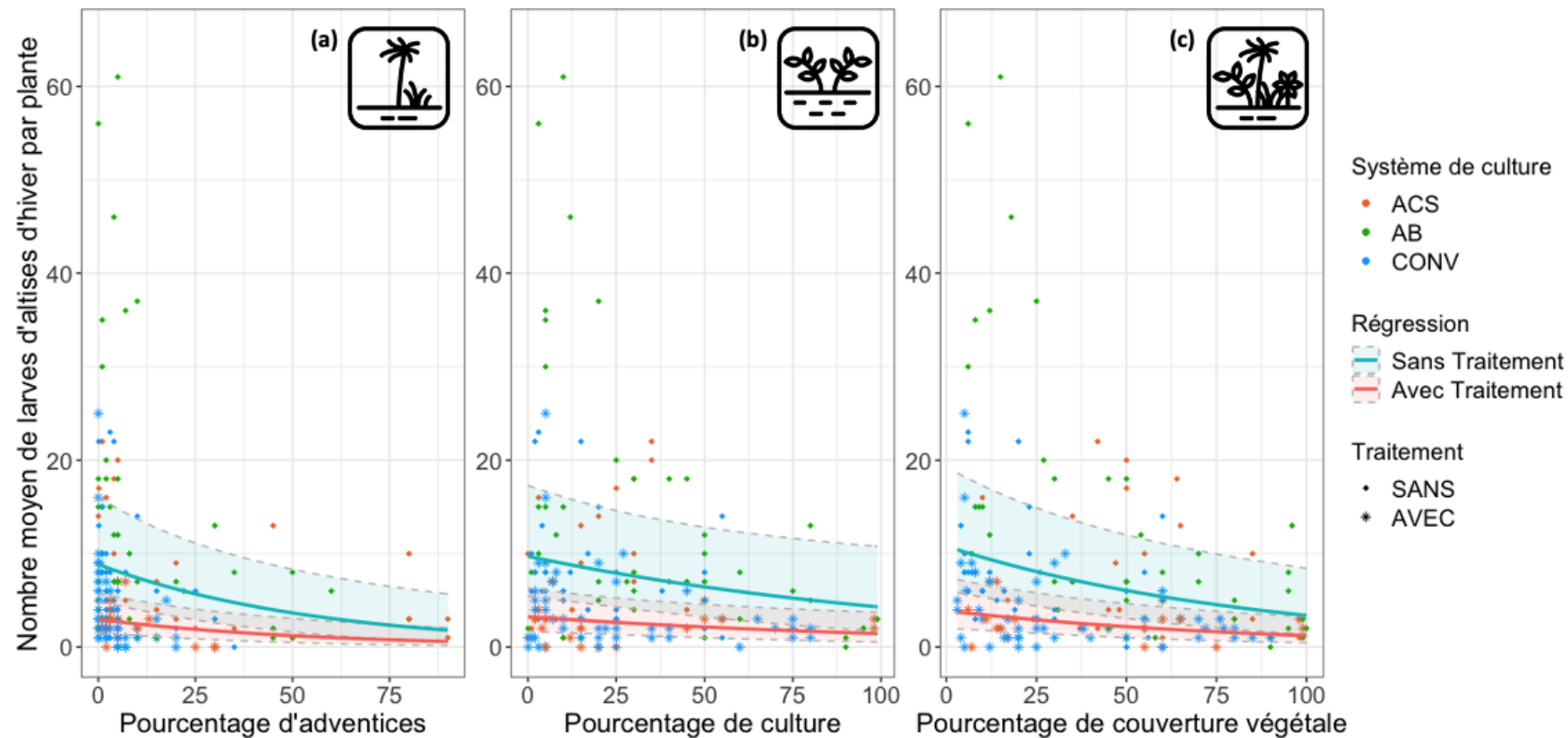


Figure 1. 19 : Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante selon différents éléments des états du milieu : le pourcentage de surface couvert par (a) des adventices, (b) la culture et (c) la couverture végétale. L'impact de l'application d'un traitement insecticide est également pris en compte (deux droites de régression et forme des points). Les différents systèmes de culture sont distingués (couleurs des points). Les points sont les valeurs réelles. Les régressions et leurs intervalles de confiance sont issus du modèle (obtenus à l'aide de visreg).

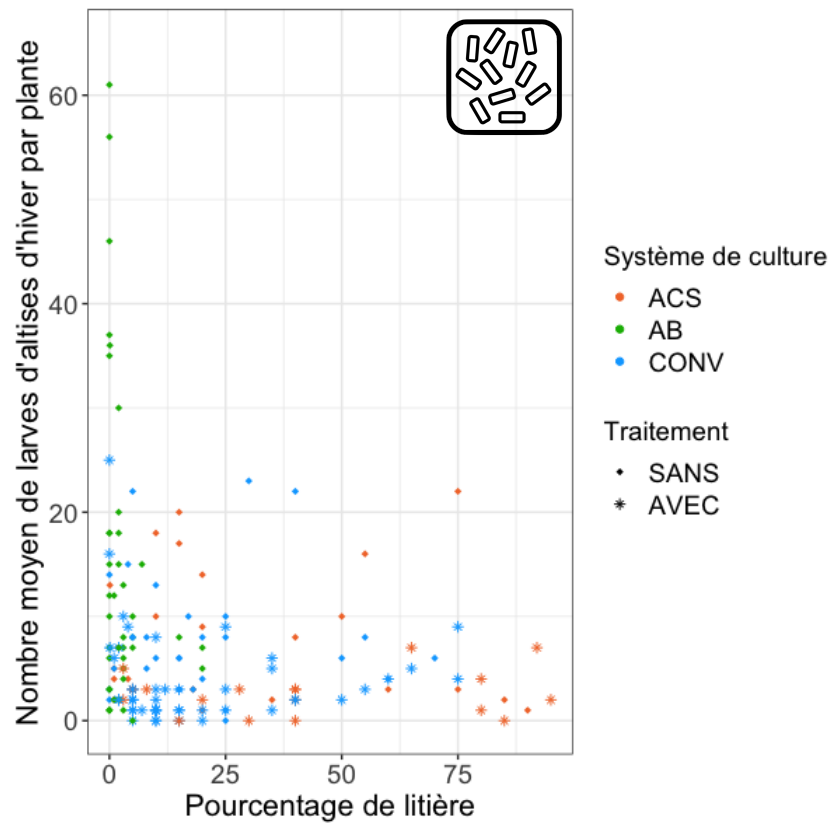


Figure 1. 20 : Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante en fonction du pourcentage de litière présent. Les différents systèmes de culture sont distingués, ainsi que la présence ou l'absence d'un traitement insecticide.



C. Une régulation *top-down* à l'effet limité sur les populations d'altises d'hiver

A l'aide de trois modèles, ayant des niveaux de détails de plus en plus fins pour les carabes, nous avons évalué l'effet de la régulation *top-down* sur le nombre de larves d'altises d'hiver par plante. Dans les deux premiers modèles, nous avons observé une tendance négative de l'activité-densité des araignées, qui devient significative dans le dernier modèle (Tableau 1.10). Aucun effet significatif des autres prédateurs ou des proies alternatives n'est observé. L'application d'un traitement insecticide avait un effet négatif significatif dans les trois modèles, contrairement à l'année de suivi qui n'a pas d'effet significatif. L'effet des araignées, couplé à l'effet de l'application d'un insecticide, est visible sur la Figure 1.21. Nous avons pu observer que l'application d'un insecticide permet de limiter les populations de larves d'altise (courbes violette et rouge). Nous avons également observé que lorsqu'il n'y a pas d'application d'insecticides, une augmentation de l'activité-densité d'araignées semble également limiter les populations.

Dans les modèles, l'ajout de détails plus fins pour les carabes (stade et régime alimentaire zoophage, puis ajout de la taille) n'apportent pas d'information et nous observons une augmentation du critères d'information d'Akaike corrigé (AICc) qui traduit un amoindrissement de la qualité des modèles.



Tableau 1. 10 : Effets des différents prédateurs et proies alternatives capturés dans les parcelles suivies en automne sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (glmmTMB : $n = 123$). Les résultats présentés sont issus de trois modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. Les variables liées aux prédateurs et proies alternatives sont en $\log_{10}(x+1)$. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 6)	Intercept							
	(Traitement NON, Année 2021)	1.97	0.18	0.18	10.68	< 0.001 ***		678
	Carabes	0.06	0.10	0.10	0.59	0.552	0.40	
	Staphylins	-0.08	0.06	0.06	0.55	0.583	0.37	
	Gamases	-0.08	0.08	0.08	1.05	0.293	0.68	
	Araignées	-0.19	0.10	0.10	1.87	0.062 .	0.92	
	Autres prédateurs	0.001	0.04	0.04	0.04	0.969	0.13	
	Proies alternatives	0.04	0.08	0.08	0.54	0.593	0.36	
	Traitement	-0.88	0.27	0.27	3.24	0.001 **	1	
	Année 2022	-0.08	0.20	0.20	0.39	0.694	0.27	
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 7)	Intercept							
	(Traitement NON, Année 2021)	1.98	0.18	0.18	10.70	< 0.001 ***		681
	Carabes adultes zoophages	0.04	0.08	0.08	0.49	0.621	0.33	
	Carabes larves	0.003	0.02	0.02	0.14	0.892	0.13	
	Staphylins	-0.04	0.06	0.06	0.56	0.574	0.38	
	Gamases	-0.08	0.08	0.08	1.06	0.291	0.69	
	Araignées	-0.19	0.10	0.10	1.89	0.058 .	0.93	
	Autres prédateurs	0.002	0.03	0.03	0.05	0.957	0.11	
Proies alternatives	0.04	0.08	0.08	0.55	0.584	0.36		
	Traitement	-0.89	0.27	0.27	3.27	0.001 **	1	
	Année 2022	-0.08	0.20	0.20	0.40	0.692	0.27	
Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (Modèle 8)	Intercept							
	(Traitement NON, Année 2021)	1.97	0.18	0.18	10.95	< 0.001 ***		683
	Petits carabes adultes zoophages	0.002	0.03	0.03	0.08	0.940	0.11	
	Grands carabes adultes zoophages	0.06	0.09	0.09	0.63	0.526	0.42	
	Carabes larves	0.004	0.02	0.03	0.16	0.876	0.13	
	Staphylins	-0.03	0.06	0.06	0.55	0.585	0.37	
	Gamases	-0.08	0.08	0.08	1.04	0.301	0.68	
	Araignées	-0.19	0.09	0.10	2.03	0.042 *	0.95	
Autres prédateurs	0.001	0.03	0.03	0.03	0.978	0.10		
Proies alternatives	0.04	0.08	0.08	0.53	0.597	0.34		
	Traitement	-0.88	0.27	0.27	3.28	0.001 **	1	
	Année 2022	-0.06	0.18	0.18	0.34	0.735	0.21	

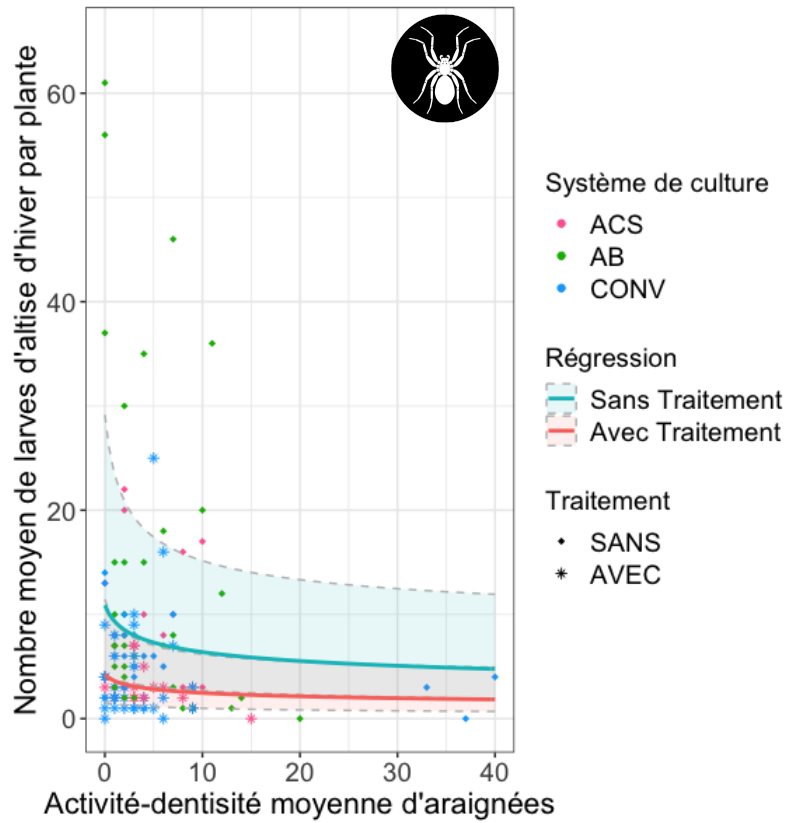


Figure 1. 21 : Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante selon l'activité-densité moyenne d'araignées piégées dans les pièges Barber. L'impact de l'application d'un traitement insecticide est également pris en compte (deux droites de régression et forme des points). Les différents systèmes de culture sont distingués (couleurs des points). Les points sont les valeurs réelles. Les régressions et leurs intervalles de confiance sont issus du modèle 8 (obtenus à l'aide de visreg).



D. Bilan des analyses : des effets plus ou moins forts des éléments des différentes composantes étudiées

A l'aide de différents modèles, nous avons constaté des effets significatifs dans les différentes composantes étudiées. Ces différents éléments sont présentés sur la Figure 1.22.

Deux éléments sont associés à une augmentation du nombre de larves d'altises d'hiver par plante : (i) un élément du paysage qui est l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 dans un rayon de 1000 m et (ii) la pratique d'un labour avant le semis. Les autres éléments ayant un effet significatif sont eux associés à une diminution du nombre de larves. Parmi ces éléments se trouvent l'IFT insecticides, un précédent qui n'est pas une légumineuse (il s'agit bien souvent d'une céréale), des états du milieu liés à la végétation (par exemple le pourcentage de couverture végétale). Enfin, nous avons observé un effet significatif des araignées, qui participent ainsi à la régulation *top-down*.

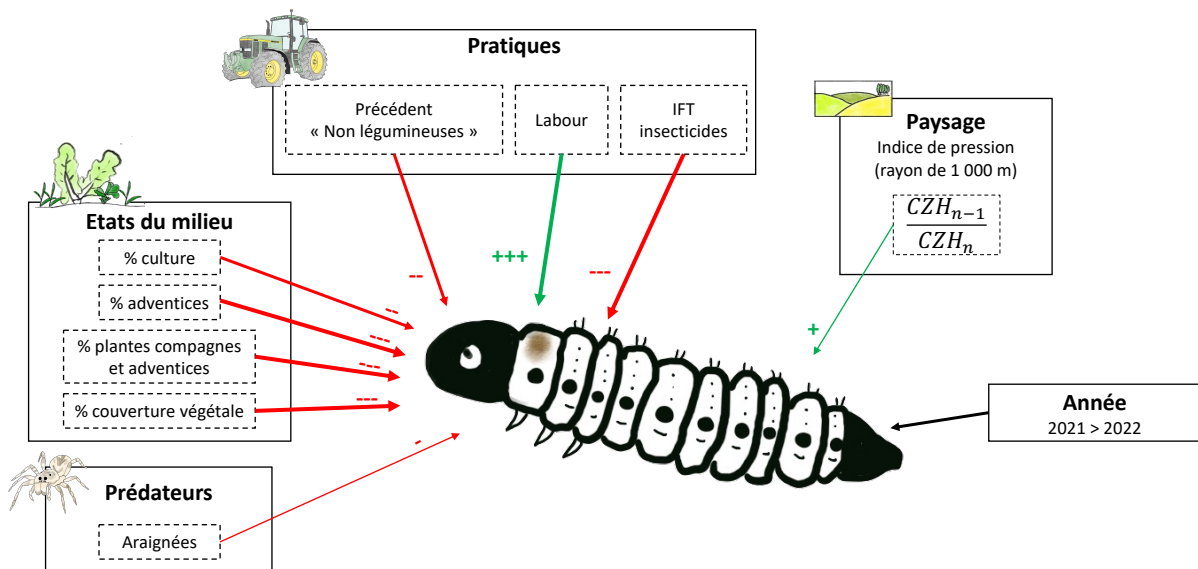


Figure 1. 22 : Schéma bilan des résultats issus des analyses effectuées afin de tester les effets de différents éléments sur le nombre de larves d'altises d'hiver par plante. Ces éléments sont relatifs au paysage, aux pratiques en place, aux états du milieu qui sont la conséquence indirecte des pratiques agricoles en place et enfin aux prédateurs présents. Le nombre de symboles sur les flèches et l'épaisseur des flèches représentent le niveau de significativité de l'effet : (*) $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Le signe et la couleur de la flèche correspondent au sens de l'effet : « - » et flèche rouge correspond à un effet négatif et « + » et flèche verte un effet positif. (©Dessin de Justine Pigot)



E. Synthétiser l'impact des différentes composantes étudiées sur les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles

Nous avons cherché à évaluer l'importance des différentes composantes étudiées : itinéraires techniques, états du milieu et prédation. Pour cela, nous avons effectué une PLS-PM, dont les résultats sont présentés sur la Figure 1.23. Avec la PLS-PM, nous souhaitons également évaluer les relations pouvant exister entre les itinéraires techniques, les états du milieu et les prédateurs.

Dans notre modèle final, toutes les variables manifestes sont bien corrélées avec la variable latente associée (« loading » > 0.5) et sont moins corrélées avec les autres variables latentes présentes. Les blocs de variables manifestes sont bien unidimensionnels (Dillon-Goldstein's rho > 0.7). Ces éléments sont présentés dans le Tableau 1.11. La performance de prédiction du modèle est correcte (Goodness of Fit de 0.28).

Tableau 1. 11 : Poids (« weight ») et corrélation (« loading ») des variables manifestes composant les différentes variables latentes. L'unidimensionnalité des blocs de variables manifestes est vérifiée grâce à Dillon-Goldstein's rho (DG-rho) qui doit être supérieur à 0.7.

Variable latente	Variable manifeste	Weight	Loading	DG-rho
Année	Année	1.00	1.00	1.00
Paysage	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 000 m)	1.00	1.00	1.00
Pratiques	Précédent (légumineuse ou non)	0.361	0.564	0.717
	Labour (présence – absence)	0.696	0.817	
	- IFT insecticide	0.388	0.588	
États du milieu	% couverture végétale	1.00	1.00	1.00
Prédateurs	Nombre d'araignées	1.00	1.00	1.00
Larves d'altises d'hiver	Nombre de larves par plante	1.00	1.00	1.00

Les coefficients de détermination (R^2) des trois variables latentes endogènes (« États du milieu », « Prédateurs » et « Larves d'altises d'hiver ») sont présents sur la Figure 1.23. Les coefficients de détermination des variables « États du milieu » et « Prédateurs » sont faibles et ne seront donc pas analysés. Ainsi, nous n'analyserons que les relations entre la variable latente « Larves d'altises d'hiver » et les autres variables latentes ($R^2 = 0.49$).

Après une validation bootstrap, nous avons obtenu les paramètres estimés (« path coefficient ») associés aux différentes relations. Les relations avec le paysage et avec les prédateurs apparaissent comme non significatives. La relation la plus importante est celle avec les pratiques en place dans les parcelles. C'est une relation positive liée à un précédent légumineuse, la présence d'un labour avant le semis et un IFT insecticides faible. L'année a une relation négative plus modérée avec les larves d'altises : moins de larves sont présentes en 2022 qu'en 2021. De même, les états du milieu, via le pourcentage de couverture végétale, ont une relation négative avec les larves.

n = 123
 GoF = 0.28
 Bootstrap resamples = 200

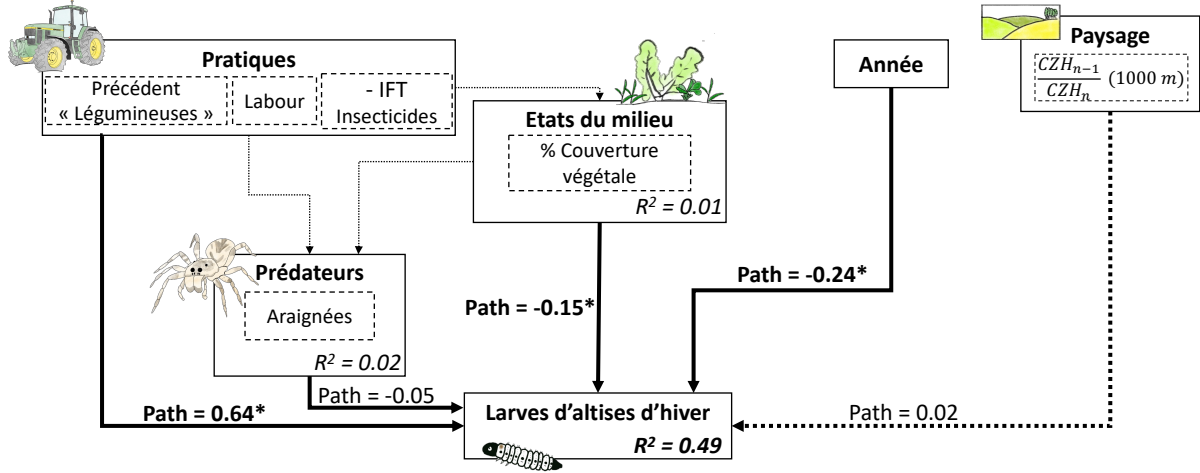


Figure 1. 23 : Relations entre les différentes variables latentes endogènes (inner model) de la PLS-PM relié à la régulation des larves d'altises d'hiver. L'année de référence est 2021. R² correspond au coefficient de corrélation associé à la variable latente endogène. Un R² < 0.30 est considéré comme faible et un R² compris entre 0.30 et 0.60 est considéré comme moyen. Les flèches épaisses correspondent à une relation significative et les flèches en pointillé à une relation non significative. Path correspond au paramètre estimé caractérisant la relation (en gras si significatif). Il est obtenu après une validation bootstrap. N : nombre d'observations. GoF : Goodness of fit. (©Dessins de Justine Pigot)



F. Le risque lié aux larves d'altises d'hiver est-il influencé par les mêmes éléments que les populations ?

L'évaluation du risque lié aux populations de larves d'altises présentes dans une parcelle donnée est primordiale pour les agriculteurs afin de gérer ce ravageur. Pour évaluer ce risque, nous nous sommes fondés sur des critères définis par Terres Inovia et liés aux nombres de larves par plante et à la biomasse des plants de colza.

La Figure 1.24 illustre la fréquence des différents risques rencontrés (« FAIBLE » ou « MOYEN-FORT ») dans les parcelles menées selon différents systèmes de cultures et selon l'application d'un insecticide.

Dans un premier modèle (Tableau 1.6 : Modèle 9), nous avons testé l'effet des systèmes de culture, tout en prenant en compte l'application d'un insecticide et l'année de suivi. Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif des systèmes de culture (clmm : $n = 162$, $\chi^2 = 0.80$, d.f = 2, $p = 0.669$). En revanche, l'application d'un traitement insecticide a un effet négatif significatif (clmm : $n = 162$, $\chi^2 = 6.29$, d.f = 1, $p = 0.017$). De même, nous observons un effet significatif de l'année de suivi (clmm : $n = 162$, $\chi^2 = 6.44$, d.f = 1, $p = 0.011$) : les risques étaient plus faibles en 2022 qu'en 2021.

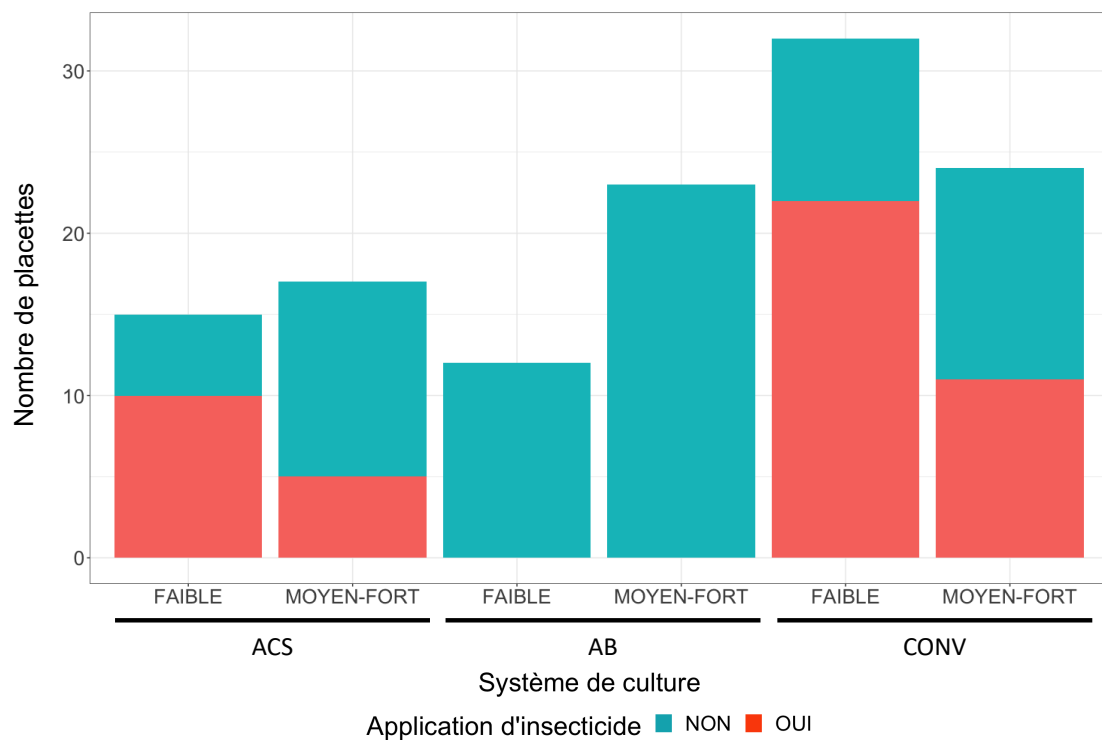


Figure 1. 24 : Fréquence des risques lié aux altises d'hiver dans les zones échantillonnées en janvier dans chaque système de culture et selon l'application d'insecticide Un même effet du paysage, mais à un rayon plus grand que pour le nombre moyen d'altises d'hiver



1. *Un même effet du paysage, mais à un rayon plus grand que pour le nombre moyen d'altises d'hiver*

Dans notre jeu de données, nous avons constaté que trois parcelles avaient un indice de pression lié aux bois (ratio du pourcentage de bois par rapport au pourcentage de colza l'année n) élevé associé à un risque faible. Ces trois parcelles faussaient nos premiers modèles, dont les variables étaient similaires à celles prises en compte dans les modèles de l'analyse de l'effet du paysage sur les populations de larves d'altises d'hiver (Chapitre 1 : IV.A.). Nous avons donc refait tourner les modèles sans ces parcelles et n'avons pas constaté d'effet de l'indice de pression lié aux bois. Ainsi, nous avons choisi d'analyser l'effet du paysage sans l'indice de pression lié aux bois, afin de garder un jeu de données composé des 54 parcelles suivies (Tableau 1.12). Nous avons observé un effet positif significatif de l'indice de pression lié au pourcentage de colza l'année n-1 aux rayons 750, 1000 et 1500 m. L'AICc du modèle à 1500 m étant le plus faible, nous avons gardé ce rayon pour la suite des analyses. Nous avons également observé un effet négatif significatif du traitement à tous les rayons testés. L'année de suivi a également un effet significatif aux rayons allant de 250 à 1000 m : le risque est plus faible en 2022 qu'en 2021.

Tableau 1. 12 : Relations entre le risque associé aux larves d'altises d'hiver et des variables paysagères à différentes échelles (clm : n = 54) : l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 et la surface des parcelles suivies. Dans les modèles, d'autres variables explicatives sont prises en compte : la surface des parcelles étudiées, l'année de suivi et l'application d'un traitement insecticide. Les variables explicatives quantitatives étaient centrées-réduites. Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. L'estimate correspond à la pente de chaque variable dans les régressions. Les degrés de liberté (d.f.) et le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) sont également présents. Seuls les modèles ayant des relations significatives entre la variable réponse et une variable paysagère sont présentés ici. Tous les modèles sont présentés en annexe, dans le Tableau S1.6.

Variable réponse	Radius	Variable explicative	d.f.	Estimate (± SEM)	P-value	χ^2	AICc	
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	750 m	% CZH_{n-1}	1	0.89 ± 0.43	0.016 *	5.76	68	
		% CZH _n						
		Surface parcelle	1	0.53 ± 0.34	0.111			2.54
		Année	1	-1.42 ± 0.68	0.028 *			4.85
			Traitement	1	-1.88 ± 0.77	0.008 **	7.11	
	1 000 m	% CZH_{n-1}	1	0.91 ± 0.34	0.011 *	6.51	68	
		% CZH _n						
Surface parcelle		1	0.54 ± 0.34	0.106	2.61			
FORT-MOYEN > FAIBLE	1 000 m	Année	1	-1.09 ± 0.66	0.093 .	2.81		
		Traitement	1	-2.01 ± 0.79	0.005 **			7.76
	1 500 m	% CZH_{n-1}	1	1.32 ± 0.55	0.004 **	8.31	66	
		% CZH _n						
Surface parcelle		1	0.39 ± 0.32	0.241	1.37			
Année		1	-0.59 ± 0.69	0.395	0.72			
		Traitement	1	-2.06 ± 0.79	0.004 **	8.13		



2. Un effet toujours présent des insecticides et du labour

Nous avons sélectionné des variables explicatives (pratiques agricoles) selon leur variabilité et à l'aide d'un Random Forest (Annexe : Figure S1.5). Nous avons ensuite fait un modèle (clmm) afin de tester l'effet de pratiques agricoles et de l'année sur le risque lié aux altises d'hiver (Tableau 1.6 : Modèle 10).

Nous avons observé un effet négatif significatif de l'IFT insecticide sur le risque (Tableau 1.13), ainsi qu'un effet positif du nombre de labours. Les autres pratiques agricoles sélectionnées n'ont pas d'effet significatif. L'effet significatif de l'année est présent, mais le paysage n'a pas d'effet significatif.

Tableau 1. 13 : Effets des pratiques en place sur les parcelles suivies sur le risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver (clmm : n = 159). Les résultats du modèle moyen (full average) issu de l'inférence multimodèle sont présentés. Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	Z value	P-value	Imp	AICc
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante FORT-MOYEN > FAIBLE (Modèle 10)	Intercept (Réf : Précédent « légumineuse », Variété hybride, Année 2021)	-1.29	0.65	1.97	0.049 *		165
	Variété	-0.02	0.49	0.03	0.974	0.25	
	Labour	1.42	0.56	2.55	0.011 *	1	
	Travail du sol hors labour avant semis	-0.34	0.45	0.74	0.458	0.51	
	IFT herbicide avant semis	-0.21	0.38	0.56	0.579	0.40	
	IFT herbicide après semis	0.30	0.46	0.65	0.516	0.45	
	IFT insecticide	-1.59	0.55	2.89	0.004 **	1	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	0.31	0.43	0.72	0.469	0.49	
	Année	-2.48	1.11	2.24	0.025 *	0.98	

3. Le couvert végétal, seul élément des états du milieu ayant un effet

Nous avons également testé les effets des états du milieu observés dans les parcelles sur le risque lié aux larves d'altises d'hiver. Nous avons sélectionné les états du milieu à intégrer dans les modèles grâce à des Random Forest (Annexe : Figure S.1.6). Nous avons exclu la masse fraîche car cette variable a participé à la construction de la variable réponse. Nous avons également décidé d'exclure le stade BBCH. Nous avons ensuite utilisé deux modèles (Tableau 1.6 : Modèles 11 et 12), car les Random Forest n'ont pas contribué à sélectionner les variables relatives aux adventices et aux plantes compagnes (Annexe : Figure S1.6 a et b). Dans ces deux modèles étaient pris en compte l'année de suivi, le paysage et l'application d'un traitement insecticide.

Les deux modèles ont un même AICc, ils sont donc aussi informatifs l'un que l'autre (Annexe : Tableau S1.7). Seul le second modèle (Modèle 12) montre un effet significatif d'un état du milieu : l'augmentation de la surface couverte par le couvert végétal diminue le risque (Tableau 1.14, Figure 1.25). Les autres états du milieu testés n'apparaissent pas comme significatifs. Dans les deux modèles, l'application d'un insecticide a un effet négatif significatif. Sur la Figure 1.25, nous pouvons observer l'effet de l'application d'un insecticide : la majorité des échantillons prélevés dans des parcelles traitées est associée à un risque FAIBLE. Cependant, certains échantillons sont associés à un



risque MOYEN-FORT, notamment lorsque le pourcentage de couverture végétale est faible (inférieure à 12 %).

En revanche, nous n'observons pas d'effet de l'année de suivi ou du paysage.

Tableau 1. 14 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur le risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver (clmm : $n = 162$). Les résultats présentés sont ceux du modèle ayant une relation significative entre la variable réponse et les états du milieu. Les deux modèles sont présents en annexe, dans le Tableau S1.7. Les résultats présentés sont ceux du modèle moyen (full average) issu de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	Z value	P-value	Imp	AICc
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	Intercept (Réf : Traitement NON, Année 2021)	-1.93	0.78	2.47	0.013 *		170
	SC croûte de battance	0.34	0.47	0.72	0.474	0.51	
	SC litière	-0.05	0.20	0.24	0.814	0.26	
	SC couvert végétal	-0.99	0.51	1.96	0.050 *	0.93	
FORT-MOYEN > FAIBLE (Modèle 12)	Traitement	-3.51	1.03	3.41	< 0.001 ***	1	
	Année	-0.83	1.15	0.72	0.471	0.53	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	0.43	0.48	0.91	0.363	0.62	

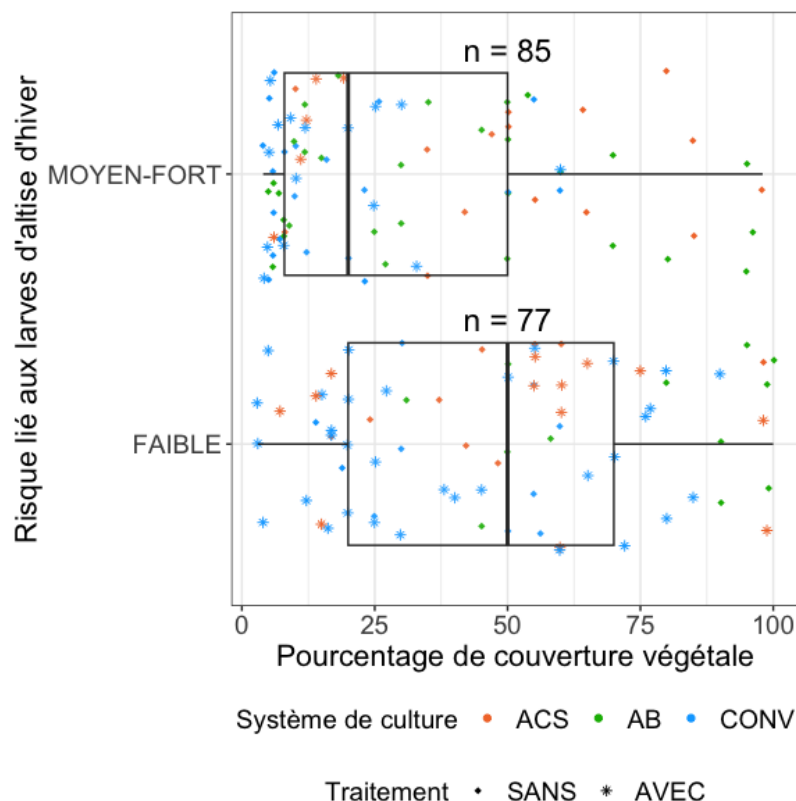


Figure 1. 25 : Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver (« FAIBLE » ou « MOYEN-FORT ») selon le pourcentage de couverture végétale. Une distinction est faite des différents systèmes de culture (couleurs des points), ainsi que de l'application possible d'un traitement insecticide (forme des points).



4. Une absence d'effet de la régulation top-down

Nous avons testé un possible effet de la régulation *top-down* grâce à deux modèles plus ou moins détaillés pour les carabes (Tableau 1.6 : Modèles 13 et 14). Les résultats des calculs sont visibles en annexe, dans le Tableau S1.8. Cependant, nous n'avons observé aucun effet significatif des prédateurs ou des proies alternatives. Seul un effet négatif significatif de l'application d'un insecticide est observé.

5. Bilan des analyses : un effet prépondérant de l'application d'insecticides

A l'aide de différents modèles, nous avons pu observer des effets significatifs dans différentes composantes étudiées. Ces différents éléments sont présentés sur la Figure 1.26.

Deux éléments participent à l'augmentation du risque lié aux larves d'altises d'hiver : (1) un élément du paysage qui est l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 dans un rayon de 1500 m et (2) la pratique d'un labour avant le semis. Les deux autres éléments ayant un effet significatif participent eux à la diminution du risque. Il s'agit de l'IFT insecticides et du pourcentage de couverture végétale. L'application d'insecticide a un effet significatif dans tous les modèles testés et semble fortement participer à la réduction du risque. Nous n'avons observé aucun effet de la régulation *top-down* sur le risque.

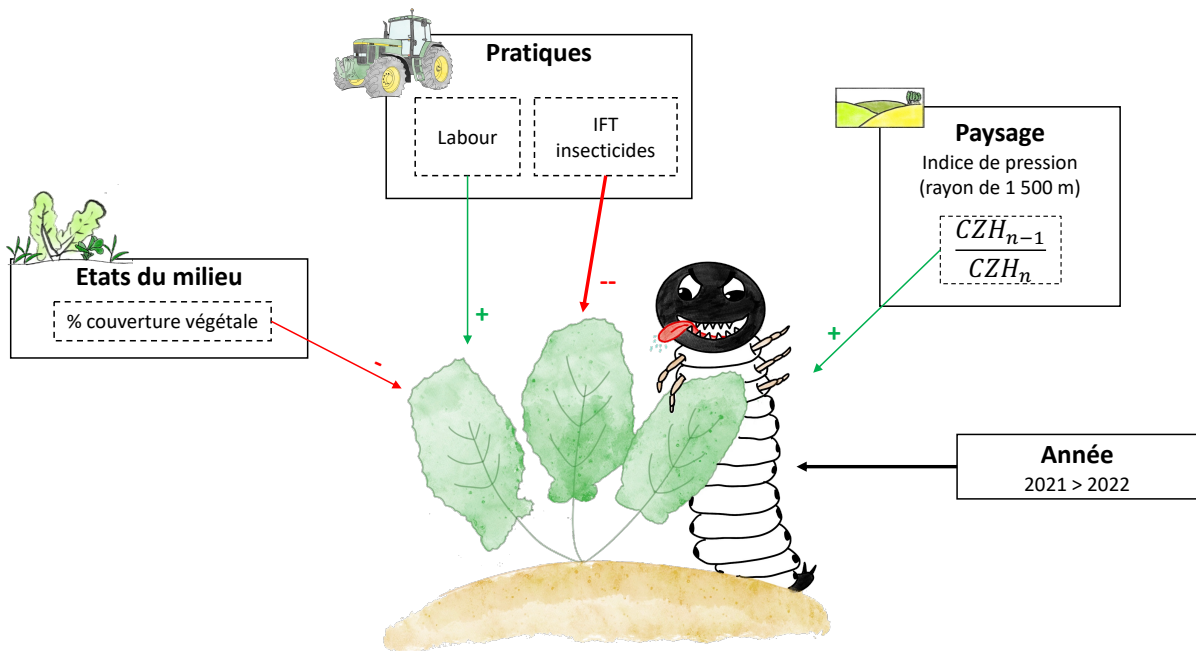


Figure 1. 26 : Schéma bilan des résultats issus des analyses effectuées afin de tester les effets de différents éléments sur le risque lié aux larves d'altises d'hiver. Ces éléments sont relatifs au paysage, aux itinéraires techniques, aux états du milieu qui sont la conséquence indirecte des pratiques agricoles et enfin aux prédateurs présents. Le nombre de symboles sur les flèches et l'épaisseur des flèches représentent le niveau de significativité de l'effet : (*) $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Le signe et la couleur de la flèche correspondent au sens de l'effet : « - » et flèche rouge correspond à un effet négatif et « + » et flèche verte un effet positif. (©Dessins de Justine Pigot)



G. Les infestations peuvent-elles être retardées ?

Dans un premier modèle (Tableau 1.6 : Modèle 15), nous avons testé l'effet des systèmes de culture sur la proportion moyenne de larves au stade L3, tout en prenant en compte l'application d'un insecticide et l'année de suivi. Nous n'avons pas trouvé d'effet significatif des systèmes de culture sur la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plant de colza (glmmTMB : $n = 162$, $\chi^2 = 0.92$, d.f = 6, $p = 0.632$). L'application d'insecticide n'a également pas d'effet significatif (glmmTMB : $n = 162$, $\chi^2 = 0.81$, d.f = 6, $p = 0.368$). Cette absence d'effet est visible sur la Figure 1.26. Nous avons observé un effet significatif de l'année de suivi (glmmTMB : $n = 162$, $\chi^2 = 4.46$, d.f = 6, $p = 0.035$) : il y a avait une plus forte proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3 en 2022 qu'en 2021.

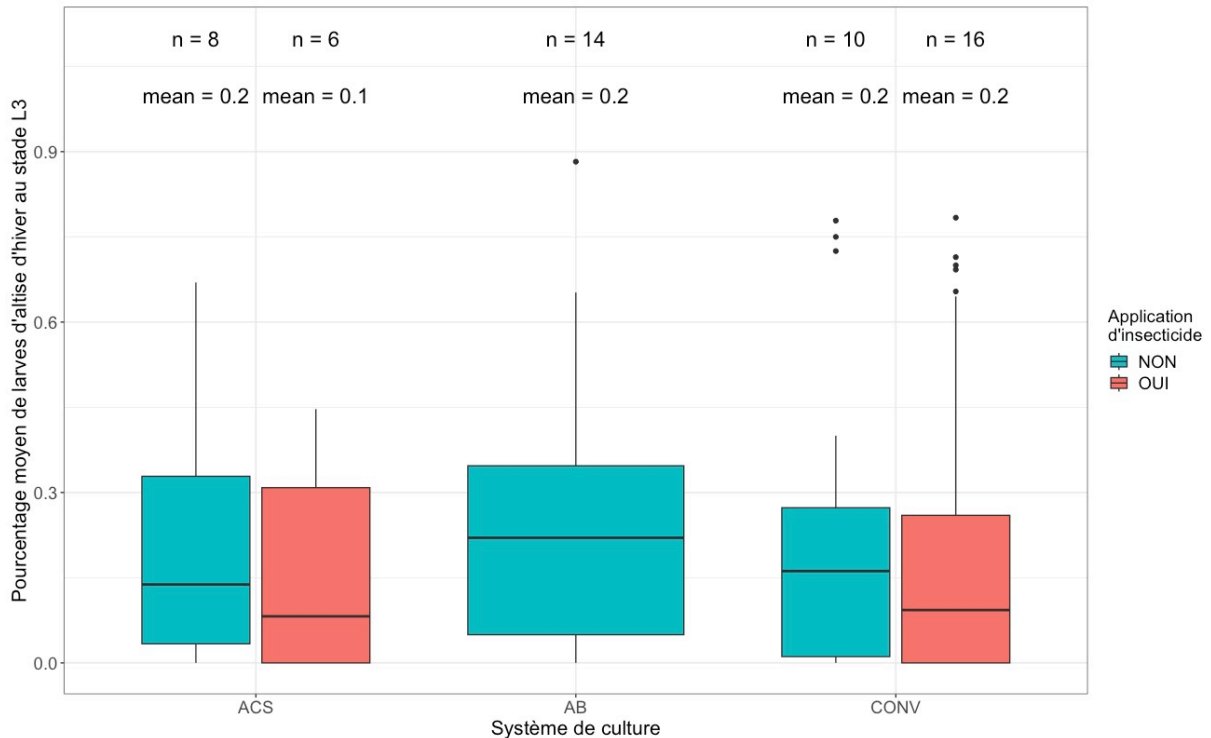


Figure 1. 27 : Pourcentage de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plant de colza échantillonné en janvier dans chaque système de culture et selon l'application d'insecticide. Le nombre d'observations et la moyenne de chaque élément (mean) sont annotés sur le graphique.



1. Un effet du paysage limité

L'effet du paysage, évalué à partir des indices de pression, a été testé à différentes échelles allant de 250 à 3000 m (Tableau 1.15). Nous n'avons observé aucun effet significatif des éléments du paysage testés (surface de la parcelle suivie et deux indices de pression). Nous avons uniquement observé deux tendances négatives. La première concerne l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 dans un rayon de 750 m et la seconde, l'indice de pression lié au pourcentage de bois dans un rayon de 3000 m.

Dans la quasi-totalité des modèles (hors 2000 m), nous avons observé des effets de l'année de suivi : la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3 est plus importante en 2022 qu'en 2021. L'application d'insecticide a un effet négatif significatif uniquement dans les modèles testant les éléments paysagers dans des rayons de 1000 et 1500 m.

Dans la suite des analyses et par souci d'homogénéité avec les analyses précédentes, nous avons décidé de garder uniquement l'effet de l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 à 750 m.

Tableau 1. 15 : Relations entre la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3 au sein des populations moyennes dans les plantes et des variables paysagères à différentes échelles (glmmTMB : n = 54) : des indices de pression liés au pourcentage de colza présent l'année n-1 et au pourcentage de bois et la surface des parcelles suivies. Dans les modèles, d'autres variables explicatives sont prises en compte : la surface des parcelles étudiées, l'année de suivi et l'application d'un traitement insecticide. Les coordonnées géographiques sont ajoutées pour l'autocorrélation spatiale (résultats non présentés ici). Les niveaux de significativité sont les suivants : $p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. L'estimate correspond à la pente de chaque variable dans les régressions. Les degrés de liberté (d.f.) et le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) sont également présents. Seuls les modèles ayant des relations significatives entre la variable réponse et une variable paysagère sont présentés ici. Tous les modèles sont présentés en annexe, dans le Tableau S.1.9.

Variable réponse	Radius	Variable explicative	d.f.	Estimate (\pm SEM)	P-value	χ^2	AICc
Pourcentage de larves d'altises d'hiver au stade L3 au sein de la population moyenne dans une plante	750 m	% CZH_{n-1}	1	-0.26 \pm 0.15	0.088 .	2.92	139
		% CZH _n				0.55	
		% Bois	1	-0.17 \pm 0.23	0.459		
		% CZH _n					
		Surface parcelle	1	-0.21 \pm 0.18	0.242	1.37	
			Année	1	0.90 \pm 0.30	0.003 **	9.12
			Traitement	1	0.20 \pm 0.40	0.614	0.25
	3 000 m	% CZH _{n-1}	1	0.48 \pm 0.36	0.181	1.79	136
		% CZH _n					
		% Bois	1	-0.94 \pm 0.51	0.066 .	3.38	
Surface parcelle		1	-0.15 \pm 0.18	0.406	0.69		
Année		1	0.67 \pm 0.29	0.020 *	5.41		
		Traitement	1	0.03 \pm 0.36	0.938	0.006	



2. *Un effet limité des pratiques : seul le type de variété semée semble légèrement impacter la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3*

Après avoir sélectionné les variables explicatives à l'aide d'un Random Forest (Annexe : Figure S.1.7), nous avons fait tourner un modèle (glimmTMB, Tableau 1.6 : Modèle 16) afin de tester les effets des pratiques agricoles sélectionnées. Dans ce modèle, nous prenions également en compte l'année de suivi et le paysage.

Nous n'avons observé aucun effet significatif des pratiques agricoles sélectionnées et il en est de même pour l'année de suivi et le paysage (Tableau 1.16). Une seule tendance, liée au type variété semée (hybride ou lignée), est apparue : il y a une plus grande proportion de larves au stade L3 dans les colzas lorsque la variété est une lignée que lorsqu'elle est hybride. Cet effet semble être fortement lié aux systèmes de culture. En effet, sur la Figure 1.28, nous avons constaté que les variétés de type « lignée » étaient liées aux systèmes en agriculture de conservation des sols (ACS) et en agriculture biologique (AB).

Tableau 1. 16 : Effets des pratiques sur les parcelles suivies sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (glimmTMB : $n = 159$). Les résultats du modèle moyen (full average) issu de l'inférence multimodèle sont présentés. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction *scale* et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 16)	Intercept (Réf : Période de semis Q1, Variété hybride, Année 2021)	-1.96	0.23	0.23	8.38	< 0.001 ***		441
	Période de semis	-0.03	0.13	0.13	0.22	0.819	0.09	
	Variété	0.76	0.43	0.43	1.76	0.079 .	0.88	
	Travail du sol hors labour avant semis	0.004	0.04	0.04	0.089	0.929	0.06	
	Travail du sol hors labour après semis	0.07	0.13	0.13	0.57	0.571	0.33	
	IFT herbicide après semis	-0.01	0.05	0.05	0.11	0.910	0.06	
	IFT insecticide	0.001	0.04	0.04	0.02	0.981	0.05	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	-0.01	0.05	0.05	0.16	0.877	0.07	
	Année	0.09	0.23	0.23	0.42	0.676	0.22	

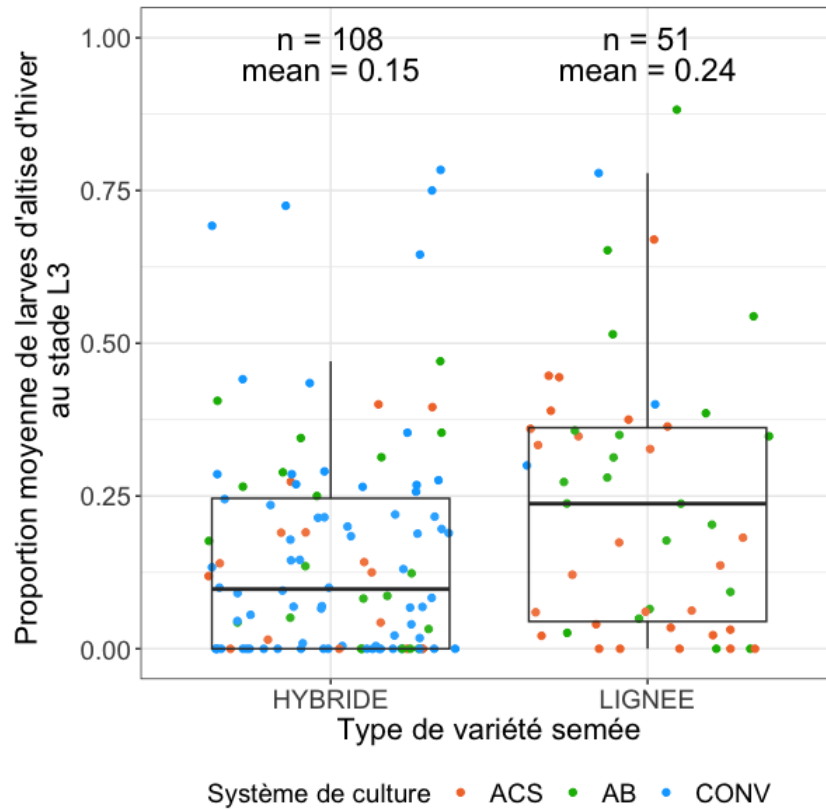


Figure 1. 28 : Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 selon le type de variété semée (« Hybride » ou « Lignée »). Une distinction des systèmes de culture a été faite via différentes couleurs.

3. Les états du milieu : une influence non négligeable du colza et de son développement sur la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3

Dans une analyse similaire à la précédente, nous avons testé les effets des états du milieu observés dans les parcelles à l'aide de six modèles (Tableau 1.6 : Modèles 17 à 22). En effet, nos premiers Random Forest (Annexe : Figure S.1.8) ont démontré une importance de la masse fraîche dans l'explication du pourcentage de larves au stade L3. Importance qui a été confirmée par les modèles 17 à 19. Nous avons donc décidé de faire une nouvelle série de Random Forest (Annexe : Figure S.1.9) et de modèles (Tableau 1.6 : Modèles 20 à 22), afin de tester l'impact potentiel des états du milieu observés dans les parcelles en automne, en excluant donc la masse fraîche.

Dans les modèles 17 à 19 (Tableau 1.17), nous avons observé un fort effet positif de la masse fraîche sur la proportion moyenne de larves d'altises au stade L3.



Tableau 1. 17 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (glmmTMB : $n = 161$). Les résultats présentés sont ceux des modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 17)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.86	0.19	0.19	9,86	< 0.001 ***		380
	SC croûte de battance	0.003	0.03	0.03	0.10	0.921	0.05	
	SC litière	-0.01	0.05	0.05	0.17	0.868	0.06	
	SC culture	0.06	0.12	0.12	0.46	0.645	0.24	
	SC plantes compagnes	-0.002	0.03	0.03	0.06	0.953	0.04	
	SC adventices	-0.03	0.10	0.10	0.31	0.755	0.15	
	Masse fraîche	0.72	0.11	0.12	6.26	< 0.001 ***	1	
	Traitement	0.002	0.07	0.07	0.04	0.972	0.04	
	Année	0.20	0.30	0.30	0.67	0.504	0.39	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	0.01	0.05	0.05	0.15	0.882	0.07	
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 18)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.86	0.19	0.19	9.94	< 0.001 ***		377
	SC croûte de battance	0.003	0.03	0.03	0.10	0.918	0.05	
	SC litière	-0.01	0.05	0.05	0.17	0.864	0.07	
	SC culture	0.06	0.13	0.13	0.48	0.632	0.26	
	SC plantes compagnes et adventices	-0.03	0.10	0.10	0.29	0.773	0.14	
	Masse fraîche	0.72	0.11	0.12	6.25	< 0.001 ***	1	
	Traitement	0.002	0.07	0.07	0.04	0.971	0.04	
	Année	0.20	0.30	0.30	0.67	0.502	0.39	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	0.01	0.05	0.05	0.15	0.878	0.08	
	Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 19)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.85	0.18	0.18	10.04	< 0.001 ***	
SC croûte de battance		0.004	0.04	0.04	0.12	0.905	0.07	
SC litière		-0.01	0.06	0.06	0.20	0.841	0.09	
SC couvert végétal		0.04	0.11	0.11	0.38	0.705	0.18	
Masse fraîche		0.73	0.11	0.11	6.45	< 0.001 ***	1	
Traitement		0.003	0.08	0.08	0.04	0.966	0.06	
Année		0.18	0.29	0.29	0.63	0.529	0.36	
$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)		0.002	0.04	0.04	0.06	0.951	0.06	

Nous n'avons observé qu'un seul effet significatif, dans le modèle 20 (Tableau 1.18). Il s'agit d'un effet positif du pourcentage surfacique de culture : plus le colza couvre le sol, plus il y a une forte proportion de larves au stade L3. Les autres états du milieu testés n'ont aucun effet significatif. De même, l'application d'un insecticide, l'année de suivi et le paysage apparaissent sans effet sur la proportion de larves au stade L3.



Tableau 1. 18 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (glmmTMB : $n = 162$). Les résultats présentés sont ceux du modèle moyen (full average) issu de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction *scale* et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Seul le modèle ayant des relations significatives entre la variable réponse et un état du milieu est présenté ici. Les résultats des autres modèles sont présentés en annexe, dans le Tableau S.1.10. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Proportion moyenne de larves d'altises au stade L3 par plante (Modèle 20)	Intercept	-1.69	0.21	0.21	8.06	< 0.001 ***		439
	(Traitement NON, Année 2021)							
	SC croûte de battance	0.02	0.08	0.08	0.29	0.771	0.13	
	SC litière	-0.004	0.04	0.04	0.10	0.920	0.05	
	SC culture	0.39	0.16	0.16	2.41	0.016 *	0.96	
	SC plantes compagnes	-0.01	0.05	0.06	0.19	0.846	0.07	
	SC adventices	-0.14	0.20	0.20	0.69	0.491	0.41	
	Traitement	-0.02	0.11	0.11	0.16	0.871	0.06	
	Année	0.20	0.33	0.33	0.60	0.546	0.34	
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	-0.003	0.03	0.03	0.08	0.936	0.04	

4. Effets de la régulation top-down

Grâce à trois modèles (Modèles 23 à 25), avec plus ou moins de détails concernant les populations de carabes, nous avons testé une possible régulation *top-down* des premières populations de larves présentes dans les parcelles, les mêmes qui conduiront aux larves au stade L3 dénombrées. Cependant, aucune variable explicative n'a d'effet significatif. Les résultats des modèles sont visibles en annexe, dans le Tableau S.1.11.

Ces trois modèles prenaient également en compte l'effet de l'application d'un insecticide, de l'année de suivi et du paysage. Cependant, nous n'avons observé aucun effet significatif de ces éléments.



5. Bilan des analyses

Après avoir utilisé différents modèles, nous avons pu observer des effets significatifs et des tendances de quelques éléments qui sont présentés sur la Figure 1.29. Le seul effet significatif est celui du pourcentage surfacique de la culture, qui est positif. Deux tendances ont tout de même été observées. La première liée au type de variété semée : les variétés de type lignée ont tendance à avoir des proportions de larves au stade L3 plus importantes. La seconde est une tendance positive de l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 dans un rayon de 750 m. Nous avons également observé l'effet de l'année de suivi : les proportions de larves d'altises d'hiver au stade L3 sont plus importantes en 2022 qu'en 2021. Cependant, cet effet pourrait être limité, car il n'est présent que dans les modèles testant l'effet du paysage et dans le premier modèle exploratoire testant l'effet des systèmes de culture classiques. En revanche, nous n'avons observé aucun effet de la régulation *top-down* sur la proportion moyenne de larves au stade L3 observées dans les plantes.

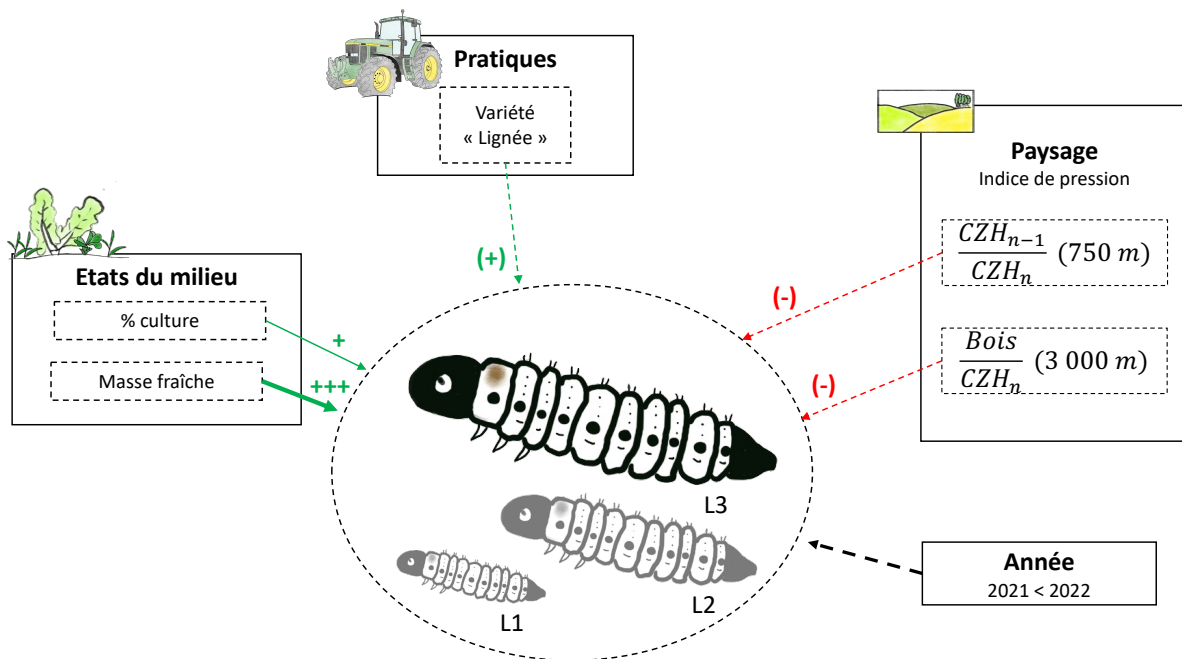


Figure 1. 29 : Schéma bilan des résultats issus des analyses effectuées afin de tester les effets de différents éléments sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante. Ces éléments sont relatifs au paysage, aux itinéraires techniques et aux états du milieu qui sont la conséquence indirecte des pratiques agricoles. Aucun élément relatif aux prédateurs n'ayant d'effet significatif, cette composante n'est pas présente dans le schéma. (@Dessins de Justine Pigot)



V. Discussion

Au cours de notre étude, nous avons observé plusieurs des effets supposés des pratiques et des états du milieu issus de la bibliographie, notamment ceux inhérents au couvert végétal. Cependant, la régulation *top-down*, ou encore le paysage pris en covariable, semblent avoir un effet très limité sur nos variables de réponse. D'autres éléments pris en covariables semblent également influents. Ainsi, nous avons observé une autocorrélation spatiale pour deux de nos variables réponses et un effet de l'année de suivi. Bien que ces éléments ne fassent pas partie à part entière des objectifs de notre étude, il demeure important de les prendre en compte.

En premier lieu, nous discuterons de ces éléments, puis nous évoquerons les effets des variables étudiées (pratiques, états du milieu, régulation *top-down*) sur nos variables de réponse. Enfin, nous discuterons les limites et perspectives de notre étude.

A. Des populations d'altises d'hiver réparties selon un gradient nord-sud possiblement en lien avec un effet de la répartition des systèmes de culture

Nous avons constaté la présence d'autocorrélations spatiales concernant les populations de larves d'altise et la proportion de larves au stade L3 au sein des populations, mais il n'y en a pas pour le risque lié aux altises. Nous avons observé la présence d'un gradient nord-sud : les populations d'altises sont plus importantes au nord que dans le sud de notre région d'étude. Le même constat est également fait pour la proportion de larves au stade L3. Ce gradient pourrait être lié au fait que nous avons un plus grand nombre de parcelles conduites en agriculture biologique dans le nord que dans le sud de notre région d'étude. Or, ces parcelles ont tendance à avoir des populations d'altises plus importantes.

Concernant la proportion de larves au stade L3, cela traduit une colonisation des parcelles plus précoce au nord qu'au sud. Bonnemaïson (1965) avait observé des vols plus précoces au nord qu'au sud de la France, ce qui pourrait sembler en accord avec notre observation, mais Bonnemaïson travaillait sur un gradient de latitude beaucoup plus important que le nôtre. Cependant, en analysant les différents Bulletins de Santé du Végétal (BSV) des régions Ile-de-France et Centre-Val de Loire, nous faisons le constat inverse. Pour les deux campagnes (2021 et 2022), le début des captures et le pic de colonisation étaient plus tardifs en Ile-de-France que dans le Centre-Val de Loire. Pour les deux campagnes, le début des captures est début septembre dans le Centre-Val de Loire et mi-septembre en Ile-de-France. Quant au pic de colonisation, il a lieu quatre jours plus tard en Ile-de-France que dans le Centre-Val de Loire. Ces constats tendraient donc à témoigner d'un gradient inverse : des colonisations plus précoces au sud qu'au nord du Bassin Parisien. Cependant, la zone couverte par les BSV est bien plus importante que notre région d'étude, il est donc possible que le constat soit différent à une échelle plus petite.

B. Un effet de l'année de suivi probablement lié aux conditions météorologiques

Nous avons observé des effets de l'année de suivi plus ou moins importants selon nos variables réponses. Les effets les plus importants sont sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante et le risque associé : ils étaient moindres en 2022 qu'en 2021. Un même constat a été fait dans les BSV des deux régions couvrant la zone de notre étude. Cela pourrait s'expliquer par les conditions météorologiques de l'automne 2022 qui peuvent avoir des effets sur les vols de migrations et les pontes. En effet, en automne 2022 la température moyenne était plus fraîche qu'en 2021, notamment en août (22°C en 2021 contre 19°C en 2022). Cela reste une température assez élevée pour permettre des vols, Bonnemaïson (1965) ayant noté une température minimale de 16°C pour leurs déplacements.



Cependant, la présence de fortes précipitations a pu également limiter les vols d'altises et donc la colonisation des parcelles. En effet, Conrad *et al.* (2021) ont noté que les migrations des altises d'hiver depuis les sites d'estivation étaient favorisées par des conditions météorologiques chaudes et sèches.

Les conditions météorologiques ont également pu impacter la ponte et donc le nombre de larves présentes dans les parcelles. En effet, Ortega-Ramos *et al.* (2023) ont constaté que des conditions chaudes et sèches en août avaient un effet positif sur le nombre de larves présentes en automne. Des conditions sèches peuvent augmenter le nombre de vols en août, ce qui conduit à des colonisations plus précoces et donc des périodes de reproduction et de ponte plus longues (Ortega-Ramos *et al.*, 2023 ; Tixeront *et al.*, 2023). De même, une augmentation de la température conduit à une augmentation du nombre d'œufs et du taux d'oviposition, ainsi qu'à une réduction de la période de pré-ponte (Mathiasen *et al.*, 2015) et du temps de développement des œufs (Vig, 2003). Cependant, des températures supérieures à 25°C peuvent avoir un effet négatif sur les populations de larves en détruisant les œufs (phénomène de dessiccation) et en réduisant la longévité des femelles (Vig, 2003; Mathiasen *et al.*, 2015). De telles températures n'ont toutefois pas été atteintes dans notre zone d'étude (selon les températures moyennes mensuelles, présente dans la partie « Matériels et méthodes de la thèse »).

En ce qui concerne le risque lié aux larves d'altises d'hiver, étant fortement lié aux populations d'altises, il était plus faible en 2022 qu'en 2021. Ce constat est visible dans les BSV où les risques annoncés sont pratiquement restés au niveau « faible » tout au long de l'automne 2022.

L'effet de l'année de suivi était plus limité et inverse sur la proportion de larves au stade L3 au sein des populations. En effet, la proportion était plus grande en 2022 qu'en 2021, ce qui peut traduire une colonisation plus précoce en 2022 qu'en 2021. Grâce à l'analyse des BSV, nous avons constaté que bien que la date de début de capture soit identique entre les deux années, le pic de colonisation a eu lieu un peu plus tôt en 2022 qu'en 2021 (par exemple, en Centre-Val de Loire, en 2021 le pic a eu lieu autour du 25 septembre et en 2022 autour du 20 septembre).

C. Un effet limité du paysage sur les populations d'altises d'hiver et leur dynamique

Bien que nous ayons testé plusieurs variables paysagères, la seule ayant un effet est le ratio lié au pourcentage de colza présent à l'année n-1 par rapport au pourcentage de colza présent à l'année n. Cette variable paysagère avait un effet positif sur le nombre moyen de larves d'altise par plante, dans les rayons d'étude 750 et 1000 m, et sur le risque lié, aux rayons d'étude 750, 1000 et 1500 m. La présence de cet effet suggère l'existence d'un lien entre la pression d'altises et le pourcentage de colza à l'année n-1. Ainsi, lorsqu'un colza est implanté dans une zone où la culture était fortement présente à la campagne précédente, il faut s'attendre à une plus forte pression liée aux altises d'hiver, probablement en raison d'un plus grand réservoir de ravageurs présents dans le paysage. De même, un faible pourcentage de colza présent l'année n peut conduire à une pression plus forte sur ces parcelles (absence de dilution). Ce constat est important lorsque la gestion des ravageurs est réfléchi à l'échelle paysagère. Or, ce type de variable n'est pas toujours pris en compte dans les études (Skellern *et al.*, 2017).

En revanche, cette variable paysagère avait une tendance à un effet négatif sur la proportion de larves au stade L3 au sein des populations échantillonnées dans les parcelles, dans un rayon d'étude de 750 m. Ceci traduit une colonisation plus tardive des colzas lorsqu'il y avait un plus grand pourcentage de colza à l'année n-1. Cela pourrait être dû à la présence de repousses de colza dans le paysage, qui peuvent également attirer les altises sortant d'estivation. Cela peut également traduire



une faible présence de colza l'année n. Cela pourrait provoquer une colonisation plus tardive, car les parcelles peuvent alors être éloignées et plus difficiles à localiser.

Nous avons remarqué que les effets liés à cette variable paysagère étaient observables dans des rayons proches de 1000 m (750 à 1500 m). Or, il est assez courant d'avoir une réponse des insectes aux variables paysagères dans un rayon de 1000 m, c'est d'ailleurs un rayon souvent utilisé dans les études (Skellern *et al.*, 2017). En effet c'est un cercle d'action de courte distance pour l'exploration des ressources (Foraging zone)

Nous nous attendions à avoir également un effet du ratio lié au pourcentage de bois par rapport au pourcentage de colza l'année n dans le paysage sur nos variables réponses. Cependant, nous n'avons observé qu'une tendance négative de cette variable paysagère sur la proportion de larves au stade L3, au rayon d'étude 3000 m. Ce résultat est contraire à ce que nous pensions avoir, c'est-à-dire un effet positif du pourcentage de bois, car c'est un lieu d'estivation privilégié des altises d'hiver (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b; Pigot *et al.*, 2023) et ainsi, un possible réservoir. Bien que l'effet au rayon de 3000 m ne soit pas surprenant, car les altises adultes peuvent parcourir jusqu'à quatre kilomètres depuis leurs lieux d'estivation (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b), nous nous attendions à avoir des effets à des rayons plus petits. Cependant, un constat similaire se trouve dans l'étude de Skellern *et al.* (2017) sur méligèthes (coléoptères du colza) : ils n'ont pas observé d'effets des bois dans un rayon de 1000 m sur les populations de méligèthes colonisant les parcelles de colza au printemps, alors que les bois constituent des lieux d'hivernation.

Enfin, la dernière variable paysagère étudiée était la surface des parcelles suivies. Nous nous attendions à avoir plus de larves dans les plus grandes parcelles, car nous les supposons plus facilement visibles dans le paysage. En effet, au Royaume-Uni, Ortega-Ramos *et al.* (2023) avaient observé un plus grand nombre de larves d'altises dans les parcelles de plus de 12 ha. Cependant, nous n'avons constaté aucun effet de la surface des parcelles suivies.

Les effets limités du paysage sur les populations de larves d'altises d'hiver et leur dynamique ne sont pas forcément étonnants car le paysage impacte surtout les adultes au moment de leur migration vers les parcelles. Nous n'avons pas mesuré les populations d'adultes, mais les populations de larves. Or, les populations de larves ne dépendent pas seulement des populations d'altises, mais également de nombreux autres éléments qui peuvent les affecter, comme le taux de ponte, l'usage d'insecticides au sein des parcelles ou encore la prédation potentielle des œufs et des larves.

D. Analyse de l'impact des pratiques sur les populations de larves, les risques liés et leur dynamique de colonisation

1. Une classification classique des systèmes de culture tenace, mais qui mérite d'être affinée pour approcher la diversité présente

Nous avons tenté de regrouper les parcelles selon les systèmes de culture, tout en essayant de nous affranchir du regroupement en trois grands types de systèmes de culture couramment fait (agriculture conventionnelle, biologique et de conservation des sols), car cette classification peut être limitante. Nous souhaitions affiner cette classification classique où nous avons placé les agriculteurs, et non les parcelles, car chez un même agriculteur, deux parcelles peuvent être conduites différemment. De plus, nous disposons d'un gradient de pratiques, ce qui fait que certains de nos agriculteurs pouvaient être dans un système, tout en étant proches d'un autre (par exemple un agriculteur conventionnel qui travaille peu le sol et met peu de pesticides). Cependant, même en utilisant un regroupement par clustering fondé sur les itinéraires techniques des parcelles l'année n, nous avons abouti à un regroupement très proche de l'initial. La classification couramment utilisée semble donc plutôt robuste, c'est peut-être la raison pour laquelle elle demeure très utilisée dans les études. Cependant,



l'utilisation des systèmes de culture comme facteur de variation devrait être couplée à d'autres éléments afin d'affiner les études et gagner en compréhension.

Il semble possible d'affiner les effets des systèmes de culture en se fondant à la fois directement sur les itinéraires techniques (effets directs des pratiques) et sur les états du milieu observés (effets indirects des systèmes). En effet, tout comme il existait des variabilités au sein des pratiques, il en existe également au sein des états du milieu observés dans les parcelles suivies. C'est donc ce que nous avons fait dans cette étude et nous avons constaté que l'utilisation des états du milieu comme variables explicatives rendait nos modèles plus informatifs que lorsque les systèmes de culture étaient utilisés (AICc plus faibles). L'analyse des itinéraires techniques semble être plus informative que l'analyse des états du milieu. Cependant, les états du milieu présentent un avantage non négligeable : ils permettent de contrebalancer les manques ou les incohérences constatés lors des questionnaires aux agriculteurs, qui ne se souviennent pas toujours très bien de toutes les informations. Certains éléments des itinéraires techniques demeurent indispensables, comme l'utilisation d'insecticides, dont les conséquences ne sont pas visibles en observant les états du milieu. Finalement, l'utilisation des deux éléments apparaît complémentaire.

2. Analyse des effets des pratiques : un effet prédominant de l'utilisation des insecticides

Les relations observées entre les pratiques et les variables réponses sont résumées sur la Figure 1.30.

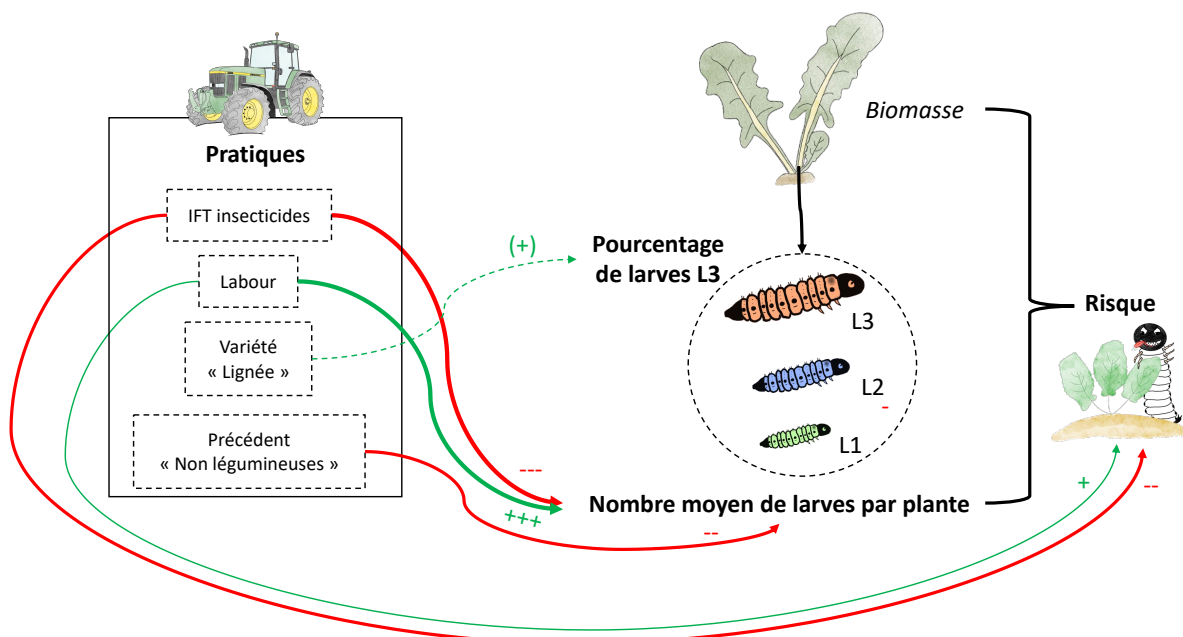


Figure 1. 30 : Schéma récapitulatif des relations observées dans les différents modèles entre des pratiques et les variables réponses. (@Dessins de Justine Pigot)

Nous avons observé un effet négatif significatif de l'IFT insecticide sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver et sur le risque associé. L'utilisation d'insecticides demeure donc un levier relativement efficace pour contrôler les populations de larves et le risque lié, malgré les impasses parfois rencontrées vis-à-vis de l'apparition de résistances (Robert et Ruck, 2022b). En revanche, nous n'avons pas observé d'effet des insecticides sur le pourcentage de larves au stade L3. Cette absence d'effet peut être liée à des applications d'insecticides trop tardives, lorsque les larves sont déjà entrées dans les plantes et sont donc relativement protégées.



Nous avons également observé un effet positif du labour sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver et le risque associé. A première vue, cet effet pourrait être confondant avec les systèmes de culture et notamment avec l'agriculture biologique. En effet, beaucoup d'agriculteurs en AB labourent leurs parcelles (Annexe : Tableau S.1.1) et dans notre étude, de nombreuses parcelles en AB présentaient des populations de larves d'altises d'hiver importantes (ce sont des parcelles en AB qui ont les valeurs maximales) et un risque « MOYEN-FORT ». Cependant, plusieurs études ont observé des effets du labour, et du travail du sol en général, avec des infestations de larves d'altises d'hiver plus faibles dans les systèmes sans ou avec peu de travail du sol que dans les systèmes avec labour, ceci indépendamment du type de système de culture (AB vs conventionnel) (Valantin-Morison *et al.*, 2007; Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Dans une communication, Ulber et Schierbaum-Schickler (2003) ont expliqué avoir observé une colonisation plus importante des altises d'hiver adultes et larves dans les parcelles labourées que dans les parcelles sans labour avec un travail du sol limité ou absent. Cet effet positif du labour pourrait s'expliquer par des conséquences indirectes. Il est connu que le labour peut être néfaste à certaines espèces de carabes, c'est par exemple le cas de *Trechus quadristriatus*, prédateur potentiel des altises et qui émerge au moment de la préparation du lit de semence (Warner *et al.*, 2003). De plus, l'absence de labour favorise la présence de chaumes et de résidus en surface des parcelles. Or leur présence pourrait entraver le déplacement des altises adultes et larves, les rendant plus sensibles à la prédation et même limiter la reconnaissance des pieds de colza. Cependant, dans notre étude, nous n'avons pas observé d'effets de la présence de résidus en surface, ni de la prédation des larves d'altises d'hiver par les carabes.

Concernant le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante, nous avons constaté un effet positif du précédent légumineuse. Comme l'effet du labour, cet effet pourrait être confondant avec les parcelles en agriculture biologique. En effet, les agriculteurs en agriculture conventionnelle et de conservation des sols intègrent peu de légumineuses dans leurs rotations, contrairement aux agriculteurs en agriculture biologique. Cependant, dans notre étude, nous avons la moitié des parcelles en AB avec des précédents non-légumineuses, ainsi que quelques parcelles en agriculture conventionnelle et ACS avec des précédents légumineuses. Nous avons observé la même tendance dans tous les systèmes de culture : les précédents légumineuses semblent associés à un plus grand nombre de larves (Figure 1.31). Il est connu qu'un précédent légumineuse permet d'augmenter le rendement du colza. Ce gain peut être dû à la présence d'un reliquat azoté, mais également à d'autres éléments, comme une meilleure structure du sol, qui permettent une meilleure implantation et un meilleur développement des colzas. *In fine*, cela pourrait rendre les colzas plus facilement repérables par les ravageurs. Cependant, les études observent peu d'effets des précédents culturaux sur les ravageurs du colza (Hegewald *et al.*, 2018). De plus, dans notre analyse des états du milieu (partie suivante V.E.), nous observons plutôt une relation inverse : une culture plus développée et/ou plus dense est associée avec un nombre plus faible de larves.

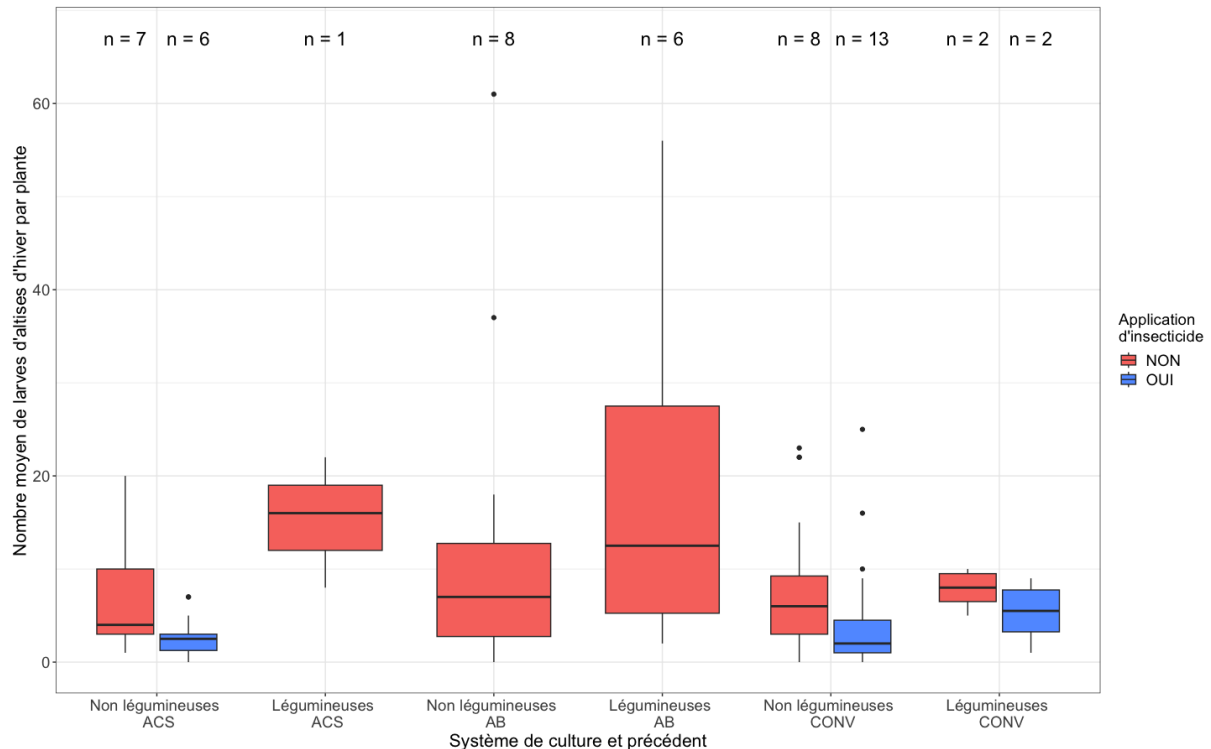


Figure 1.31 : Nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante selon le précédent cultural, le système de culture et la présence d'un traitement insecticide

Le dernier effet des pratiques que nous avons observé est une tendance du type de variétés implantées sur la proportion de larves au stade L3. En effet, les parcelles avec des variétés de type « lignée » ont tendance à présenter une plus grande proportion de larves au stade L3 que les parcelles avec des variétés de type « hybride », ce qui signifie une colonisation plus précoce des colzas de « lignée ». Les variétés de colza de type « lignée » sont plutôt utilisées par les agriculteurs en AB et en ACS (IV.G.2 : Figure 1.28, Annexe : Tableau S.1.1), cette tendance pourrait donc être liée au système de culture. Une autre explication pourrait être liée au fait que les colzas de variétés de type « hybride » se développent normalement plus vite que les colzas de type « lignée » (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Cependant, cette caractéristique favoriserait plutôt la reconnaissance des colzas de type « hybride ». C'est en effet dans ce sens que répondent les états du milieu (partie suivante V.E.) : lorsque la couverture végétale augmente, le pourcentage de larves au stade L3 augmente. Enfin, la dernière explication que nous envisageons a trait à la reconnaissance olfactive des colzas et n'est pas vérifiable par notre étude. Nous n'avons pas trouvé d'études comparant l'infestation des colzas de type « hybride » et des colzas de type « lignée » par les larves d'altises. Cependant, une étude de Döring et Ulber (2020) fondée sur des expériences faites en laboratoire s'est intéressée à l'impact de la teneur en glucosinolate de différentes variétés de colza et d'autres espèces de Brassicacées pouvant être hôtes pour les larves d'altises d'hiver. Ils n'ont pas constaté d'effet de cette variable, mais ont observé un moins bon développement des larves dans certaines espèces de Brassicacées comme la moutarde blanche (*Sinapis alba* L.). Ils n'ont pas identifié les éléments en cause, mais cela montre une potentielle forte influence de certaines molécules présentes dans les Brassicacées sur ce ravageur, qui pourrait être utilisée dans des programmes de sélection. Nous avons cependant noté la commercialisation récente d'une variété de colza dite « piège » par KWS, sous le nom de « KWS ESCAPE ». Cette variété est plus attractive pour les altises d'hiver et doit être mélangée avec la variété principale « d'intérêt », à raison de 7 %. Elle permettrait de réduire de 30 % les larves d'altises (KWS, 2023).

Nous avons été surpris de ne pas avoir d'effet de la date de semis sur les différentes variables réponses. Cet élément est pourtant mentionné dans de nombreuses études s'intéressant aux altises d'hiver (Bonnemaison, 1965; White *et al.*, 2020; Ortega-Ramos *et al.*, 2023). Nous avons une diversité



de dates de semis, que nous avons regroupées en deux périodes (première et deuxième quinzaine d'août), mais aucun de nos agriculteurs n'avait semé de colza en septembre. Or, les études ayant observé un effet de la date de semis ont souvent comparé des semis faits en août et en septembre. Ainsi, l'absence d'effet dans notre étude pourrait être dû au fait que toutes nos dates de semis peuvent être considérées comme plutôt précoces avec des conditions météorologiques favorables à la croissance et au développement rapide des couverts de colza.

3. Analyse des états du milieu : l'importance du couvert végétal dans la gestion des larves d'altises d'hiver

Nous avons constaté plusieurs effets des états du milieu observés dans les parcelles qui sont liés à la couverture végétale. Les relations observées entre ces éléments et les variables réponses sont résumées sur la Figure 1.32.

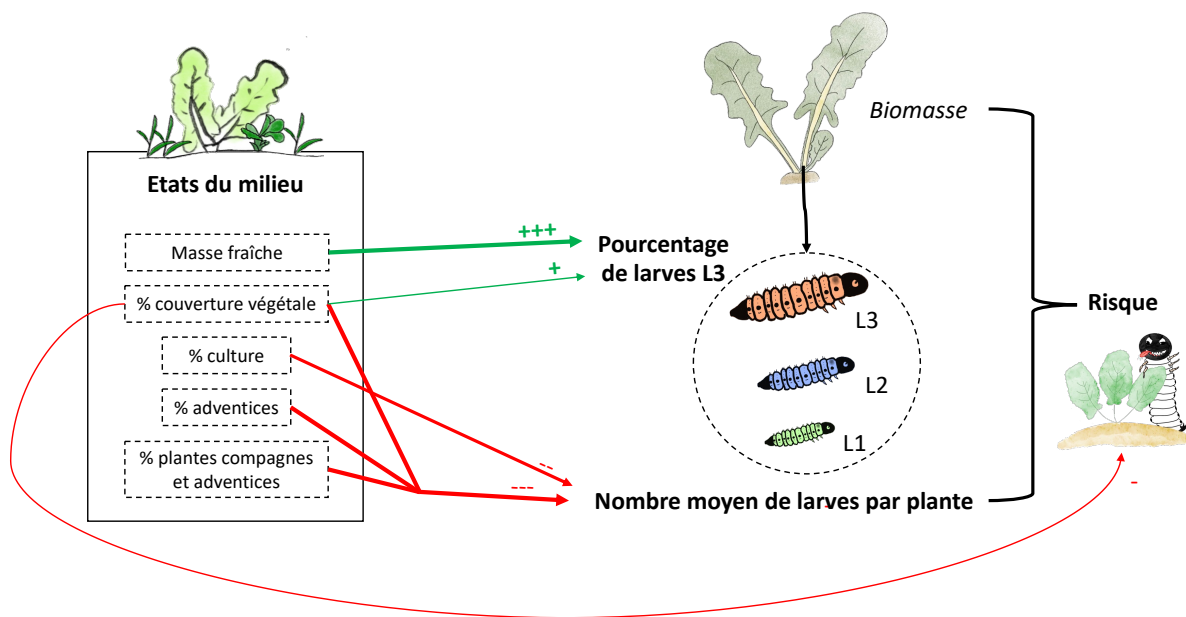


Figure 1. 32 : Schéma récapitulatif des relations observées dans les différents modèles entre des états du milieu et les variables réponses. (@Dessins de Justine Pigot)

Tout d'abord, nous avons constaté un effet négatif du pourcentage surfacique en culture sur le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante. Cela pourrait être un effet de dilution de la population lorsque le colza est plus développé ou plus dense. En effet, Ortega-Ramos *et al.* (2022) avaient noté que les infestations de larves avaient tendance à diminuer lorsque la densité du colza augmentait. Nous avons observé une relation inverse avec la proportion de larves au stade L3, ce qui traduit une infestation plus précoce lorsque le colza est plus dense ou plus développé. Le lien entre une infestation plus précoce et un colza plus développé est appuyé par la relation positive entre la masse fraîche et le pourcentage de larves au stade L3. Cela pourrait être lié à une reconnaissance facilitée pour les altises adultes et larves.

Nous n'avons pas observé de relation entre le pourcentage de surface en culture et le risque associé aux larves d'altises. En revanche, nous avons constaté un effet négatif du pourcentage surfacique en couvert végétal. Ainsi, ce n'est pas seulement la culture qui permet de limiter le risque lié aux larves, mais l'ensemble de la végétation présente, comme les adventices ou les plantes compagnes. De même, nous avons observé un effet similaire sur le nombre moyen de larves par plante. Cette variable réponse nous permet de creuser ce point inhérent à la couverture végétale et sa diversité. En effet, nous avons



observé un effet négatif de la présence d'autres espèces végétales que le colza, notamment des adventices. Cependant, ce constat pourrait être élargi aux plantes compagnes, moins problématiques pour la culture que les adventices lorsqu'elles sont bien implantées. Malheureusement, dans nos parcelles d'études, les plantes compagnes étaient souvent peu ou pas développées suite à une mauvaise implantation. Ainsi, nous n'avons pas observé de relation liée uniquement à ces dernières. Ainsi, nous concluons que la présence d'autres espèces végétales (plantes compagnes et adventices) au sein d'une culture de colza peut permettre de limiter les populations de larves d'altises d'hiver. Cet effet peut être lié à une limitation de la reconnaissance des colzas par les altises à l'échelle paysagère et parcellaire. A l'échelle paysagère, la présence d'autres plantes que le colza pourrait limiter le contraste colza (vert) – sol (marron) et donc la reconnaissance visuelle des pieds de colza au moment de la colonisation. Cette observation n'est pas incompatible avec la précocité d'infestation des parcelles où le colza est plus développé. En effet, des colzas plus denses ou mieux développés restent probablement assez repérables par les altises qui sortent d'estivation, même en présence d'autres plantes. A l'échelle parcellaire, la présence d'autres plantes peut perturber la reconnaissance olfactive (présence d'autres odeurs) et visuelle (difficulté à reconnaître les pieds de colza), ainsi que le déplacement des altises, en créant des obstacles.

Alors que nous nous attendions à un effet négatif de la présence de résidus, nous n'avons observé aucune relation liée à cette variable. Cette variable ressortait fortement dans les Random Forest qui précèdent les modèles testant l'effet des états du milieu sur le nombre moyen de larves par plante. Cependant, aucune relation significative n'est observée dans les modèles.

E. Une régulation *top-down* limitée

La seule relation que nous avons observée concernant la régulation *top-down* est une relation négative entre l'activité-densité d'araignées et le nombre moyen de larves par plantes. L'étude de Öberg *et al.* (2011) a montré grâce à des analyses PCR que les larves de méligèthes pouvaient être prédatées par les araignées au printemps, notamment par les *Pardosa* (*Araneae* : *Lycosidae*) qui chassent au sol. Les larves pouvaient également être prédatées par les *Theridion* (*Araneae* : *Theridiidae*) qui tissent des toiles. Ils ont également observé une augmentation de la prédation lorsque les populations de larves de méligèthes présentes augmentent. Nous supposons qu'un comportement similaire est possible pour les araignées présentes en automne, notamment celles qui chassent au sol et qui pourraient prédaté les œufs et les larves d'altises d'hiver présents sur le sol. Cependant, nous ne pouvons pas analyser aussi finement les relations liées aux espèces d'araignées et aux méthodes de chasse, car nous n'avons pas identifié les araignées à l'espèce.

F. Des pistes pour les agriculteurs ?

Avec nos observations, nous pouvons identifier plusieurs stratégies possibles afin de minimiser les risques liés aux larves d'altises d'hiver.

La première stratégie se fonde sur l'atténuation de l'impact des larves d'altises d'hiver, en visant des colzas plus développés qui pourront mieux résister aux attaques, même s'ils peuvent être plus facilement repérables et donc subir des infestations plus précoces. Pour cela, il est possible d'implanter des colzas « hybrides » connus pour se développer plus rapidement que les colzas « lignées » (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). Un point d'attention doit également être porté sur la période de semis et sur la fertilisation des colzas en automne. Nous n'avons pas observé de relation entre la période de semis et les larves d'altises d'hiver. Nous pensons qu'à l'heure actuelle, ce n'est pas la période de semis elle-même qui importe, mais surtout les conditions dans lesquelles le colza est implanté. Ainsi, il faut viser les périodes où les sols sont humides, et préserver cette humidité en limitant le travail du sol. La fertilisation des colzas à l'automne doit également être bien réfléchi afin de limiter les carences et



donc un ralentissement du développement des colzas. Pour cela, il est possible de piloter la fertilisation azotée et phosphorée à l'automne, mais également d'implanter des légumineuses gélives (Robert et Ruck, 2019; Champolivier, 2022).

L'association du colza avec d'autres espèces végétales est au cœur de la seconde stratégie : l'évitement des altises d'hiver. En effet, nous avons observé plusieurs relations négatives entre la présence d'autres espèces végétales et les larves d'altises. La présence de ces espèces peut contribuer à camoufler les plants de colza d'un point de vue visuel et olfactif, mais également à limiter le contraste sol-culture qui facilite la reconnaissance des pieds de colza à l'échelle paysagère. Dans notre étude, nous avons observé un effet plus marqué de la présence d'adventices que de la présence de plantes compagnes. Cependant, il n'est pas nécessaire de favoriser la présence d'adventices qui peuvent nuire à la culture. En effet, l'effet est probablement plus marqué uniquement car les adventices étaient mieux développées et couvraient plus de surface que les plantes compagnes. Ainsi, il est possible d'implanter une ou plusieurs espèces végétales, en veillant à maximiser une bonne implantation, afin d'obtenir une bonne couverture végétale, sans qu'elle ne porte préjudice au colza.

La première stratégie est couramment mise en avant dans les stratégies de lutte présentées par Terres Inovia (Robert et Ruck, 2019). La seconde l'est de plus en plus (Wacker, 2021). Cependant, cette seconde stratégie peut être plus complexe à mettre en place et les résultats demeurent incertains, car ils dépendent du succès d'implantation des espèces associées.

L'utilisation d'insecticides demeure un moyen de lutte efficace contre les larves d'altises d'hiver, comme nous l'avons observé. Cependant, si on choisit de recourir à ce mode de lutte, elle doit être faite à bon escient et probablement assez tôt lors d'attaques précoces, en se fondant sur des observations au champ à l'aide de cuvettes jaunes et de Berlèse (Wacker, 2021), ainsi que sur des seuils, tels que ceux proposés par Terres Inovia (Terres Inovia, s.d.).

G. Limites et perspectives

Notre étude présente plusieurs limites. La limite majeure est que nous n'avons pas de quantification des populations d'altises d'hiver adultes qui étaient présentes dans les parcelles. Or, bien qu'il existe une association spatiale entre les altises d'hiver femelles adultes et les infestations de larves en Octobre (Warner *et al.*, 2003), il existe également une forte variabilité de ponte. Ainsi, une forte infestation de larves ne traduit pas forcément la présence d'une forte population d'altises adultes, notamment des femelles. En effet, une femelle peut pondre jusqu'à 1000 œufs (Williams, 2010a), mais ce nombre peut diminuer selon les facteurs abiotiques (par exemple le climat) et biotiques (par exemple à travers les ressources alimentaires disponibles) (Bonnemaison et Jourdeuil, 1954b).

Une autre limite est liée à l'absence de mesure du micro-climat au sein des parcelles (notamment température, humidité). Il est en effet connu que le micro-climat a un impact non négligeable sur les altises d'hiver, à tous les stades (ponte, survie des œufs et des larves), mais également sur les prédateurs.

Notre méthode de piégeage des prédateurs et proies alternatives peut sembler également limitée : nous les avons piégés seulement pendant une semaine, alors que nous supposons que les populations peuvent varier durant l'automne.

Concernant les parcelles et surtout les pratiques en place, nous manquons parfois de précisions sur certains éléments comme les variétés semées ou la densité de semis. Cependant, ces manques semblent difficiles à combler car nous nous fondons sur des questionnaires aux agriculteurs, dont les réponses peuvent être imprécises ou manquantes.



Enfin, dans notre étude du paysage, nous avons identifié deux limites. La première concerne la non prise en compte de la gestion des repousses de colza dans les parcelles en colza l'année n-1. Ces repousses ont pu attirer des altises adultes en automne et donc participer à la dilution des populations dans le paysage. La seconde concerne notre méthode d'étude : nous nous sommes fondés sur des rayons et non sur des distances. Or, les altises adultes sortent majoritairement des lisières de bois pour coloniser les parcelles ; ainsi, il aurait été intéressant de considérer les distances aux bois les plus proches dans notre analyse.

Notre étude comporte également plusieurs perspectives. Nous avons tenté de faire une étude la plus complète possible, c'est pour cela que nous nous avons utilisé trois variables réponses différentes et complémentaires. En effet, il nous semblait intéressant de coupler le nombre moyen de larves d'altises à une notion de risque, plus compréhensible et plus fonctionnelle pour les agriculteurs, ainsi qu'à une dynamique d'infestation en s'appuyant sur le pourcentage de larves au stade L3. La considération de cette dynamique est importante pour affiner les leviers liés à l'atténuation des populations via un bon développement des colzas avant l'arrivée des adultes.

Dans notre étude, nous avons également souhaité approfondir l'effet des systèmes de culture, en l'affinant via l'utilisation des pratiques en place et des états du milieu, conséquences indirectes des pratiques. Ces deux éléments sont très complémentaires, car les états du milieu peuvent combler des manques au sein des pratiques. Inversement, certaines pratiques, comme l'utilisation d'insecticides, ne sont pas visibles au niveau des états du milieu. Dans les deux cas, nous avons obtenu des modèles plus informatifs que lorsque les grandes catégories de systèmes de culture sont utilisées.

Nous espérons que les méthodes que nous avons utilisées, ainsi que nos observations, constitueront des pistes pour de futures expériences.

VI. Annexes

377

How do farming practices and landscape influence the population of cabbage stem flea beetle larvae in oilseed rape fields?

J. PIGOT¹, A. GARDARIN¹, T. DORE¹, M. VALANTIN-MORISON¹.
¹Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie - Palaiseau (France)



Who are the cabbage stem flea beetles?

At the end of summer...

After their aestivation in woodland edges, adults go to newly sown oilseed rape

There, the females lay eggs near plants of oilseed rape, so the larvae can find a plant easily. Larvae enter inside the plant, eat and will spend the winter there. They create a lot of damages.

The **larvae** are responsible of the **most detrimental damages** on oilseed rape for the farmers

Psylliodes chrysocephala is a major pest of oilseed rape (OSR)

Adults and larvae could be disturbed and create less damages...

Effect of landscape

The pressure of flea beetle on oilseed rape present the year n could depend of the percentage OSR present the year n and the year n-1 (concentration and dilution effects¹).

Direct and indirect effect of farming practices

Direct effects: insecticides applications in autumn are detrimental for adults and larvae

Indirect effects: changing the local habitat characteristics: vegetation diversity (companion crops, weeds) or the presence of straw could disturb adults and larvae?

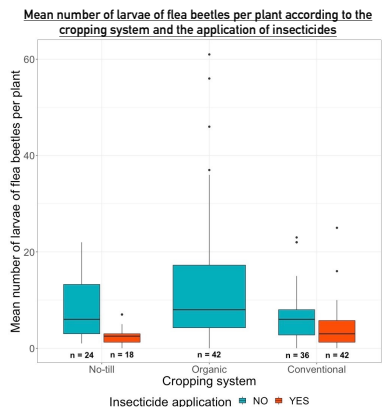
Material & Methods: What did we measure?

During 2 years, we followed 54 oilseed rape fields in the Paris Basin

- In **autumn**, we measured the **local habitat characteristics** at 3 plots within the fields
- In **winter**, we sampled 10 plants per plot and we used a **Berlese funnel** to capture the larvae
- The larvae are **identified** and **counted**
- We described the **local landscape** in seven circular sectors (250 to 3 000 m). With satellite images (Sentinel-hub) and the available land cover BD TOPO. We characterised three elements : the percentage of area covered by (i) **oilseed rape the year n**, (ii) **oilseed rape the year n-1** and (iii) **woodlands**.

Results and discussion

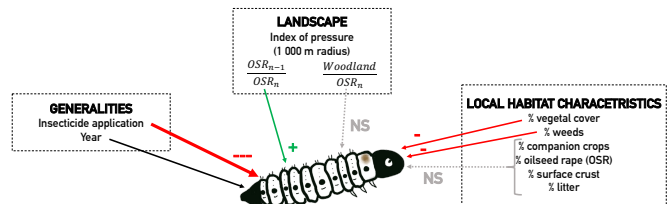
1. A first analysis based on the cropping systems



- With a glmmTMB model, we found no effect of the cropping system but a **strong negative effect of the insecticide application**
- A lot of diversity of practices within a system: **a more detailed analysis is needed**

2. Effects of local habitat characteristics on the number of larvae per plant

With **glmmTMB models** mixing (i) **characteristics chosen** with literature and a random forest, (ii) **landscape characteristics** and (iii) **generalities**, we got the following results:



- The presence of a **big vegetal cover composed of OSR and other plants**, such as weeds, may disturb the females when they lay eggs and the larvae when they have to reach a plant of oilseed rape.
- The landscape mostly affects adults, but an effect of the ratio of OSR the year n-1 and the year n is seen on larvae

WHAT'S NEXT?
 We will analyse the direct effects of farming practices and of the presence of predators, such as carabid beetles, on the number of larvae

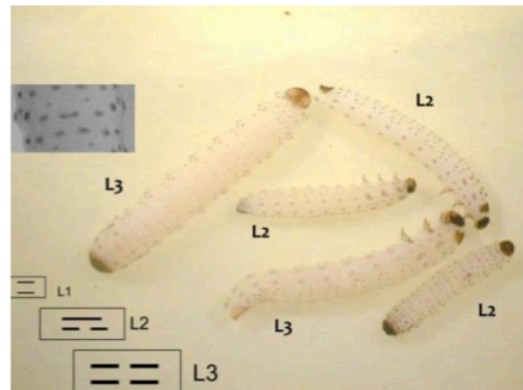
Figure S.1. 1 : Poster présenté lors du meeting SFE² GfÖ EEF qui a eu lieu à Metz du 21 au 25 novembre 2022.



Comment reconnaître les larves d'altises ?

Selon leur stade de développement (L1, L2, L3), les larves, de forme allongée, mesurent de 1,5 à 8 mm et sont de couleur translucide à blanchâtre. Elles sont caractérisées par 3 paires de pattes thoraciques, une tête brun foncé bien développée, et une plaque pigmentée brun foncé à l'extrémité postérieure.

Les 3 paires de pattes thoraciques (visibles à la loupe) et les deux extrémités brunes sont caractéristiques de la larve d'altise et permettent de la différencier de celles de charançons, sans pattes et avec uniquement la tête brune.



Attention aux confusions, les galeries sur les pétioles peuvent être aussi dues aux passages de mouches mineuses. Des larves de diptères sont fréquemment rencontrées dans les pétioles des feuilles.

	Mouche du chou (sur les racines)	Autres diptères dans pétioles et feuilles	Grosse altise dans les pétioles à cette époque de l'année
Taille	5 mm	5 mm	2 mm au stade L1 4 mm au stade L2 6 à 9 mm au stade L3
Forme	larve dodue	larve allongée	larve allongée + 3 paires de pattes

Figure S.1. 2 : Extrait de l'Annexe du Bulletin Santé du Végétal (BSV) Normandie n°23-21 du 04 novembre 2021 (Colza) permettant d'identifier les larves d'altises d'hiver et leur stade de développement. Des éléments similaires peuvent être trouvés chaque année dans les BSV des régions de grande culture.



Chapitre 1

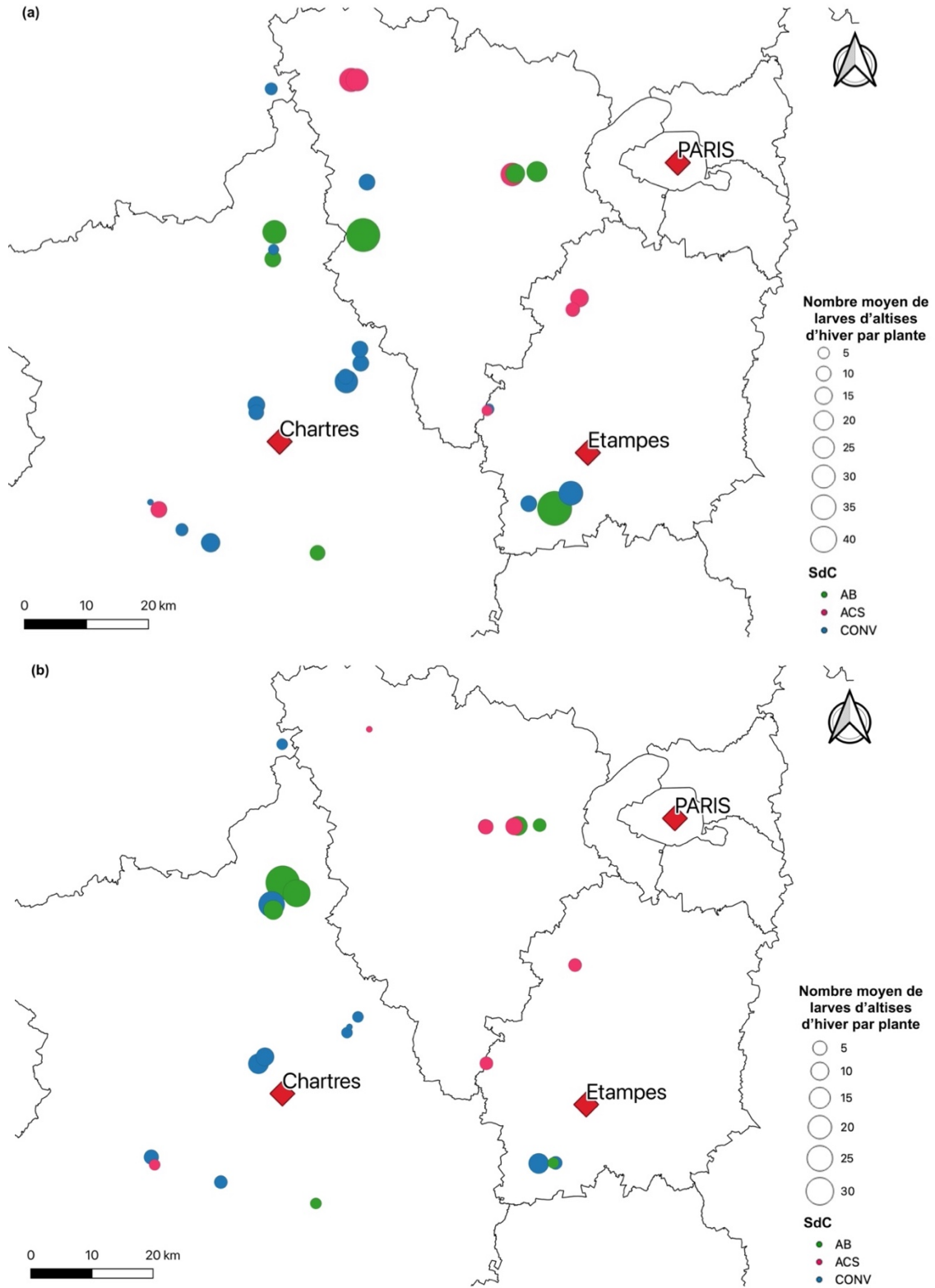


Figure S.1. 3 : Cartes représentant le nombre moyen de larves d'altises d'hiver par plante (via des cercles proportionnels) dans les parcelles suivies en 2021 (a) et en 2022 (b). Une autocorrélation spatiale est détectée en 2022, mais pas en 2021.

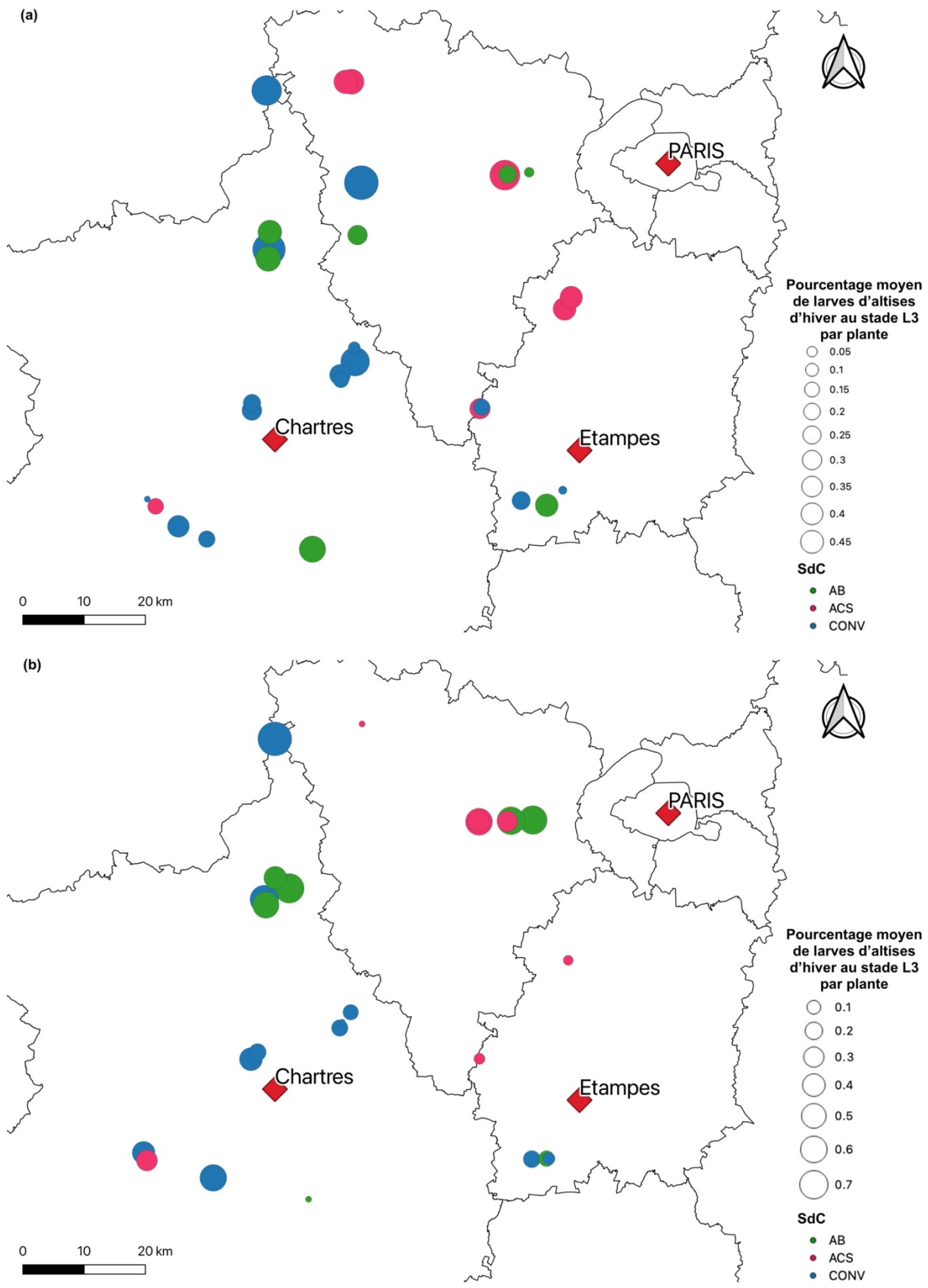


Figure S.1. 4 : Cartes représentant la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (via des cercles proportionnels) dans les parcelles suivies en 2021 (a) et en 2022 (b). Une autocorrélation spatiale est détectée les deux

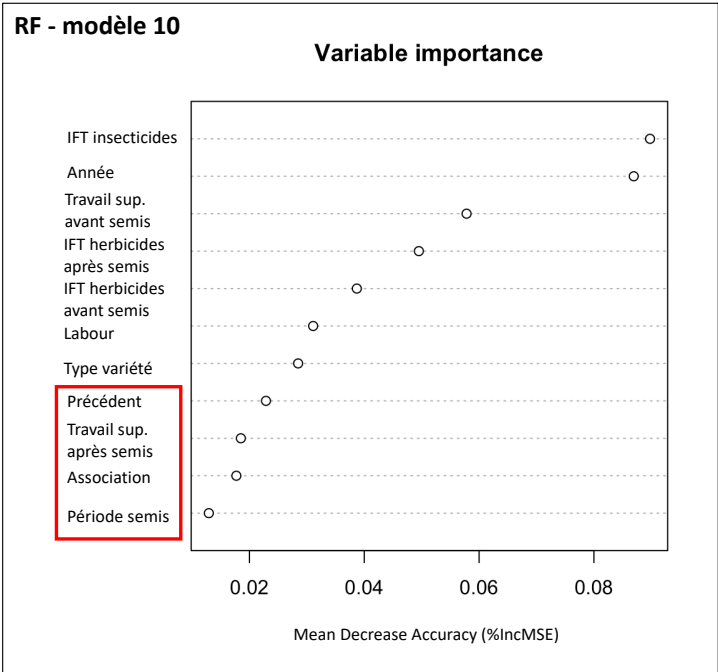


Figure S.1. 5 : Importance des variables testées dans le Random Forest (2 000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi est également prise en compte car elle peut avoir un effet non négligeable sur la variable réponse. Ce Random Forest a servi à sélectionner les variables pour le modèle 10 : les variables encadrées en rouge n'ont pas été intégrées dans le modèle.

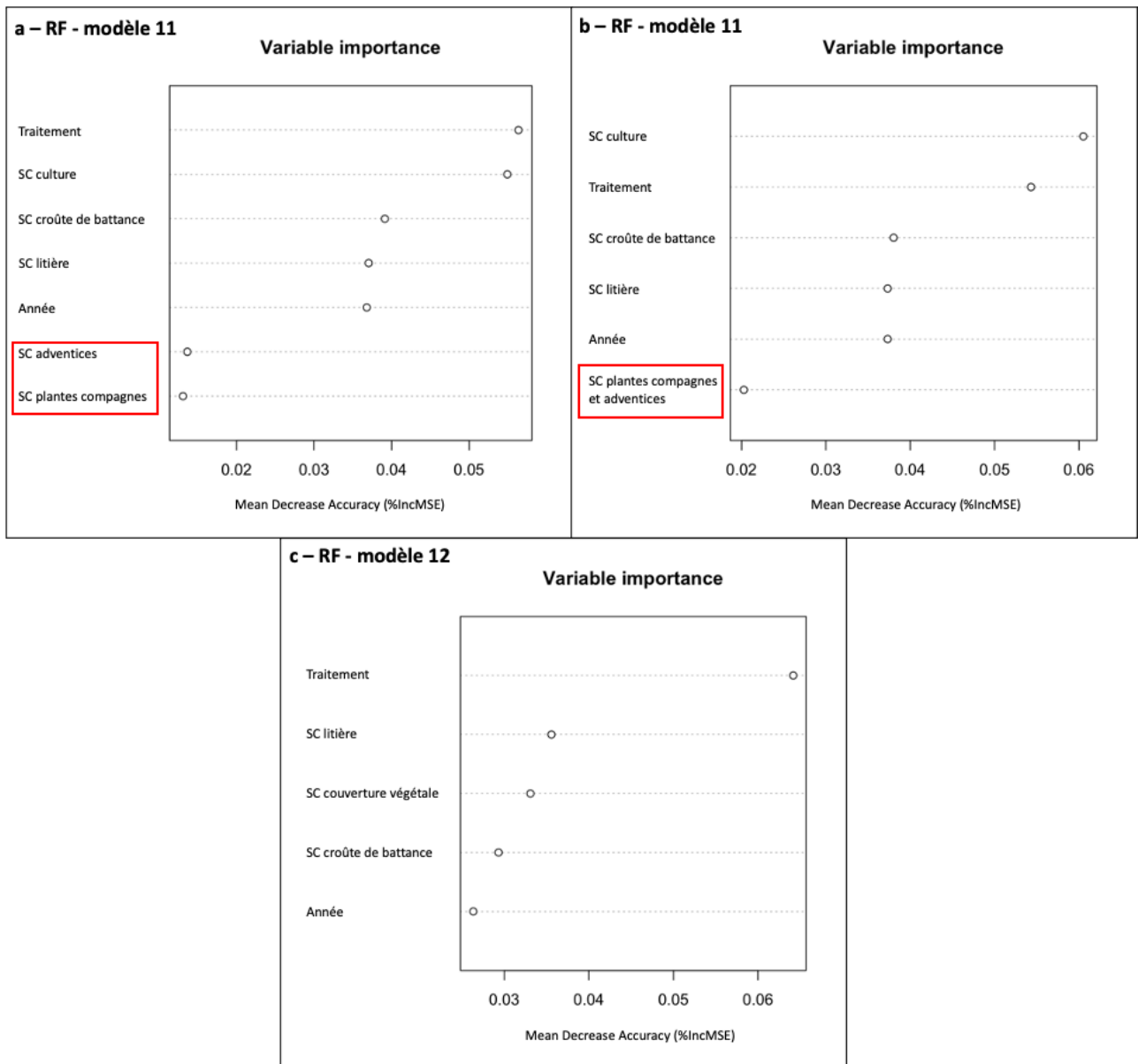


Figure S.1. 6 : Importance des variables testées dans les Random Forest (2000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi et la présence d'un traitement insecticide sont également pris en compte, car ils peuvent avoir un effet non négligeable sur la variable réponse. Ce Random Forest a servi à sélectionner les variables pour les modèles 11 (à et b) et 13 (c) : les variables encadrées en rouge n'ont pas été intégrées dans les modèles.

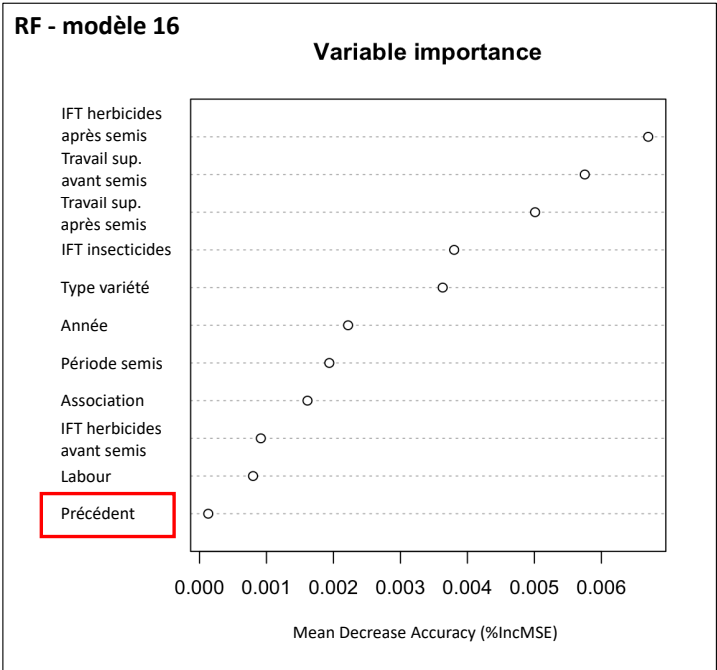


Figure S.1. 7 : Importance des variables testées dans le Random Forest (2 000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi est également prise en compte car elle peut avoir un effet non négligeable sur la variable réponse. Ce Random Forest a servi à sélectionner les variables pour le modèle 16 : les variables encadrées en rouge n'ont pas été intégrées dans le modèle.

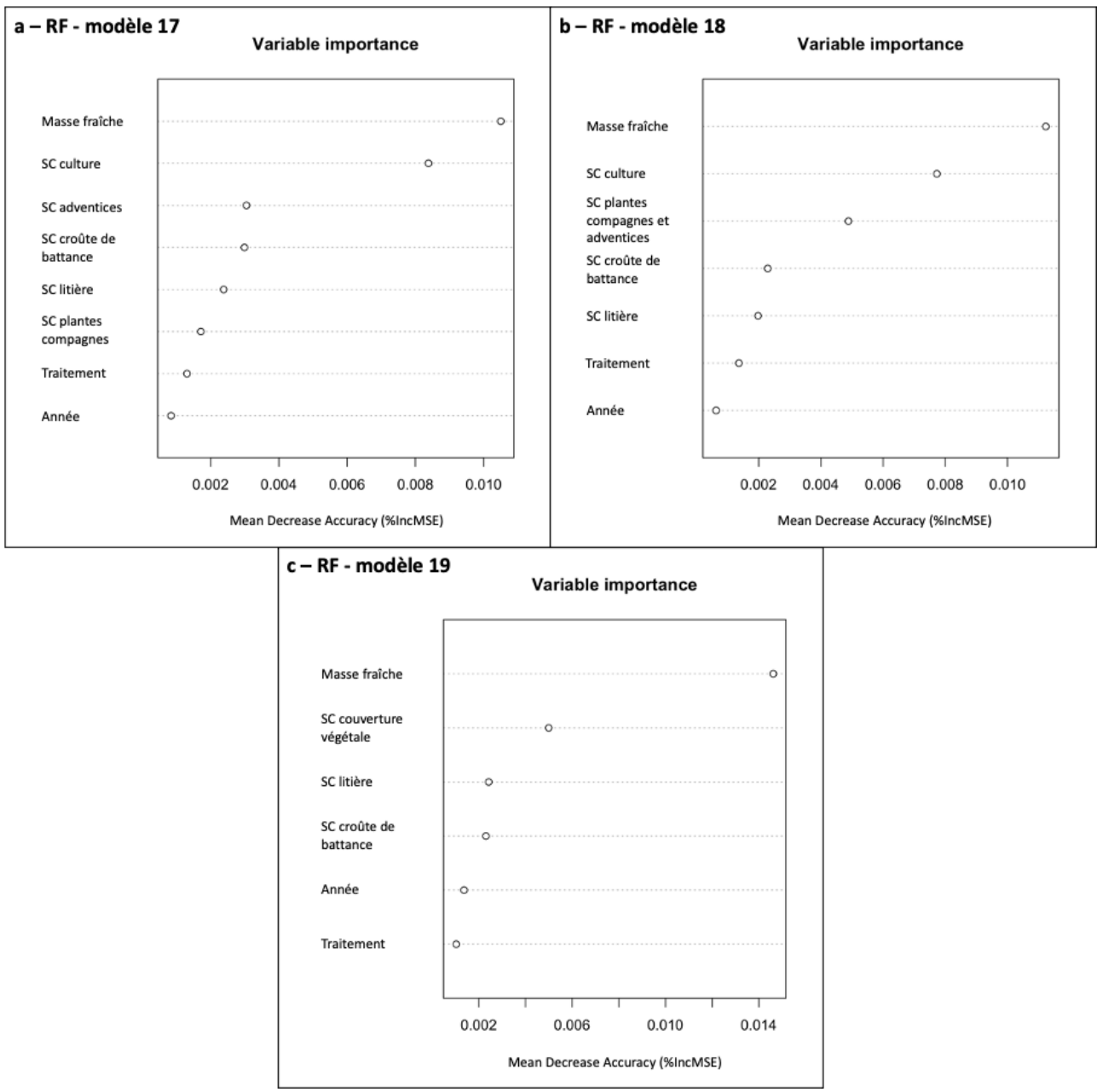


Figure S.1. 8 : Importance des variables testées dans les Random Forest (2000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi et la présence d'un traitement insecticide sont également pris en compte, car ils peuvent avoir un effet non négligeable sur la variable réponse.

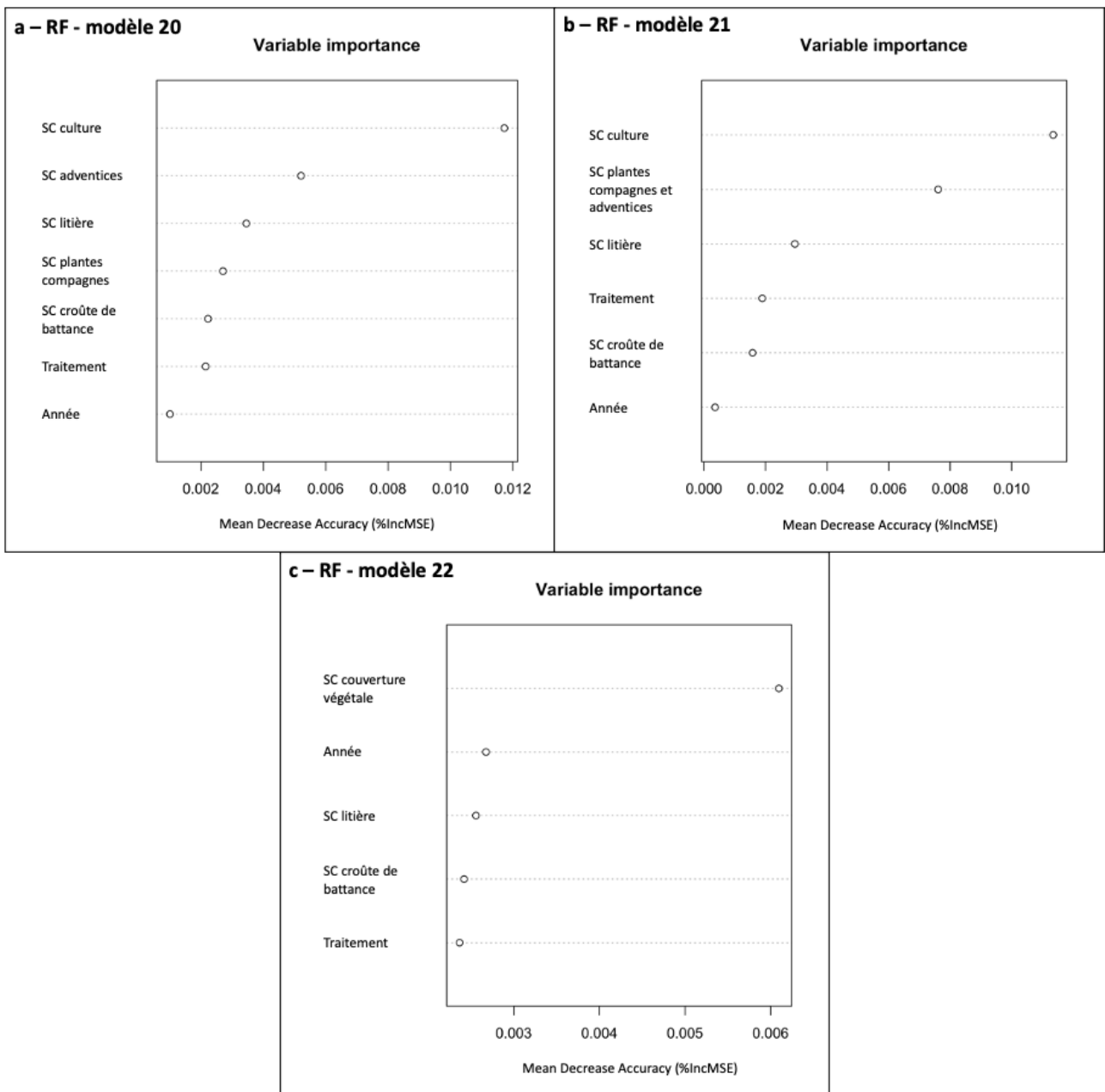


Figure S.1. 9 : Importance des variables testées dans les Random Forest (2000 arbres) basée sur le Mean Decrease Accuracy (%IncMSE). Plus le %IncMSE est élevé, plus la variable est importante. L'année de suivi et la présence d'un traitement insecticide sont également pris en compte, car ils peuvent avoir un effet non négligeable sur la variable réponse.

Tableau S.1. 1 : Pratiques analysées et gamme de valeurs selon les différents systèmes de culture (minimum, maximum et moyenne ou proportions).

Nature de la pratique	Indicateur	Description	Agriculture biologique	Agriculture de conservation des sols	Agriculture conventionnelle
Succession culturale	Précédent	Légumineuse (1) ou non légumineuse (0)	1 : 43 % ; 0 : 57 %	1 : 93 % ; 0 : 7 %	1 : 15 % ; 0 : 85 %
	Période de semis	Quinzaine (1 ou 2)	1 : 71 % ; 2 : 29 %	1 : 0 % ; 2 : 100 %	1 : 16 % ; 2 : 85 %
	Type de variété semée	Lignée (0) ou hybride (1)	0 : 50 % ; 1 : 50 %	0 : 64 % ; 1 : 36 %	0 : 4 % ; 1 : 96 %
Travail du sol	Associations de cultures	OUI (1) ou NON (0)	1 : 64 % ; 0 : 36 %	1 : 93 % ; 0 : 7 %	1 : 46 % ; 0 : 54 %
	Labour	Nombre de labour	0 : 43 % ; 1 : 57 %	0 : 100 % ; 1 : 0 %	0 : 96 % ; 1 : 4 %
	Travail du sol hors labour avant semis	Nombre d'intervention	0 à 7 (mean : 2)	0 à 3 (mean : 1)	0 à 5 (mean : 3)
	Travail du sol hors labour après semis	Nombre d'intervention	0 à 3 (mean : 1)	0 à 1 (mean : 0.14)	0 à 1 (mean : 0.28)
Traitements phytosanitaires	Herbicides avant semis	IFT herbicide	0	0 à 1 (mean : 0.24)	0 à 0.75 (mean : 0.09)
	Herbicides après semis	IFT herbicide	0	0 à 3.39 (mean 1.36)	0.27 à 3.7 (mean : 2.15)
	Insecticides	IFT insecticides	0	0 à 2 (mean 0.49)	0 à 2.77 (mean : 0.72)

Tableau S.1. 2 : États du milieu analysés (mesurés au champ ou au laboratoire pour la masse fraîche) et gamme de valeurs selon les différents systèmes de culture (minimum, maximum et moyenne).

Catégorie	Variable	Échelle ou unité	Agriculture biologique	Agriculture de conservation des sols	Agriculture conventionnelle
Surface du sol	Surface couverte par de la croûte de battance	Pourcentage de surface	0 à 100 % (mean : 51 %)	0 à 95 % (mean : 19 %)	0 à 100 % (mean : 59 %)
Litière	Surface couverte par la litière	Pourcentage de surface	0 à 20 % (mean : 3 %)	0 à 95 % (mean : 35 %)	0 à 75 % (mean : 19 %)
Couvert végétal	Surface couverte par le couvert végétal	Pourcentage de surface	5 à 100 % (mean : 48 %)	6 à 99 % (mean : 47 %)	3 à 90 % (mean : 30 %)
- culture	Surface couverte par la culture	Pourcentage de surface	0 à 99 % (mean : 36 %)	0 à 98 % (mean : 22 %)	0 à 90 % (mean : 25 %)
- plantes compagnes	Surface couverte par les plantes compagnes	Pourcentage de surface	0 à 40 % (mean : 5 %)	0 à 60 % (mean : 10 %)	0 à 20 % (mean : 1 %)
- adventices	Surface couverte par les adventices	Pourcentage de surface	0 à 60 % (mean : 11 %)	0 à 90 % (mean : 20 %)	0 à 35 % (mean : 5 %)
- plantes compagnes et adventices	Somme de la surface couverte par les plantes compagnes et les adventices	Pourcentage de surface	0 à 60 % (mean : 16 %)	0 à 150 % (mean : 30 %)	0 à 35 % (mean : 6 %)
Masse fraîche	Masse moyenne d'un plant de colza au moment du prélèvement	Gramme	9 à 169 g (mean : 76 g)	10 à 198 g (mean : 66 g)	5 à 292 g (mean : 86 g)

Note : Le pourcentage de plantes compagnes et adventices correspond à la somme de surface couverte par les plantes compagnes et par les adventices, le pourcentage peut dépasser 100 %.



Chapitre 1

Tableau S.1. 3 : Répartition des organismes capturés et identifiés dans les pièges Barber selon leur rôle potentiel dans le contrôle biologique des larves d'altises d'hiver (prédateurs et proies alternatives). Les organismes présents mais n'ayant pas d'interactions dans le contrôle biologique ne sont pas présentés ici. Les organismes étaient identifiés jusqu'à la classe, l'ordre ou la famille, selon nos compétences, la facilité d'identification et la nécessité. Il en va de même pour le stade.

Catégorie	Classe-Ordre-Famille	Stade
Prédateurs	<i>Anthicidae</i>	NA
	<i>Anthocoridae</i>	NA
	<i>Araneae</i>	NA
	<i>Cantharidae</i>	LARVE
	<i>Carabidae</i>	ADULTE
	<i>Carabidae</i>	LARVE
	<i>Chilopoda</i>	NA
	<i>Dermaptera</i>	NA
	<i>Ensifera – Gryllidae</i>	NA
	<i>Formicidae</i>	NA
	<i>Gamasina</i>	NA
	<i>Melyridae</i>	ADULTE
	<i>Melyridae</i>	LARVE
	<i>Nabidae</i>	NA
	<i>Opiliones</i>	NA
	<i>Pseudoscorpionida</i>	NA
	<i>Silphidae</i>	ADULTE
<i>Staphylinidae</i>	ADULTE	
<i>Staphylinidae</i>	LARVE	
Proies alternatives	<i>Acari</i>	NA
	<i>Aphididae</i>	NA
	<i>Chrysomelidae</i>	LARVE
	<i>Diptera</i>	LARVE
	<i>Elateridae</i>	LARVE
	<i>Entomobryomorpha</i>	NA
	<i>Gamasina</i>	NA
	<i>Oribatida</i>	NA
	<i>Siphonaptera</i>	NA
	<i>Symphyleona</i>	NA
	<i>Tetranychidae</i>	NA
	<i>Thysanoptera</i>	ADULTE
	<i>Thysanoptera</i>	LARVE



Tableau S.1. 4 : Caractéristiques (régime alimentaire et taille moyenne) des espèces de carabes capturés dans les pièges Barber. La plupart des données provient de la base de données BETSI. Les tailles moyennes manquantes (*) proviennent de la « Clé de détermination des carabides » de (Roger et al., 2016). Les données manquantes concernant le régime alimentaire proviennent de différentes sources : ¹données utilisées dans la thèse de Lola Serée (Serée, 2022) ²(Talarico et al., 2016) et ³(Deroulers et Bretagnolle, 2019).

Espèce	Régime alimentaire (proportion)			Taille moyenne (mm)
	Détritivore – Nécrophage(*)	Phytophage	Zoophage	
Acupalpus meridianus ¹	0	0,83	0,17	3,6
Amara apricaria	0	0,31	0,69	7
Amara aulica	0	0,95	0,05	12
Amara consularis	0	0	1	8,1
Amara similata	0	0,91	0,09	8,6
Anchomenus dorsalis	0	0,24	0,76	7,1
Badister bullatus	0	0	1	5,4
Bembidion lampros	0,02 *	0,36	0,62	3,5
Bembidion obtusum	0	0,5	0,5	3,9
Brachinus sclopeta ¹	0	0	1	5,8
Calathus cinctus	0	0	1	7,8
Calathus fuscipes	0	0,66	0,34	13
Calathus gr. melanocephalus	0	0,375	0,625	7
Harpalus affinis	0	0,85	0,15	10,3
Harpalus dimidiatus	0	1	0	12,3
Harpalus distinguendus	0	0,5	0,5	9,9
Metallina lampros	0,02 *	0,36	0,62	3,5
Nebria brevicolis	0	0,07	0,93	11,7
Nebria salina	0	0	1	11,4
Notiophilus biguttatus	0	0,06	0,94	5,1
Notiophilus quadripunctatus ¹	0	0	1	5,3
Notiophilus substriatus	0	0,3	0,7	4,9
Parophonus mendax ²	0	0,5	0,5	7,5 *
Phyla obtusa	0	0,5	0,5	3
Poecilus cupreus	0,02 *	0,34	0,64	11,4
Pseudoophonus rufipes	0	0,82	0,18	13,3
Pterostichus melanarius	0	0,54	0,46	15
Scybalicus oblongiusculus ³	0	1	0	11,5 *
Semiophonus signaticornis ³	0	0,75	0,25	6,5 *
Trechus gr. quadristriatus	0,05	0	0,95	3,6
Trechus quadristriatus	0,05	0	0,95	3,6
Zabrus tenebrioides	0	0,96	0,04	18,7

Tableau S.1. 5 : Gamme de valeurs (minimum, maximum et moyenne) d'éléments du paysage mesurés et d'indices calculés

Catégorie	Variable	Échelle ou unité	Rayon						
			250 m	500 m	750 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m	3 000 m
Éléments mesurés	Pourcentage surfacique de colza à l'année n	Pourcentage de surface au sein du rayon	0 à 76 % (34 %)	0 à 60 % (18 %)	0 à 43 % (13 %)	0 à 31 % (11 %)	1 à 29 % (9 %)	1 à 20 % (9 %)	0 à 21 % (10 %)
	Pourcentage surfacique de colza à l'année n-1	Pourcentage de surface au sein du rayon	0 à 46 % (8 %)	0 à 42 % (10 %)	0 à 34 % (11 %)	0 à 25 % (11 %)	1 à 29 % (10 %)	1 à 26 % (10 %)	0 à 22 % (10 %)
	Pourcentage surfacique de bois (feuillus et conifères)	Pourcentage de surface au sein du rayon	0 à 23 % (3 %)	0 à 29 % (5 %)	0 à 35 % (7 %)	0 à 38 % (9 %)	1 à 29 % (11 %)	1 à 31 % (13 %)	2 à 44 % (14 %)
Indices	Surface des parcelles d'étude	m ²	10 013 (1 ha) à 647 123 m ² (64 ha) (121 172 m ² / 12 ha)						
	$\frac{\text{Pourcentage de colza}_{n-1}}{\text{Pourcentage de colza}_n}$	Sans unité	0 à 2 (0.25)	0 à 5 (0.72)	0 à 3 (1)	0 à 4 (1)	0 à 5 (1)	0 à 8 (1)	0 à 20 (2)
	$\frac{\text{Pourcentage de bois}}{\text{Pourcentage de colza}_n}$	Sans unité	0 à 23 (0.90)	0 à 29 (2)	0 à 35 (3)	0 à 38 (3)	0 à 8 (2)	0 à 26 (2)	0 à 100 (4)



Tableau S.1. 6 : Relations entre le risque associé aux larves d'altises d'hiver et des variables paysagères à différentes échelles (clm : n = 54) : l'indice de pression lié au pourcentage de colza présent l'année n-1 et la surface des parcelles suivies. Dans les modèles, d'autres variables explicatives sont prises en compte : la surface des parcelles étudiées, l'année de suivi et l'application d'un traitement insecticide. Les variables explicatives quantitatives étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale. Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. L'estimate correspond à la pente de chaque variable dans les régressions. Les degrés de liberté (d.f.) et le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) sont également présents.

Variable réponse	Radius	Variable explicative	d.f.	Estimate (± SEM)	P-value	χ^2	AICc
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	250 m	% CZH _{n-1}	1	0.55 ± 0.44	0.170	1.88	72
		% CZH _n					
		Surface parcelle	1	0.38 ± 0.32	0.226	1.47	
		Année	1	-1.06 ± 0.64	0.094 .	2.81	
		Traitement	1	-1.62 ± 0.69	0.014 *	6.06	
	500 m	% CZH _{n-1}	1	0.65 ± 0.43	0.103	2.66	71
		% CZH _n					
		Surface parcelle	1	0.44 ± 0.33	0.171	1.87	
		Année	1	-1.25 ± 0.64	0.043 *	4.09	
		Traitement	1	-1.59 ± 0.70	0.016 *	5.82	
750 m	% CZH _{n-1}	1	0.89 ± 0.43	0.016 *	5.76	68	
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.53 ± 0.34	0.111	2.54		
	Année	1	-1.42 ± 0.68	0.028 *	4.85		
	Traitement	1	-1.88 ± 0.77	0.008 **	7.11		
1 000 m	% CZH _{n-1}	1	0.91 ± 0.34	0.011 *	6.51	68	
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.54 ± 0.34	0.106	2.61		
	Année	1	-1.09 ± 0.66	0.093 .	2.81		
	Traitement	1	-2.01 ± 0.79	0.005 **	7.76		
1 500 m	% CZH _{n-1}	1	1.32 ± 0.55	0.004 **	8.31	66	
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.39 ± 0.32	0.241	1.37		
	Année	1	-0.59 ± 0.69	0.395	0.72		
	Traitement	1	-2.06 ± 0.79	0.004 **	8.13		
2 000 m	% CZH _{n-1}	1	0.84 ± 0.86	0.237	1.40	73	
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.33 ± 0.31	0.289	1.12		
	Année	1	-0.75 ± 0.77	0.328	0.96		
	Traitement	1	-1.55 ± 0.68	0.016 *	5.76		
3000 m	% CZH _{n-1}	1	0.64 ± 1.30	0.426	0.63	73	
	% CZH _n						
	Surface parcelle	1	0.28 ± 0.31	0.350	0.87		
	Année	1	-1.04 ± 0.72	0.168	1.90		
	Traitement	1	-1.44 ± 0.66	0.023 *	5.15		



Chapitre 1

Tableau S.1. 7 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur le risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver (clmm : $n = 162$). Les résultats sont ceux des modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	Z value	P-value	Imp	AICc
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	Intercept (Réf : Traitement NON, Année 2021)	-2.26	0.84	2.71	0.007		170
	SC croûte de battance	0.75	0.52	1.45	0.148	0.84	
	SC litière	0.0009	0.16	0.01	0.996	0.18	
	SC culture	-0.62	0.49	1.25	0.210	0.77	
	Traitement	-3.18	1.00	3.17	0.002 **	1	
FORT-MOYEN > FAIBLE	Année	-1.93	1.23	1.56	0.118	0.88	
(Modèle 11)	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	0.36	0.47	0.77	0.444	0.55	
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	Intercept (Réf : Traitement NON, Année 2021)	-1.93	0.78	2.47	0.013 *		170
	SC croûte de battance	0.34	0.47	0.72	0.474	0.51	
	SC litière	-0.05	0.20	0.24	0.814	0.26	
	SC couvert végétal	-0.99	0.51	1.96	0.050 *	0.93	
	Traitement	-3.51	1.03	3.41	< 0.001 ***	1	
FORT-MOYEN > FAIBLE	Année	-0.83	1.15	0.72	0.471	0.53	
(Modèle 12)	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (1 500 m)	0.43	0.48	0.91	0.363	0.62	



Tableau S.1. 8 : Effets des différents prédateurs et proies alternatives capturés dans les parcelles suivies en automne sur le risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante (clmm : $n = 123$). Les résultats présentés sont issus de trois modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. Les variables liées aux prédateurs et proies alternatives sont en $\log_{10}(x+1)$. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	Z value	P-value	Imp	AICc	
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	Intercept						150	
	(Traitement NON, Année 2021)	-1.45	0.75	1.93	0.054 .			
	Carabes	-0.03	0.21	0.15	0.882	0.17		
	FORT-MOYEN > FAIBLE	Staphylins	0.02	0.15	0.14	0.890		0.16
		Gamases	-0.37	0.38	0.97	0.332		0.64
	(Modèle 13)	Araignées	-0.35	0.45	0.78	0.434		0.52
		Autres prédateurs	-0.20	0.35	0.57	0.567		0.38
		Proies alternatives	0.16	0.38	0.48	0.632		0.32
		Traitement	-2.82	1.10	2.56	0.010 *		1
		Année 2022	-0.41	0.85	0.49	0.626		0.33
Risque moyen lié aux larves d'altises d'hiver par plante	Intercept						151	
	(Année 2021)	-1.46	0.76	1.91	0.056 .			
	Carabes adultes zoophages	-0.08	0.25	0.31	0.758	0.22		
	FORT-MOYEN > FAIBLE	Carabes larves	0.18	0.33	0.54	0.588		0.37
		Staphylins	0.02	0.14	0.12	0.906		0.13
	(Modèle 14)	Gamases	-0.35	0.38	0.93	0.355		0.62
		Araignées	-0.37	0.47	0.79	0.427		0.53
		Autres prédateurs	-0.17	0.33	0.50	0.617		0.33
		Proies alternatives	0.15	0.32	0.45	0.650		0.30
		Traitement	-2.77	1.09	2.55	0.011 *		1
	Année 2022	-0.46	0.89	0.51	0.607	0.35		



Tableau S.1. 9 : Relations entre la proportion de larves d'altises d'hiver au stade L3 au sein des populations moyennes dans les plantes et des variables paysagères à différentes échelles (glmmTMB : n = 54) : des indices de pression liés au pourcentage de colza présent l'année n-1 et au pourcentage de bois et la surface des parcelles suivies. Dans les modèles, d'autres variables explicatives sont prises en compte : la surface des parcelles étudiée, l'année de suivi et l'application d'un traitement insecticide (les résultats sont présentés ici). Les coordonnées géographiques sont ajoutées pour l'autocorrélation spatiale (résultats non présentés ici). Les niveaux de significativité sont les suivants : $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. Les résultats significatifs, ainsi que les tendances, sont en gras. L'estimate correspond à la pente de chaque variable dans les régressions. Les degrés de liberté (d.f.) et le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) sont également présents. Seuls les modèles ayant des relations significatives entre la variable réponse et une variable paysagère sont présentés ici.

Variable réponse	Radius	Variable explicative	d.f.	Estimate (\pm SEM)	P-value	χ^2	AICc
Pourcentage de larves d'altises d'hiver au stade L3 au sein de la population moyenne dans une plante	250 m	% CZH _{n-1}	1	-0.03 \pm 0.17	0.840	0.04	142
		% CZH _n					
		% Bois	1	-0.11 \pm 0.28	0.688	0.16	
		% CZH _n					
	500 m	Surface parcelle	1	-0.13 \pm 0.18	0.460	0.55	
		Année	1	0.70 \pm 0.28	0.012 *	6.33	
		Traitement	1	0.09 \pm 0.39	0.807	0.06	
		% CZH _{n-1}	1	-0.16 \pm 0.15	0.277	1.18	141
		% CZH _n					
		% Bois	1	-0.08 \pm 0.22	0.715	0.13	
		% CZH _n					
		750 m	Surface parcelle	1	-0.16 \pm 0.18	0.375	0.79
Année	1		0.70 \pm 0.27	0.0099 **	6.65		
Traitement	1		0.07 \pm 0.39	0.860	0.03		
% CZH _{n-1}	1		-0.26 \pm 0.15	0.088 .	2.92	139	
% CZH _n							
% Bois	1		-0.17 \pm 0.23	0.459	0.55		
% CZH _n							
1 000 m	Surface parcelle		1	-0.21 \pm 0.18	0.242	1.37	
	Année	1	0.90 \pm 0.30	0.003 **	9.12		
	Traitement	1	0.20 \pm 0.40	0.614	0.25		
	% CZH _{n-1}	1	-0.01 \pm 0.16	0.975	0.001	142	
	% CZH _n						
	% Bois	1	-0.02 \pm 0.24	0.929	0.008		
	% CZH _n						
	1 500 m	Surface parcelle	1	-0.12 \pm 0.18	0.526	0.40	
Année		1	0.70 \pm 0.28	0.012 *	6.25		
Traitement		1	0.05 \pm 0.40	0.906	0.01		
% CZH _{n-1}		1	-0.19 \pm 0.16	0.226	1.46	139	
% CZH _n							
% Bois		1	-0.29 \pm 0.19	0.134	2.24		
% CZH _n							
2 000 m		Surface parcelle	1	-0.14 \pm 0.17	0.405	0.69	
	Année	1	0.59 \pm 0.27	0.030 *	4.71		
	Traitement	1	0.26 \pm 0.38	0.497	0.46		
	% CZH _{n-1}	1	-0.21 \pm 0.29	0.470	0.52	136	
	% CZH _n						
	% Bois	1	-0.52 \pm 0.37	0.164	1.94		
	% CZH _n						
	3 000 m	Surface parcelle	1	-0.07 \pm 0.17	0.663	0.19	
Année		1	0.43 \pm 0.32	0.173	1.86		
Traitement		1	0.08 \pm 0.36	0.836	0.04		
% CZH _{n-1}		1	0.48 \pm 0.36	0.181	1.79	136	
% CZH _n							
% Bois		1	-0.94 \pm 0.51	0.066 .	3.38		
% CZH _n							
3 000 m		Surface parcelle	1	-0.15 \pm 0.18	0.406	0.69	
	Année	1	0.67 \pm 0.29	0.020 *	5.41		
	Traitement	1	0.03 \pm 0.36	0.938	0.006		



Tableau S.1. 10 : Effets des états du milieu observés dans les parcelles suivies en automne sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (glmmTMB : $n = 162$). Les résultats présentés sont issus de trois modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. La présence de fortes corrélations entre les variables liées à la végétation n'a pas permis de faire un modèle unique. Les niveaux de significativité sont les suivants : $.p < 0.1$, $*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. SC signifie « Surface couverte ». Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc	
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 20)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.69	0.21	0.21	8.06	< 0.001 ***		439	
	SC croûte de battance	0.02	0.08	0.08	0.29	0.771	0.13		
	SC litière	-0.004	0.04	0.04	0.10	0.920	0.05		
	SC culture	0.39	0.16	0.16	2.41	0.016 *	0.96		
	SC plantes compagnes	-0.01	0.05	0.06	0.19	0.846	0.07		
	SC adventives	-0.14	0.20	0.20	0.69	0.491	0.41		
	Traitement	-0.02	0.11	0.11	0.16	0.871	0.06		
	Année	0.20	0.33	0.33	0.60	0.546	0.34		
	$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	-0.003	0.03	0.03	0.08	0.936	0.04		
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 21)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.70	0.21	0.21	8.13	< 0.001 ***		436	
	SC croûte de battance	0.02	0.07	0.07	0.28	0.782	0.12		
	SC litière	-0.003	0.03	0.03	0.10	0.923	0.04		
	SC culture	0.39	0.16	0.16	2.38	0.017	0.96		
	SC plantes compagnes et adventives	-0.21	0.24	0.24	0.85	0.393	0.53		
	Traitement	-0.02	0.10	0.10	0.16	0.876	0.06		
	Année	0.21	0.33	0.33	0.63	0.527	0.36		
		$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	-0.003	0.03	0.03	0.08	0.0938	0.04	
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 22)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.71	0.21	0.21	8.05	< 0.001 ***		443	
	SC croûte de battance	0.03	0.08	0.08	0.30	0.767	0.18		
	SC litière	-0.02	0.07	0.07	0.23	0.816	0.13		
	SC couvert végétal	0.17	0.19	0.19	0.91	0.362	0.57		
	Traitement	-0.02	0.12	0.13	0.17	0.863	0.10		
	Année	0.25	0.35	0.35	0.73	0.465	0.45		
		$\frac{\% CZH_{n-1}}{\% CZH_n}$ (750 m)	-0.04	0.10	0.10	0.37	0.714	0.20	

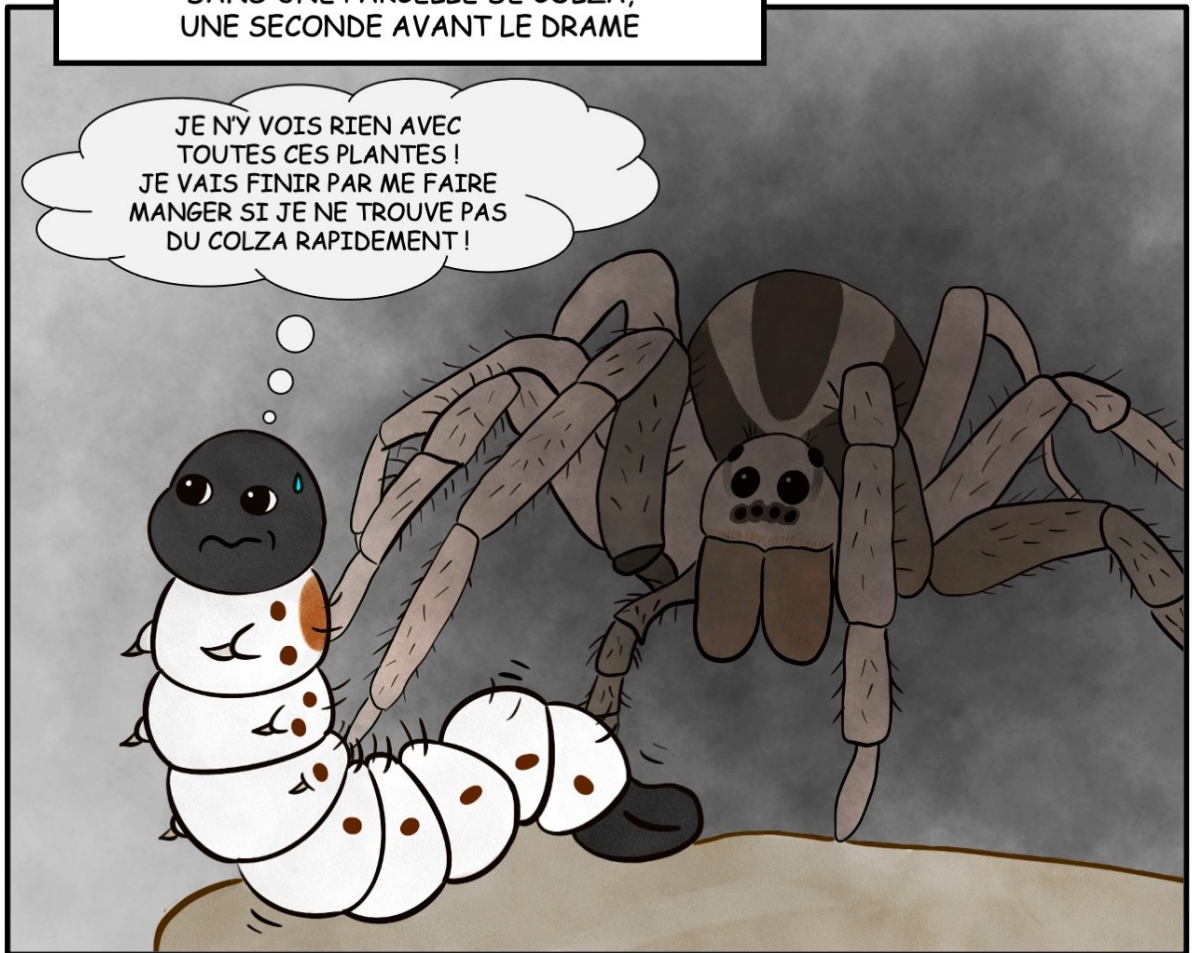


Tableau S.1. 11 : Effets des différents prédateurs et proies alternatives capturés dans les parcelles suivies en automne sur la proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (glmmTMB : n = 123). Les résultats présentés sont issus de trois modèles moyens (full average) issus de l'inférence multimodèle. Les variables liées aux prédateurs et proies alternatives sont en log₁₀(x+1). Les niveaux de significativité sont les suivants : .p < 0.1, *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Les résultats significatifs sont en gras. Toutes les variables étaient centrées-réduites à l'aide de la fonction scale et les coordonnées géographiques étaient prises en compte. « Imp » correspond à la somme des poids d'Akaike associée à chaque variable dans le modèle moyen. Le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) correspond à celui du modèle initial qui a les mêmes variables. Le numéro de modèle correspond aux modèles présentés dans le Tableau 1.6.

Variable réponse	Variable explicative	Estimate	SEM	SEM ajusté	Z value	P-value	Imp	AICc
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 20)	Intercept (Traitement NON, Année 2021)	-1.73	0.28	0.28	6.13	< 0.001 ***		365
	Carabes	0.30	0.19	0.19	1.52	0.129	0.87	
	Staphylins	0.04	0.08	0.08	0.44	0.661	0.23	
	Gamases	0.03	0.07	0.07	0.37	0.714	0.19	
	Araignées	-0.002	0.03	0.03	0.07	0.947	0.03	
	Autres prédateurs	0.02	0.07	0.07	0.25	0.801	0.12	
	Proies alternatives	-0.01	0.06	0.06	0.24	0.812	0.12	
	Traitement	-0.16	0.32	0.33	0.49	0.625	0.29	
	Année 2022	0.34	0.41	0.41	0.83	0.408	0.52	
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 21)	Intercept (Année 2021)	-1.67	0.26	0.26	6.30	< 0.001 ***		366
	Carabes adultes zoophages	0.23	0.20	0.20	1.17	0.243	0.74	
	Carabes larves	-0.02	0.06	0.06	0.33	0.743	0.16	
	Staphylins	0.03	0.08	0.08	0.41	0.685	0.21	
	Gamases	0.03	0.07	0.08	0.38	0.704	0.20	
	Araignées	-0.001	0.02	0.02	0.03	0.978	0.03	
	Autres prédateurs	0.02	0.08	0.08	0.30	0.767	0.14	
	Proies alternatives	-0.01	0.06	0.06	0.22	0.823	0.10	
	Traitement	-0.18	0.34	0.34	0.53	0.599	0.32	
Année 2022	0.25	0.36	0.36	0.69	0.488	0.43		
Proportion moyenne de larves d'altises d'hiver au stade L3 par plante (Modèle 22)	Intercept (Année 2021)	-1.63	0.24	0.24	6.72	< 0.001 ***		368
	Petits carabes adultes zoophages	0.11	0.15	0.15	0.73	0.466	0.46	
	Grands carabes adultes zoophages	0.08	0.15	0.15	0.54	0.587	0.33	
	Carabes larves	-0.02	0.06	0.06	0.36	0.718	0.19	
	Staphylins	0.03	0.07	0.07	0.39	0.698	0.21	
	Gamases	0.03	0.08	0.08	0.39	0.694	0.21	
	Araignées	0.001	0.03	0.03	0.02	0.984	0.05	
	Autres prédateurs	0.04	0.10	0.10	0.36	0.717	0.20	
	Proies alternatives	-0.01	0.06	0.06	0.24	0.811	0.12	
Traitement	-0.13	0.30	0.30	0.45	0.654	0.26		
Année 2022	0.18	0.31	0.32	0.57	0.570	0.34		

DANS UNE PARCELLE DE COLZA,
UNE SECONDE AVANT LE DRAME

JE N'Y VOIS RIEN AVEC
TOUTES CES PLANTES !
JE VAIS FINIR PAR ME FAIRE
MANGER SI JE NE TROUVE PAS
DU COLZA RAPIDEMENT !



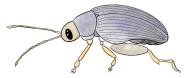
©Dessin de Justine Pigot

Chapitre 2 : Contrairement aux lisières de bois, les bandes fleuries ne constituent pas un refuge pour l'estivation des altises d'hiver



« Mais dès que le jour s'éveille
Sur les maisons toutes pareilles
La vie qui reprend son cours
Oublie le compte à rebours »

Les Cowboys fringants, Les maisons toutes pareilles



I. Résumé du chapitre

Contexte

Les habitats semi-naturels, dont font partie les bandes fleuries, sont généralement considérés comme bénéfiques aux ennemis naturels des ravageurs et aux pollinisateurs. Cependant, ces habitats pourraient également être utilisés par des ravageurs, comme les altises d'hiver, *Psylliodes chrysocephala*, un des principaux insectes ravageurs du colza d'hiver. En effet, les altises adultes émergent à partir des nymphes à la fin du printemps et partent dans des refuges pour estiver. Dans la littérature, les lisières de bois sont considérées comme le principal habitat d'estivation. Cependant, des bandes fleuries pérennes, implantées à proximité des parcelles agricoles, pourraient également constituer un refuge.

Questions de recherche et objectifs

Dans ce chapitre, nous cherchons à répondre à la question suivante : en quoi les bandes fleuries peuvent-elles constituer un habitat d'estivation pour les altises d'hiver, en comparaison à un habitat de référence, les lisières de bois ?

Ainsi, nous tenterons de :

- Déterminer le rôle de bandes fleuries pérennes présentes à proximité de parcelles agricoles, en comparaison avec des lisières de bois voisines ;
- Déterminer l'influence d'éléments du paysage sur l'abondance des altises d'hiver présentes dans les refuges pendant l'estivation ;
- Identifier les caractéristiques des habitats associées à la présence de fortes populations d'altises d'hiver pendant l'estivation.

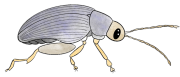


Schéma résumé de la question de recherche et des objectifs

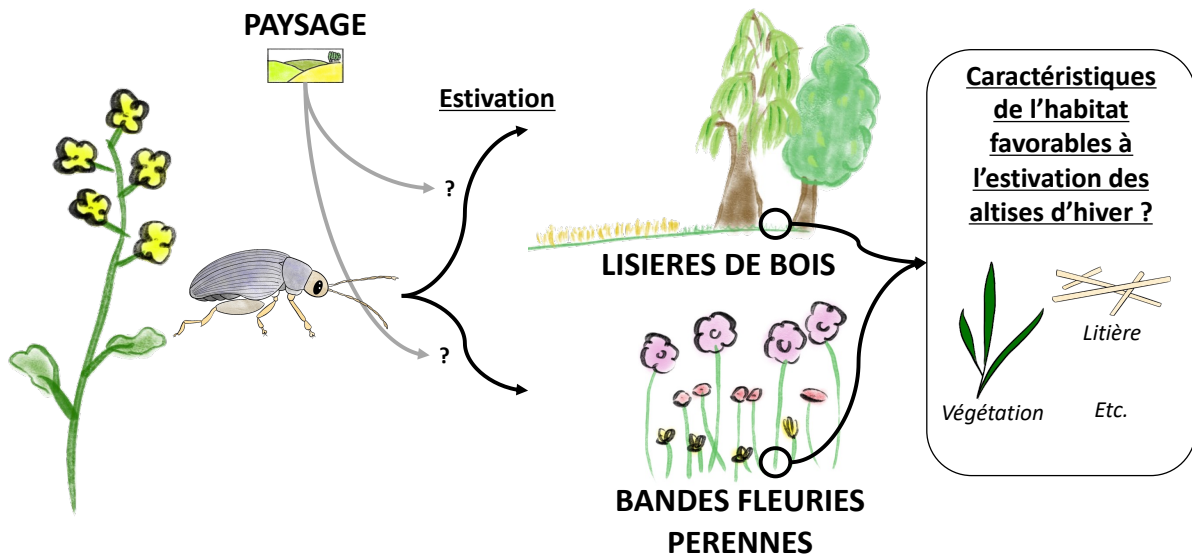


Figure 2. 1 : Schéma résumant les éléments étudiés dans le Chapitre 2. (©Dessins de Justine Pigot)

Méthodologie

En 2021, nous avons suivi 14 sites contenant les trois types d'habitats de référence dans un rayon d'un kilomètre. Ces trois types d'habitats sont : (i) des parcelles de colza d'hiver fraîchement récoltées afin de vérifier que les altises les avaient bien quittées pour partir en estivation, (ii) des bandes fleuries pérennes composées de 42 espèces végétales indigènes et (iii) des lisières de bois de feuillus. Dans ces différents habitats, les émergences des altises d'hiver sortant d'estivation ont été suivies de mi-août à mi-octobre. Nous avons également décrit les états du milieu observables (par exemple la couverture végétale) au sein de quadrats de 50 cm x 50 cm. Dans le cas particulier des bois, nous avons également caractérisé les lisières dans des quadrats de 15 m x 15 m, notamment pour obtenir des éléments comme la circonférence moyenne des arbres. Nous avons également considéré des éléments paysagers : les pourcentages de bois et de colza (récoltés en 2021) présents à différents rayons allant de 250 à 1000 m.

Résultats principaux

Nous avons constaté que les bandes fleuries pérennes étudiées ne constituaient pas un refuge pour l'estivation des altises d'hiver. Nous avons observé les plus grandes populations d'altises d'hiver sortant d'estivation dans les lisières de bois, ce qui est donc en accord avec la littérature, où ces habitats sont les refuges majoritaires durant l'estivation.

Nous avons également constaté un effet des éléments du paysage à petite échelle (250 m) : (i) une réduction significative des populations d'altises d'hiver émergeant des lisières de bois lorsque le pourcentage de bois dans le paysage augmente et (ii) lorsque le pourcentage de colza augmente, une tendance à la diminution de la taille des populations.

Dans le cas des lisières de bois, nous avons cherché à comprendre quelles caractéristiques de l'habitat pouvaient affecter les populations d'altises d'hiver qui y estivent. Nous avons ainsi observé des impacts positifs de la présence de litière au sol, de la circonférence moyenne des arbres et de l'ouverture des bois (ouverture de la canopée et facilité d'accès) sur le nombre d'altises d'hiver capturées. En revanche, la présence de sol nu diminue ce nombre.



Ces résultats sont résumés sur la Figure 2.2.

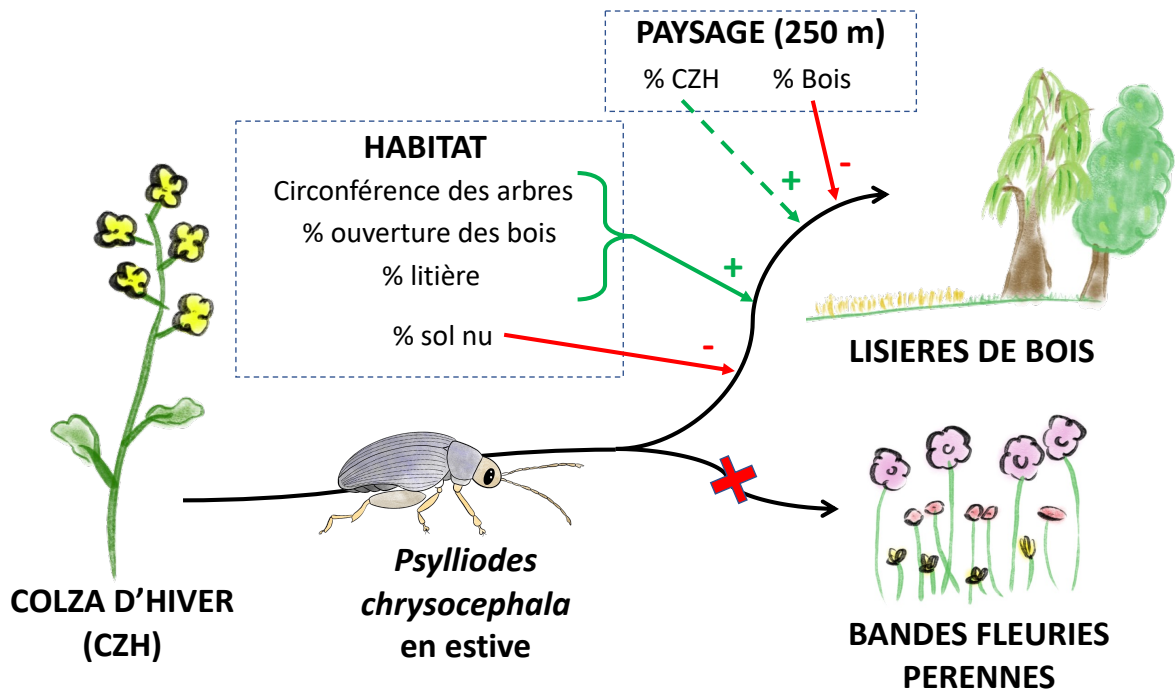


Figure 2. 2 : Schéma récapitulatif des résultats et des relations observées dans ce chapitre. La couleur des flèches correspond au sens des effets : rouge pour un effet négatif et vert pour un effet positif. La flèche en tiret correspond à une tendance. (©Dessins de Justine Pigot)

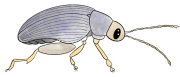
Valorisation du chapitre

Ce chapitre a fait l'objet d'une présentation lors du meeting en ligne de l'IOBC-ICOC les 17 et 18 mai 2022, ainsi que d'un article scientifique paru dans la revue *Pest Management Science* (DOI : 10.1002/ps.7558).



Ce qu'il faut retenir

- ⇒ Les altises d'hiver n'estivent pas dans les bandes fleuries pérennes étudiées, en comparaison des lisières de bois. Les bandes fleuries ne semblent donc pas bénéfiques à ce ravageur pendant l'estivation.
- ⇒ Au sein de la lisière de bois, le nombre d'altises d'hiver sortant d'estivation peut être impacté par des éléments du paysage, à petite échelle (dans un rayon de 250 m) et par des caractéristiques de l'habitats, comme un effet positif du pourcentage de litière.



Unlike woodland edges, flower strips do not act as a refuge for cabbage stem flea beetle aestivation

Justine Pigot¹, Antoine Gardarin¹, Thierry Doré¹, Alexandre Morisseau¹, Muriel Valantin-Morison¹

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie, 91120, Palaiseau, France

II. Abstract

BACKGROUND: Semi-natural habitats are generally considered to be beneficial to natural enemies of crop pest and pollinators. However, they could also be used by pests, such as the Cabbage Stem Flea Beetle (CSFB), *Psylliodes chrysocephala*, a major pest of winter oilseed rape, *Brassica napus*. Adults emerge from pupation in late spring and move to aestivation habitats. Published reports identify forest edges as the major shelter used, but flower strips may also constitute an alternative habitat. This study aimed to: (i) determine the role of perennial flower strips in CSFB aestivation in comparison with woodland edges; (ii) determine the influence of landscape composition on the abundance of aestivating CSFB and (iii) identify the characteristics of the local habitat associated with a high abundance of aestivating CSFB.

RESULTS: CSFB emergence from aestivation was monitored with emergence traps from mid-August to mid-October 2021, at 14 sites in France. We found that CSFB preferred woodland edges and did not aestivate in flower strips. We found a negative effect of percentage woodland cover only for the smallest scale studied (250 m radius). We also found positive effects of the percentage of litter and mean tree circumference on the number of aestivating CSFB in woodland edges.

CONCLUSION: The aestivation of CSFB is supported by woodland edges, but not by flower strips. This implies that the presence of flower strips near oilseed rape fields does not exacerbate the problems due to this pest. However, the crops in the vicinity of woodlands could be colonized earlier by this pest than more distant fields.

Keywords: *Psylliodes chrysocephala*, aestivation, *Brassica napus*, semi-natural habitat, local environment characteristics, landscape



III. Introduction

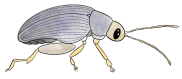
The intensification of agriculture has led to the simplification of landscapes in many regions of North America and Western Europe, which are now dominated by arable crop fields with few natural or semi-natural habitats (SNH) remaining (Foley *et al.*, 2005; Bianchi *et al.*, 2006; Rusch *et al.*, 2016). Landscape simplification has negative consequences for biodiversity (Newbold *et al.*, 2015) and affects some ecosystem services, such as biological pest control (Bianchi *et al.*, 2006; Rusch *et al.*, 2016). Indeed, fields are ephemeral habitats subject to frequent and intensive disturbances. Many arthropod species need more stable habitats, such as non-crop habitats (Keller et Häni, 2000; Bianchi *et al.*, 2006; Boetzel *et al.*, 2019) to complete their life-cycle. As a means of mitigating the effects of this landscape simplification, agri-environment schemes, including the implementation of flower strips, are encouraged by public policies, such as the European Common Agricultural Policy (Scheper *et al.*, 2013; European Commission, 2018).

Perennial habitats enhance biodiversity and related ecosystem services, such as pollination and the conservation biological control of pests by their natural enemies (Landis *et al.*, 2000b; Chaplin-Kramer *et al.*, 2011; Blitzer *et al.*, 2012; Tscharrntke *et al.*, 2016; Karp *et al.*, 2018). For example, Albrecht *et al.* (2020) reported that flower strips, annual and perennial, enhance pest control or have a neutral effect in adjacent crops. However, it is important to bear in mind that the response to the presence of SNH depends on the species of natural enemies and pests present in the environment (Karp *et al.*, 2018). Keller et Häni (2000) showed that nine in every ten natural enemy species require natural habitats at some point in their lifecycle, mostly during unfavourable periods, whereas such habitats are a requirement for only five in every ten pest species.

The Cabbage Stem Flea Beetle (CSFB), *Psylliodes chrysocephala* (Linnaeus, 1758, Coleoptera: Chrysomelidae), is a major pest of winter oilseed rape (*Brassica napus*, Linnaeus, 1753). This pest is becoming increasingly difficult to control in European cropping systems, in which oilseed rape is widespread (Breitenmoser *et al.*, 2020; Ortega-Ramos *et al.*, 2022) and control is generally achieved by insecticides. However, an increase of the populations of pests resistant to insecticides, especially to pyrethroids, limits the efficacy of chemical control (Heimbach et Müller, 2013; Robert *et al.*, 2017; Willis *et al.*, 2020). Insecticide use is also harmful for biodiversity (Tudi *et al.*, 2021) and can cause human health problems (Inserm, 2021). Conservation biological control aims to enhance pest control by supporting natural enemies naturally occurring in the environment. This implies the maintenance or the development of their habitats (Begg *et al.*, 2017; Rousseaux *et al.*, 2022). This method could be a good alternative to synthetic pesticides with a positive impact on biodiversity.

Indeed, Gardarin *et al.* (2021) showed that flower strips can enhance the parasitism of CSFB larvae within the crop. However, few studies to date have evaluated the extent to which such habitats, designed to enhance predator and parasitoid communities, can also provide suitable habitats for the targeted pest.

Cabbage stem flea beetle is univoltine i.e., it completes its life cycle within one year (Ortega-Ramos *et al.*, 2022). The adults arrive in the newly sown oilseed rape field in autumn. They cause damage by feeding on seedlings (Williams, 2010a; Ortega-Ramos *et al.*, 2022). The larvae are also responsible for damage. Females lay eggs in proximity of plants, then, the larvae migrate to oilseed rape plants and enter via a petiole. They develop inside the plants and mine them. This reduces plant vigour and exposes them to frost damage and disease, which limits the overwintering survival (Williams, 2010a; Ortega-Ramos *et al.*, 2022). At the end of winter, the larvae leave the plants and pupate in the soil for a few weeks in the spring. The new adults emerge in late spring (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b) and they feed on the leaves, stems and pods of oilseed rape and other Brassicaceae, but they do not cause damage at this time (Williams, 2010a). In mid-summer, during the hottest period of the year, CSFB move to aestivation habitats, where they hide in the vegetation or the litter to aestivate



Chapitre 2

(Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b; Williams, 2010a). During this diapause period, their activity is minimal and their rates of metabolism decrease to very low levels (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b; Navas et Carvalho, 2010; Williams, 2010a). According to published studies, forest edges are the principal shelter used by CSFB for aestivation, although some individuals are found in oilseed rape crop residues in fields (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b; Thioulouse *et al.*, 1984). However, the particular characteristics rendering a site suitable for CSFB aestivation remain largely unknown. We hypothesised that CSFB might use flower strips as shelters during aestivation because these structures have several characteristics that appear to be important for aestivation. For example, the presence of vegetation and litter may reduce temperature variations, and protect CSFB from desiccation and predation while in diapause. However, factors more complex than the simple presence or absence of vegetation and litter may be involved: the percentage of soil covered by litter and vegetation, litter thickness or the diversity of the vegetation may also play a role. Furthermore, landscape characteristics, such as winter oilseed rape cover, considered as the source of CSFB and the woodland cover (the putative principal shelter of these beetles) may also influence the distribution of CSFB between aestivation sites. Indeed, these elements could lead to dilution or concentration effects on pests (Scheiner et Martin, 2020).

The aim of this study was to assess the extent to which flower strips can be used by CSFB as a habitat for aestivation in an agricultural landscape. More specifically, we addressed the following issues:

- (a) We determined the extent to which flower strips could constitute a habitat for the aestivation of CSFB through comparison with woodland edges, the principal aestivation habitat identified in published studies;
- (b) We investigated whether the composition of the surrounding landscape influences the distribution of CSFB between their refuges
- (c) We investigated the characteristics of the local habitat associated with a high abundance of aestivating CSFB.



IV. Materials and methods

A. Study site selection

The study was conducted in the south-western part of the Paris Basin (Figure 2.3) in 2021, the most important agricultural area for arable crops production in France. The landscape in this area is characterised by a large-scale mosaic of arable crops with a few, scattered semi-natural habitats, such as woodlands. We selected 14 sites all containing the three habitat types we wanted to study within a radius of 1 km.

The three habitat types selected were: (1) fields in which a winter oilseed rape crop had recently been harvested (i.e., former oilseed rape crop) to demonstrate that CSFB leave the crop for aestivation sites after harvest; shallow tillage had recently been performed in 11 of these 14 fields; (2) perennial flower strips sown with 42 indigenous species in late 2018 or 2019 and mown only once in winter (details Table S.2.1) and (3) a deciduous woodland edge. Within a site, the different habitat types were separated by an average of 557 ± 64 m [min: 31 m; max: 1624 m], more details are given in Table S.2.2. The perennial flower strip contained the flowering herbaceous plants generally promoted in environmental policies and studied across Europe (Ouvrard *et al.*, 2018; Albrecht *et al.*, 2020). Woodland edges were identified according to the definition of Matlack and Litvaitis (1999), as “an abrupt transition between two relatively homogeneous ecosystems, at least one of which is a forest”. We considered flower strips and woodlands as semi-natural habitats as these perennial elements were not or only minimally managed.

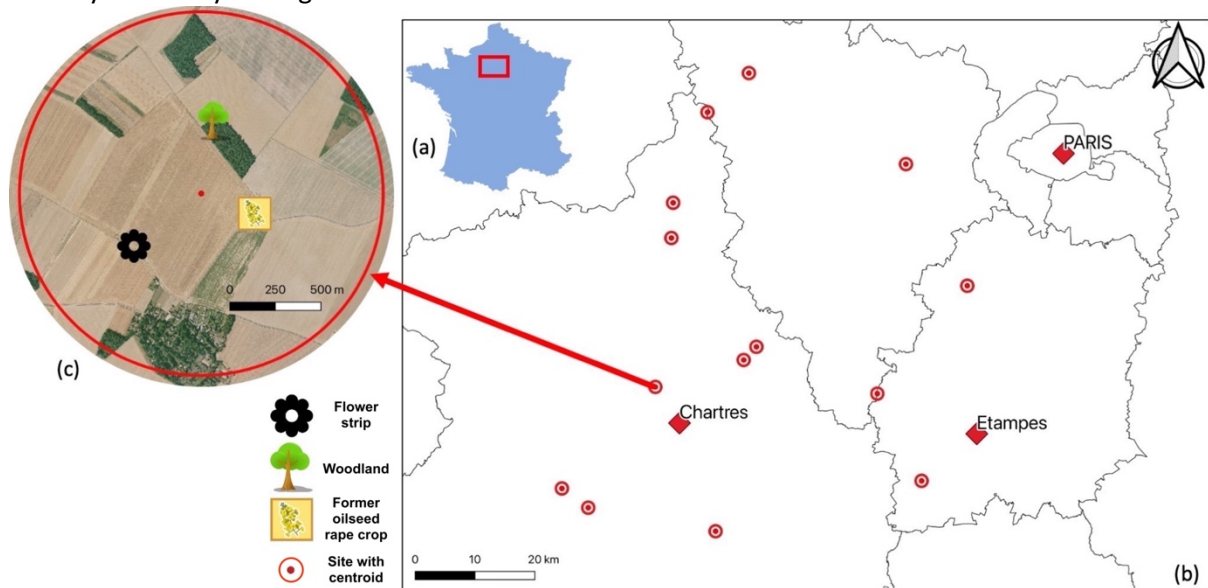
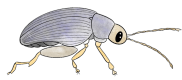


Figure 2.3 : Location of the sampling region in Northern France (a) and the 14 sites (red circles) in which the emergence of cabbage stem flea beetles was monitored (b). Magnification shows a site in more detail, to provide an example of the position of the three habitat types sampled in this study i.e., a former oilseed rape crop, a perennial flower strip and a deciduous woodland edge (c)



Chapitre 2

B. Insect sampling

The emergence of CSFB from aestivation was monitored from mid-August to mid-October 2021. This period was chosen because adult CSFB are already present in their aestivation habitats by August and they then migrate to newly sown oilseed rape fields from late August to early September (Bonnemaison et Jourdeuil, 1954b; Williams, 2010a). We installed 42 emergence traps (14 sites \times 3 habitat types) as illustrated in Figure 2.4. These comprised a floorless closed tent (60 x 60 x 60 cm) with flaps at the bottom, which were buried to prevent the arthropods from escaping. An emergence trap covered a surface of 0.36 m² (Figure S.2.1). A collecting bottle was located at the apex of the trap, and was half-filled with 30 % propylene glycol (IUPAC name: propane-1,2-diol) and soap (2 cL/L). The emergence traps were checked approximately every three weeks. The contents of the collecting bottle were removed and replaced at every visit. The arthropods caught were transferred to 70 % ethanol solution and *P. chrysocephala* individuals were identified with the “Subfamily Galerucinae, keys to British species of tribe Alticini” key adapted by Mike Hackson from the German key of Arved Lompe (Hackson, 2014), and counted.

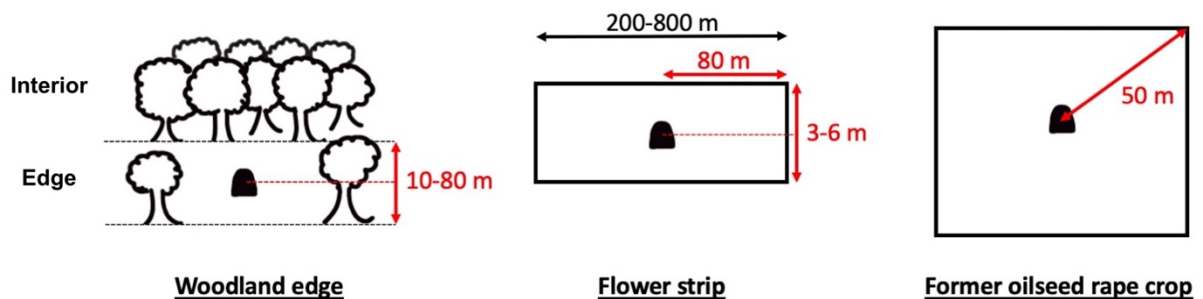


Figure 2. 4 : Placement of the emergence traps within the different habitat types studied: in woodland edges and flower strips. The trap was placed in the middle of the habitat, while in former oilseed rape crops, it was placed at 50 m in diagonal from the field corner to avoid edge effects.

C. Description of the habitats

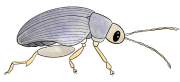
In each habitat type, we recorded the characteristics of the local habitat (Table 1) in a 50 cm \times 50 cm quadrat placed at one metre from the emergence trap. We characterised the various elements of ground cover (vegetation, litter, bare soil and stones) likely to influence the microclimate or to form a hiding place for insects. We used a method inspired by Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1932; 1964) to estimate the percent cover of these elements. We determined the mean vegetation height by measuring the maximum height of three plants within the quadrat. The same was done for litter thickness, by measuring the thickness at three points within the quadrat.

In woodland edges, we also characterised the woodland itself in 15 m \times 15 m quadrats. We measured the mean tree circumference by measuring the diameter at breast height (approximately 1.3 m above ground) of five trees. We defined two types of openness: (i) the canopy openness as the vertical openings through the top of the trees that allow light entrance; (ii) the horizontal openness as the ease of access to the woodland, related to vegetation density. Both openness percentages were estimated as for local habitat characteristics. The width of the woodland edge was also measured; i.e., the width from the border of the edge to the beginning of woodland interior. We identified the woodland interior as a more homogenous ecosystem with a higher density of trees, compared with the edge (Matlack et Litvaitis, 1999).

All assessments were performed by the same observer. The variables are summarised in Table 1 and further details are given in Tables S3, S4 and S5.

Table 2. 1 : Variables used to describe the local characteristics of each habitat studied, showing the mean \pm SEM and the range [min, max] measured in each type of habitat at the 14 study sites in France. Further details are provided in Tables S.2.3, S.2.4 and S.2.5.

Category	Variable	Scale or unit	Flower strip	Former oilseed rape	Woodland edge
Local habitat characteristics (measured in a 50 cm x 50 cm quadrat)					
Soil surface	Surface covered by stones	Percentage of the area	1 \pm 1 [0, 8]	1 \pm 3 [0, 45]	0.4 \pm 0.2 [0, 2]
	Surface covered by bare soil	Percentage of the area	3 \pm 2 [0, 30]	8 \pm 9 [0, 86]	7 \pm 3 [0, 40]
Litter	Surface covered by litter	Percentage of the area	60 \pm 11 [3, 100]	17 \pm 11 [10, 100]	76 \pm 9 [15, 100]
	Litter thickness	cm	5 \pm 1 [0.1, 8]	1 \pm 0.1 [0.1, 3]	2 \pm 0.3 [0.1, 4]
Vegetation	Surface covered by moss	Percentage of the area	Not measured	Not measured	4 \pm 2 [0, 22]
	Surface covered by vegetation	Percentage of area	71 \pm 6 [30, 100]	8 \pm 7 [1, 90]	63 \pm 7 [20, 96]
	Number of species	Number of species	5 \pm 1 [1, 10]	1 \pm 0.3 [1, 4]	3 \pm 0.3 [1, 6]
	Percentage of monocotyledons	Percentage of vegetation	2 \pm 2 [0, 25]	2 \pm 7 [0, 100]	7 \pm 7 [0, 97]
	Mean height	cm	74 \pm 7 [25, 112]	2 \pm 1 [0.5, 17]	10 \pm 1 [5, 24]
Characteristics of the global habitat (for woodland edges only)					
Vegetation	Mean tree circumference	cm	Not measured	Not measured	59 \pm 7 [13, 107]
Openness and width	Horizontal openness	Percentage openness	Not measured	Not measured	41 \pm 10 [0, 100]
	Canopy openness	Percentage openness	Not measured	Not measured	27 \pm 6 [0, 75]
	Width of woodland edge	m	Not measured	Not measured	47 \pm 6 [10, 80]



D. Landscape characteristics

We investigated the effect of landscape composition on the number of CSFB emerging from aestivation and caught in the emergence traps per habitat at different scales, by describing the local landscape in four circular sectors of radius 250, 500, 750 and 1 000 m (Figure S.2.2 and Table S.2.6). We characterised two elements of the landscape: the proportion of fields under oilseed rape harvested in 2021 (before the beginning of the study) and the proportion of woodland. The percentage of fields formerly under oilseed rape was accessed using satellite images obtained with EO Browser from the Sentinel-hub website (Sentinel-hub, 2023). The percentage of the woodland cover was obtained with the available land cover BD TOPO (vegetation layer ver. 3.0, 2020), a vector map with a resolution of 1 m (IGN, 2021). We did not take into account the perimeter of the woodland as it was correlated with the surface. We combined broadleaved, coniferous and mixed forests with a closed canopy, and woodlands together under the term “woodlands”. Landscape analyses were performed with QGIS 3.10.10-A Coruña.

E. Statistical analysis

All statistical analyses were performed with R statistical software version 4.0.4. Before beginning the analyses, we calculated Moran’s I coefficient to evaluate the possible presence of spatial autocorrelation in the abundance of emerged CSFB. No spatial autocorrelation in the abundance of emerged CSFB between the centroids of the sites was detected (Table S.2.7) (Dormann *et al.*, 2007).

1. *Effects of site, type of habitat and landscape composition at different scales*

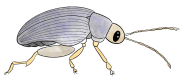
We first analysed the effects of site and habitat type on the number of aestivating CSFB per trap over the sampling period with a generalised linear model assuming a negative binomial distribution, “nbinom2”, with “Template Model Builder”, glmmTMB package (Brooks *et al.*, 2017), with only fixed effects. The negative binomial distribution was chosen to account for overdispersion. The fit of the model was checked using DHARMA, “DHARMA” package (Hartig, 2020), to look for the presence of significant deviations in residual plots (QQ plot and residual vs. predicted). Then, the possible correlations between covariates were assessed by calculating the variance inflation factor (VIF) with the “vif” function of the “car” package (Fox et Weisberg, 2019); all covariates with a VIF less than 2.5 were retained (James *et al.*, 2013). Wald chi-squared tests (type II sums of squares) were performed with the “ANOVA” function, “car” package (Fox et Weisberg, 2019), to calculate *p*-values. *Post hoc* analyses were then performed, by calculating the estimated marginal means and with pairwise comparison using the CLD function, “emmeans” package (Lenth, 2021).

We then analysed the effect of landscape composition (percentage of woodland cover and former oilseed rape crop cover), at different scales, on the numbers of CSFB aestivating in flower strips and woodland edges. For each habitat type, we performed a generalised linear model assuming a negative binomial distribution, “nbinom2”, with “Template Model Builder”, with only fixed effects, for each radius, to avoid collinearity: in total, four models were done for each type. The models were verified and analysed the same way than the model testing the effect of site and habitat type.



2. Combined effects of local habitat characteristics and landscape on CSFB abundance

We analysed the combined effects of local habitat characteristics (Table 1) and of landscape composition (percentage of woodland cover and former oilseed rape crop cover as described in section IV.D) on the CSFB abundance within woodland edges. As suggested by Ballot *et al.* (in press.), we refined the selection of variables by discarding those with limited variability: quantitative variables with variation coefficients below 20 % and qualitative variables with a dominant category accounting for more than 80 % of the sample. We performed univariate partial linear squares regression, PLSR1 (Hammami *et al.*, 2017), “plsRglm” package (Bertrand et Maumy-Bertrand, 2022), because the number of variables exceeded the number of observations and our variables were correlated (Figure S.2.3) (Tenenhaus, 1998; Carrascal *et al.*, 2009). We used two indices to validate the PLSR1: R^2Y , the proportion of the variance of the dependent variable explained by the model, and Q^2 , the proportion of the variance of the response predicted by the model, obtained by a cross-validation procedure. For a variable to be included in the model, the factor concerned had to have a $Q^2 > 0.0975$ (Tenenhaus, 1998). We also tested the normality of the residuals from the PLSR1 with a Shapiro-Wilk test. We ranked the variables according to their variable importance in projection (VIP) scores. This VIP criterion measures evaluates the importance of each variable for predicting the dependent variable from its importance in the building of each latent variable and the correlation between these latent variables and the dependent variable. Higher VIP values are associated with more important variables. Variables with a $VIP > 1$ were considered to be the most important variables for Y prediction (Tenenhaus, 1998; Chong et Jun, 2005).



V. Results

In total, we collected 304 adult CSFB between mid-August and mid-October 2022 (Figure S.2.4; detailed data in Table S.2.8).

A. Cabbage stem flea beetles aestivate in woodland edges but not in flower strips

We found no significant difference between the 14 sites on the number of aestivating CSFB (glmmTMB: $n = 42$, $\chi^2 = 12.50$, d.f = 13, $p = 0.487$). However, type of habitat had a significant effect (glmmTMB: $n = 42$, $\chi^2 = 25.14$, d.f = 2, $p < 0.001$). A *post hoc* test showed that the mean number of aestivating CSFB was significantly lower in flower strips (with predicted mean = 2.0 ± 0.61 SEM individuals) than in woodland edges (13.54 ± 3.39 individuals). No significant difference was observed between the mean number of individuals in former oilseed rape crops (3.51 ± 1.01) and that in flower strips (Figure 2.5).

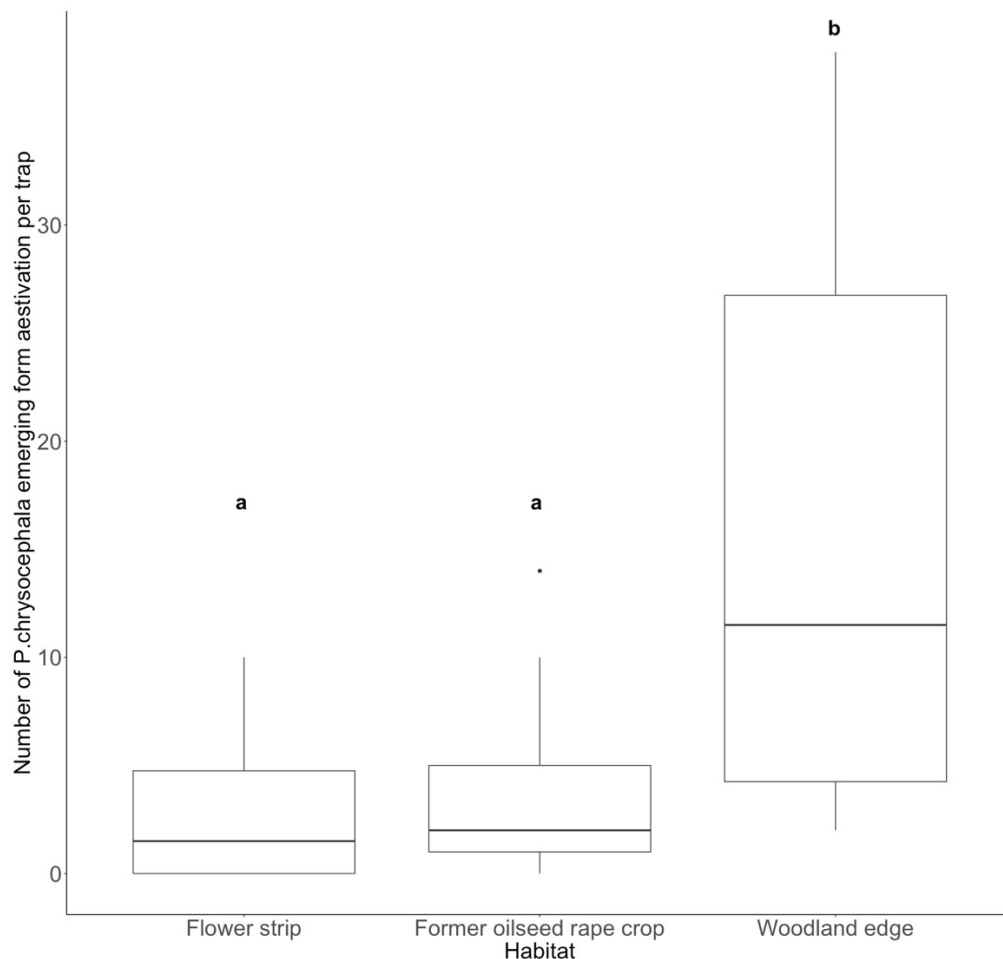


Figure 2.5 : Mean total number of cabbage stem flea beetles (*Psylliodes chrysocephala*) emerging from aestivation in three types of habitat present in each of 14 sites sampled in France, summed over the sampling period (from August to October 2021). Different letters above the boxplot indicate groups significantly different ($P < 0.05$) in a *post hoc* test. The upper whisker extends from the hinge to the largest value no further than $1.5 \times$ inter-quartile range (IQR) from the hinge. The lower whisker extends from the hinge to the smallest value at most $1.5 \times$ IQR of the hinge. Data beyond the end of the whiskers are outliers.



B. The percentage of the landscape under woodland has an effect only at the smallest scale

The abundance of CSFB emerging from aestivation in woodland edges decreased significantly with increasing percentage woodland within a 250 m radius (Table 2.2). This effect was the only significant effect of landscape on the number of CSFB trapped in woodland edges and flower strips observed. In woodland edges, we also found a positive trend of the percentage of former oilseed rape cover within a 250 m radius on the abundance of CSFB. Model quality (assessed with the corrected Akaike information criterion, AICc) was highest (lowest AICc) at the smallest spatial scale (250 m radius) and decreased with increase in spatial scale to 1000 m.

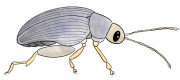
Table 2. 2 : Relationships between abundance of cabbage stem flea beetles (CSFB, *Psylliodes chrysocephala*) emerging from woodland edges and the percentage former oilseed rape (OSR) cover and percentage woodland cover at different scales (“radius”) within the landscape (glmmTMB: n=14). Significant results are shown in bold typeface. Significance levels: . $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. The “Estimate” corresponds to the slope of each variable in the regressions. Corrected Akaike information criterion (AICc) is also presented.

Response variable	Radius	Explanatory variable (%)	Estimate (\pm SEM)	P-value	χ^2	AICc
CSFB in woodland edges	250 m	Former OSR	0.013 \pm 0.008	0.082 .	3.02	108
		Woodland	-0.044 \pm 0.015	0.003 **	8.87	
	500 m	Former OSR	0.025 \pm 0.017	0.141	2.16	114
		Woodland	-0.028 \pm 0.026	0.267	1.23	
	750 m	Former OSR	0.023 \pm 0.031	0.452	0.57	116
		Woodland	-0.027 \pm 0.036	0.451	0.57	
	1000 m	Former OSR	0.026 \pm 0.051	0.616	0.39	117
		Woodland	-0.004 \pm 0.044	0.932	0.01	

C. Effect of local habitat characteristics on cabbage stem flea beetle aestivation in woodland edges

The abundance of CSFB in flower strips was low, with little variability between strips (Figure 2.5). However, there were differences in local characteristics between strips (Table 2.1 and Table S.2.3). We therefore concluded that CSFB aestivate at very low densities in flower strips irrespective of their characteristics. We focused further analyses on woodland edges, in which CSFB abundance was more variable (Figure 2.5), to try to identify the characteristics of the landscape or habitat favouring or reducing the likelihood of the presence of aestivating CSFB. The landscape within a radius of 250 m was also taken into account, because an effect of woodland percentage was previously detected for the smallest radius considered (250 m).

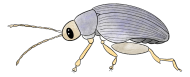
We retained only the first component of the PLSR1, as this was the only component with a $Q^2 > 0.0975$. The model had a Q^2 value of 0.51 and accounted for 75 % of the variance of CSFB emergence from woodland edges. Seven variables had VIP scores above 1 (Table 2.3) and were considered to be the most important variables for predicting CSFB abundance. Mean tree circumference, percentage horizontal openness, percentage canopy openness, percentage litter and percentage of OSR cover within a radius of 250 m around the trap also had positive effects on CSFB abundance. This abundance was also inversely related to the percentage bare soil and percentage woodland within a radius of 250 m (Table 2.3).



Chapitre 2

Table 2. 3 : Combined effects of local habitat characteristics and landscape on cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) emerging from woodland edges following aestivation (partial linear squares regression PLSR1, $n = 14$). The "Estimate" corresponds to the slope of the parameters in the regression. The variables are ranked by decreasing order of variable importance in projection (VIP) scores. Variables with a VIP > 1 are considered to be the most important explanatory variables.^{46,48} The estimates with a VIP > 1 are shown in bold typeface.

Landscape parameters and habitat characteristics (explanatory variables)	Estimate	VIP
Percentage of former oilseed rape cover in 250 m radius	0.11	1.50
Mean tree circumference	0.10	1.50
Percentage of woodland cover in 250 m radius	- 0.18	1.46
Surface covered by bare soil	- 0.18	1.25
Horizontal openness	0.06	1.22
Canopy openness	0.10	1.16
Surface covered by litter (or dead plants)	0.06	1.10
Number of plant species	- 1.12	0.83
Mean vegetation height	- 0.26	0.74
Litter thickness	0.98	0.71
Surface covered by stones	1.49	0.63
Width of woodland edge	0.04	0.57
Surface covered by vegetation	0.03	0.39
Surface covered by moss	- 0.08	0.33
Percentage of monocotyledons	0.005	0.07



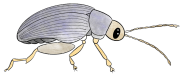
VI. Discussion

Published studies have reported that semi-natural habitats (SNH) can support arthropod species considered beneficial for crops, such as pollinators and natural enemies by enhancing both their abundance and diversity (Chaplin-Kramer *et al.*, 2013; Karp *et al.*, 2018). However, there are some concerns about possible negative effects of SNH if they also benefit crop pests (Tscharntke *et al.*, 2016; Karp *et al.*, 2018; Tamburini *et al.*, 2020). We investigated the effect of the presence of flower strips on CSFB aestivation. We found that the perennial flower strips in our study area did not constitute a significant aestivation site for CSFB. The low density of CSFB emerging from the flower strips cannot be explained by a lack of movement of the population of CSFB during the aestivation period. Indeed, they were also less present in the fields formerly grown with oilseed rape, but emerged in high abundance from woodland edges. This implies that the CSFB had left the fields where they emerged from pupation to go to aestivation sites. The representativeness of the sampling method may be questioned in view of the small numbers of CSFB trapped. However, Sutter *et al.* (2018) found similar densities in their study on the overwintering of pollen beetle (*Brassicogethes aeneus*, Fabricius, 1775): in their emergence traps (50 x 50 cm; quite similar to ours), they counted a mean of 3.2 pollen beetles from traps positioned from the end of February to the beginning of June. Furthermore, it is unlikely that some CSFB remained in the fields and flower strips but were not trapped, because the emergence traps were left on the ground for a long time period, covering the reported period of emergence, i.e., late August to early September (Williams, 2010a; Bonnemaïson et Jourdeuil, 1954b). We observed the maximum of emergence during the first three weeks of September (Figure S.2.4).

Most of the CSFB emerging from aestivation were caught in traps placed in woodland edges. This result supports the findings of Bonnemaïson et Jourdeuil (1954) that woodland edges are the main aestivation site for CSFB. However, other semi-natural habitats, such as woodland interiors or hedgerows could also constitute aestivation sites. More research is needed to explore this. We also cannot exclude the possibility that CSFB may aestivate in flower strips in larger numbers in extremely simplified landscapes devoid of woodland (unlike our study sites). However, the lack of an effect of the percentage woodland on the abundance of CSFB in flower strips, regardless of the scale considered, suggests that even if there is very little and distant woodland, CSFB nevertheless prefer to aestivate in woodlands. Similar results have been reported for another oilseed rape pest, the pollen beetle, which overwinters more rarely in sown semi-natural habitats, such as flower strips, than in forest edges or winter oilseed rape fields (Sutter *et al.*, 2018).

The population of CSFB in woodland edges varied considerably between sites. These differences probably reflect local characteristics, given the contrast between woodland edges. However, we recognise that the presence of only one trap in each habitat at each site makes it impossible to assess within-site variability. We suppose that woodland edges may have several characteristics that are essential for CSFB during their aestivation. Flower strips may have similar micro-habitat characteristics, with the presence of vegetation and litter, for example, but the global habitat differs considerably between flower strips and woodland edges, particularly due to the presence of trees.

The abundance of CSFB in flower strips was too low for us to be able to identify favourable local habitat characteristics, but it was possible for woodland edges. The most favourable woodland edge habitats for CSFB aestivation were those with the most litter, the least bare soil and the most available light (a positive effect of canopy opening). These findings suggest that vegetation density may be an important factor in aestivation site choice. In flower strips, vegetation density affects litter density (especially if mowing residues are left in place), the percentage of bare soil, and light availability. However, increasing vegetation density might result in larger amounts of litter, favouring aestivation, but lower levels of available light, which may be unfavourable for aestivation. The major impact of litter thickness may be related to the behaviour of this pest, as reported by Bonnemaïson et Jourdeuil

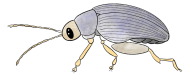


Chapitre 2

(1954) following observations with a controlled manipulation, in which the CSFB preferred to hide in layers of muslin rather than in plants. Similar behaviour was also reported by Rusch *et al.* (2016) for overwintering pollen beetles. Maudsley *et al.* (2002) found a similar effect in carabids and suggest that litter may provide a more sheltered microclimate, with bare ground providing a poor overwintering site for beetles. This is consistent with the negative effect of the percentage bare soil observed here. However, Sutter *et al.* (2018) reported a negative effect of percentage litter and a positive effect of bare soil on overwintering pollen beetles.

We also observed an effect of landscape corresponding to the dilution or concentration effects on pest abundance described by Scheiner et Martin (2020) : a high percentage of woodland dilutes the population of aestivating CSFB, whereas a high percentage of fields formerly under oilseed rape, a source of the pest, creates pressure on aestivation sites. Other pests of oilseed rape are sensitive to the dilution or concentration effects, such as the pollen beetles. Schneider *et al.* (2015) also observed a decrease of the abundance of pollen beetles within the fields while the proportion of oilseed rape increased in the landscape (1 km radius). We detected no effect of landscape at scales of more than a 250 m radius. This suggests that either this pest may have a low dispersal capability during this period or that CSFB does not disperse further than needed and aestivates in sites which are close to where they emerge from pupation. This may be because CSFB need to leave the fields and find a suitable aestivation site very rapidly (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b). However, these beetles are known to cover large distances when they leave their aestivation sites in search of newly sown oilseed rape, although the fields close to aestivation sites are at greater risk of attack (Bonnemaison et Jourdheuil, 1954b).

In terms of the possible impact on agriculture, we show here that flower strips do not act as a shelter for CSFB under the conditions studied. This is good news, given the fears that SNH could act as a shelter for pest species reported by Tscharrntke *et al.* (2016) and which come mainly from the farmers. The confirmation that CSFB mostly aestivate in woodland edges is also of potential importance in terms of the positioning of oilseed rape fields within the landscape. Nevertheless, additional information, concerning CSFB mortality during aestivation and rates of dispersal from aestivation sites to newly sown oilseed rape fields, will be required for the integration of this knowledge into integrated cropping system recommendations.



VII. Conclusion

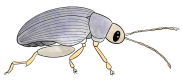
We show here that CSFB mostly utilise woodland edges for aestivation and far less aestivate in flower strips. CSFB abundance in woodland edges was influenced by landscape composition at a small scale (250 m radius). Aestivation CSFB densities were also positively influenced by some local and global habitat characteristics, such as the litter cover or the openness of the woodland edges. Our results confirm previous observations, which can now be taken into account in future studies on the management of CSFB. Indeed, it is important to consider the proximity of new crops of OSR to aestivation sites to limit damage due to this pest. Our principal finding — that this pest does not use flower strips for aestivation — is good news, favouring further promotion of the use of such habitats in agri-environmental schemes.

Acknowledgments We thank Louis Gégou, Mathis Morin and Véronique Tanneau for technical assistance in the field and in the laboratory. We also thank Arnaud Gauffreteau for his very useful advice for statistical analysis. We also thank the farmers for allowing us access to their fields.

Conflict of Interest Statement The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could appear to influence the work reported in this paper.

Funding This research was funded by INRAE, AgroParisTech and *Office Français de la Biodiversité*.

Availability of data and materials The datasets generated and analysed during the current study are available in the Zenodo repository, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7181680>



VIII. Annexes



Figure S.2. 1 : Emergence traps (60 x 60 x 60 cm) were placed in three habitats (here, forest edge). They were protected by three iron corners to prevent wild boars' damage.

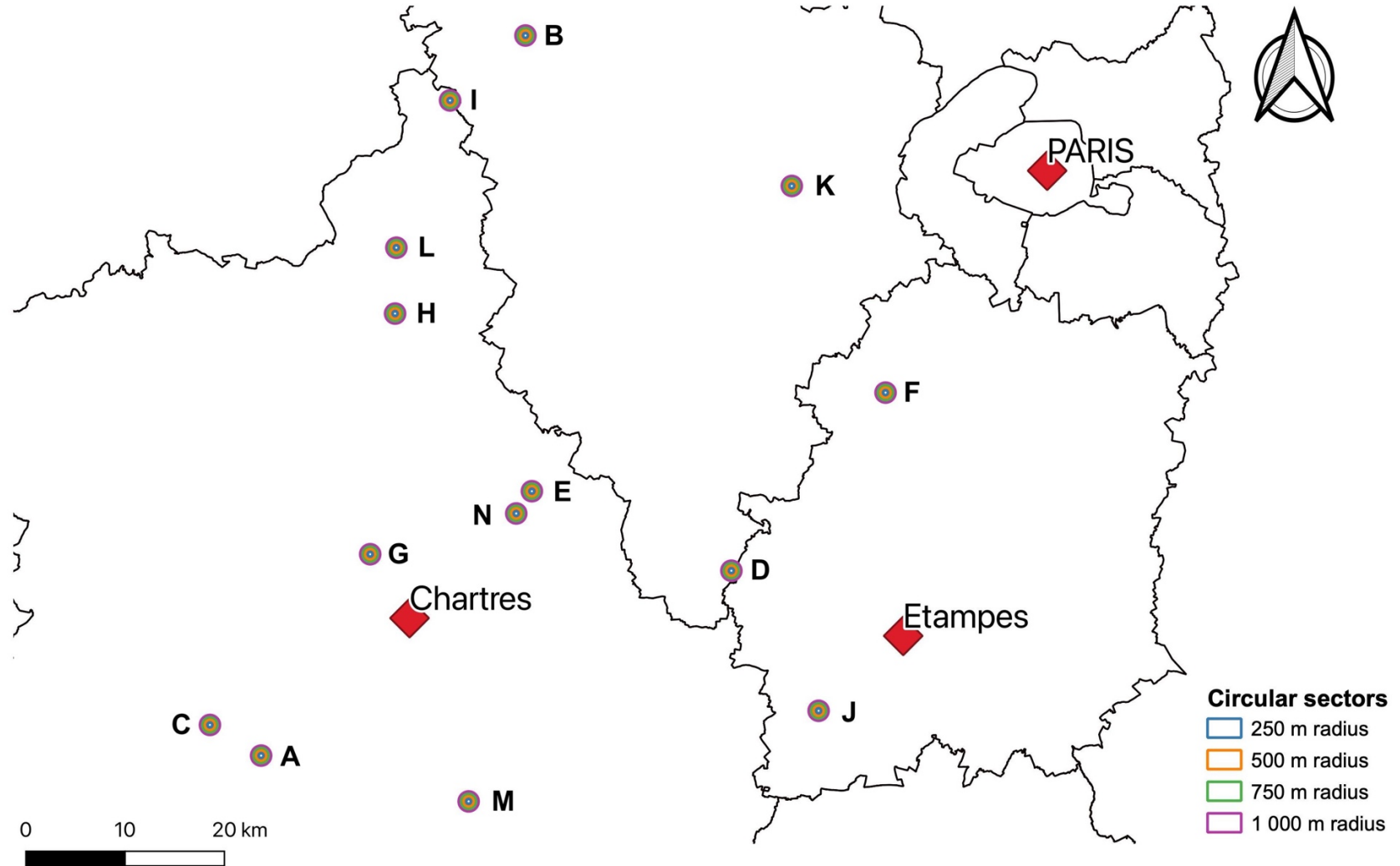
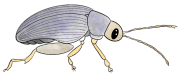


Figure S.2. 2 : Location of the circular sectors around the traps within the woodland edges present in the 14 sites (letters), with four different radii, used for the analysis of the effect of the landscape composition on the number of cabbage stem flea beetles trapped. For the traps within the flower strips, a similar analysis was done. For the sake of clarity, the circular sectors are not represented, but the map is similar.



Chapitre 2

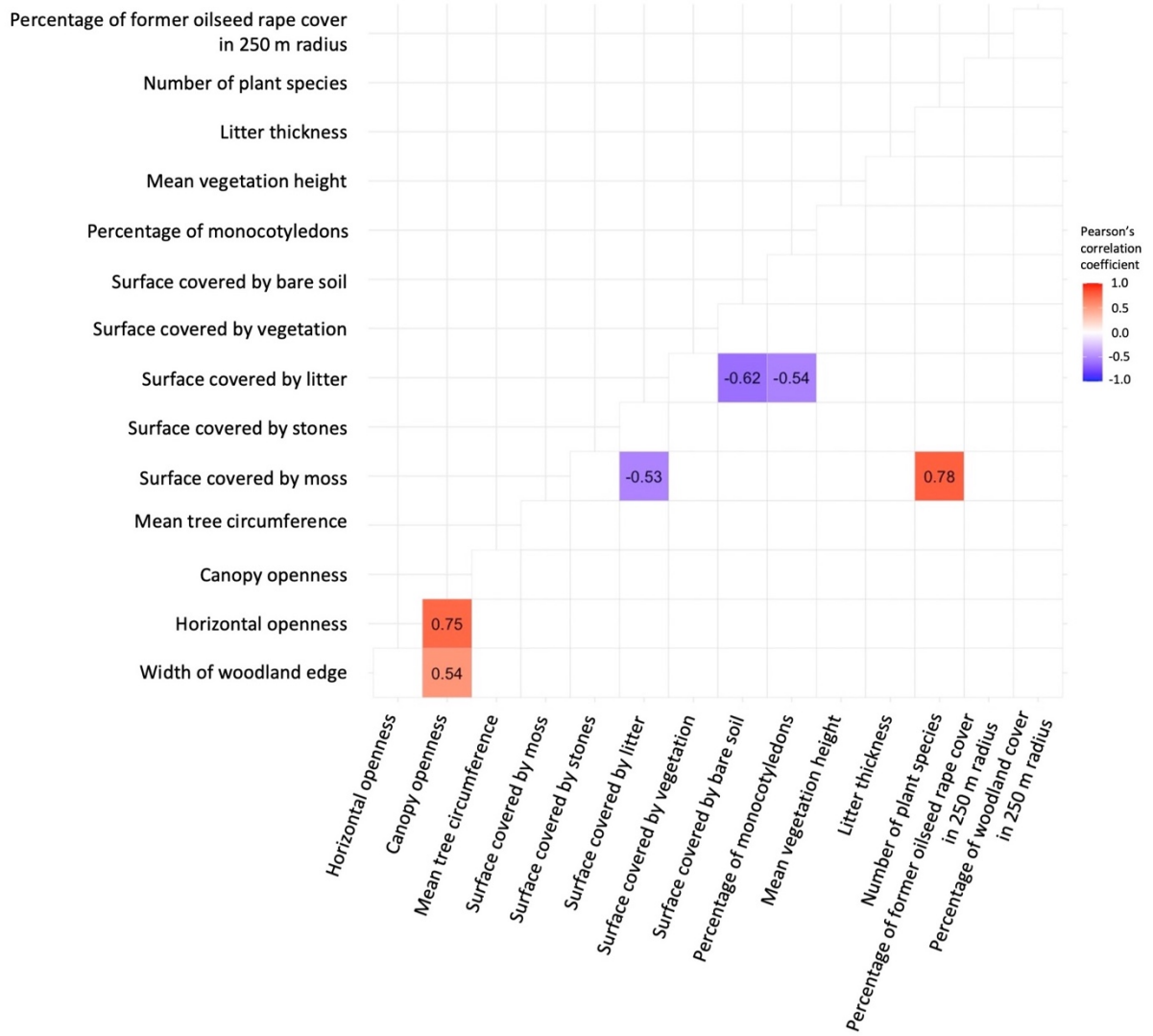


Figure S.2. 3 : Correlation matrix between habitat and landscape characteristics. The only Pearson's correlation coefficients shown are those that were significant ($p < 0.05$). The colour represents the intensity of correlation and the sign of the correlation coefficient.

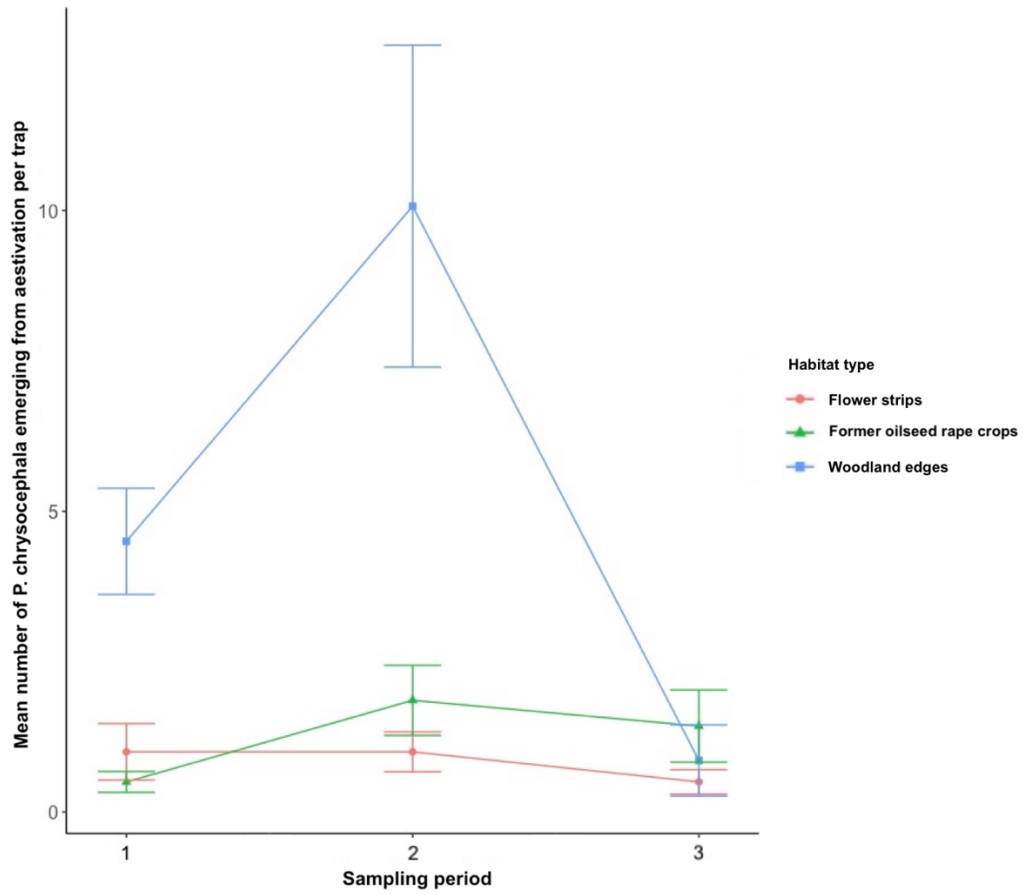


Figure S.2. 4 : Mean number of cabbage stem flea beetles (*Psylliodes chrysocephala*) emerging from aestivation captured per trap in each type of habitat present in 14 sites sampled in France, over the sampling period from August to October (1: mid-August to beginning September; 2: to the end of September; 3: to mid-October)



Chapitre 2

Table S.2. 1 : List of the plant species sown in perennial flower strips sampled in our study to understand the role of flower strips in supporting aestivation of cabbage stem flea beetles. The flower strips measured 3 to 6 m wide and 200 to 800 m long (surface of the flower strips: min: 1 067 m²; max: 3 600 m²; mean: 2 044 m²)

Binomial name	Perenniality
<i>Achillea millefolium</i>	perennial
<i>Alliaria petiolata</i>	biennial
<i>Anthemis tinctoria</i>	perennial
<i>Anthriscus sylvestris</i>	perennial
<i>Barbarea vulgaris</i>	biennial
<i>Bellis perennis</i>	perennial
<i>Carum carvi</i>	biennial
<i>Centaurea cyanus</i>	annual
<i>Centaurea scabiosa</i>	perennial
<i>Cichorium intybus</i>	perennial
<i>Daucus carota</i>	biennial
<i>Echium vulgare</i>	biennial
<i>Festuca arundinacea</i>	perennial
<i>Galium mollugo</i>	perennial
<i>Geum urbanum</i>	perennial
<i>Glechoma hederacea</i>	perennial
<i>Hesperis matronalis</i>	biennial
<i>Hypericum perforatum</i>	perennial
<i>Knautia arvensis</i>	perennial
<i>Leucanthemum vulgare</i>	perennial
<i>Lotus corniculatus</i>	perennial
<i>Malva sylvestris</i>	perennial
<i>Medicago sativa</i>	perennial
<i>Melilotus officinalis</i>	perennial
<i>Onobrychis viciifolia</i>	perennial
<i>Origanum vulgare</i>	perennial
<i>Pastinaca sativa</i>	biennial
<i>Pimpinella saxifraga</i>	perennial
<i>Plantago lanceolata</i>	perennial
<i>Ranunculus acris</i>	perennial
<i>Reseda luteola</i>	biennial
<i>Securigera varia</i>	perennial
<i>Senecio jacobaea</i>	perennial
<i>Stellaria media</i>	annual
<i>Tanacetum vulgare</i>	perennial
<i>Taraxacum officinale</i>	perennial
<i>Trifolium repens</i>	perennial
<i>Trisetum flavescens</i>	perennial
<i>Veronica hederifolia</i>	annual
<i>Veronica persica</i>	annual
<i>Vicia sativa</i>	annual

Table S.2. 2 : Average distances between the different habitat types studied within the 14 sites: flower strip, woodland edge and former oilseed rape crops (i.e., where the oilseed rape had recently been harvested). Each site comprised the three habitat

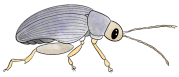


types within a radius of 1 km. The average distances are presented with standard error of mean (SEM), the minimum and the maximum values (n = 14)

Distance between	Mean ± SEM (m)	Minimum distance (m)	Maximum distance (m)
Flower strip to Former oilseed rape	288 ± 109	32	1381
Flower strips to Woodland edge	727 ± 105	31	1624
Woodland edge to Former oilseed rape	656 ± 85	63	1133
Mean	557 ± 64	31	1624

Table S.2. 3 : Habitat characteristics of the flower strips measured at each site and used to describe the local habitat. The different characteristics were related to the soil surface, to the litter and to the vegetation

Site	Local habitat characteristics							
	Soil surface		Litter		Vegetation			Mean height (cm)
	Surface covered by stones (%)	Surface covered by bare soil (%)	Surface covered by litter (%)	Litter thickness (cm)	Surface covered by vegetation (%)	Number of species	Percentage of monocotyledons in vegetation (%)	
A	0	0	3	0.1	80	6	25	112
B	8	10	10	0.1	90	7	0	65
C	0	0	100	0.1	95	6	1	97
D	0	0	100	8	40	1	0	25
E	0	0	30	2	70	2	0	82
F	0	3	80	0.1	30	3	0	29
G	0	0	100	0.1	30	2	s	52
H	0	0	100	0.5	60	6	0	60
I	0	0	10	0.1	99	5	2	74
J	0	2	90	0.1	65	4	0	89
K	0	0	20	0.1	100	6	0	111
L	0	30	10	0.1	65	4	0	74
M	1	0	90	0.5	90	10	0	72
N	0	0	100	0.5	75	5	0	95



Chapitre 2

Table S.2. 4 : Habitat characteristics in former oilseed rape crops measured at each site and used to describe the local habitat. The different characteristics were related to the soil surface, to the litter and to the vegetation. At the time of the sampling, no crop was present.

	Local habitat characteristics							
	Soil surface		Litter		Vegetation			
Site	Surface covered by stones (%)	Surface covered by bare soil (%)	Surface covered by litter (%)	Litter thickness (cm)	Surface covered by vegetation (%)	Number of species	Percentage of monocotyledons in vegetation (%)	Mean height (cm)
A	0	0	100	3	35	4	8	5
B	45	0	100	0.5	75	2	0	17
C	0	0	100	3	1	1	100	13
D	0	0	100	3	45	3	0	13
E	2	60	25	0.5	8	1	0	3
F	0	0	100	3	20	4	0	7
G	0	1	99	2	30	2	0	9
H	0	78	15	0.1	7	1	0	3
I	3	5	95	0.5	90	2	0	3
J	0	80	20	0.1	2	1	0	1
K	0	5	80	0.5	45	4	0	5
L	0	55	10	0.1	45	1	0	4
M	2	30	30	0.1	40	2	1	4
N	0	86	12	0.1	2	1	0	0.5

Table S.2. 5 : Habitat characteristics of woodland edges measured in each site and used to describe the local and the global habitat. The different characteristics were related to the soil surface, to the litter and to the vegetation and to the “openness” and width of the woodland edges. Two types of openness were defined: (i) the canopy openness as the vertical openings through the top of the trees that allowed light entrance; (ii) the horizontal openness as the ease of access to the woodland, related to vegetation density. The width of woodland edges corresponded to the width from the border of the edge to the beginning of woodland interior

Site	Local habitat characteristics									Global habitat characteristics			
	Soil surface		Litter		Vegetation					Vegetation	Openness and width		
	Surface covered by stones (%)	Surface covered by bare soil (%)	Surface covered by litter (%)	Litter thickness (cm)	Surface covered by moss (%)	Surface covered by vegetation (%)	Number of species	Percentage of monocotyledons in vegetation (%)	Mean height (cm)	Mean tree circumference (cm)	Horizontal openness (%)	Canopy openness (%)	Width of woodland edge (m)
A	0	4	15	0.1	2	96	3	97	11	39	80	25	50
B	0	0	100	4	0	92	2	0	10	107	30	0	25
C	0	2	98	1	0	35	4	0	24	45	0	25	20
D	1	30	50	0.5	0	35	3	0	6	39	60	25	60
E	0	5	20	3	10	50	3	0	17	41	0	25	35
F	0	40	20	0.1	22	40	6	5	13	84	30	25	80
G	0	0	100	2	1	70	1	0	8	88	100	75	65
H	0	0	100	2	0	20	3	0	5	54	60	25	25
I	0	0	100	2	0	40	3	0	8	84	30	23	80
J	2	3	90	0.5	3	85	2	0	8	42	30	25	40
K	2	0	90	0.5	15	85	5	0	12	84	60	50	70
L	0	0	100	0.5	0	95	2	0	7	61	0	0	40
M	0	1	99	3	0	85	3	0	11	47	100	50	55
N	0	10	80	0.5	0	55	2	0	5	13	0	0	10



Chapitre 2

Table S.2. 6 : Landscape characteristics within the four circular sector of radius 250, 500, 750 and 1 000 m at each type of habitat and each site.

Type of habitat	Site	Landscape characteristics within the four circular sectors							
		Percentage of fields under oilseed rape harvested in 2021				Percentage of woodland cover			
		250 m	500 m	750 m	1000 m	250 m	500 m	750 m	1000 m
Flower strips	A	0	0	3	4	0	5	2	2
	B	26	7	5	6	1	7	6	9
	C	35	22	18	17	0	3	4	6
	D	25	21	23	21	0	0	0	2
	E	26	27	19	13	0	1	1	3
	F	46	22	12	7	1	3	5	11
	G	0	1	10	11	0	1	7	9
	H	23	34	31	22	0	1	2	4
	I	0	2	8	11	1	1	3	3
	J	43	25	25	20	0	0	0	0
	K	40	26	16	11	0	0	2	3
	L	8	8	6	8	0	0	3	2
	M	18	14	13	7	0	0	3	8
	N	24	13	6	6	1	0	2	2
Woodland edge	A	0	0	4	12	11	4	2	2
	B	1	7	4	5	5	10	11	16
	C	0	1	5	11	38	27	26	23
	D	5	19	25	24	45	15	8	5
	E	0	3	13	15	24	6	3	2
	F	11	19	13	7	17	4	2	2
	G	68	34	17	10	18	11	6	7
	H	65	38	27	19	9	3	4	4
	I	16	22	22	19	14	8	6	9
	J	0	3	6	10	7	3	3	2
	K	4	17	13	8	4	1	3	7
	L	0	0	0	1	24	6	3	3
	M	0	2	4	5	41	33	27	23
	N	24	13	7	6	1	0	2	2
Former oilseed rape crop	A	29	13	6	6	0	0	4	3
	B	28	7	6	6	3	5	6	8
	C	41	23	18	17	0	2	4	6
	D	25	19	23	21	0	0	0	1
	E	31	24	18	13	0	0	1	3
	F	59	22	12	7	1	3	6	12
	G	31	15	14	9	1	4	3	7
	H	63	39	35	23	0	0	2	1
	I	51	35	25	22	11	8	5	6
	J	39	27	26	20	0	0	0	0
	K	44	25	16	11	0	0	1	3
	L	23	11	7	10	0	0	1	2
	M	19	14	13	7	0	0	4	8
	N	0	13	6	6	0	0	2	2

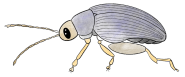


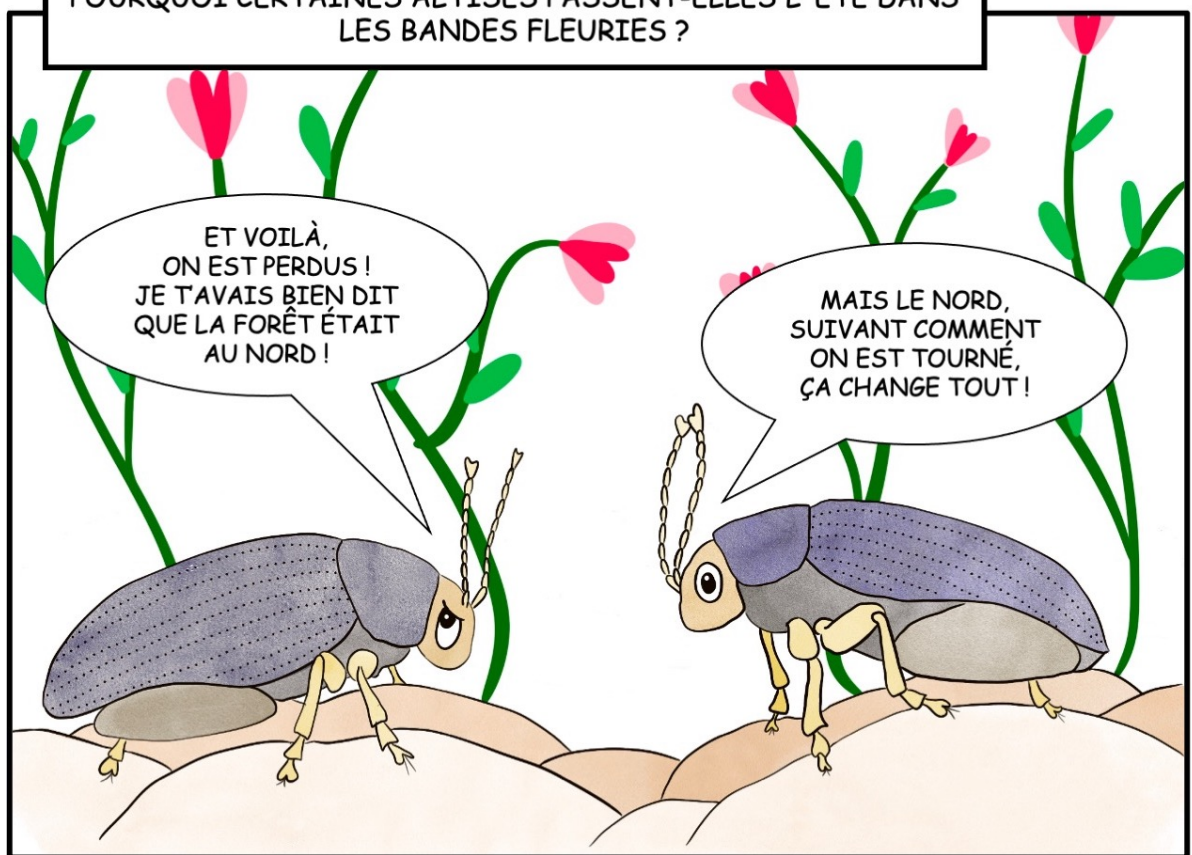
Table S.2. 7 : Summary of the Moran's Index calculated to evaluate the possible presence of spatial autocorrelation in the abundance of emerged cabbage stem flea beetles: the test for Moran's I coefficient was not significant

Moran's Index	- 0.14653665
Expected Index	- 0.07692308
Variance	0.02091434
Z-score (Moran I statistic standard deviate)	- 0.48136
p-value	0.6303

Table S.2. 8 : Total number of cabbage stem flea beetles counted in emergence traps at the various sites for each type of habitat, showing the total, the mean and the standard error of mean (SEM) per habitat type

Site	Flower strip	Former oilseed rape crop	Woodland edge
A	6	1	17
B	0	2	26
C	10	5	5
D	1	2	2
E	0	1	4
F	2	10	6
G	4	4	38
H	0	2	29
I	0	5	27
J	5	0	29
K	2	0	23
L	0	14	2
M	5	1	6
N	0	6	2
TOTAL	35	53	216
MEAN	2.5	3.8	15.4
SEM	0.8	1.1	3.4

POURQUOI CERTAINES ALTISES PASSENT-ELLES L'ÉTÉ DANS
LES BANDES FLEURIES ?



ET VOILÀ,
ON EST PERDUS !
JE T'AVAIS BIEN DIT
QUE LA FORÊT ÉTAIT
AU NORD !

MAIS LE NORD,
SUIVANT COMMENT
ON EST TOURNÉ,
ÇA CHANGE TOUT !

Discussion générale

« Enfin vient la montagne hostile
Et son ascension au mille périls
Où les victoires sont triomphales
Mais où les chutes sont souvent brutales
Seuls quelques-uns se hissent en haut
Et réussissent à planter leur drapeau
La plupart stoppe à mi-trajet
Et se résigne bien à court du sommet

Prépare toi petit garçon
Elle s'ra longue l'expédition
Et même si on n'en revient jamais vivant
Il faut marcher droit devant »

Les Cowboys fringants, Droit devant



Photographie : Justine Pigot



Dans cette thèse, nous avons cherché à identifier les effets directs et indirects des systèmes de culture mis en place dans un contexte de production en grande culture sur les communautés d'invertébrés présents. Nous nous sommes notamment intéressés à la régulation d'un ravageur très problématique pour la culture de colza d'hiver : l'altise d'hiver, (Chrysomelidae : *Psylliodes chrysocephala*, Linnaeus, 1758). Ainsi, nous avons cherché à évaluer l'ampleur de la régulation biologique de ce ravageur (ascendante ou « *bottom-up* » et descendante ou « *top-down* ») et les conséquences que cela peut avoir sur les dégâts aux cultures, via une notion de risque. Ce travail est détaillé dans le premier chapitre.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés au possible effet de la présence de bandes fleuries implantées à proximité de parcelles cultivées, sur la dynamique des populations d'altises d'hiver. Nous avons étudié un possible rôle de refuge au moment de l'estivation des altises. C'est un moment crucial du cycle biologique de ce ravageur, où les nouveaux adultes cherchent un lieu pour réaliser leur diapause. Nous avons constaté que cette période du cycle des altises n'était plus très étudiée depuis les années 1950. Cependant, des changements sont intervenus depuis, notamment une simplification du paysage du Bassin parisien, dont les effets négatifs sur la biodiversité tentent d'être limité grâce à l'implantation d'habitats semi-naturels comme des bandes fleuries. Cependant, l'implantation de ces habitats pourrait également bénéficier à des communautés de ravageurs, dont font partie les altises d'hiver. Cette étude fait l'objet du second chapitre.

Cette discussion générale est divisée en six parties. La première partie revient sur les objectifs de la thèse et les résultats obtenus. Nous discuterons ensuite des avantages et limites que nous avons observés lors de notre travail en parcelles agricoles. Dans un troisième temps, nous nous intéresserons à la nécessité d'étudier la diversité de pratiques pouvant être mises en place en grande culture. Nous y aborderons notamment la méthode que nous avons adoptée pour capter cette diversité et en étudier les conséquences directes et indirectes. Dans une quatrième partie, nous aborderons l'enjeu de l'implantation des bandes fleuries dans les plaines agricoles. Enfin, dans une dernière partie, nous mettrons en avant quelques perspectives de recherche que nous avons identifiées suite à ce travail de thèse.

Les points d'originalité de la thèse que nous avons identifiés seront présentés dans des encadrés tout au long de la discussion.



I. Avons-nous réussi à atteindre, au moins partiellement, les objectifs de la thèse ?

A. Quels sont les apports du premier chapitre ?

Nous revenons d'abord sur le premier chapitre, consacré aux populations de larves d'altises d'hiver. Ce chapitre a participé à répondre aux deux premières questions de la thèse, qui sont :

- (A) Quels sont les effets des systèmes de culture, *via* l'étude des différentes pratiques et leurs effets directs et indirects, sur les communautés d'invertébrés présents dans les parcelles ?**
- (B) Quelle est l'ampleur de la régulation et quelles sont les conséquences sur les dégâts aux cultures ?**

Dans un premier temps, nous avons supposé que certaines pratiques pourraient avoir des effets directs sur la régulation des larves d'altises, mais également indirects, en agissant sur les états du milieu, (régulation « *bottom-up* »). En étudiant les populations de larves d'altises présentes dans les parcelles, nous avons identifié des effets directs de certaines pratiques, mais également des effets indirects via certaines composantes des états du milieu. Nous avons également observé des effets sur le risque associé à ces populations. Nous avons, par exemple, constaté un impact négatif de la végétation (via la couverture) présente dans les parcelles : de la culture elle-même, mais également des autres espèces végétales pouvant être présentes. Un même effet avait déjà été observé pour le charançon du bourgeon terminal (Cadoux *et al.*, 2015).

Nous avons également supposé que des systèmes de culture ayant des pratiques favorables aux prédateurs pourraient conduire à une meilleure régulation biologique (régulation « *top-down* »). Cependant, la régulation *top-down* des larves d'altises d'hiver est apparue très faible dans nos analyses. En effet, seules les araignées ont impacté négativement le nombre de larves présentes. Nous n'avons pas observé d'autres effets de la présence d'araignées sur la proportion de larves au stade L3 ou le risque associé aux larves. Ainsi, la présence de prédateurs et de proies alternatives ne semble pas beaucoup impacter les populations de larves d'altises et les risques associés, en comparaison à la régulation *bottom-up*. Dans une analyse de synthèse (Chapitre 1, IV.E), nous avons testé l'effet des pratiques en place et des états du milieu observés sur les prédateurs et les proies alternatives présentes. Cependant, aucune relation significative n'est apparue. Contrairement aux résultats sur les effets des pratiques, nous n'avons donc pas pu déterminer si certains systèmes de culture pouvaient favoriser les prédateurs et la régulation biologique des larves d'altises.

Les connaissances apportées par ce chapitre vis-à-vis des questions de thèse sont présentées sur la Figure 14 qui reprend le schéma récapitulatif de la thèse (Introduction, Figure 10).

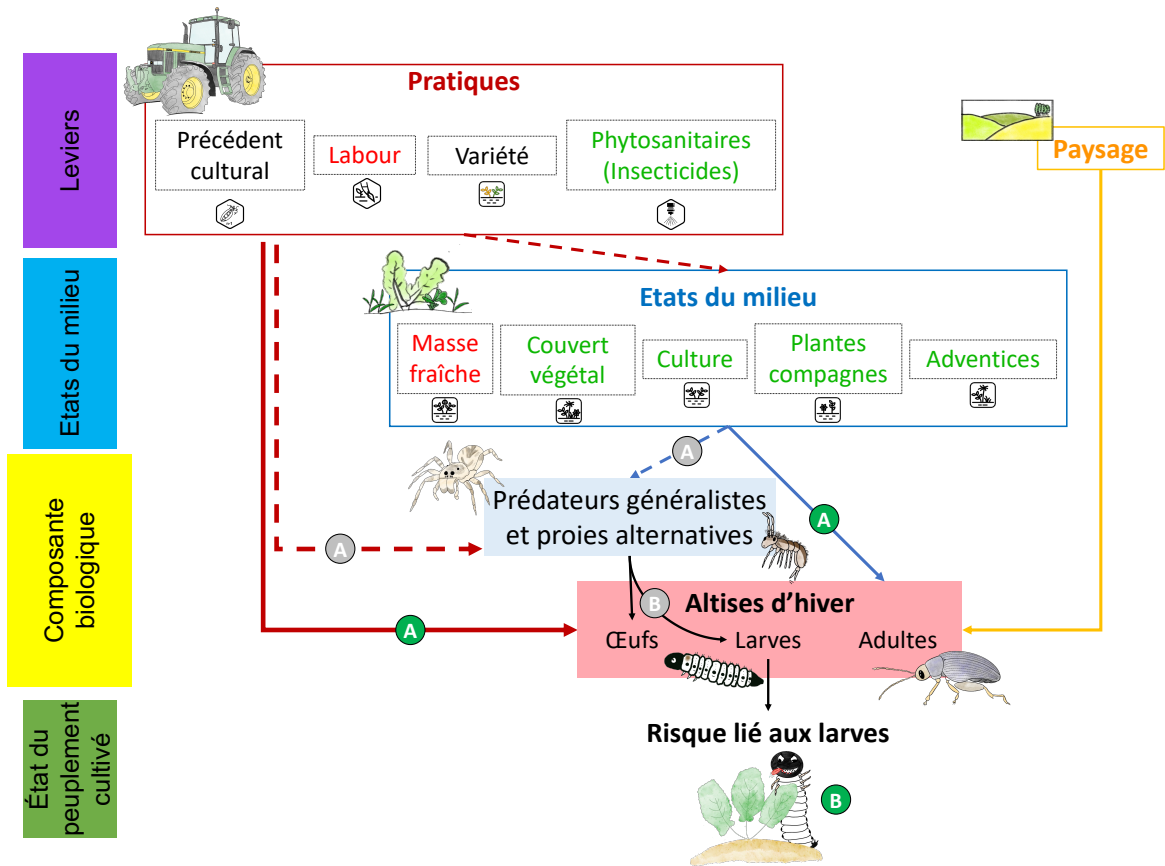


Figure 14 : Schéma récapitulatif du Chapitre 1 présentant les éléments étudiés et positionnant les grandes questions de recherche (A et B). Lorsque le chapitre a permis de répondre à la question, la lettre de la question est dans un cercle vert. A l'inverse, lorsqu'il ne l'a pas permis, la lettre est dans un cercle gris. Les éléments des pratiques et des états du milieu dont nous avons observé un effet sur la régulation des larves d'altises sont colorés selon le sens de l'effet : vert pour les éléments favorisant la régulation biologique et rouge pour les éléments limitant la régulation. Les éléments en noir sont des variables binaires. Les flèches en pointillés illustrent des relations qui existent mais qui n'ont pas été étudiées de façon approfondie. (©Dessins de Justine Pigot)



Points d'originalité du premier chapitre

Le premier chapitre concernant les populations de larves d'altises d'hiver présentes dans les parcelles de colza se base sur trois variables de réponse analysées en parallèle afin d'offrir l'étude la plus complète possible. Cette démarche nous a permis d'appréhender les populations de différentes manières : (i) de façon directe via le nombre de larves présentes, mais également avec (ii) un aspect temporel via le pourcentage de larves au stade L3, qui correspondent aux premières pontes et (iii) avec une vision plus agronomique via le risque associé. De telles études sont peu courantes dans la littérature.

Dans notre analyse de la régulation *top-down*, nous avons veillé à considérer la cohorte de prédateurs présents, ainsi que les proies alternatives. En effet, de nombreuses études se concentrent sur quelques prédateurs, comme les carabes ou les araignées. Or, une diversité de prédateurs peut participer à la régulation biologique des ravageurs. De même la présence de proies alternatives peut limiter la prédation des ravageurs par les prédateurs généralistes. Ainsi, il semble nécessaire de faire des études qui évaluent les effets de la présence d'une diversité de prédateurs et de proies alternatives, ainsi que leurs interactions, sur la régulation biologique des ravageurs.

Nous avons également tenté d'affiner notre analyse de l'impact des carabes via l'utilisation de traits fonctionnels : le régime alimentaire et la taille. En effet, toutes les espèces de carabes n'ont pas forcément le même impact sur la régulation des ravageurs : certaines espèces sont granivores, d'autres peuvent être trop petites pour consommer un ravageur donné. Cette approche devient plus courante dans la littérature et permet des études plus fines.



B. Quels sont les apports du second chapitre ?

Le second chapitre était consacré au rôle des bandes fleuries dans l'estivation des altises d'hiver. Ce chapitre a permis de répondre à la dernière question de thèse, qui est la suivante :

(C) Dans quelle mesure la présence d'une bande fleurie peut-elle impacter les ravageurs présents dans les parcelles ?

Nous avons supposé que les bandes fleuries implantées aux abords des parcelles ne constituaient pas un refuge majeur pour l'estivation des nouvelles altises d'hiver adultes qui émergent des parcelles de colza. C'est en effet une des préoccupations lors de l'implantation d'habitats semi-naturels, comme des bandes fleuries : ces habitats doivent être favorables aux insectes bénéfiques, comme les ennemis naturels ou les pollinisateurs, sans l'être aux ravageurs (Tscharrntke *et al.*, 2016). Avec notre étude, nous avons constaté que les bandes fleuries pérennes étudiées ne constituaient pas un refuge pour l'estivation des altises d'hiver, en comparaison des lisières de bois. Les lisières de bois étaient déjà les principaux refuges d'estivation identifiés dans la littérature (Bonnemaison et Jourdeuil, 1954b). Nous avons donc tenté d'identifier les caractéristiques de l'habitat qui pourraient être favorables à l'estivation des altises d'hiver. Nous avons par exemple observé des effets positifs de la présence de litière ou de la circonférence des arbres.

Les connaissances apportées par ce chapitre vis-à-vis de la question de thèse sont présentées sur la Figure 15 qui reprend le schéma récapitulatif de la thèse (Introduction, Figure 10).

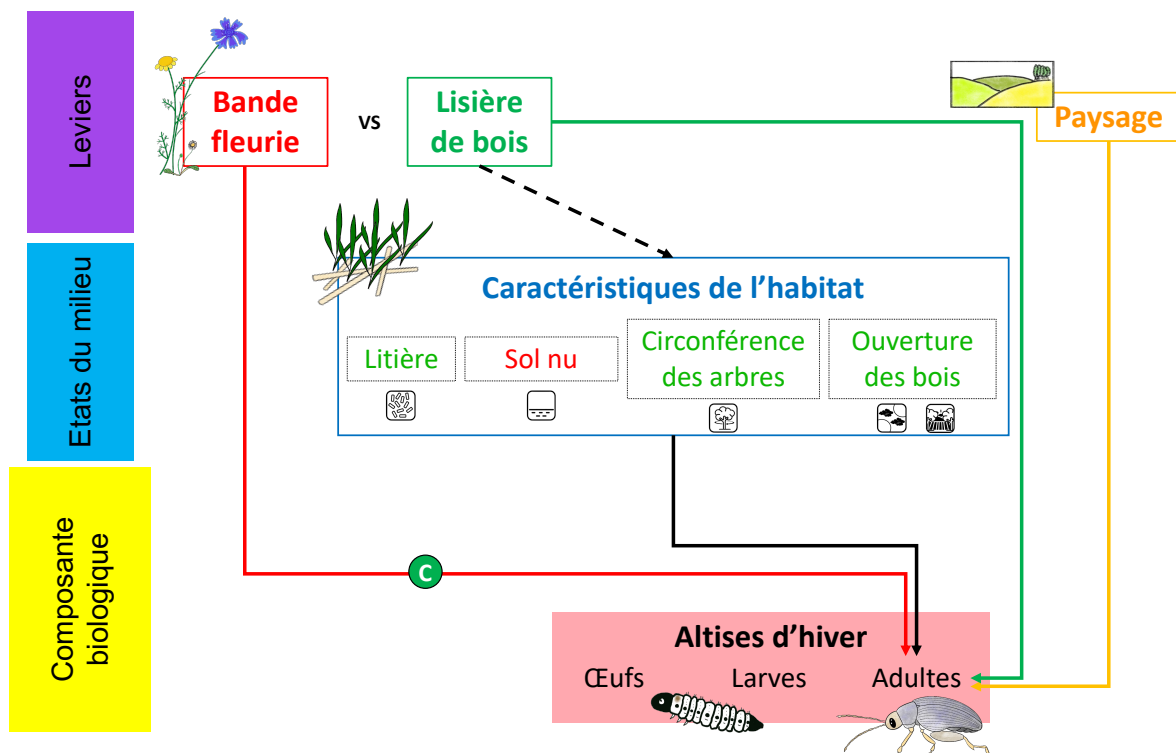


Figure 15 : Schéma récapitulatif du Chapitre 2 présentant les éléments étudiés et positionnant la grande question de recherche (C). Le chapitre ayant permis de répondre à la question, la lettre de la question est dans un cercle vert. Les caractéristiques de l'habitat identifiées comme impactant l'estivation des altises d'hiver sont colorés selon le sens de l'impact : vert pour les éléments favorisant la présence d'altises et rouge pour les caractéristiques la limitant.

(©Dessins de Justine Pigot)



Points d'originalité du second chapitre

Ce chapitre s'intéressait à un moment du cycle biologique des altises d'hiver qui n'est plus très étudié depuis les années 1950. Des études plus récentes sont nécessaires car le comportement des altises a pu changer, par exemple vis-à-vis des changements climatiques et de la simplification du paysage. De même des études à des petites échelles, comme la nôtre, sont intéressantes, car elles peuvent apporter des connaissances réutilisables par des études plus globales.

Notre étude s'est basée sur l'analyse de caractéristiques de l'habitat afin de tenter d'identifier les éléments favorables à la présence d'altises d'hiver durant l'estivation. Cette approche est très intéressante pour améliorer la compréhension du comportement des insectes vis-à-vis d'un environnement ou d'un habitat donné.

Ce chapitre était consacré à l'étude du potentiel rôle bénéfique de l'implantation d'habitats semi-naturels, comme les bandes fleuries, pour les ravageurs de grande culture, dont font partie les altises d'hiver. Les études s'intéressant à ce rôle pour les ravageurs sont moins nombreuses que celles évaluant l'impact de la présence de ces habitats sur les arthropodes bénéfiques, comme les ennemis naturels ou les pollinisateurs. Favoriser ces organismes est en effet l'un des objectifs principaux de l'implantation des habitats semi-naturels. Cependant, leur présence pouvant également favoriser les ravageurs, des études sont nécessaires afin de comprendre en quoi certains habitats peuvent être bénéfiques à des ravageurs à des périodes données. Cela pourra participer à la conception d'habitats semi-naturels dont les caractéristiques peuvent favoriser un maximum d'organismes bénéfiques, tout en limitant leur utilisation par des organismes nuisibles aux cultures.



II. Quels sont les avantages et limites du travail en parcelles agricoles que nous avons identifiés ?

Dans leur synthèse bibliographique, Petit *et al.* (2020) ont constaté que peu de travaux visant à mieux maîtriser les ravageurs en grande culture se sont déroulés en parcelles agricoles. Il est tout de même possible d'en citer quelques-uns, comme l'étude de Valantin-Morison *et al.* (2007) qui ont étudié l'effet de pratiques mises en place dans des parcelles de colza en agriculture biologique sur l'incidence des ravageurs. Il existe également des études plus récentes comme celles de Chabert et Sarthou (2017) et Duflot *et al.* (2022) qui se sont intéressées à l'impact direct et indirect, via l'étude de la biodiversité, des pratiques des agriculteurs sur les rendements céréaliers. De telles études sont importantes car elles permettent d'accéder à une diversité de systèmes de culture, que des études en conditions contrôlées ou semi-contrôlées ne peuvent pas entièrement reproduire. Cette approche tient compte d'une analyse systémique du champ cultivé qui englobe des variables propres à la nature du sol (caractéristiques physiques et chimiques), mais également les pratiques mises en place par l'agriculteur et la composante biologique qui en résulte (biodiversité présente). De cette approche peut découler une évaluation des pratiques et de leurs impacts particulièrement intéressante. En effet, là où l'expérimentation en conditions contrôlées ou semi-contrôlées permet de comparer des traitements où peu de variables diffèrent, l'observation de parcelles agricoles offre une gamme de systèmes de culture et donc une diversité d'états du milieu et de structure de composantes biologiques, résultant de ces systèmes (Doré, 2000). De même, des études en conditions plus ou moins contrôlées ne peuvent pas permettre d'appréhender la complexité des réseaux trophiques qui peuvent exister au sein des parcelles. En effet, il existe souvent une diversité de prédateurs et de proies. Or, dans ces études, il n'est pas possible de travailler avec de telles diversités d'organismes. De plus, le travail en parcelles agricoles est également important pour les études à l'échelle paysagère : dans une même région, il peut exister une diversité de paysages.

Le travail en parcelles agricoles présente ainsi plusieurs avantages. En effet, la parcelle agricole est un révélateur de réel (Doré, 2000). Ainsi, comme nous l'avons expérimenté, un des premiers atouts est de pouvoir étudier les effets d'ensembles de pratiques qui sont réellement mis en œuvre dans une région donnée. Nous nous approchons au plus près de la réalité des conditions dans lesquelles les systèmes sont mis en place, tout en prospectant une large gamme de cette réalité agricole, là où une expérimentation en conditions contrôlées est forcément plus limitée en termes de gamme de situations prospectée. Les observations en parcelles agricoles peuvent permettre d'élaborer des hypothèses qui pourront ensuite être testées à l'aide de modèles expérimentaux (Sebillotte, 1974). L'approche en parcelles agricoles se trouve ainsi complémentaire de l'approche en station expérimentale, qui de son côté permet une meilleure approche des mécanismes biologiques grâce à une instrumentation plus poussée et une meilleure puissance statistique, pour étudier les effets de pratiques ou d'aménagements sur la régulation des ravageurs. Par ailleurs, cette analyse sur un réseau de parcelles d'agriculteurs permet de générer une gamme de variation d'états du milieu heuristique. Dans notre cas, l'insertion d'une diversité de modalités de travail du sol et la mise en place de bandes fleuries se fait au sein de systèmes réels, ce qui crée une diversité originale d'états du milieu que l'on n'aurait pas su spontanément reproduire en station. Et cette gamme d'états est un élément clé pour aider à la compréhension des phénomènes. Enfin, on ne saurait négliger le bénéfice lié au contact et à la communication avec les agriculteurs et d'autres acteurs du monde agricole, comme des conseillers de chambre d'agriculture. Ces contacts permettent un transfert de connaissances dans les deux sens.

Cependant, le travail en parcelles agricoles présente également des inconvénients. L'inconvénient majeur est le fait de ne pas pouvoir beaucoup contrôler. Dans la plupart des cas, les agriculteurs ne modifient pas leurs pratiques pour les suivis, il faut donc se plier aux contraintes imposées par les agriculteurs, comme les délais de rentrée dans les parcelles après un traitement. De plus, certaines



Discussion générale

pratiques peuvent endommager ou perturber les suivis, comme les binages qui peuvent déterrer les pièges Barber. Un autre inconvénient est lié au fait de travailler en conditions non contrôlées : des effets confondants peuvent apparaître, car il n'est pas possible de bloquer une variable et d'en faire varier une autre. Enfin, le travail en parcelles agricoles implique souvent de nombreux déplacements afin de capter un maximum de diversité dans une région donnée. Ces déplacements sont coûteux en temps et sur le plan économique. Le travail à cette échelle demande également une bonne organisation.

Une autre limite majeure à cette approche est la nécessité de demander aux agriculteurs des itinéraires techniques les plus complets possibles. En effet, cela rajoute une charge de travail non négligeable : trouver un créneau où l'agriculteur est disponible, le temps du rendez-vous plus ou moins long, puis la saisie et le traitement des données. De plus, les données ne sont pas toujours très précises et certaines sont parfois manquantes.

Enfin, la dernière limite que nous avons identifiée est liée aux conditions météorologiques. Dans nos analyses nous n'avons pas inclus de variables liées au climat, car nous avons l'hypothèse que les conditions météorologiques n'étaient pas très variables entre les différentes parcelles étudiées. Cette hypothèse semble plutôt bonne au regard des températures mensuelles moyennes des trois départements où se trouvaient nos parcelles, qui sont peu variables (Introduction : Figure 12 et Tableau S.2). L'observation de la température moyenne mensuelle était suffisante pour nous permettre d'émettre une hypothèse sur la différence d'abondance de larves entre les deux années de suivi dans le Chapitre 1. Cependant, il aurait pu être intéressant d'utiliser des capteurs afin d'avoir des mesures plus fines des conditions météorologiques à l'échelle des parcelles, mais également au sein des habitats. De telles mesures auraient pu affiner nos analyses dans le Chapitre 2 sur l'estivation des altises d'hiver. En effet, même si le microclimat présent dans les habitats est probablement fortement lié à la présence de résidus et à la densité du couvert végétal, des mesures telles que la température ou l'hygrométrie apparaissent complémentaires.



Points d'originalité

Il est intéressant de travailler sur des parcelles agricoles pour avoir accès aux pratiques réellement mises en œuvre. Cette approche donne accès à une diversité (pratiques, états du milieu) qu'aucune expérimentation contrôlée ou semi-contrôlée ne peut offrir. Cependant, ce sont deux approches complémentaires : les observations faites peuvent en effet conduire à l'élaboration d'hypothèses ou de pistes qui pourront être testées par des modèles expérimentaux.

Si de nombreux travaux existent en parcelles agricoles en particulier dans la communauté agronomique française, beaucoup se concentrent sur un nombre limité d'organismes, notamment les carabes. Les travaux s'intéressant à l'impact d'un grand nombre d'organismes (prédateurs et proies alternatives) sur la régulation biologique de ravageurs, demeurent rares.



III. Comment et pourquoi capter la diversité de pratiques présente au sein des systèmes ?

Au sein des systèmes de culture, il existe une diversité de pratiques (nature et intensité) qui constitue une « hétérogénéité cachée » qui peut fortement influencer la biodiversité présente (Vasseur *et al.*, 2013). Une analyse plus fine des systèmes de culture est donc nécessaire afin de capter cette hétérogénéité. Dans cette thèse, nous avons adopté deux approches : (i) en étudiant les pratiques en place dans les parcelles étudiées et (ii) en observant les états du milieu, qui sont les effets indirects des pratiques en place.

A. Étudier les pratiques en place dans les parcelles et de leurs conséquences directes

L'étude des pratiques mises en place dans les parcelles offre une analyse plus fine que si on se contentait de se référer à des grandes catégories de systèmes de culture. Il est alors possible de prendre en compte les caractéristiques propres aux pratiques mises en œuvre dans les parcelles agricoles, la chronologie des opérations et leurs interactions. Cette analyse plus fine peut devenir complexe si les éléments sont regardés un à un de façon très précise. Cependant, il n'y a pas toujours besoin d'autant de détails. Ainsi, dans cette thèse, nous avons choisi de prendre en compte des indicateurs simples, comme le nombre d'opérations de travail du sol superficiel (hors labour) avant le semis de la culture ou différents indices de fréquence de traitement (IFT). Ce travail a été fait dans l'esprit de Büchi *et al.* (2019), mais nous n'avons pas utilisé les « indices composites d'intensité », car il ne nous semblait pas nécessaire d'avoir une synthèse plus fine des pratiques en place. Un travail similaire a été fait par Chassain *et al.* (2023), afin d'étudier les effets de systèmes de culture diversifiés sur la faune du sol, fondé sur le même réseau d'agriculteurs que nous. Cependant, il est nécessaire de vérifier la variabilité des pratiques entre les différentes parcelles, mais également entre les différents systèmes de culture. En effet, à l'échelle des parcelles, certaines pratiques sont apparues peu variables et n'ont donc pas été prises en compte dans notre analyse. A l'échelle des systèmes de culture, certaines pratiques sont apparues très caractéristiques de certains modes de production. C'est par exemple le cas du couple « travail du sol – utilisation de produits phytosanitaires » qui discrimine les systèmes en agriculture biologique et en agriculture de conservation du sol.

Nous n'avons également pas pris en compte l'intensité des perturbations mécaniques (profondeur de travail). En effet, par exemple, plusieurs études ont montré, dans le cas du labour, que c'est la perturbation elle-même qui est défavorable à la biodiversité du sol et que l'intensité importe peu (Rowen *et al.*, 2020). Ainsi, dans leur méta-analyse, Rowen *et al.* (2020) ont observé une plus grande abondance d'arthropodes prédateurs passant une partie de leur cycle dans le sol dans les systèmes sans labour, indépendamment de l'intensité de perturbation. Cela peut s'expliquer par le fait que les prédateurs peuvent être blessés directement par la perturbation mécanique du labour (Holland et Luff, 2000; Gailis et Turka, 2013; Blubaugh et Kaplan, 2015) ou touchés indirectement via la perte d'habitats favorables (Holland et Luff, 2000; Gailis et Turka, 2013). Nous n'avons donc conservé que la discrimination labour / non labour.

L'identification de pratiques participant à la régulation des ravageurs entre dans le quatrième principe de la Protection Intégrée des Cultures (PIC) et de la Protection Agroécologique des Cultures (PAEC : l'utilisation de méthodes de lutte non chimique pour prévenir l'impact des ravageurs. Notre travail de thèse s'est concentré sur la régulation biologique via les états du milieu (régulation *bottom-up*) et via les prédateurs (régulation *top-down*). Il existe cependant une autre méthode de lutte non chimique : l'utilisation de produits de biocontrôle par exemple. Nous n'avons pas pu considérer cette méthode dans notre travail car aucun de nos agriculteurs n'en utilisait. Leur usage n'est pas encore



Discussion générale

répandu en grande culture, mais il est promu par les politiques publiques (Xicluna, 2023). Il pourrait en effet limiter l'utilisation des produits phytosanitaires chimiques.

Dans notre travail, nous avons également pris en compte la lutte curative, chimique, via l'utilisation d'insecticides. Comme mentionné dans la PAEC, ce moyen de lutte doit intervenir en dernier recours. La PIC la mentionne également dans ses derniers principes (5 à 8) et souligne l'utilisation raisonnée des produits phytosanitaires en prêtant attention à la substance active utilisée, la dose, l'efficacité et les risques de résistance. Dans notre étude sur les larves d'altises, nous avons constaté que même si des résistances sont observées dans les populations d'altises d'hiver, l'utilisation d'insecticides (majoritairement à base de pyréthriinoïdes) demeure efficace.

B. Utiliser les états du milieu, traduisant l'impact indirect des pratiques, afin d'affiner la compréhension des effets et de combler les manques potentiels

Les parcelles agricoles constituent un habitat pour les arthropodes qui y vivent. Les différentes pratiques mises en œuvre, via un itinéraire technique, induisent des modifications des états du milieu caractérisant cet habitat (par exemple la présence de litière ou la densité de culture). Ces modifications peuvent avoir des impacts positifs comme négatifs sur les arthropodes présents. Ainsi, l'observation des états du milieu, et de leur évolution, peut participer à améliorer la compréhension des effets des pratiques agricoles en place (Doré, 2000). Elle offre la possibilité de faire un diagnostic a posteriori et permet d'aborder la parcelle cultivée d'une manière fonctionnelle (Doré *et al.*, 2008). En effet, cela permet de comprendre comment une pratique donnée impacte un ou plusieurs éléments de l'habitat, et donc les organismes qui y vivent. Ainsi, il pourrait être possible pour l'agriculteur de moduler ses pratiques afin d'agir sur l'habitat présent au sein de la parcelle, et donc sur les organismes qu'il souhaite favoriser. Au cours de cette thèse, nous avons également constaté que l'utilisation des états du milieu pouvait permettre de faire face à des manques présents dans les itinéraires techniques fournis par les agriculteurs.

En nous fondant sur l'observation des états du milieu présents au sein des parcelles, nous avons pu affiner la compréhension des effets indirects des pratiques, qui modifient le milieu de vie des arthropodes. Elles ont pu nous permettre de mieux comprendre les impacts d'éléments de l'habitat, comme la couverture végétale (densité et diversité), sur les ravageurs et sur leurs ennemis naturels. Nous avons trouvé des effets des états du milieu dans le travail sur les larves d'altises d'hiver. En comparant les modèles testant les effets des pratiques et ceux testant les effets des états du milieu, les premiers apparaissent plus informatifs. Cependant, cela ne signifie pas qu'il faut se passer des états du milieu. Au contraire, ces deux approches nous semblent complémentaires. En effet, les états du milieu permettent d'affiner la compréhension des effets des pratiques en place. Cela peut ensuite contribuer à la conception de stratégies qui pourront être proposées pour gérer les bioagresseurs. Par exemple, dans le Chapitre 1, nous avons identifié deux stratégies possibles : l'atténuation de l'impact des larves d'altises d'hiver et l'évitement. Ainsi, l'étude des états du milieu peut permettre d'affiner le premier principe de la PIC «Prévention et suppression » et contribuer au quatrième principe de la PAEC qui concerne la mise en place de leviers agronomiques et paysagers.

De plus, dans des études sur la biologie des organismes, comme dans le travail sur le rôle des bandes fleuries dans l'estivation des altises d'hiver, l'observation et l'analyse des caractéristiques des microhabitats nous semblent primordiaux. En effet, cela permet de comprendre le comportement et les réactions des organismes face à différents habitats, selon leurs caractéristiques. Ces études peuvent alors être complémentaires d'études analysant de gros jeux de données, à plus grande échelle, comme celle de Delaune *et al.* (2021) qui ont étudié, à l'échelle du paysage, l'impact des espaces semi-naturels sur l'abondance de bioagresseurs dans les parcelles cultivées. Ils avaient d'ailleurs noté que leur étude



pouvait fournir quelques hypothèses à exploiter sur certaines espèces de ravageurs dont les cycles biologiques sont peu connus, notamment sur l'utilisation des bois comme lieu de refuge.

Dans des études non exploratoires, où des hypothèses fortes vis-à-vis de certaines pratiques agricoles sont à vérifier, il est possible d'utiliser cette approche pour alléger les questionnaires aux agriculteurs. Elle ne permet cependant pas de s'affranchir des questionnaires aux agriculteurs, notamment vis-à-vis des traitements insecticides qui ne sont pas visibles en observant les états du milieu. Ainsi, cette approche pourrait être utilisée dans des études à larges échelles, comme l'échelle paysagère où de nombreux agriculteurs sont impliqués, afin de limiter la charge de travail liée aux questionnaires agriculteurs. En effet, dans leur revue, Vasseur *et al.* (2013) avaient noté que dans la plupart des études à l'échelle des paysages agricoles, l'impact de la présence d'hétérogénéité était surtout étudié via les éléments naturels et semi-naturels présents. Or, les parcelles cultivées présentent également de l'hétérogénéité, dans l'espace et le temps. Il est donc important de la prendre en compte, notamment dans les études s'intéressant à l'implantation d'habitats semi-naturels dans le but de favoriser des espèces d'intérêts économique (comme les prédateurs de ravageurs ou les pollinisateurs).

Nous avons tout de même identifié quelques inconvénients liés à cette approche. L'observation des états du milieu dans les parcelles et dans les habitats demande du temps et il faut être exhaustif : il n'est pas possible d'y revenir car les états du milieu changent avec le temps. De plus, il peut y avoir un fort effet observateur auquel il faut être particulièrement attentif, notamment dans notre cas vis-à-vis de la quantification du pourcentage de surface couverte. Dans la thèse, nous avons tenté de minimiser cet effet en limitant le nombre d'observateurs : un maximum d'observations a été fait par la doctorante. Pour les autres observateurs, des points ont régulièrement été faits avec la doctorante afin d'avoir des observations les plus homogènes possibles dans les modalités de notation et de description. Enfin, la dernière limite majeure identifiée est la même que pour l'approche via les pratiques : il peut exister des effets confondants avec les systèmes de culture. Par exemple, la présence de résidus en surface va souvent de pair avec les systèmes limitant le travail du sol, c'est-à-dire en agriculture de conservation des sols.



Points d'originalité

Nous avons décidé d'adopter une approche plus fine des systèmes de culture en prenant en compte les pratiques mise en œuvre dans les parcelles étudiées, via des variables simples (par exemple IFT insecticides, nombre de labours). Nous nous sommes également basés sur les états du milieu observables dans les parcelles, qui résultent des pratiques en place. Ces éléments demeurent peu étudiés, mais peuvent améliorer la compréhension des effets des pratiques sur la régulation des ravageurs.

Notre démarche avait pour but d'affiner la compréhension de l'impact des différents systèmes de culture en place dans notre région de grande culture, tout en tentant de nous détacher des grands modes de production « agriculture biologique », « agriculture de conservation du sol » et « agriculture conventionnelle ».



IV. Pourquoi implanter des bandes fleuries à proximité des parcelles cultivées ?

L'implantation d'habitats semi-naturels comme une bande fleurie peut apparaître comme un levier plus gérable que le paysage pour les agriculteurs. Il est en effet reconnu que le paysage a un fort effet sur les ennemis naturels (Bianchi *et al.*, 2006; Chaplin-Kramer *et al.*, 2011). De plus, Sirami *et al.* (2019) ont observé que la présence d'hétérogénéités dans le paysage avait un impact positif plus important sur la diversité multi-trophique des invertébrés que l'augmentation des habitats semi-naturels. Cependant, l'implantation d'habitats semi-naturels (HSN) aux abords des parcelles est un levier plus facilement gérable par les agriculteurs. D'ailleurs, l'implantation d'infrastructures agroécologiques est promue par des politiques publiques, comme la politique agricole commune (PAC) (Scheper *et al.*, 2013; European Commission, 2018).

A. Dans notre étude, la présence d'une bande fleurie à proximité des parcelles ne bénéficie pas aux populations d'altises d'hiver

Dans le Chapitre 2, nous nous sommes intéressés à l'éventuel effet favorable de la présence d'une bande fleurie sur l'estivation des altises d'hiver. Bien que cet effet ne soit pas désiré, il fait partie des inconvénients possibles liés à l'implantation d'une bande fleurie, et de façon générale, d'habitats semi-naturels (Tschardtke *et al.*, 2016). Nous n'avons pas constaté un tel effet dans notre étude. Cependant, nous avons étudié un nombre limité d'habitats et nous ne pouvons donc pas nous prononcer sur le rôle des infrastructures boisées comme les haies. Dans leur synthèse, Petit *et al.* (2020) ont observé que les habitats semi-naturels comme les bandes fleuries, les bandes enherbées et les haies, augmentaient l'abondance et la diversité des ennemis naturels dans la moitié des études. De même, dans la plupart des études, la présence d'HSN diminuait l'abondance des ravageurs dans la parcelle adjacente, ou n'avait pas d'effet. Cependant, tous les insectes ravageurs ne réagissent pas de la même façon, ainsi des études sur d'autres organismes peuvent être nécessaires.

Notre résultat peut participer à rassurer les agriculteurs lorsqu'ils réfléchissent à implanter des bandes fleuries, dans le cas des altises. De plus, les bandes fleuries présentent d'autres fonctionnalités que la gestion des ravageurs, en ayant un aspect plaisant qui peut conduire à des activités récréatives, comme la cueillette de fleurs. En effet, c'est ce qu'a étudié Lola Serée dans sa thèse (Serée, 2022). Cependant, les bandes fleuries, notamment les plus complexes, peuvent demeurer onéreuses. A titre d'exemple, la bande fleurie pérenne de notre étude coûte environ 1000 €/ha, ce qui peut paraître beaucoup. Ce prix s'explique notamment par la présence d'espèces végétales sauvages dont la production est très limitée, au contraire des espèces fourragères ou horticoles. Cependant, ce prix est à relativiser car les bandes sont pérennes, au contraire de la plupart des mélanges commerciaux qui doivent être ressemés tous les deux-trois ans.



B. Implanter des habitats semi-naturels pour favoriser la présence d'ennemis naturels et ainsi la régulation biologique

Même si la régulation *top-down* est apparue très limitée dans notre étude sur les populations de larves d'altises d'hiver, elle peut être plus conséquente dans la régulation d'autres ravageurs. Dans ces cas, la présence d'un HSN, comme une bande fleurie, à proximité pourrait augmenter la régulation. La synthèse de Petit *et al.* (2020) montre qu'il existe une variabilité dans la réponse des ennemis naturels à la présence d'HSN, et donc une variabilité dans l'impact sur la régulation biologique. Lors de l'implantation ou de la gestion d'un HSN, il est donc important d'identifier les besoins des ennemis naturels qui peuvent participer à la régulation du ou des ravageurs ciblés, mais aussi si cet habitat peut constituer un refuge pour des périodes défavorables, climatiques mais également dues à des perturbations au sein des parcelles (Landis *et al.*, 2000a). Cependant, la seule présence d'un HSN favorable n'assure pas une meilleure régulation. En effet, le *spill-over* des ennemis naturels (Encadré 2) et par extension, la régulation biologique des ravageurs, dépendent de plusieurs facteurs : (i) la qualité des HSN (composition floristique, densité végétale, etc.), (ii) de l'environnement dans lequel est implanté l'HSN et (iii) de la capacité de dispersion des ennemis naturels. Cela peut ainsi limiter l'effet de la présence de l'HSN aux bordures de parcelles. Par exemple, Boetzi *et al.* (2019) ont constaté que l'activité-densité des carabes, staphylins et araignées, ainsi que la richesse spécifique des carabes, diminuaient à mesure que la distance à la bande augmentait.



Encadré 2 : Définition

- ❖ **(Effet) *Spill-over*** : Les prédateurs présents dans les habitats semi-naturels peuvent migrer dans les parcelles adjacentes lorsque les populations de ravageurs augmentent. Ces prédateurs peuvent ainsi participer à leur régulation (Rand *et al.*, 2006).

C. Quid de la combinaison des deux leviers (pratiques agricoles et infrastructures agroécologiques) ?

Tout comme la complexité du paysage, les pratiques mises en place dans les parcelles adjacentes à un HSN pourraient influencer son effet sur les ennemis naturels. Des études récentes suggèrent que les effets de l'hétérogénéité du paysage et des HSN pourraient être plus importants lorsque les pratiques dans les parcelles adjacentes sont moins intensives, avec par exemple un travail du sol ou des IFT réduits (Duflot *et al.*, 2022). En effet, certaines pratiques agricoles peuvent augmenter, directement ou indirectement, la mortalité des ennemis naturels, et donc diminuer leur abondance. Or l'implantation d'HSN est supposée favoriser les ennemis naturels déjà présents dans l'environnement, et notamment dans les parcelles adjacentes. Ainsi, lorsque les pratiques en place dans les parcelles impactent négativement la communauté d'ennemis naturels, l'efficacité des HSN peut être compromise.

Par exemple Ricci *et al.* (2019) ont observé une interaction entre la proportion de culture similaire à celle de l'expérimentation dans le paysage et l'utilisation de produits phytosanitaires (IFT) pour la prédation des œufs de *Ephestia kuehniella* (Zeller, 1879). Le biocontrôle était important dans deux contextes :

- (i) lorsque les deux sont faibles : la prédation est assurée par une cohorte de prédateurs qui a besoin d'une diversité de cultures dans le paysage, donc d'un paysage complexe, et une utilisation limitée des produits phytosanitaires ;



Discussion générale

- (ii) lorsque les deux sont forts : la prédation est assurée par quelques espèces de prédateurs attachés à une culture donnée et peu sensibles aux effets directs et indirects des produits phytosanitaires.

Ce constat signifie que la régulation biologique des ravageurs peut intervenir à un même niveau, tout en provenant de processus écologiques et de prédateurs différents, et plus ou moins sensibles à leur environnement (présence d'HSN, pratiques agricoles).

Il y a donc fort à parier que des interactions existent également entre les HSN et les pratiques agricoles en place. Cependant, peu d'études ont été menées sur ce sujet. Ces interactions dépendront surtout des besoins des ennemis naturels (ressources alimentaires, habitats) et de ce que les parcelles peuvent leur fournir. La plupart des arthropodes prédateurs ont besoin d'un habitat plus stable à un moment de leur cycle de vie, comme par exemple une bande fleurie (Keller et Häni, 2000; Bertrand *et al.*, 2016).

Cependant, il peut exister des habitats stables au sein des parcelles. En effet, certains systèmes de culture, comme l'agriculture de conservation des sols, comportent des pratiques qui sont très favorables aux invertébrés (Wezel *et al.*, 2014). Ils peuvent ainsi offrir de bonnes conditions d'habitats, en créant des milieux stables, peu perturbés. Ces conditions pourraient être équivalentes à celles présentes dans les HSN. Dans ce cas, les HSN pourraient avoir un effet synergique avec la parcelle adjacente.

Des recherches restent à mener afin d'améliorer la compréhension de l'impact de l'implantation d'HSN adjacents aux parcelles cultivées. En effet, plusieurs études montrent des effets variables. Dans leur synthèse bibliographique, Petit *et al.* (2020) ont observé des limites dans les études qui ont été menées :

- de nombreuses études évaluent les bénéfices des HSN sur la biodiversité au sein des HSN et non dans les parcelles adjacentes ;
- beaucoup d'études se concentrent sur un nombre limité de taxons, notamment sur des ennemis naturels. Les réseaux trophiques et les interactions interspécifiques pouvant exister sont donc souvent omis. Ils peuvent pourtant moduler l'efficacité des HSN dans la régulation biologique.



Affaire à suivre

Ces différentes problématiques autour des interactions entre la présence d'une bande fleurie pérenne à proximité des parcelles et les pratiques en place au sein de ces dernières ont fait également l'objet du travail de cette thèse. Nous avons en effet deux expérimentations axées sur ce sujet : l'une sur la régulation des pucerons des céréales en automne et l'autre sur l'hivernation des arthropodes dans les parcelles et dans les bandes fleuries.

Les résultats n'apparaissent pas dans ce manuscrit car les analyses sont en cours, mais nous tenterons de les valoriser au mieux par la suite. Affaire à suivre donc !



V. Quelles sont les perspectives de recherche que nous avons identifiées à la fin de ce travail ?

A. Quelles sont les perspectives pour l'étude d'autres ravageurs de grande culture, et plus globalement des invertébrés présents dans les parcelles cultivées ?

Dans cette thèse, nous avons noté un besoin d'études plus récentes sur la biologie des organismes. En effet, depuis l'arrivée des produits phytosanitaires, et notamment des insecticides, ces études sont devenues plus rares. Par exemple, pour notre étude sur l'estivation des altises d'hiver, les principaux éléments de biologie sur lesquels nous nous sommes fondés dataient des années 1950. Les altises ne sont pas un cas isolé : beaucoup de références de la très citée synthèse bibliographique de Williams (2010) sur les ravageurs de colza datent des années 1950-1970. Ce manque de connaissances récentes est dommageable, en particulier car les insectes sont très sensibles à leur environnement et notamment aux conditions météorologiques. Ainsi, les changements de climats que nous subissons actuellement, et que nous subirons dans un futur proche, peuvent fortement impacter le comportement des insectes ravageurs. Or ces informations sont primordiales pour comprendre la dispersion d'un ravageur donné, aux différentes échelles. Nous ne pouvons donc qu'encourager les prochaines études qui s'intéresseront à ces questions, à des échelles plus ou moins fines.

1. *Les coléoptères ravageurs du colza : des insectes univoltins qui colonisent les parcelles au printemps et en automne*

Les études menées dans cette thèse pourraient être conduites pour d'autres ravageurs du colza. La majorité des ravageurs du colza sont des coléoptères univoltins qui colonisent les parcelles de colza à différents moments de son développement.

Une partie de ces coléoptères colonise les parcelles au printemps. Il s'agit des méligèthes (Nitidulidae : *Meligethes aenus*, Fabricius, 1775) et des charançons des siliques (Curculionidae : *Ceutorhynchus assimilis*, Paykull, 1792), de la tige du chou (Curculionidae : *Ceutorhynchus pallidactylus*, Marsham, 1802) et du colza (Curculionidae : *Ceutorhynchus napi*, Gyllenhal, 1837). Les adultes arrivent dans les parcelles lorsque le colza est au stade boutons floraux ou à floraison et la ponte se fait sur les boutons ou sur les siliques (Williams, 2010a). A cette période, les plants de colza sont déjà grands et font partie des premières plantes en fleur dans la plaine agricole. Les adultes les repèrent donc probablement assez facilement et ne sont pas trop impactés par les états du milieu au sein de ces parcelles. Cependant, les larves peuvent être nettement plus influencées par l'habitat présent, car elles se nymphosent dans le sol (Williams, 2010a). Il leur faut donc un habitat aux conditions favorables pour qu'elles puissent mener complètement leur nymphose. Ainsi, même si notre approche ne sera pas forcément pertinente pour l'étude de ces ravageurs au stade adulte, elle peut l'être pour étudier les larves au moment de leur nymphose dans le sol.

Des études similaires à la nôtre pourraient être menées sur l'hivernation de ces ravageurs. De telles études ont déjà été menées sur les méligèthes par Rusch *et al.* (2012) et par Sutter *et al.* (2018), mais ce n'est pas le cas, à notre connaissance, pour les autres ravageurs. De plus, ces études ont été menées dans des petites régions en France et en Suisse. Il pourrait donc être intéressant de mener d'autres études dans d'autres régions du monde, où les conditions peuvent être différentes (paysage, disponibilité et caractéristiques des habitats) et donc où le comportement de l'insecte pourrait varier.



Discussion générale

L'autre partie des coléoptères ravageurs du colza colonise les parcelles en automne. Il s'agit de l'altise d'hiver, que nous avons étudiée ici, et du charançon du bourgeon terminal (Curculionidae : *Ceutorhynchus picitarsis*, Gyllenhal, 1837). Nous avons remarqué que ce ravageur est peu présent dans la littérature : par exemple, sa biologie n'est pas mentionnée dans la synthèse de Williams (2010). C'est pourtant un ravageur qui peut faire beaucoup de dégâts dans les parcelles de colza. Seule la larve est nuisible et peut fortement impacter les rendements, notamment lorsqu'elle attaque le bourgeon terminal, causant des colzas au port buissonnant en sortie d'hiver. Le cycle biologique de ce ravageur semble proche de celui de l'altise : les adultes arrivent dans les parcelles de colza en automne, un peu après le semis, les femelles pondent leurs œufs dans les pétioles des colzas (BAYER, 2018). Tout comme la larve d'altise, la larve de ce charançon passe l'hiver au sein de la plante, mais elle peut monter jusqu'au bourgeon terminal. La larve se nymphose ensuite dans le sol jusqu'à mai-juin, puis entre dans une diapause estivale jusqu'en septembre. Ainsi, un travail similaire à celui présent dans ce manuscrit pourrait être envisageable. Les adultes pourraient être perturbés par les états du milieu présents dans les parcelles au moment de leur arrivée et au moment de la ponte. Ce n'est probablement pas le cas des larves qui sont déjà dans les plants lors de l'éclosion. Cependant elles pourraient être perturbées au moment de la nymphose dans le sol, tout comme les larves des autres ravageurs présentés dans le paragraphe précédent. Nous notons qu'un premier travail a été réalisé par Cadoux *et al.* (2015). Une étude sur l'estivation est également possible, et probablement nécessaire, et peut être plus globale que la nôtre en testant une diversité d'habitats. En effet, le lieu et les conditions d'estivation de ce ravageur ne semblent pas très bien connus.

2. *Les autres organismes présents dans les parcelles en grande culture : des espèces polyvoltines colonisant les parcelles chaque année ou des espèces univoltines inféodées aux parcelles*

L'approche que nous avons eue pour l'étude des larves d'altises pourrait être facilement transposée à l'étude de ravageurs colonisant les parcelles peu après les semis. En effet, ces ravageurs peuvent être plus ou moins perturbés par les pratiques agricoles et les états du milieu présents dans les parcelles, lors de la détection des parcelles et lors de l'identification des plantes hôtes.

C'est par exemple le cas des pucerons des céréales qui colonisent les parcelles en automne et peuvent transmettre le virus de la Jaunisse Nanisante de l'Orge (JNO). Ce virus peut être très pénalisant sur le rendement avec une perte moyenne de 25 q/ha pour l'orge (Arvalis-Institut du Végétal, 2013 ; SYNGENTA, 2014 ; Thibord *et al.*, 2016). Son impact était auparavant maîtrisé à l'aide d'un traitement de semences à base de néonicotinoïdes, mais ces produits ont été interdits (Foucart, 2016). Des recherches doivent donc être menées sur la gestion préventive de ces ravageurs. En effet, des leviers agronomiques pourraient être mis en place afin de limiter les populations de pucerons en automne, en agissant sur les états du milieu. Par exemple, Kennedy *et al.* (2010) ont constaté qu'en présence de paille, le nombre de pucerons sur les plantes était plus faible qu'en présence de sol nu. Cela peut être dû à une réduction des repères visuels aidant à l'identification des parcelles et des plantes hôtes par les pucerons, en limitant le contraste plantes – sol (Kennedy *et al.*, 1961). Les pucerons semblent également influencés par une diversité végétale, notamment au moment de l'arrivée dans la culture : une diversité végétale provoque une dilution de la culture, ce qui la rend probablement moins repérable par les pucerons (Smith, 1969).

Ce travail sur les pucerons des céréales pourrait également être mené sur des pucerons d'autres cultures, comme le colza ou les betteraves sucrières.

Notre approche peut également être intéressante pour l'étude de ravageurs qui passent toute leur vie dans les parcelles. C'est par exemple le cas des limaces qui peuvent fortement impacter les cultures peu après le semis. Elles sont en effet très influencées par leur environnement et notamment par les



caractéristiques de l’habitat dans lequel elles vivent. Ainsi des conditions fournissant un milieu de vie humide, comme la présence de résidus, peut les favoriser. Cependant, les résidus pourraient également constituer une source de nourriture alternative (Glen *et al.*, 1984) qui pourrait limiter l’impact sur les cultures. Il semblerait également que les limaces montrent des préférences pour certaines espèces végétales. Différents facteurs influencent ces préférences, comme la présence de métabolites de défense, les caractéristiques des feuilles (appétence, présence de poils...), *etc.* (Cook *et al.*, 1996). Ainsi, il serait très intéressant d’étudier plus finement les effets des pratiques agricoles via les états du milieu, afin de mieux appréhender le comportement des limaces et donc de mieux les gérer.

Enfin, il serait possible d’utiliser cette approche pour améliorer la compréhension de l’effet des habitats présents dans les parcelles cultivées et dans les habitats semi-naturels à proximité sur l’hivernation des arthropodes, ainsi que des interactions entre ces deux éléments. En effet, les habitats semi-naturels sont implantés afin de répondre au besoin d’un habitat stable de certains organismes (Keller et Häni, 2000 ; Bertrand *et al.*, 2016). Cependant, certains systèmes de culture peuvent également fournir des habitats stables au sein des parcelles. L’enjeu de la compréhension de la combinaison des leviers « pratiques agronomiques » et « infrastructures agroécologiques » a été détaillé dans une partie précédente (IV.C).

Le Tableau 4 résume cette partie, en présentant les organismes dont nous avons parlé et les stades auxquels ils peuvent être affectés par différents processus.

Tableau 3 : Récapitulatif des organismes qui pourraient faire l’objet d’études avec une même approche que la nôtre, à différents moments de leur cycle biologique

		Stade affecté par ...		
		... la perturbation de la reconnaissance des parcelles ou des plantes hôtes	... la fourniture d’un milieu de vie adéquat au sein de la parcelle	... la fourniture d’un refuge (HSN)
RAVAGEURS	Méligèthe		Larves (Nymphose)	Adultes (Hivernation)
	Charançon des siliques		Larves (Nymphose)	Adultes (Hivernation)
	Charançon de la tige du chou		Larves (Nymphose)	Adultes (Hivernation)
	Charançon de la tige du colza		Larves (Nymphose et hivernation)	
	Charançon du bourgeon terminal	Adultes et larves	Larves (Nymphose)	Adultes (Estivation)
	Pucerons des céréales	Adultes		
	Limaces	Adultes et juvéniles	Adultes et juvéniles	
Autres arthropodes (dont les ennemis naturels des ravageurs)			Adultes et juvéniles	Adultes et juvéniles



Affaire à suivre

Ce manuscrit se concentre sur l'altise d'hiver, mais notre travail de thèse était également consacré à deux autres ravageurs : les pucerons des céréales en automne et les limaces. Comme mentionné à l'encadré « Affaire à suivre » précédent, nous avons également étudié l'hivernation des arthropodes dans les parcelles et dans les bandes fleuries adjacentes. Dans ces différentes études, nous avons adopté la même approche via les pratiques et leurs impacts sur les états du milieu.

B. Comment utiliser les connaissances acquises par la thèse ou par des travaux similaires ?

La compréhension des effets des pratiques et des aménagements, au sein ou à proximité des parcelles, sur la régulation biologique de ravageurs en grande culture permet d'ouvrir des pistes de réflexion pour les agriculteurs et leurs conseillers. Ainsi, il est important d'utiliser des éléments parlants pour les différents acteurs du monde agricole, comme nous l'avons fait dans le Chapitre 1, en nous basant sur un panel de variables, dont une notion de risque.

Cette démarche peut conduire à des projets multi-acteurs qui contribueront à la transition agroécologique vers des systèmes agricoles plus durables. Ces initiatives amènent les différents acteurs à réfléchir ensemble dans un esprit « gagnant-gagnant » et pourront conduire à la production de nouvelles connaissances (Rouillon, 2023). Ces projets peuvent prendre différentes formes allant de la traque aux innovations auprès des agriculteurs jusqu'à la co-conception de systèmes de culture innovants.

Ces initiatives entrent dans la PAEC (sixième principe) qui promeut les interactions entre les acteurs de la production jusqu'à la transformation-vente des denrées. Elles sont de plus en plus mises en place et participent à l'accompagnement des différents acteurs du monde agricole dans la transition agroécologique. Par exemple, un guide pratique destiné aux conseillers, ingénieurs et chercheurs est disponible. Il est issu d'une collaboration entre Arvalis et INRAE, avec le soutien de l'Université de Wageningen. Ce guide présente des méthodes et des outils qui aident les différents acteurs à appréhender les enjeux liés à la transition agroécologique (Rouillon, 2023).

La perte de biodiversité causée par l'intensification agricole entraîne une perte de fonctionnalité au sein de l'agroécosystème. Contrairement aux systèmes intensifs, qui dépendent de l'utilisation d'intrants, les systèmes agroécologiques cherchent à promouvoir les fonctions écologiques exercées par les organismes bénéfiques. Cependant, ces systèmes sans ou très économes en produits phytosanitaires, sont souvent plus complexes et accentuent le besoin d'une vision systémique, avec en outre des objets supra-parcellaire à intégrer dans la reconception.

En effet, la parcelle ou la bordure de champ restent des échelles privilégiées pour analyser les interactions entre différents organismes comme l'avait montré d'autres études auparavant, comme celle de Sarthou *et al.* (2014) qui montre un effet plus important à l'échelle locale qu'à l'échelle du paysage. Mais cette thèse montre que cette échelle ne suffit pas pour appréhender la gestion d'organismes qui se déplacent sur de très grandes étendues. Il faut sortir de la parcelle cultivée en prenant en compte les habitats semi-naturels, mais également en regardant les interactions agroécologiques au sein d'un paysage constitué de plusieurs habitats, dont les agricoles. Ainsi, les habitats semi naturels, les infrastructures agroécologiques et les systèmes agricoles ne peuvent être analysés séparément : ils doivent donc être appréhendés selon des approches multi-échelles (Gonthier



et al., 2014; Chabert et Sarthou, 2017). Ils doivent également être appréhendés selon des approches multi-organismes et multi-acteurs. En effet, à ces échelles, plusieurs exploitations agricoles sont impliquées, ainsi que plusieurs gestionnaires et usagers. Ainsi, le territoire apparaît comme un lieu de construction de solutions qui combinent contraintes et opportunités agroécologiques des organismes qui y vivent, ainsi que les contraintes et opportunités sociales des acteurs qui gèrent l'espace.

Finalement, reconcevoir une agriculture sans ou très économe en pesticides oblige à penser à une échelle plus large que celle de la parcelle ou de l'exploitation agricole : celle du territoire. A moyen terme, cela conduit à mobiliser des processus de conception innovante à l'échelle du territoire, ce qui est une question assez vive et nouvelle, car elle nécessite de penser les territoires agricoles de manière multi-acteurs et multi-échelles où des verrouillages peuvent exister (Meynard *et al.*, 2013).

Les connaissances agroécologiques acquises dans cette thèse pourront ainsi alimenter un processus de reconception embarquant les agriculteurs et les conseillers d'un même territoire, qui sont confrontés à des problématiques de résistance aux insecticides. Elles pourraient également alimenter des outils de conception qui permettraient de se projeter dans un futur sans pesticides, comme la plateforme Maelia (Thérond, 2016). La limite majeure sera l'estimation in fine de la production agricole à l'échelle du territoire.



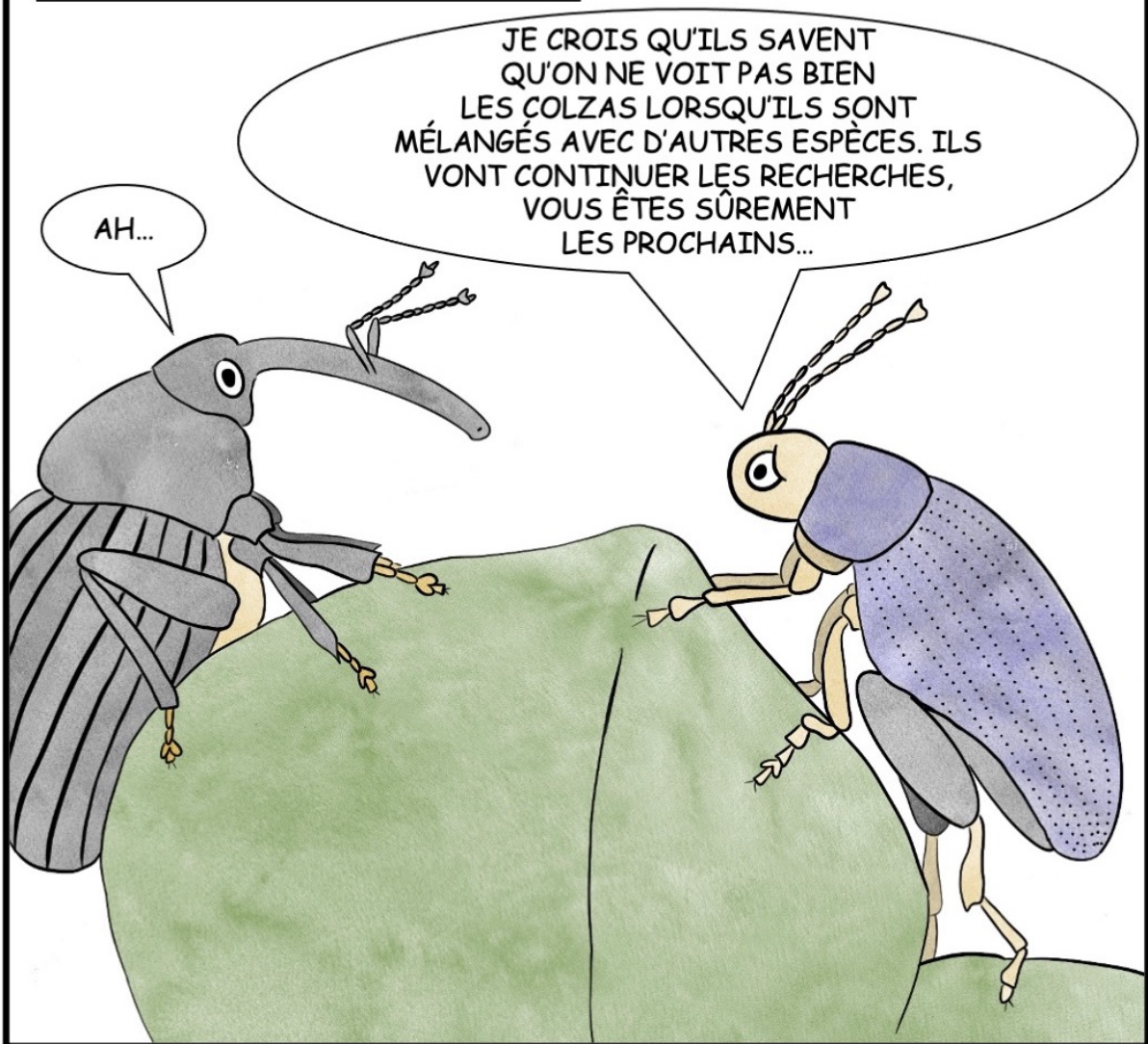
VI. Conclusion générale

En se basant sur un réseau d'agriculteurs, cette thèse a cherché à capter les impacts d'une diversité de systèmes de culture qui peuvent être mis en place dans une région de grande culture, ainsi que de l'implantation de bandes fleuries, sur la régulation d'un ravageur du colza : l'altise d'hiver. Cette approche donne notamment accès à une diversité de pratiques agricoles, d'états du milieu en résultant et de communautés d'invertébrés, qui ont été utilisés dans nos analyses. Nous avons tenté de fournir des études les plus complètes possibles en nous appuyant sur une diversité de variables réponses, ainsi qu'en intégrant des éléments du paysage. Nous avons alors pu adopter une démarche d'évaluation qui peut conduire à l'élaboration d'hypothèses qui peuvent être testées par la suite par des dispositifs expérimentaux.

Nous avons ainsi observé une forte influence des caractéristiques de la végétation sur les populations de larves d'altises d'hiver. En agissant sur la végétation présente, via la densité et la diversité, il serait possible de limiter l'abondance des larves et les risques associés. Par exemple, la présence d'autres espèces végétales que le colza pourrait limiter la reconnaissance de la plante hôte par les altises, adultes et larves. Nous avons également constaté que l'utilisation d'insecticides demeure un levier efficace pour gérer les altises d'hiver présentes dans notre région d'étude. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'éventuel effet bénéfique de la présence d'une bande fleurie sur l'estivation des altises d'hiver. Nous n'avons pas observé un tel effet, ce qui semble rassurant quant aux impacts potentiellement négatifs de l'implantation d'infrastructures agroécologiques telles que des bandes fleuries.

Notre travail pourrait être reproduit pour l'étude des invertébrés présents dans les parcelles agricoles, que ce soit les ravageurs ou leurs ennemis naturels. En effet, dans notre travail de thèse, nous avons également étudié d'autres ravageurs (pucerons des céréales et limaces) et à l'hivernation des arthropodes, en utilisant la même démarche que celle menée pour l'étude des altises d'hiver. Les connaissances acquises par notre travail de thèse pourraient être prises en compte dans des démarches de co-conception de systèmes de culture, en apportant des pistes de réflexion.

LES ON-DIT DE LA PLAINE





Bibliographie

« Les vers de terre se terrent dans les artères
Jammés dans l'tunnel été comme hiver
Ils avancent comme des automates
Dans une conformité triste et plate

Font leur job sans se poser de question
Aux labours ou ben au bout d'un hameçon
Enrichissant celui qui tient la ligne
Gobant toutes les conneries qu'on leur aligne

Et comment on s'emmerde chez les lombrics
Où l'ennui est dev'nu pathologique
On leur donne des bébelles, des somnifères
La vie en cent quarante caractères

Et s'ils sont bien conscients de ce non-sens
Bien peu osent déroger de la cadence
Comme un immense ballon qui se dégonfle
On ne réveille pas le confort qui ronfle »

Les Cowboys fringants, Les vers de terre



- AGRESTE, 2020a. RA 2020 - Cultures détaillées par département. [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/RA2020_1013#query/open/RA2020_1013 [Consulté le 2 janvier 2023].
- AGRESTE, 2020b. *Pratiques culturales en grandes cultures 2017 - IFT et nombre de traitements*.
- AGRESTE, 2022. *Graph'Agri 2022*. ISBN 978-2-11-162022-3.
- ALARCÓN-SEGURA, V., GRASS, I., BREUSTEDT, G., ROHLFS, M. et TSCHARNTKE, T., 2022. Strip intercropping of wheat and oilseed rape enhances biodiversity and biological pest control in a conventionally managed farm scenario. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 59, n° 6, pp. 1513-1523. DOI 10.1111/1365-2664.14161.
- ALBRECHT, M., KLEIJN, D., WILLIAMS, N. M., TSCHUMI, M., BLAAUW, B. R., BOMMARCO, R., CAMPBELL, A. J., DAINESE, M., DRUMMOND, F. A., ENTLING, M. H., GANSER, D., ARJEN DE GROOT, G., GOULSON, D., GRAB, H., HAMILTON, H., HERZOG, F., ISAACS, R., JACOT, K., JEANNERET, P., JONSSON, M., KNOP, E., KREMEN, C., LANDIS, D. A., LOEB, G. M., MARINI, L., MCKERCHAR, M., MORANDIN, L., PFISTER, S. C., POTTS, S. G., RUNDLÖF, M., SARDIÑAS, H., SCILIGO, A., THIES, C., TSCHARNTKE, T., VENTURINI, E., VEROMANN, E., VOLLHARDT, I. M.G., WÄCKERS, F., WARD, K., WESTBURY, D. B., WILBY, A., WOLTZ, M., WRATTEN, S. et SUTTER, L., 2020. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis. IRWIN, Rebecca (éd.), *Ecology Letters*. Vol. 23, n° 10, pp. 1488-1498. DOI 10.1111/ele.13576.
- ALFORD, D. V., 1979. Observations on the cabbage stem flea beetle, *Psylliodes chrysocephala*, on winter oil-seed rape in Cambridgeshire. *Annals of Applied Biology*. Vol. 93, n° 2, pp. 117-123. DOI 10.1111/j.1744-7348.1979.tb06521.x.
- ALVES, L., WYNN, S. et STOPPS, J., 2015. 551 : *Cabbage stem flea beetle live incidence and severity monitoring*.
- ANDERT, S., ZIESEMER, A. et ZHANG, H., 2021. Farmers' perspectives of future management of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A case study from north-eastern Germany. *European Journal of Agronomy*. Vol. 130, pp. 126350. DOI 10.1016/j.eja.2021.126350.
- ANDREOTTI, G., KOUTROS, S., HOFMANN, J. N., SANDLER, D. P., LUBIN, J. H., LYNCH, C. F., LERRO, C. C., DE ROOS, A. J., PARKS, C. G., ALAVANJA, M. C., SILVERMAN, D. T et BEANE FREEMAN, L. E., 2018. Glyphosate Use and Cancer Incidence in the Agricultural Health Study. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. Vol. 110, n° 5, pp. 509-516. DOI 10.1093/jnci/djx233.
- APAD, 2022. Pourquoi un label « Au cœur des sols » ? *Apad* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.apad.asso.fr/le-label-au-coeur-des-sols> [Consulté le 21 novembre 2022].
- ARJAURÉ, G. et VINCENT, B., 2011. Colza : Réguler les populations de grosses altises. *Perspectives Agricoles*. N° 381, pp. 64-65.
- ARVALIS-INSTITUT DU VÉGÉTAL, 2013. Pucerons d'automne : mieux les connaître pour les maîtriser. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/ravageurs-d-automne-pucerons-la-lutte-s-organise-@/view-13999-arvarticle.html> [Consulté le 26 juin 2020].
- AUXIMORE, 2020. *Optimiser le contrôle biologique des bioagresseurs en systèmes de grandes cultures - Altise* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://arena-auximore.fr/wp-content/uploads/2014/12/ALTISE_WEB.pdf



Bibliographie

- AZEVEDO, K. E. X., MAGALHÃES, D. M., DE ANDRADE MORAL, R. et BENTO, J. Maurício S., 2023. Weathering the hunt: The role of barometric pressure in predator insects' foraging behaviour. *Ecology and Evolution*. Vol. 13, n° 8, pp. e10416. DOI 10.1002/ece3.10416.
- BADGLEY, C., MOGHADDER, J., QUINTERO, E., ZAKEM, E., CHAPPELL, M. J., AVILÉS-VÁZQUEZ, K., SAMULON, A. et PERFECTO, I., 2007. Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*. Vol. 22, n° 2, pp. 86-108. DOI 10.1017/S1742170507001640.
- BAHLAI, C. A., XUE, Y., MCCREARY, C. M., SCHAAFSMA, A. W. et HALLETT, R. H., 2010. Choosing Organic Pesticides over Synthetic Pesticides May Not Effectively Mitigate Environmental Risk in Soybeans. JOHNSON, Stephen J. (éd.), *PLoS ONE*. Vol. 5, n° 6, pp. e11250. DOI 10.1371/journal.pone.0011250.
- BALLOT, R., GUICHARD, L., MIGNOLET, C., REAU, R., SCHMIDT, A., SOULIÉ, M. et JEUFFROY, M.-H., in press. Synthetizing the diversity of cropping practices to highlight contrasted performances; a typology of winter oilseed rape-based cropping systems.
- BARTOŃ, K., 2022. *MuMIn: Multi-Model Inference* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn> [Consulté le 13 mars 2023].
- BARZMAN, M., BÀRBERI, P., BIRCH, A. N. E., BOONEKAMP, P., DACHBRODT-SAADEH, S., GRAF, B., HOMMEL, B., JENSEN, J. E., KISS, J., KUDSK, P., LAMICHHANE, J. R., MESSÉAN, A., MOONEN, A.-C., RATNADASS, A., RICCI, P., SARAH, J.-L. et SATTIN, M., 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 35, n° 4, pp. 1199-1215. DOI 10.1007/s13593-015-0327-9.
- BAYER, 2018. Charançon du bourgeon terminal : des colzas buissonnants : Bayer-Agri. [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.bayer-agri.fr/cultures/charancon-du-bourgeon-terminal-des-colzas-buissonnants_1383/ [Consulté le 7 septembre 2023].
- BEGG, G. S., COOK, S. M., DYE, R., FERRANTE, M., FRANCK, P., LAVIGNE, C., LÖVEI, G. L., MANSION-VAQUIE, A., PELL, J. K., PETIT, S., QUESADA, N., RICCI, B., WRATTEN, S. D. et BIRCH, A. N. E., 2017. A functional overview of conservation biological control. *Crop Protection*. Vol. 97, pp. 145-158. DOI 10.1016/j.cropro.2016.11.008.
- BENTON, T. G., VICKERY, J. A. et WILSON, J. D., 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology & Evolution*. Vol. 18, n° 4, pp. 182-188. DOI 10.1016/S0169-5347(03)00011-9.
- BERGER, F. et DELVAL, Ph., 2018. Lutte par conservation - Biodiversité fonctionnelle | EcophytoPIC. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.ecophytopic.fr/tr/pr%C3%A9vention-prophylaxie/habitat/lutte-par-conservation-biodiversit%C3%A9-fonctionnelle> [Consulté le 9 avril 2019].
- BERTRAND, C., BAUDRY, J. et BUREL, F., 2016. Seasonal variation in the effect of landscape structure on ground-dwelling arthropods and biological control potential. *Basic and Applied Ecology*. Vol. 17, n° 8, pp. 678-687. DOI 10.1016/j.baae.2016.07.007.
- BERTRAND, F. et MAUMY-BERTRAND, M., 2022. *plsRglm: Partial Least Squares Regression for Generalized Linear Models* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=plsRglm> [Consulté le 12 janvier 2023].
- BIANCHI, F. J. J. A., BOOIJ, C. J. H. et TSCHARNTKE, T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 273, n° 1595, pp. 1715-1727. DOI 10.1098/rspb.2006.3530.



- BLITZER, E. J., DORMANN, C. F., HOLZSCHUH, A., KLEIN, A-M., RAND, T. A. et TSCHARNTKE, T., 2012. Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 146, n° 1, pp. 34-43. DOI 10.1016/j.agee.2011.09.005.
- BLUBAUGH, C. K. et KAPLAN, I., 2015. Tillage compromises weed seed predator activity across developmental stages. *Biological Control*. Vol. 81, pp. 76-82. DOI 10.1016/j.biocontrol.2014.11.007.
- BOETZL, F. A., KRIMMER, E., KRAUSS, J. et STEFFAN-DEWENTER, I., 2019. Agri-environmental schemes promote ground-dwelling predators in adjacent oilseed rape fields: Diversity, species traits and distance-decay functions. LEWIS, Owen (éd.), *Journal of Applied Ecology*. Vol. 56, n° 1, pp. 10-20. DOI 10.1111/1365-2664.13162.
- BOND, W. et GRUNDY, A. C., 2001. Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*. Vol. 41, n° 5, pp. 383-405. DOI 10.1046/j.1365-3180.2001.00246.x.
- BONNEMAISON, L. et JOURDHEUIL, P., 1954a. L'altise d'hiver du colza (*Psylliodes chrysocephala* L.). *Annales Epiphyties*. Vol. 5, pp. 345-1524.
- BONNEMAISON, L. et JOURDHEUIL, P., 1954b. L'altise d'hiver du colza (*Psylliodes chrysocephala* L.). *Annales Epiphyties*. pp. 345-524.
- BONNEMAISON, L., 1965. Insect Pests of Crucifers and Their Control. *Annual Review of Entomology*. j Vol. 10, n° 1, pp. 233-256. DOI 10.1146/annurev.en.10.010165.001313.
- BOREAU DE ROINCÉ, C., LAVIGNE, C., MANDRIN, J.-F., ROLLARD, C. et SYMONDSON, W.O.C., 2013. Early-season predation on aphids by winter-active spiders in apple orchards revealed by diagnostic PCR. *Bulletin of Entomological Research*. Vol. 103, n° 2, pp. 148-154. DOI 10.1017/S0007485312000636.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1932. *Plant sociology: the study of plant communities*. 1st ed. New York and London : McGraw-Hill book company, inc.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1964. *Pflanzensoziologie: Grundzuege der Vegetationskunde ; dritte, neubearbeitete und wesentlich vermehrte Auflage*. 3rd. Berlin : Springer Verlag.
- BREITENMOSER, S., STEINGER, T., HILTPOLD, I., GROSJEAN, Y., NUSSBAUM, V., BUSSEREAU, F., KLÖTZLI, F., WIDMER, N. et BAUX, A., 2020. Effet des plantes associées au colza d'hiver sur les dégâts d'altises. *Recherche Agronomique Suisse*. Vol. 11, pp. 16-25. DOI 10.34776/AFS11-16.
- BROOKS, M. E., KRISTENSEN, K., BENTHEM, K. J. van, MAGNUSSON, A., BERG, C. W., NIELSEN, A., SKAUG, H. J., MÄCHLER, M. et BOLKER, B. M., 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*. Vol. 9, n° 2, pp. 378-400.
- BÜCHI, L., GEORGES, F., WALDER, F., BANERJEE, S., KELLER, T., SIX, J., VAN DER HEIJDEN, M. et CHARLES, R., 2019. Potential of indicators to unveil the hidden side of cropping system classification: Differences and similarities in cropping practices between conventional, no-till and organic systems. *European Journal of Agronomy*. Vol. 109, pp. 125920. DOI 10.1016/j.eja.2019.125920.
- BÜCHS, W., 2003. Impact of On-Farm Landscape Structures and Farming Systems on Predators. In : ALFORD, David V. (éd.), *Biocontrol of Oilseed Rape Pests*. Oxford, UK : Blackwell Science Ltd. pp. 245-278. ISBN 978-0-470-75098-8. DOI 10.1002/9780470750988.ch15.
- BUREL, F. et BAUDRY, J., 1990. Structural dynamic of a hedgerow network landscape in Brittany France. *Landscape Ecology*. Vol. 4, n° 4, pp. 197-210. DOI 10.1007/BF00129828.



Bibliographie

- CADOUX, S., SAUZET, G., VALANTIN-MORISON, M., PONTET, C., CHAMPOLIVIER, L., ROBERT, C., LIEVEN, J., FLÉNET, F., MANGENOT, O., FAUVIN, P. et LANDÉ, N., 2015. Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL*. Vol. 22, n° 3, pp. D302. DOI 10.1051/ocl/2015014.
- CARDINALE, B. J., DUFFY, J. E., GONZALEZ, A., HOOPER, D. U., PERRINGS, C., VENAIL, P., NARWANI, A., MACE, G. M., TILMAN, D., WARDLE, D. A., KINZIG, A. P., DAILY, G. C., LOREAU, M., GRACE, J. B., LARIGAUDERIE, A., SRIVASTAVA, D. S. et NAEEM, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*. Vol. 486, n° 7401, pp. 59-67. DOI 10.1038/nature11148.
- CARRASCAL, L. M., GALVÁN, I. et GORDO, O., 2009. Partial least squares regression as an alternative to current regression methods used in ecology. *Oikos*. Vol. 118, n° 5, pp. 681-690. DOI 10.1111/j.1600-0706.2008.16881.x.
- CHABERT, A. et SARTHOU, J.-P., 2017. Practices of conservation agriculture prevail over cropping systems and landscape heterogeneity in understanding the ecosystem service of aphid biocontrol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 249, pp. 70-79. DOI 10.1016/j.agee.2017.08.005.
- CHAILLEUX, A., MOHL, E. K., TEIXEIRA ALVES, M., MESSELINK, G. J et DESNEUX, N., 2014. Natural enemy-mediated indirect interactions among prey species: potential for enhancing biocontrol services in agroecosystems: NE-mediated indirect interactions among prey species for biocontrol in agroecosystems. *Pest Management Science*. Vol. 70, n° 12, pp. 1769-1779. DOI 10.1002/ps.3916.
- CHAMBRES D'AGRICULTURE, 2022. Plan Ecophyto 2+. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://chambres-agriculture.fr/agriculteur-et-politiques/ecophyto/plan-ecophyto-2/> [Consulté le 21 novembre 2022].
- CHAMPOLIVIER, L., 2022. Assurer une bonne nutrition minérale du colza à l'automne pour permettre une croissance continue jusqu'à l'hiver. *Terres Inovia* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terresinovia.fr/-/assurer-une-bonne-nutrition-minerale-du-colza-a-l-automne-pour-permettre-une-croissance-continue-jusqu-a-l-hiver-1> [Consulté le 18 août 2023].
- CHAPLIN-KRAMER, R., DE VALPINE, P., MILLS, N. J. et KREMEN, C., 2013. Detecting pest control services across spatial and temporal scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 181, pp. 206-212. DOI 10.1016/j.agee.2013.10.007.
- CHAPLIN-KRAMER, R., O'ROURKE, M. E., BLITZER, E. J. et 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*. Vol. 14, n° 9, pp. 922-932. DOI 10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x.
- CHASSAIN, J., JOIMEL, S., GARDARIN, A. et VIEUBLÉ GONOD, L., 2023. *Switching to Indicators of Practice Intensity to Unearth the Effect of Cropping Systems on Soil Mesofauna* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ssrn.com/abstract=4526824> [Consulté le 10 août 2023].
- CHONG, I.-G. et JUN, C.-H., 2005. Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. Vol. 78, n° 1-2, pp. 103-112. DOI 10.1016/j.chemolab.2004.12.011.
- CHRISTENSEN, R. H. B., 2022. *ordinal: Regression Models for Ordinal Data* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=ordinal> [Consulté le 12 mars 2023].
- COMMISSION MIXTE FAO-OMS DU CODEX ALIMENTARIUS (éd.), 2007. *Aliments issus de l'agriculture biologique*. 3e éd. Rome : FAO OMS. Codex alimentarius. ISBN 978-92-5-205835-9. 664.002 18



- CONRAD, N., BRANDES, M., ULBER, B. et HEIMBACH, U., 2021. Effect of immigration time and beetle density on development of the cabbage stem flea beetle, (*Psylliodes chrysocephala* L.) and damage potential in winter oilseed rape. *Journal of Plant Diseases and Protection*. Vol. 128, n° 4, pp. 1081-1090. DOI 10.1007/s41348-021-00474-7.
- COOK, R. T., BAILEY, S. E. R. et MCCROHAN, C. R., 1996. Slug Preferences for Winter Wheat Cultivars and Common Agricultural Weeds. *The Journal of Applied Ecology*. Vol. 33, n° 4, pp. 866. DOI 10.2307/2404957.
- COOK, S. M., RASMUSSEN, H. B., BIRKETT, M. A., MURRAY, D. A., PYE, B. J., WATTS, N. P. et WILLIAMS, I. H., 2007. Behavioural and chemical ecology underlying the success of turnip rape (*Brassica rapa*) trap crops in protecting oilseed rape (*Brassica napus*) from the pollen beetle (*Meligethes aeneus*). *Arthropod-Plant Interactions*. Vol. 1, n° 1, pp. 57. DOI 10.1007/s11829-007-9004-5.
- COOK, S. M., SKELLERN, M. P., DÖRING, T. F. et PICKETT, J. A., 2013. Red oilseed rape? The potential for manipulation of petal colour in control strategies for the pollen beetle (*Meligethes aeneus*). *Arthropod-Plant Interactions*. Vol. 7, n° 3, pp. 249-258. DOI 10.1007/s11829-013-9252-5.
- COTTINGHAM, K. L., BROWN, B. L. et LENNON, J. T., 2001. Biodiversity may regulate the temporal variability of ecological systems. *Ecology Letters*. Vol. 4, n° 1, pp. 72-85. DOI 10.1046/j.1461-0248.2001.00189.x.
- CUTHBERT, R. N., DALU, T., WASSERMAN, Ryan J., WEYL, Olaf L.F., FRONEMAN, P. William, CALLAGHAN, Amanda, COUGHLAN, Neil E. et DICK, Jaimie T.A., 2020. Alternative prey impedes the efficacy of a natural enemy of mosquitoes. *Biological Control*. Vol. 141, pp. 104146. DOI 10.1016/j.biocontrol.2019.104146.
- CUTLER, F. et WIENER, R. 2022. *randomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=randomForest> [Consulté le 14 février 2023].
- DEGUINE, J.-P., AUBERTOT, J.-N., BELLON, S., CÔTE, F., LAURI, P.-E., LESOURRET, F., RATNADASS, A., SCOPEL, E., ANDRIEU, N., BÀRBERI, P., BECKER, N., BOUYER, J., BRÉVAULT, T., CERDAN, C., CORTESERO, A.-M., DANGLES, O., DELATTE, H., DINH, P. T. Y., DREYER, H., DURU, M., FLOR, R. J., GARDARIN, A., HUSSON, O., JACQUOT, M., JAVELLE, A., JUSTES, E., LAM, M. T. X., LAUNAY, M., LE, V. V., LONGIS, S., MARTIN, J., MUNIER-JOLAIN, N., NGUYEN, N. T. T., NGUYEN, T. T. N., PENVERN, S., PETIT, S., POISOT, A.-S., ROBIN, M.-H., ROLLAND, B., RUSCH, A., SABOURIN, E., SANGUIN, H., SARTHOU, J.-P., SESTER, M., SIMON, S., SOURISSEAU, J.-M., STEINBERG, C., TCHAMITCHIAN, M., THOUMAZEAU, A., TIBI, A., TIVET, F., TIXIER, P., TRINH, X. T., VIALATTE, A., WYCKHUYS, K. et LAMICHHANE, J. R., 2023. Agroecological crop protection for sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*.
- DEGUINE, J.-P., AUBERTOT, J.-N., FLOR, R. J., LESOURRET, F., WYCKHUYS, K. A.G. et RATNADASS, A., 2021. Integrated pest management: good intentions, hard realities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 41, n° 3, pp. 38. DOI 10.1007/s13593-021-00689-w.
- DEGUINE, J.-P., RATNADASS, A., ROBIN, M.-H., SARTHOU, J.-P. et AUBERTOT, J.-N., 2020. Protection agroécologique des cultures : Définition. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/protection-agroecologique-des-cultures/> [Consulté le 29 janvier 2023]. DOI 10.17180/B4VJ-9E56.
- DELAUNE, T., OUATTARA, M. S., BALLOT, R., SAUSSE, C., FELIX, I., MAUPAS, F., CHEN, M., MORISON, M., MAKOWSKI, D. et BARBU, C., 2021. Landscape drivers of pests and pathogens abundance in arable crops. *Ecography*. Vol. 44, n° 10, pp. 1429-1442. DOI 10.1111/ecog.05433.



Bibliographie

- DEROULERS, P. et BRETAGNOLLE, V., 2019. The consumption pattern of 28 species of carabid beetles (Carabidae) to a weed seed, *Viola arvensis*. *Bulletin of Entomological Research*. Vol. 109, n° 2, pp. 229-235. DOI 10.1017/S0007485318000457.
- DERRON, J.O. et GOY, G., 1991. L'altise d'hiver du colza (*Psylliodes chrysocephala* L.): Biologie, nuisibilité et moyens de lutte. *Swiss Agricultural Research*. N° 23, pp. 5-9.
- DESNEUX, N., DECOURTYE, A. et DELPUECH, J.-M., 2007. The Sublethal Effects of Pesticides on Beneficial Arthropods. *Annual Review of Entomology*. Vol. 52, n° 1, pp. 81-106. DOI 10.1146/annurev.ento.52.110405.091440.
- DEWAR, A. M., 2017. The adverse impact of the neonicotinoid seed treatment ban on crop protection in oilseed rape in the United Kingdom: Adverse impact of the neonicotinoid seed treatment ban on oilseed rape. *Pest Management Science*. Vol. 73, n° 7, pp. 1305-1309. DOI 10.1002/ps.4511.
- DIRZO, R., YOUNG, H. S., GALETTI, M., CEBALLOS, G., ISAAC, N. J. B. et COLLEN, B., 2014. Defaunation in the Anthropocene. *Science*. Vol. 345, n° 6195, pp. 401-406. DOI 10.1126/science.1251817.
- DORÉ, T., 2000. *Contribution à la recherche sur les systèmes de culture : diagnostic agronomique régional et maîtrise des effets précédent*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- DORÉ, T., 2019. Introduction. In: *Agriculture biologique : espoir ou chimère?* Le Muscadier. ISBN hal-02275565.
- DORÉ, T., CLERMONT-DAUPHIN, C., CROZAT, Y., DAVID, C., JEUFFROY, M.-H., LOYCE, C., MAKOWSKI, D., MALÉZIEUX, E., MEYNARD, J.-M. et VALANTIN-MORISON, M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 28, n° 1, pp. 151-161. DOI 10.1051/agro:2007031.
- DÖRING, A. et ULBER, B., 2020. Performance of cabbage stem flea beetle larvae (*Psylliodes chrysocephala*) in brassicaceous plants and the effect of glucosinolate profiles. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. Vol. 168, n° 3, pp. 200-208. DOI 10.1111/eea.12891.
- DORMANN, C. F., MCPHERSON, J. M., ARAÚJO, M. B., BIVAND, R., BOLLIGER, J., CARL, G., DAVIES, R. G., HIRZEL, A., JETZ, W., KISSLING, W. D., KÜHN, I., OHLEMÜLLER, R., PERES-NETO, P. R., REINEKING, B., SCHRÖDER, B., SCHURR, F. M. et WILSON, R., 2007. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*. Vol. 30, n° 5, pp. 609-628. DOI 10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x.
- DUFFY, J. E., CARDINALE, B. J., FRANCE, K. E., MCINTYRE, P. B., THÉBAULT, E. et LOREAU, M., 2007. The functional role of biodiversity in ecosystems: incorporating trophic complexity. *Ecology Letters*. Vol. 10, n° 6, pp. 522-538. DOI 10.1111/j.1461-0248.2007.01037.x.
- DUFLOT, R., SAN-CRISTOBAL, M., ANDRIEU, E., CHOISIS, J.-P., ESQUERRÉ, D., LADET, S., OUIN, A., RIVERS-MOORE, J., SHEEREN, D., SIRAMI, C., FAUVEL, M. et VIALATTE, A., 2022. Farming intensity indirectly reduces crop yield through negative effects on agrobiodiversity and key ecological functions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 326, pp. 107810. DOI 10.1016/j.agee.2021.107810.
- DUFOUR, A., RONCERAY, C., GRAVIER-BARDET, M., HUBERT, L. et DEPROST, P., 2021. Rapport CGEDD n°013476-01, CGAAER n°20070, IGF n°2020-M-040-03 : *Évaluation des actions financières du programme Écophyto*.
- ECOPHYTOPIC, 2022. Qu'est-ce que le réseau DEPHY ? | Ecophytopic. *EcophytoPIC* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/dephy/quest-ce-que-le-reseau-dephy> [Consulté le 9 novembre 2022].



- EILENBERG, J., HAJEK, A. et LOMER, C., 2001. Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*. Vol. 46, n° 4, pp. 387-400. DOI 10.1023/A:1014193329979.
- EUROPEAN COMMISSION, 2018. Key policy objectives of the new CAP. *European Commission - European Commission* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy/new-cap-2023-27/key-policy-objectives-new-cap_en [Consulté le 11 avril 2022].
- EUROPEAN COURT OF AUDITORS., 2020. *Biodiversité des terres agricoles: la contribution de la PAC n'a pas permis d'enrayer le déclin. Rapport spécial n° 13, 2020*. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://data.europa.eu/doi/10.2865/778990> [Consulté le 24 août 2023].
- EVANS, E. W., STEVENSON, A. T. et RICHARDS, D. R., 1999. Essential versus alternative foods of insect predators: benefits of a mixed diet. *Oecologia*. Vol. 121, n° 1, pp. 107-112. DOI 10.1007/s004420050911.
- EVELEIGH, E. S. et CHANT, D. A., 1982. Experimental studies on acarine predator-prey interactions: the effects of predator density on prey consumption, predator searching efficiency, and the functional response to prey density (Acarina: Phytoseiidae). *Canadian Journal of Zoology*. Vol. 60, n° 4, pp. 611-629. DOI 10.1139/z82-091.
- FAUVERGUE, X., RUSCH, A., BARRET, M., BARDIN, M., JACQUIN-JOLY, E., MALAUSA, T. et LANNOU, C., 2020. *Biocontrôle: éléments pour une protection agroécologique des cultures*. Versailles : Éditions Quae. Savoir faire. ISBN 978-2-7592-3076-1. 632.96
- FERGUSON, A. W., KLUKOWSKI, Z., WALCZAK, B., CLARK, S. J., MUGGLESTONE, M. A., PERRY, J. N. et WILLIAMS, I. H., 2003. Spatial distribution of pest insects in oilseed rape: implications for integrated pest management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 95, n° 2-3, pp. 509-521. DOI 10.1016/S0167-8809(02)00200-1.
- FINKE, D. L. et DENNO, R. F., 2002. Intraguild predation diminished in complex-structured vegetation : implications for prey suppression. *Ecology*. Vol. 83, n° 3, pp. 643-652. DOI 10.1890/0012-9658(2002)083[0643:IPDICS]2.0.CO;2.
- FINKE, D. L. et DENNO, R. F., 2004. Predator diversity dampens trophic cascades. *Nature*. Vol. 429, n° 6990, pp. 407-410. DOI 10.1038/nature02554.
- FOLEY, J. A., DEFRIES, R., ASNER, G. P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S. R., CHAPIN, F. S., COE, M. T., DAILY, G. C., GIBBS, H. K., HELKOWSKI, J. H., HOLLOWAY, T., HOWARD, E. A., KUCHARIK, C. J., MONFREDA, C., PATZ, J. A., PRENTICE, I. C., RAMANKUTTY, N. et SNYDER, P. K., 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*. Vol. 309, n° 5734, pp. 570-574. DOI 10.1126/science.1111772.
- FOSTER, S. et CUSTODIO, E., 2019. Groundwater Resources and Intensive Agriculture in Europe – Can Regulatory Agencies Cope with the Threat to Sustainability? *Water Resources Management*. Vol. 33, n° 6, pp. 2139-2151. DOI 10.1007/s11269-019-02235-6.
- FOUCART, S., 2016. Tout comprendre aux pesticides néonicotinoïdes. *Le Monde.fr* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.lemonde.fr/biodiversite/article/2016/05/10/tout-comprendre-aux-pesticides-neonicotinoïdes_4916480_1652692.html [Consulté le 26 juin 2020].
- FOX, J. et WEISBERG, S., 2019. *An R Companion to Applied Regression* [en ligne]. 3rd ed. Sage Publications. Disponible à l'adresse : <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- FRANCEAGRIMER, 2022. Présentation du Certiphyto. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.franceagrimer.fr/Appui-aux-filieres/Certiphyto/Presentation-du-Certiphyto> [Consulté le 21 novembre 2022].



Bibliographie

- GAILIS, J. et TURKA, I., 2013. Discussion on ground beetles and rove beetles as indicators of sustainable agriculture in Latvia: review. *Research for rural development*. Vol. 1, pp. 56-62.
- GARDARIN, A., PIGOT, J. et VALANTIN-MORISON, M., 2021. The hump-shaped effect of plant functional diversity on the biological control of a multi-species pest community. *Scientific Reports*. Vol. 11, n° 1, pp. 21635. DOI 10.1038/s41598-021-01160-2.
- GARDARIN, A. et VALANTIN-MORISON, M., 2022. Initial assemblage characteristics determine the functional dynamics of flower-strip plant communities. *Ecology and Evolution* Vol. 12, n° 10. DOI 10.1002/ece3.9435.
- GARLAND, G., EDLINGER, A., BANERJEE, S., DEGRUNE, F., GARCÍA-PALACIOS, P., PESCADOR, D. S., HERZOG, C., ROMDHANE, S., SAGHAI, A., SPOR, A., WAGG, C., HALLIN, S., MAESTRE, F. T., PHILIPPOT, L., RILLIG, M. C. et VAN DER HEIJDEN, M. G. A., 2021. Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*. Vol. 2, n° 1, pp. 28-37. DOI 10.1038/s43016-020-00210-8.
- GEIGER, F., BENGTTSSON, J., BERENDSE, F., WEISSER, W. W., EMMERSON, M., MORALES, M. B., CERYNGIER, P., LIIRA, J., TSCHARNTKE, T., WINQVIST, C., EGGERS, S., BOMMARCO, R., PÄRT, T., BRETAGNOLLE, V., PLANTEGENEST, M., CLEMENT, L. W., DENNIS, C., PALMER, C., OÑATE, J. J., GUERRERO, I., HAWRO, V., AAVIK, T., THIES, C., FLOHRE, A., HÄNKE, S., FISCHER, C., GOEDHART, P. W. et INCHAUSTI, Pablo, 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology*. Vol. 11, n° 2, pp. 97-105. DOI 10.1016/j.baae.2009.12.001.
- GLEN, D. M., WILTSHIRE, C. W. et MILSOM, N. F., 1984. Slugs and straw disposal in winter wheat. *Proceedings of the 1984 British Crop Protection Conference – Pests and Diseases*. Vol. 1, pp. 139-144.
- GONTHIER, D. J., ENNIS, K. K., FARINAS, S., HSIEH, H.-Y., IVERSON, A. L., BATÁRY, P., RUDOLPHI, J., TSCHARNTKE, T., CARDINALE, B. J. et PERFECTO, I., 2014. Biodiversity conservation in agriculture requires a multi-scale approach. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 281, n° 1791, pp. 20141358. DOI 10.1098/rspb.2014.1358.
- GREGORY, P. J., INGRAM, J. S. I., ANDERSSON, R., BETTS, R. A., BROVKIN, V., CHASE, T. N., GRACE, P. R., GRAY, A. J., HAMILTON, N., HARDY, T. B., HOWDEN, S. M., JENKINS, A., MEYBECK, M., OLSSON, M., ORTIZ-MONASTERIO, I., PALM, C. A., PAYN, T. W., RUMMUKAINEN, M., SCHULZE, R. E., THIEM, M., VALENTIN, C. et WILKINSON, M. J., 2002. Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 88, n° 3, pp. 279-290. DOI 10.1016/S0167-8809(01)00263-8.
- GRIFFIN, J. N. et SILLIMAN, B. R., 2011. Predator diversity stabilizes and strengthens trophic control of a keystone grazer. *Biology Letters*. Vol. 7, n° 1, pp. 79-82. DOI 10.1098/rsbl.2010.0626.
- GURR, G. M., WRATTEN, S. D., TYLIANAKIS, J., KEAN, J. et KELLER, M., 2005. Providing plant foods for natural enemies in farming systems: balancing practicalities and theory. In : WACKERS, F. L., VAN RIJN, P. C. J. et BRUIN, J. (éd.), *Plant-Provided Food for Carnivorous Insects*. Cambridge : Cambridge University Press. pp. 326-347. ISBN 978-0-511-54222-0.
- GURR, G. M., WRATTEN, S. D. et LUNA, J. M., 2003. Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*. Vol. 4, n° 2, pp. 107-116. DOI 10.1078/1439-1791-00122.
- GURR, G., WRATTEN, S. D., SNYDER, W. E. et READ, D. M. Y. (éd.), 2012. *Biodiversity and pests: key issues for sustainable management*. Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, NJ : John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-65686-0. SB950 .B47 2012
- HACKSON, M., 2014. *Subfamily Galerucinae, keys to British species of tribe Alticini*.



- HAMMAMI, Z., GAUFFRETEAU, A., BELHAJFRAJ, M., SAHLI, A., JEUFFROY, M.-H., REZGUI, S., BERGAOUI, K., MCDONNELL, R. et TRIFA, Y., 2017. Predicting yield reduction in improved barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties and landraces under salinity using selected tolerance traits. *Field Crops Research*. Vol. 211, pp. 10-18. DOI 10.1016/j.fcr.2017.05.018.
- HARRISON, X. A., DONALDSON, L., CORREA-CANO, M. E., EVANS, J., FISHER, D. N., GOODWIN, C. E.D., ROBINSON, B. S., HODGSON, D. J. et INGER, R., 2018. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*. Vol. 6, pp. e4794. DOI 10.7717/peerj.4794.
- HARTIG, F., 2020. *DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>
- HARWOOD, J. D., PHILLIPS, S. W., LELLO, J., SUNDERLAND, K. D., GLEN, D. M., BRUFORD, M. W., HARPER, G. L. et SYMONDSON, W. O. C., 2009. Invertebrate biodiversity affects predator fitness and hence potential to control pests in crops. *Biological Control*. Vol. 51, n° 3, pp. 499-506. DOI 10.1016/j.biocontrol.2009.09.007.
- HARWOOD, J. et OBRYCKI, J., 2005. The role of alternative prey in sustaining predator populations. *Proceedings of Second International Symposium on Biological Control of Arthropods*. Vol. 2.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. et FRIEDMAN, J. H., 2009. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. 2nd ed. New York, NY : Springer. Springer series in statistics. ISBN 978-0-387-84857-0.
- HAZARD, L., MONTEIL, C., MICHEL, D., BEDOUSSAC, L., JUSTES, E. et THEAU, J.-P., 2016. Agroécologie : Définition. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/agroecologie/> [Consulté le 21 novembre 2022]. DOI 10.17180/5A6G-FQ51.
- HEGEWALD, H., WENSCH-DORENDORF, M., SIELING, K. et CHRISTEN, O., 2018. Impacts of break crops and crop rotations on oilseed rape productivity: A review. *European Journal of Agronomy*. Vol. 101, pp. 63-77. DOI 10.1016/j.eja.2018.08.003.
- HEIMBACH, U. et MÜLLER, A., 2013. Incidence of pyrethroid-resistant oilseed rape pests in Germany: Pyrethroid-resistant oilseed rape pests in Germany. *Pest Management Science*. Vol. 69, n° 2, pp. 209-216. DOI 10.1002/ps.3351.
- HENLE, K., ALARD, D., CLITHEROW, J., COBB, P., FIRBANK, L., KULL, T., MCCracken, D., MORITZ, R. F. A., NIEMELÄ, J., REBANE, M., WASCHER, D., WATT, A. et YOUNG, J., 2008. Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe—A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 124, n° 1-2, pp. 60-71. DOI 10.1016/j.agee.2007.09.005.
- HENNERON, L., BERNARD, L., HEDDE, M., PELOSI, C., VILLENAVE, C., CHENU, C., BERTRAND, M., GIRARDIN, C. et BLANCHART, E., 2015. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 35, n° 1, pp. 169-181. DOI 10.1007/s13593-014-0215-8.
- HERVÉ, M., 2019. *RVAideMemoire: Testing and Plotting Procedures for Biostatistics* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=RVAideMemoire> [Consulté le 19 août 2019].
- HINTZPETER, U. et BAUER, T., 1986. The antennal setal trap of the Ground beetle *Loricera pilicornis* : a specialization for feeding on Collembola. *Journal of Zoology*. Vol. 208, n° 4, pp. 615-630. DOI 10.1111/j.1469-7998.1986.tb01527.x.



Bibliographie

- HOARAU, C., CAMPBELL, H., PRINCE, G., CHANDLER, D. et POPE, T., 2022. Biological control agents against the cabbage stem flea beetle in oilseed rape crops. *Biological Control*. Vol. 167, pp. 104844. DOI 10.1016/j.biocontrol.2022.104844.
- HOLLAND, J. M. et LUFF, M. L., 2000. The Effects of Agricultural Practices on Carabidae in Temperate Agroecosystems. *Integrated Pest Management Reviews*. Vol. 5, n° 2, pp. 109-129. DOI 10.1023/A:1009619309424.
- HOLLAND, J. M. et OAKLEY, J., 2007. *Importance of arthropod pests and their natural enemies in relation to recent farming practice changes in the UK*. HGCA Res Rev.
- HONEK, A., MARTINKOVA, Z. et JAROSIK, V., 2003. Ground beetles (Carabidae) as seed predators. *European Journal of Entomology*. Vol. 100, n° 4, pp. 531-544. DOI 10.14411/eje.2003.081.
- HUSSON, F., JOSSE, J., LE, S. et MAZET, J., 2022. *FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR> [Consulté le 12 mars 2023].
- IGN, 2021. *LES BASES VECTORIELLES BD TOPO. Ver. 3.0. Descriptif de contenu*.
- INAO, 2022. Agriculture biologique. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Agriculture-biologique> [Consulté le 21 novembre 2022].
- INGERSON-MAHAR, J. M., 2014. *Relating diet and morphology of the head, mandibles and proventriculus in adult carabid beetles*. The State University of New Jersey.
- INRAE, 2020. L'agriculture de conservation. *INRAE Institutionnel* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.inrae.fr/actualites/dossier-lagriculture-conservation> [Consulté le 21 novembre 2022].
- INSERM, 2014. *Pesticides - Effets Sur La Santé - Synthèse et recommandations*. Inserm. ISBN 978-2-85598-906-X.
- INSERM, 2021. *Pesticides et effets sur la santé : Nouvelles données*. Montrouge : EDP Sciences. Collection Expertise collective.
- JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T. et TIBSHIRANI, R. (éd.), 2013. *An introduction to statistical learning: with applications in R*. New York : Springer. Springer texts in statistics, 103. ISBN 978-1-4614-7137-0. QA276 .I585 2013
- KALINOVA, J., 2010. Allelopathy and Organic Farming. *Sociology, Organic Farming, Climate Change and Soil Science*. pp. 379-418. Sustainable Agriculture Reviews. ISBN 978-90-481-3332-1. DOI 10.1007/978-90-481-3333-8_14



- KARP, D. S., CHAPLIN-KRAMER, R., MEEHAN, T. D., MARTIN, E. A., DECLERCK, F., GRAB, H., GRATTON, C., HUNT, L., LARSEN, A. E., MARTÍNEZ-SALINAS, A., O'ROURKE, M. E., RUSCH, A., POVEDA, K., JONSSON, M., ROSENHEIM, J. A., SCHELLHORN, N. A., TSCHARNTKE, T., WRATTEN, S. D., ZHANG, W., IVERSON, A. L., ADLER, L. S., ALBRECHT, M., ALIGNIER, A., ANGELELLA, G. M., ZUBAIR ANJUM, M., AVELINO, J., BATÁRY, P., BAVECO, J. M., BIANCHI, F. J. J. A., BIRKHOFFER, K., BOHNENBLUST, E. W., BOMMARCO, R., BREWER, M. J., CABALLERO-LÓPEZ, B., CARRIÈRE, Y., CARVALHEIRO, L. G., CAYUELA, L., CENTRELLA, M., ČETKOVIĆ, A., HENRI, D. C., CHABERT, A., COSTAMAGNA, A. C., DE LA MORA, A., DE KRAKER, J., DESNEUX, N., DIEHL, E., DIEKÖTTER, T., DORMANN, C. F., ECKBERG, J. O., ENTLING, M. H., FIEDLER, D., FRANCK, P., FRANK VAN VEEN, F. J., FRANK, T., GAGIC, V., GARRATT, M. P. D., GETACHEW, A., GONTHIER, D. J., GOODELL, P. B., GRAZIOSI, I., GROVES, R. L., GURR, G. M., HAJIAN-FOROOSHANI, Z., HEIMPEL, G. E., HERRMANN, J. D., HUSETH, A. S., INCLÁN, D. J., INGRAO, A. J., IV, P., JACOT, K., JOHNSON, G. A., JONES, L., KAISER, M., KASER, J. M., KEASAR, T., KIM, T. N., KISHINEVSKY, M., LANDIS, D. A., LAVANDERO, B., LAVIGNE, C., LE RALEC, A., LEMESSA, D., LETOURNEAU, D. K., LIERE, H., LU, Y., LUBIN, Y., LUTTERMOSER, T., MAAS, B., MACE, K., MADEIRA, F., MADER, V., CORTESERO, A. M., MARINI, L., MARTINEZ, E., MARTINSON, H. M., MENOZZI, P., MITCHELL, M. G. E., MIYASHITA, T., MOLINA, G. A. R., MOLINA-MONTENEGRO, M. A., O'NEAL, M. E., OPATOVSKY, I., ORTIZ-MARTINEZ, S., NASH, M., ÖSTMAN, Ö., OUIN, A., PAK, D., PAREDES, D., PARSÁ, S., PARRY, H., PEREZ-ALVAREZ, R., PEROVIĆ, D. J., PETERSON, J. A., PETIT, S., PHILPOTT, S. M., PLANTEGENEST, M., PLEČAŠ, M., PLUESS, T., PONS, X., POTTS, S. G., PYWELL, R. F., RAGSDALE, D. W., RAND, T. A., RAYMOND, L., RICCI, B., SARGENT, C., SARTHOU, J.-P., SAULAIS, J., SCHÄCKERMANN, J., SCHMIDT, N. P., SCHNEIDER, G., SCHÜEPP, C., SIVAKOFF, F. S., SMITH, H. G., STACK WHITNEY, K., STUTZ, S., SZENDREI, Z., TAKADA, M. B., TAKI, H., TAMBURINI, G., THOMSON, L. J., TRICAULT, Y., TSAFACK, N., TSCHUMI, M., VALANTIN-MORISON, M., VAN TRINH, M., VAN DER WERF, W., VIERLING, K. T., WERLING, B. P., WICKENS, J. B., WICKENS, V. J., WOODCOCK, B. A., WYCKHUYS, K., XIAO, H., YASUDA, M., YOSHIOKA, A. et ZOU, Y., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 115, n° 33, pp. E7863-E7870. DOI 10.1073/pnas.1800042115.
- KASSAM, A., FRIEDRICH, T. et DERPSCH, R., 2019. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*. Vol. 76, n° 1, pp. 29-51. DOI 10.1080/00207233.2018.1494927.
- KELLER, S. et HÄNI, F., 2000. Ansprüche von Nützlingen und Schädlingen an den Lebensraum. *Streifenförmige Ökologische Ausgleichsflächen in der Kulturlandschaft: Ackerkrautstreifen, Buntbrache, Feldränder*. pp. 199-217. Scopus
- KENNEDY, J. S., BOOTH, C. O. et KERSHAW, W. J. S., 1961. Host finding by aphids in the field.: III. Visual attraction. *Annals of Applied Biology*. Vol. 49, n° 1, pp. 1-21. DOI 10.1111/j.1744-7348.1961.tb03587.x.
- KENNEDY, T. F., MCDONALD, J. G., CONNERY, J. et PURVIS, G., 2010. A comparison of the occurrence of aphids and barley yellow dwarf virus in minimum-till and conventional-till autumn-sown cereals. *The Journal of Agricultural Science*. Vol. 148, n° 4, pp. 407-419. DOI 10.1017/S0021859610000304.
- KIM, K.-H., KABIR, E. et JAHAN, S. A., 2017. Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment*. Vol. 575, pp. 525-535. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.09.009.
- KOSS, A. M. et SNYDER, W. E., 2005. Alternative prey disrupt biocontrol by a guild of generalist predators. *Biological Control*. Vol. 32, n° 2, pp. 243-251. DOI 10.1016/j.biocontrol.2004.10.002.



Bibliographie

- KOSS, A. M, CHANG, G. C et SNYDER, W. E, 2004. Predation of green peach aphids by generalist predators in the presence of alternative, Colorado potato beetle egg prey. *Biological Control*. Vol. 31, n° 2, pp. 237-244. DOI 10.1016/j.biocontrol.2004.04.006.
- KOTZE, D. J., BRANDMAYR, P., CASALE, A., DAUFFY-RICHARD, E., DEKONINCK, W., KOIVULA, M., LOVEI, G., MOSSAKOWSKI, D., NOORDIJK, J., PAARMANN, W., PIZZOLOTO, R., SASKA, P., SCHWERK, A., SERRANO, J., SZYSZKO, J., TABOADA PALOMARES, A., TURIN, H., VENN, S., VERMEULEN, R. et ZETTO BRANDMAYR, T., 2011. Forty years of carabid beetle research in Europe – from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation. *ZooKeys*. Vol. 100, pp. 55-148. DOI 10.3897/zookeys.100.1523.
- KROMP, B., 1999. Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 74, n° 1-3, pp. 187-228. DOI 10.1016/S0167-8809(99)00037-7.
- KUHN, S., EGERT, B., NEUMANN, S. et STEINBECK, C., 2008. Building blocks for automated elucidation of metabolites: Machine learning methods for NMR prediction. *BMC Bioinformatics*. Vol. 9, n° 1, pp. 400. DOI 10.1186/1471-2105-9-400.
- KWS, 2023. KWS ESCAPE - Variété piège à altises - Colza - KWS en France -. *kws.com* [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.kws.com/fr/fr/produits/colza/aperçu-des-varietes/kws-escape-variete-piege-altises/?utm_source= agrico&utm_medium=email&utm_campaign=traffic.farmer.colza.agricoco.escape.10072023&utm_id=Agrico+Emailing+Escape+10072023&utm_term=escape&utm_content=escape [Consulté le 18 août 2023].
- LABRUYERE, S., RICCI, B., LUBAC, A. et PETIT, S., 2016. Crop type, crop management and grass margins affect the abundance and the nutritional state of seed-eating carabid species in arable landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 231, pp. 183-192. DOI 10.1016/j.agee.2016.06.037.
- LACROIX, R. et KURRASCH, D. M, 2023. Glyphosate toxicity: *in vivo*, *in vitro* , and epidemiological evidence. *Toxicological Sciences*. Vol. 192, n° 2, pp. 131-140. DOI 10.1093/toxsci/kfad018.
- LAL, R., REICOSKY, D.C. et HANSON, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*. Vol. 93, n° 1, pp. 1-12. DOI 10.1016/j.still.2006.11.004.
- LAMI, F., BURGIO, G., MAGAGNOLI, S., SOMMAGGIO, D., HORVÁTH, R., NAGY, D. D. et MASETTI, A., 2023. Ground-dwelling arthropods as biodiversity indicators in maize agroecosystems of Northern Italy. *Ecological Indicators*. Vol. 152, pp. 110352. DOI 10.1016/j.ecolind.2023.110352.
- LAMY-GRANDIDIER, C., 2022. Les ventes de produits phyto en hausse pour la première fois depuis vingt ans. *Cultivar* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.cultivar.fr/sinformer/les-ventes-de-produits-phyto-en-hausse-pour-la-premiere-fois-depuis-vingt-ans> [Consulté le 27 janvier 2023].
- LANDIS, D. A., WRATTEN, S. D. et GURR, G. M., 2000a. Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*. Vol. 45, n° 1, pp. 175-201. DOI 10.1146/annurev.ento.45.1.175.
- LANDIS, D. A., WRATTEN, S. D. et GURR, G. M., 2000b. Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*. Vol. 45, n° 1, pp. 175-201. DOI 10.1146/annurev.ento.45.1.175.



- LEE, H., LAUTENBACH, S., NIETO, A. P. G., BONDEAU, A., CRAMER, W. et GEIJZENDORFFER, I. R., 2019. The impact of conservation farming practices on Mediterranean agro-ecosystem services provisioning—a meta-analysis. *Regional Environmental Change*. Vol. 19, n° 8, pp. 2187-2202. DOI 10.1007/s10113-018-1447-y.
- LEHMAN, C. L. et TILMAN, D., 2000. Biodiversity, Stability, and Productivity in Competitive Communities. *The American Naturalist*. Vol. 156, n° 5, pp. 534-552. DOI 10.1086/303402.
- LENTH, R. V., 2021. *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- LETOURNEAU, D. K., ARMBRECHT, I., RIVERA, B. S., LERMA, J. M., CARMONA, E. J., DAZA, M. C., ESCOBAR, S., GALINDO, V., GUTIÉRREZ, C., LÓPEZ, S. D., MEJÍA, J. L., RANGEL, A. M. A., RANGEL, J. H., RIVERA, L., SAAVEDRA, C. A., TORRES, A. M. et TRUJILLO, A. R., 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications*. Vol. 21, n° 1, pp. 9-21. DOI 10.1890/09-2026.1.
- LETOURNEAU, D. K., JEDLICKA, J. A., BOTHWELL, S. G. et MORENO, C. R., 2009. Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. Vol. 40, n° 1, pp. 573-592. DOI 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120320.
- LOREAU, M., DOWNING, A., EMMERSON, M., GONZALEZ, A., HUGHES, J., INCHAUSTI, P., JOSHI, J., NORBERG, J. et SALA, O., 2002. A new look at the relationship between diversity and stability. In : *Biodiversity and ecosystem functioning*. Oxford University Press. pp. 79-91.
- LOREAU, M., NAEEM, S., INCHAUSTI, P., BENGTTSSON, J., GRIME, J. P., HECTOR, A., HOOPER, D. U., HUSTON, M. A., RAFFAELLI, D., SCHMID, B., TILMAN, D. et WARDLE, D. A., 2001. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science*. Vol. 294, n° 5543, pp. 804-808. DOI 10.1126/science.1064088.
- LÖVEI, G. L. et SUNDERLAND, K. D., 1996. Ecology and Behavior of Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*. Vol. 41, n° 1, pp. 231-256. DOI 10.1146/annurev.en.41.010196.001311.
- MATHIASSEN, H., SØRENSEN, H., BLIGAARD, J. et ESBJERG, P., 2015. Effect of temperature on reproduction and embryonic development of the cabbage stem flea beetle, *Psylliodes chrysocephala* L., (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Applied Entomology*. Vol. 139, n° 8, pp. 600-608. DOI 10.1111/jen.12201.
- MATLACK, G. R. et LITVAITIS, J. A., 1999. Forest edges. In : HUNTER, Malcolm L. (éd.), *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems* Cambridge University Press. pp. 210-233. ISBN 978-0-521-63104-4.
- MATSON, P. A., PARTON, W. J., POWER, A. G. et SWIFT, M. J., 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science*. Vol. 277, n° 5325, pp. 504-509. DOI 10.1126/science.277.5325.504.
- MAUDSLEY, M., SEELEY, B. et LEWIS, O., 2002. Spatial distribution patterns of predatory arthropods within an English hedgerow in early winter in relation to habitat variables. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 89, n° 1-2, pp. 77-89. DOI 10.1016/S0167-8809(01)00320-6.
- MEYNARD, J.M., MESSÉAN, A., CHARLIER, A., CHARRIER, F., FARÈS, M., LE BAIL, M. et MAGRINI, M.B., 2013. *Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières*. [en ligne]. Rapport d'étude. INRA. Disponible à l'adresse : <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/diversification-des-cultures-rapport-d-etude-1.pdf>



Bibliographie

- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2022a. Le plan Écophyto, qu'est-ce que c'est ? *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-quest-ce-que-cest> [Consulté le 21 novembre 2022].
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE, 2022b. Indicateurs des ventes de produits phytopharmaceutiques. *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/indicateurs-des-ventes-de-produits-phytopharmaceutiques> [Consulté le 27 janvier 2023].
- MUNERET, L., RICCI, B., VIALATTE, A., AVIRON, S., DUCOURTIEUX, C., BIJU-DUVAL, L. et PETIT, S., 2022. *Converting cropping systems into seasonal habitat functionality reveals the hump-shaped responses of carabid beetles to agricultural management* [en ligne]. preprint. Ecology. Disponible à l'adresse : <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2022.02.26.480658> [Consulté le 29 juin 2023].
- MUÑOZ, J. P., SILVA-PAVEZ, E., CARRILLO-BELTRÁN, D. et CALAF, G. M., 2023. Occurrence and exposure assessment of glyphosate in the environment and its impact on human beings. *Environmental Research*. Vol. 231, pp. 116201. DOI 10.1016/j.envres.2023.116201.
- NAVAS, C. A. et CARVALHO, J. E. (éd.), 2010. *Aestivation: molecular and physiological aspects*. Berlin ; New York : Springer. Progress in molecular and subcellular biology, 49. ISBN 978-3-642-02420-7. QH523 .A47 2010
- NÉRON, F. et LE CHATELIER, D., 2014. *Petit précis d'agriculture*. ISBN 978-2-85557-344-1.
- NEWBOLD, T., HUDSON, L. N., HILL, S. L. L., CONTU, S., LYSENKO, I., SENIOR, R. A., BÖRGER, L., BENNETT, D. J., CHOIMES, A., COLLEN, B., DAY, J., DE PALMA, A., DÍAZ, S., ECHEVERRIA-LONDOÑO, S., EDGAR, M. J., FELDMAN, A., GARON, M., HARRISON, M. L. K., ALHUSSEINI, T., INGRAM, D. J., ITESCU, Y., KATTGE, J., KEMP, V., KIRKPATRICK, L., KLEYER, M., CORREIA, D. L. P., MARTIN, C. D., MEIRI, S., NOVOSOLOV, M., PAN, Y., PHILLIPS, H. R. P., PURVES, D. W., ROBINSON, A., SIMPSON, J., TUCK, S. L., WEIHER, E., WHITE, H. J., EWERS, R. M., MACE, G. M., SCHARLEMANN, J. P. W. et PURVIS, A., 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*. Vol. 520, n° 7545, pp. 45-50. DOI 10.1038/nature14324.
- NEYTON, S., ABBADY, D. et SARTHOU, J.-P., 2018. Agroécosystème : Définition. [en ligne]. 2018. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/agroecosysteme/> [Consulté le 27 janvier 2023]. DOI 10.17180/YS6M-A511.
- ÖBERG, S., CASSEL-LUNDHAGEN, A. et EKBOM, B., 2011. Pollen beetles are consumed by ground- and foliage-dwelling spiders in winter oilseed rape: Pollen beetle predation by spiders in oilseed rape. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. Vol. 138, n° 3, pp. 256-262. DOI 10.1111/j.1570-7458.2011.01098.x.
- ODRE, 2023. Température quotidienne départementale (depuis janvier 2018). *data.gouv.fr* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/temperature-quotidienne-departementale-depuis-janvier-2018/> [Consulté le 11 septembre 2023].
- ORTEGA-RAMOS, P. A., COSTON, D. J., SEIMANDI-CORDA, G., MAUCLINE, A. L. et COOK, S. M., 2022. Integrated pest management strategies for cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) in oilseed rape. *GCB Bioenergy*. Vol. 14, n° 3, pp. 267-286. DOI 10.1111/gcbb.12918.
- ORTEGA-RAMOS, P. A., MAUCLINE, A. L., METCALFE, H., COOK, S. M., GIRLING, R. D. et COLLINS, L., 2023. Modelling the factors affecting the spatiotemporal distribution of cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) larvae in winter oilseed rape (*Brassica napus*) in the UK. *Pest Management Science*. pp. 7427. DOI 10.1002/ps.7427.



- OUVRARD, P., TRANSON, J. et JACQUEMART, A.-L., 2018. Flower-strip agri-environment schemes provide diverse and valuable summer flower resources for pollinating insects. *Biodiversity and Conservation*. Vol. 27, n° 9, pp. 2193-2216. DOI 10.1007/s10531-018-1531-0.
- PALM, C., BLANCO-CANQUI, H., DECLERCK, F., GATERE, L. et GRACE, P., 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 187, pp. 87-105. DOI 10.1016/j.agee.2013.10.010.
- PARK, I., SCHWARZLÄNDER, M., HINZ, H. L., SCHAFFNER, U. et EIGENBRODE, S. D., 2019. A simple approach to evaluate behavioral responses of insect herbivores to olfactory and visual cues simultaneously: the double stacked y-tube device and portable volatile collection system. *Arthropod-Plant Interactions*. Vol. 13, n° 1, pp. 139-149. DOI 10.1007/s11829-018-9663-4.
- PETIT, S., MUNERET, L., CARBONNE, B., HANNACHI, M., RICCI, B., RUSCH, A. et LAVIGNE, C., 2020. Landscape-scale expansion of agroecology to enhance natural pest control: A systematic review. *Advances in Ecological Research*. pp. 1-48. ISBN 978-0-12-822017-7.
- PETIT, S., MUNIER-JOLAIN, N., BRETAGNOLLE, V., BOCKSTALLER, C., GABA, S., CORDEAU, S., LECHENET, M., MÉZIÈRE, D. et COLBACH, N., 2015. Ecological Intensification Through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environmental Management*. Vol. 56, n° 5, pp. 1078-1090. DOI 10.1007/s00267-015-0554-5.
- PIERRE, E. et OLLIVIER, M., 2017. Hypp : encyclopédie en protection des plantes - Biologie du ravageur *Ceutorhynchus piciparsis*. *Ephytia* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://ephytia.inra.fr/fr/C/18002/Hypp-encyclopedie-en-protection-des-plantes-Biologie-du-ravageur> [Consulté le 24 mai 2023].
- PIGOT, J., GARDARIN, A., DORÉ, T., MORISSEAU, A. et VALANTIN-MORISON, M., 2023. Unlike woodland edges, flower strips do not act as a refuge for cabbage stem flea beetle aestivation. *Pest Management Science*. pp. ps.7558. DOI 10.1002/ps.7558.
- POLLIER, A., 2016. *Interactions entre végétation des habitats semi-naturels, pratiques agricoles et contrôle biologique des ravageurs de cultures - Optimisation de l'approche bande fleurie*.
- PUECH, C., POGGI, S., BAUDRY, J. et AVIRON, S., 2015. Do farming practices affect natural enemies at the landscape scale? *Landscape Ecology*. Vol. 30, n° 1, pp. 125-140. DOI 10.1007/s10980-014-0103-2.
- PURVIS, G. et FADL, A., 1996. Emergence of Carabidae (Coleoptera) from pupation: a technique for studying the « productivity » of carabid habitats. *Annales Zoologici Fennici*. Vol. 33, n° 1, pp. 215-223. JSTOR
- RAND, T. A., TYLIANAKIS, J. M. et TSCHARNTKE, T., 2006. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecology Letters*. Vol. 9, n° 5, pp. 603-614. DOI 10.1111/j.1461-0248.2006.00911.x.
- REBOUD, X., BLANCK, M., AUBERTOT, J.-N., JEUFFROY, M.-H., MUNIER-JOLAIN, N. et THIOU-LET-SCHOLTUS, M., 2017. *Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française*. Rapport Inra à la saisine Ref TR507024,.
- REHMAN, M., LIU, J., JOHNSON, A. C., DADA, T. E. et GURR, G. M., 2019. Organic mulches reduce crop attack by sweetpotato weevil (*Cylas formicarius*). *Scientific Reports*. Vol. 9, n° 1, pp. 14860. DOI 10.1038/s41598-019-50521-5.
- RICCI, B., LAVIGNE, C., ALIGNIER, A., AVIRON, S., BIJU-DUVAL, L., BOUVIER, J. C., CHOISIS, J.-P., FRANCK, P., JOANNON, A., LADET, S., MEZERETTE, F., PLANTEGENEST, M., SAVARY, G., THOMAS, C., VIALATTE, A. et PETIT, S., 2019. Local pesticide use intensity conditions landscape effects on biological pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 286, n° 1904, pp. 20182898. DOI 10.1098/rspb.2018.2898.



Bibliographie

- RIGGI, L. G.A. et BOMMARCO, R., 2019. Subsidy type and quality determine direction and strength of trophic cascades in arthropod food web in agro-ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. pp. 1365- 2664.13444. DOI 10.1111/1365-2664.13444.
- ROBERT, C., RUCK, L., CARPEZAT, J., LAUVERNAY, A., SIEGWART, M. et LEFLON, M., 2017. Pyrethroids resistance monitoring in French cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*) and rape winter stem weevil (*Ceutorhynchus picipitarsis*) populations in oilseed rape. *Écologie Chimique: nouvelles contributions à la protection des cultures contre les ravageurs et 11e Conférence Internationale sur les Ravageurs et Auxiliaires en Agriculture, 24 au 26 octobre 2017, Montpellier, France*. pp. 196-208.
- ROBERT, C. et RUCK, L., 2019. Optimiser l'implantation pour lutter contre les ravageurs. *Terres Inovia* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terresinovia.fr/-/optimiser-l-implantation-pour-lutter-contre-les-ravageurs> [Consulté le 15 juin 2023].
- ROBERT, C. et RUCK, L., 2022a. Gestion en cours de campagne des larves de grosses altises. *Terres Inovia* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terresinovia.fr/-/surveillance-et-lutte-contre-les-larves-de-grosses-altises> [Consulté le 4 janvier 2023].
- ROBERT, C. et RUCK, L., 2022b. Etat des résistances selon la région et le ravageur. *Terres Inovia* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terresinovia.fr/-/etat-des-resistances-selon-la-region-et-le-ravageur> [Consulté le 24 mai 2023].
- ROGER, J.-L., JAMBON, O. et BOUGER, G., 2016. *Clé de détermination des carabes - Paysages agricoles du Nord Ouest de la France*.
- ROGER-ESTRADE, J., ANGER, C., BERTRAND, M. et RICHARD, G., 2010. Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*. Vol. 111, n° 1, pp. 33-40. DOI 10.1016/j.still.2010.08.010.
- ROSSI, SPERANDIO, CAFFI, SIMONETTO, et GILIOLI, 2019. Critical Success Factors for the Adoption of Decision Tools in IPM. *Agronomy*. Vol. 9, n° 11, pp. 710. DOI 10.3390/agronomy9110710.
- ROUILLON, C., 2023. DiverIMPACTS : un guide pratique pour accompagner la conduite du changement. ARVALIS [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/accompagner-les-projets-multi-acteurs-pour-la-transition-agroecologique-le-guide> [Consulté le 8 septembre 2023].
- ROUSSEAUX, A., SEYCHAL, L. et SARTHOU, J.-P., 2022. Conservation biological control : Definition. *Dictionnaire d'agroécologie* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/en/dictionnaire/conservation-biological-control/> [Consulté le 26 février 2023].
- ROWEN, E. K., REGAN, K. H., BARBERCHECK, M. E. et TOOKER, J. F., 2020. Is tillage beneficial or detrimental for insect and slug management? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 294, pp. 106849. DOI 10.1016/j.agee.2020.106849.
- ROWEN, E., TOOKER, J. F. et BLUBAUGH, C. K., 2019. Managing fertility with animal waste to promote arthropod pest suppression. *Biological Control*. Vol. 134, pp. 130-140. DOI 10.1016/j.biocontrol.2019.04.012.
- RUSCH, A., CHAPLIN-KRAMER, R., GARDINER, M. M., HAWRO, V., HOLLAND, J., LANDIS, D., THIES, C., TSCHARNTKE, T., WEISSER, W. W., WINQVIST, C., WOLTZ, M. et BOMMARCO, R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 221, pp. 198-204. DOI 10.1016/j.agee.2016.01.039.



- RUSCH, A., MORISON, M., SARTHOU, J.-P. et ROGER-ESTRADE, J., 2010. Biological control of insect pests in agroecosystems: effects of crop management, farming systems and seminatural habitats at the landscape scale: a review. *Advances in Agronomy*. Vol. 109, pp. 219-259. DOI 10.1016/S0065-2113(10)09006-1.
- RUSCH, A., VALANTIN-MORISON, M., ROGER-ESTRADE, J. et SARTHOU, J.-P., 2012. Local and landscape determinants of pollen beetle abundance in overwintering habitats. *Agricultural and Forest Entomology*. Vol. 14, n° 1, pp. 37-47. DOI 10.1111/j.1461-9563.2011.00547.x.
- SANCHEZ, G., 2013. *PLS Path Modeling with R*. Berkeley : Trowchez Editions.
- SARTHOU, J.-P., BADOZ, A., VAISSIÈRE, B., CHEVALLIER, A. et RUSCH, A., 2014. Local more than landscape parameters structure natural enemy communities during their overwintering in semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 194, pp. 17-28. DOI 10.1016/j.agee.2014.04.018.
- SAUVAGE, L., 2022. Les surfaces de colza sont en hausse dans l'UE. *Web-agri.fr* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terre-net.fr/europe/article/205292/les-surfaces-de-colza-sont-en-hausse-dans-l-union-europeenne> [Consulté le 4 janvier 2023].
- SCHEINER, C. et MARTIN, E. A., 2020. Spatiotemporal changes in landscape crop composition differently affect density and seasonal variability of pests, parasitoids and biological pest control in cabbage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 301, pp. 107051. DOI 10.1016/j.agee.2020.107051.
- SHELLHORN, N. A., PARRY, H. R., MACFADYEN, S., WANG, Y. et ZALUCKI, M. P., 2015. Connecting scales: Achieving in-field pest control from areawide and landscape ecology studies: Connecting scales. *Insect Science*. Vol. 22, n° 1, pp. 35-51. DOI 10.1111/1744-7917.12161.
- SCHEPER, J., HOLZSCHUH, A., KUUSSAARI, M., POTTS, S. G., RUNDLÖF, M., SMITH, H. G. et KLEIJN, D., 2013. Environmental factors driving the effectiveness of European agri-environmental measures in mitigating pollinator loss - a meta-analysis. GOMEZ, Jose (éd.), *Ecology Letters*. Vol. 16, n° 7, pp. 912-920. DOI 10.1111/ele.12128.
- SCHNEIDER, G., KRAUSS, J., RIEDINGER, V., HOLZSCHUH, A. et STEFFAN-DEWENTER, I., 2015. Biological pest control and yields depend on spatial and temporal crop cover dynamics. MANNING, Peter (éd.), *Journal of Applied Ecology*. Vol. 52, n° 5, pp. 1283-1292. DOI 10.1111/1365-2664.12471.
- SCHULZ, R.-R. et DAEBELER, F., 1984. Zum Schaden durch den Rapserrdfloh (*Psylliodes chrysocephala* L.), insbesondere seine Imagines. Vol. 6, pp. 113-115.
- SEBILLOTTE, M., 1974. Agronomie et agriculture, analyse des tâches de l'agronome. *Cah. ORSTOM, série biologique*. Vol. 24, pp. 3-25.
- SEBILLOTTE, M., 1990. *Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes*. [en ligne]. INRA. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02852812> [Consulté le 25 août 2020]. ISBN 978-2-7380-0256-3.
- SENTINEL-HUB, 2023. Sentinel-hub EO-Browser3. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=10&lat=41.9&lng=12.5&themeld=DEFAULT-THEME&toTime=2023-01-06T14%3A26%3A12.379Z> [Consulté le 6 janvier 2023].
- SERÉE, L., 2022. *Multifonctionnalité de systèmes de culture combinés à des bandes fleuries : Une approche interdisciplinaire pour relier la biodiversité et les services écosystémiques rendus*. Agronomie. Université Paris-Saclay.



Bibliographie

- SHENK, M. et SAUNDERS, J. L., 1984. Vegetation management systems and insect responses in the humid tropics of Costa Rica. *Tropical Pest Management*. Vol. 30, n° 2, pp. 186-193. DOI 10.1080/09670878409370875.
- SHENNAN, C., KRUPNIK, T. J., BAIRD, G., COHEN, H., FORBUSH, K., LOVELL, R. J. et OLIMPI, E. M., 2017. Organic and Conventional Agriculture: A Useful Framing? *Annual Review of Environment and Resources*. Vol. 42, n° 1, pp. 317-346. DOI 10.1146/annurev-environ-110615-085750.
- SIRAMI, C., GROSS, N., BAILLOD, A. B., BERTRAND, C., CARRIÉ, R., HASS, A., HENCKEL, L., MIGUET, P., VUILLOT, C., ALIGNIER, A., GIRARD, J., BATÁRY, P., CLOUGH, Y., VIOLLE, C., GIRALT, D., BOTA, G., BADENHAUSSER, I., LEFEBVRE, G., GAUFFRE, B., VIALATTE, A., CALATAYUD, F., GIL-TENA, A., TISCHENDORF, L., MITCHELL, S., LINDSAY, K., GEORGES, R., HILAIRE, S., RECASENS, J., SOLÉ-SENAN, X. O., ROBLEÑO, I., BOSCH, J., BARRIENTOS, J. A., RICARTE, A., MARCOS-GARCIA, M. A., MIÑANO, J., MATHEVET, R., GIBON, A., BAUDRY, J., BALENT, G., POULIN, B., BUREL, F., TSCHARNTKE, T., BRETAGNOLLE, V., SIRIWARDENA, G., OUIN, A., BROTONS, L., MARTIN, J.-L. et FAHRIG, L., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 116, n° 33, pp. 16442-16447. DOI 10.1073/pnas.1906419116.
- SIRAMI, C., THEAU, J. P. et RYSCHAWY, J. J., 2016. Services écosystémiques dans les agroécosystèmes : Définition. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/services-ecosystemiques-dans-les-agroecosystemes/> [Consulté le 27 janvier 2023]. DOI 10.17180/G1QE-4S49.
- SKELLERN, Matthew P., WELHAM, Sue J., WATTS, Nigel P. et COOK, Samantha M., 2017. Meteorological and landscape influences on pollen beetle immigration into oilseed rape crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. avril 2017. Vol. 241, pp. 150-159. DOI 10.1016/j.agee.2017.03.008.
- SMITH, J. G., 1969. Some effects of crop background on populations of aphids and their natural enemies on brussels sprouts. *Annals of Applied Biology*. Vol. 63, n° 2, pp. 326-330. DOI 10.1111/j.1744-7348.1969.tb05497.x.
- SMITH, O. M., COHEN, A. L., RIESER, C. J., DAVIS, A. G., TAYLOR, J. M., ADESANYA, A. W., JONES, M. S., MEIER, A. R., REGANOLD, J. P., ORPET, R. J., NORTHFIELD, T. D. et CROWDER, D. W., 2019. Organic Farming Provides Reliable Environmental Benefits but Increases Variability in Crop Yields: A Global Meta-Analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Vol. 3, pp. 82. DOI 10.3389/fsufs.2019.00082.
- STENBERG, J. A., 2017. A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends in Plant Science*. Vol. 22, n° 9, pp. 759-769. DOI 10.1016/j.tplants.2017.06.010.
- STERN, V. M., SMITH, R. F., VAN DEN BOSCH, R. et HAGEN, K. S., 1959. The integrated control concept. *Hilgardia*. Vol. 29, n° 2, pp. 81-101.
- STILING, P. et CORNELISSEN, T., 2005. What makes a successful biocontrol agent? A meta-analysis of biological control agent performance. *Biological Control*. Vol. 34, n° 3, pp. 236-246. DOI 10.1016/j.biocontrol.2005.02.017.
- STOATE, C., BOATMAN, N. D., BORRALHO, R. J., CARVALHO, C. R., SNOO, G. R. de et EDEN, P., 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of Environmental Management*. Vol. 63, n° 4, pp. 337-365. DOI 10.1006/jema.2001.0473.
- SUTTER, L., AMATO, M., JEANNERET, P. et ALBRECHT, M., 2018. Overwintering of pollen beetles and their predators in oilseed rape and semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 265, pp. 275-281. DOI 10.1016/j.agee.2018.06.030.



- SYMONDSON, W. O. C., SUNDERLAND, K. D. et GREENSTONE, M. H., 2002. Can Generalist Predators be Effective Biocontrol Agents? *Annual Review of Entomology*. Vol. 47, n° 1, pp. 561-594. DOI 10.1146/annurev.ento.47.091201.145240.
- SYNGENTA, 2014. Pucerons d'automne : protégez vos céréales. *Syngenta France* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.syngenta.fr/cultures/cereales/article-insecticide/pucerons-d-automne-protectez-vos-cereales> [Consulté le 26 juin 2020].
- TALARICO, F., GIGLIO, A., PIZZOLOTTO, R. et BRANDMAYR, P., 2016. A synthesis of feeding habits and reproduction rhythm in Italian seed-feeding ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *European Journal of Entomology*. Vol. 113, pp. 325-336. DOI 10.14411/eje.2016.042.
- TAMBURINI, G., SANTOIEEMMA, G., E. O'ROURKE, M., BOMMARCO, R., CHAPLIN-KRAMER, R., DAINESE, M., KARP, D. S., KIM, T. N., MARTIN, E. A., PETERSEN, M. et MARINI, L., 2020. Species traits elucidate crop pest response to landscape composition: a global analysis. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 287, n° 1937, pp. 20202116. DOI 10.1098/rspb.2020.2116.
- TAYLOR, R. L., MAXWELL, B. D. et BOIK, R. J., 2006. Indirect effects of herbicides on bird food resources and beneficial arthropods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 116, n° 3-4, pp. 157-164. DOI 10.1016/j.agee.2006.01.012.
- TENENHAUS, M., 1998. *La régression PLS: théorie et pratique*. Paris : Éd. Technip. ISBN 978-2-7108-0735-3. 51
- TERRES INOVIA, s.d. *Evaluation du risque du bourgeon terminal et larves de grosses altises*.
- THÉRON, O., 2016. Documentation plateforme Maelia | Modelling of socio-Agro-Ecological system for Landscape Integrated Assessment. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://maelia-platform.inra.fr/> [Consulté le 13 septembre 2023].
- THIBORD, J.-B., VERJUX, N. et ROBIN, N., 2016. Peut-on se passer des néonicotinoïdes pour lutter contre les viroses. *Arvalis-infos* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis-infos.fr/pas-d-alternatives-equivalentes-aux-neonicotino-des-a-court-terme-@/view-21800-arvarticle.html> [Consulté le 15 juillet 2020].
- THIELE, H.-Y., 1977. *Carabid Beetles in Their Environments*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-81156-2. DOI 10.1007/978-3-642-81154-8.
- THIOULOUSE, J., DEBOUZIE, D. et BALLANGER, Y., 1984. Structures spatiales et temporelles des populations d'un ravageur du Colza (*Psylliodes chrysocephala* L. (Col., Chrysomelidae)) dans plusieurs parcelles de culture. *Acta Œcologica*. Vol. 5, n° 4, pp. 335-353.
- THOMAS, F., 2017. Influence de la hauteur de coupe et gestion des chaumes. *TCS*. N° 95, pp. 4-6.
- THORBEC, P. et BILDE, T., 2004. Reduced numbers of generalist arthropod predators after crop management. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 41, n° 3, pp. 526-538. DOI 10.1111/j.0021-8901.2004.00913.x.
- TIERS, N., 2020. François Coutant : « Avec Orbis, je désherbe en bio sans travailler le sol ». *Terre-net* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.terre-net.fr/desherbage/article/167057/francois-coutant-avec-orbis-je-desherbe-en-bio-sans-travailler-le-sol-> [Consulté le 7 décembre 2023].
- TILMAN, D., CASSMAN, K. G., MATSON, P. A., NAYLOR, R. et POLASKY, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. Vol. 418, n° 6898, pp. 671-677. DOI 10.1038/nature01014.



Bibliographie

- TILMAN, D., ISBELL, F. et COWLES, J. M., 2014. Biodiversity and Ecosystem Functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. Vol. 45, n° 1, pp. 471-493. DOI 10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917.
- TIXERONT, M., DUPUY, F., CORTESERO, A. M. et HERVÉ, M. R., 2023. Understanding crop colonization of oilseed rape crops by the cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala* L. (Coleoptera: Chrysomelidae)). *Pest Management Science*. pp. ps.7424. DOI 10.1002/ps.7424.
- TSCHARNTKE, T., BOMMARCO, R., CLOUGH, Y., CRIST, T. O., KLEIJN, D., RAND, T. A., TYLIANAKIS, J. M., NOUHUYS, S. van et VIDAL, S., 2007. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biological Control*. Vol. 43, n° 3, pp. 294-309. DOI 10.1016/j.biocontrol.2007.08.006.
- TSCHARNTKE, T., KARP, D. S., CHAPLIN-KRAMER, R., BATÁRY, P., DECLERCK, F., GRATTON, C., HUNT, L., IVES, A., JONSSON, M., LARSEN, A., MARTIN, E. A., MARTÍNEZ-SALINAS, A., MEEHAN, T. D., O'ROURKE, M., POVEDA, K., ROSENHEIM, J. A., RUSCH, A., SCHELLHORN, N., WANGER, T. C., WRATTEN, S. et ZHANG, W., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control – Five hypotheses. *Biological Conservation*. Vol. 204, pp. 449-458. DOI 10.1016/j.biocon.2016.10.001.
- TSCHARNTKE, T., KLEIN, A. M., KRUESS, A., STEFFAN-DEWENTER, I. et THIES, C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. *Ecology Letters*. Vol. 8, n° 8, pp. 857-874. DOI 10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x.
- TUDI, M., DANIEL RUAN, H., WANG, L., LYU, J., SADLER, R., CONNELL, D., CHU, C. et PHUNG, D. T., 2021. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. 18, n° 3, pp. 1112. DOI 10.3390/ijerph18031112.
- UHLER, J., REDLICH, S., ZHANG, J., HOTHORN, T., TOBISCH, C., EWALD, J., THORN, S., SEIBOLD, S., MITESSER, O., MORINIÈRE, J., BOZICEVIC, V., BENJAMIN, C. S., ENGLMEIER, J., FRICKE, U., GANUZA, C., HAENSEL, M., RIEBL, R., ROJAS-BOTERO, S., RUMMLER, T., UPHUS, L., SCHMIDT, S., STEFFAN-DEWENTER, I. et MÜLLER, J., 2021. Relationship of insect biomass and richness with land use along a climate gradient. *Nature Communications*. Vol. 12, n° 1, pp. 5946. DOI 10.1038/s41467-021-26181-3.
- ULBER, B. et SCHIERBAUM-SCHICKLER, C., 2003. The effect of tillage regime on the infestation of oilseed rape by the cabbage stem flea beetle, *Psylliodes chrysocephala*. *Proceeding of 11th International Rapeseed Congress*. Royal Veterinary and Agricultural University of Copenhagen, Denmark.
- UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE, 2015. *Effects of conservation practices on soil properties in areas of cropland*. Soil Health Literature Summary.
- VALANTIN-MORISON, M., MEYNARD, J.-M. et DORÉ, T., 2007. Effects of crop management and surrounding field environment on insect incidence in organic winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Protection*. Vol. 26, n° 8, pp. 1108-1120. DOI 10.1016/j.cropro.2006.10.005.
- VASSEUR, C., JOANNON, A., AVIRON, S., BUREL, F., MEYNARD, J.-M. et BAUDRY, J., 2013. The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 166, pp. 3-14. DOI 10.1016/j.agee.2012.08.013.
- VERRET, V., PELZER, E., BEDOUSSAC, L. et JEUFFROY, M.-H., 2019. Traque aux innovations d'agriculteurs pour la conception d'associations d'espèces incluant des légumineuses. *Innovations Agronomiques* 74, 143-154. [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www6.inra.fr/ciag/content/download/6682/48948/file/Vol74-14-Verret_et_al.pdf [Consulté le 24 mai 2023]. DOI 10.15454/N30GY9.



- VIG, K., 2003. Data on the biology of cabbage stem flea beetle, *Psylliodes chrysocephalus* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera, Chrysomelidae, Alticinae). *Communications in agricultural and applied biological sciences*. Vol. 68, pp. 231-237.
- WACKER, L., 2021. Mieux vaut prévenir pour réduire la pression des grosses altises sur colza. *Cultivar* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.cultivar.fr/technique/mieux-vaut-prevenir-pour-reduire-la-pression-des-grosses-altises-sur-colza> [Consulté le 15 juin 2023].
- WACKER, L., DUPHIL, M. et VÉZIAN, R., 2018. Techniques culturales simplifiées : Définition. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/techniques-culturales-simplifiees/> [Consulté le 21 novembre 2022]. DOI 10.17180/S5SC-SZ78.
- WALIGORA, C., 2016. *Faune utile des bords de champs: en finir avec les idées reçues*. Paris : Éditions France agricole. Agriproduction. ISBN 978-2-85557-476-9. 632.9
- WARNER, D. J., ALLEN-WILLIAMS, L. J., WARRINGTON, S., FERGUSON, A. W. et WILLIAMS, I. H., 2003. Mapping, characterisation, and comparison of the spatio-temporal distributions of cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*), carabids, and Collembola in a crop of winter oilseed rape (*Brassica napus*): *Spatio-temporal distribution of carabids in winter rape*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. Vol. 109, n° 3, pp. 225-234. DOI 10.1046/j.0013-8703.2003.00112.x.
- WEZEL, A., CASAGRANDE, M., CELETTE, F., VIAN, J.-F., FERRER, A. et PEIGNÉ, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 34, n° 1, pp. 1-20. DOI 10.1007/s13593-013-0180-7.
- WEZEL, A., GORIS, M., BRUIL, J., FÉLIX, G., PEETERS, A., BÀRBERI, P., BELLON, S. et MIGLIORINI, P., 2018. Challenges and Action Points to Amplify Agroecology in Europe. *Sustainability*. Vol. 10, n° 5, pp. 1598. DOI 10.3390/su10051598.
- WHITE, S., ELLIS, S., PICKERING, F., LEYBOURNE, D., CORKLEY, I., KENDALL, S., COLLINS, L., NEWBERT, M., COTTON, L. et PHILLIPS, R., 2020. Project Report No. 623 : *Integrated pest management of cabbage stem flea beetle in oilseed rape*. AHDB Cereals and Oilseeds.
- WILLIAMS, I. H., 2010a. The Major Insect Pests of Oilseed Rape in Europe and Their Management: An Overview. In : WILLIAMS, Ingrid H. (éd.), *Biocontrol-Based Integrated Management of Oilseed Rape Pests* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. pp. 1-43. [Consulté le 26 juin 2020]. ISBN 978-90-481-3982-8. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3983-5_1
- WILLIAMS, Ingrid H. (éd.), 2010b. *Biocontrol-based integrated management of oilseed rape pests*. Dordrecht ; London : Springer. ISBN 978-90-481-3982-8. SB608.R2 B563 2010
- WILLIAMS, I. H., FERGUSON, A. W., KRUIJS, M., VEROMANN, E. et WARNER, D. J., 2010. Ground Beetles as Predators of Oilseed Rape Pests: Incidence, Spatio-Temporal Distributions and Feeding. In : WILLIAMS, Ingrid H. (éd.), *Biocontrol-Based Integrated Management of Oilseed Rape Pests*. Springer Netherlands. pp. 115-149. ISBN 978-90-481-3982-8. DOI 10.1007/978-90-481-3983-5_4.
- WILLIS, C. E., FOSTER, S. P., ZIMMER, C. T., ELIAS, J., CHANG, X., FIELD, Linda M., WILLIAMSON, Martin S. et DAVIES, T.G. Emyr, 2020. Investigating the status of pyrethroid resistance in UK populations of the cabbage stem flea beetle (*Psylliodes chrysocephala*). *Crop Protection*. Vol. 138, pp. 105316. DOI 10.1016/j.cropro.2020.105316.
- XICLUNA, P., 2023. Quels sont les produits de biocontrôle ? *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://agriculture.gouv.fr/quels-sont-les-produits-de-biocontrôle> [Consulté le 6 septembre 2023].



Bibliographie

YARA, 2019. Quels sont les débouchés du colza ? *Yara France* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/colza/debouches-colza/> [Consulté le 4 janvier 2023].

ZANELLA, C., 2008. *Les techniques sans labour : des pratiques culturales en réponse à une agriculture plus durable*.

ZHENG, X., KOOPMANN, B., ULBER, B. et VON TIEDEMANN, A., 2020. A Global Survey on Diseases and Pests in Oilseed Rape—Current Challenges and Innovative Strategies of Control. *Frontiers in Agronomy*. Vol. 2, pp. 590908. DOI 10.3389/fagro.2020.590908.



©Dessin de Justine Pigot

Ainsi s'achève ce manuscrit.
Après avoir vadrouillé pendant tant d'années,
Il est temps pour moi de retourner sur la ferme familiale.

