

Travail de fin d'études en gestion des forêts et des espaces naturels : Influence des associations culturelles et des bandes fleuries sur l'entomofaune fonctionnelle dans les cultures de froment d'hiver.

Auteur : Soenens, Téo

Promoteur(s) : 31323

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/26174>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

INFLUENCE DES ASSOCIATIONS CULTURALES ET DES BANDES FLEURIES SUR L'ENTOMOFAUNE FONCTIONNELLE DANS LES CULTURES DE FROMENT D'HIVER

TEO SOENENS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2025-2026

PROMOTEUR : FRANCIS F.

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority¹ of Gembloux Agro-Bio Tech.

© Le présent document n'engage que son auteur

© This document is the sole responsibility of its author.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par les promoteurs, membres du personnel enseignant de GxABT.

In this case, the academic authority is represented by the promoters, members of the GxABT teaching staff.

INFLUENCE DES ASSOCIATIONS CULTURALES ET DES BANDES FLEURIES SUR L'ENTOMOFAUNE FONCTIONNELLE DANS LES CULTURES DE FROMENT D'HIVER

TEO SOENENS

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2025-2026

PROMOTEUR : FRANCIS F.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le Pr. Frédéric Francis, directeur du laboratoire d'entomologie, pour avoir proposé ce sujet et m'avoir accueilli au sein de son équipe. Grâce à lui, j'ai pu bénéficier du matériel, des locaux et de l'encadrement nécessaires au bon déroulement de ce projet.

Je remercie tout particulièrement Arnaud Segers pour son encadrement continu tout au long de ce mémoire. De la présentation complète du projet à ses relectures attentives, en passant par l'organisation des expérimentations sur le terrain, son implication dans chaque étape du travail a été déterminante. Son soutien constant et sa compréhension ont été décisifs pour l'aboutissement de ce projet.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Grégoire Noël pour son accompagnement. Ses conseils avisés, notamment pour les analyses statistiques, m'ont été d'une grande aide tout au long de mon travail. Ses impressionnantes compétences en identification d'abeilles m'ont également permises de gagner un temps considérable.

Je remercie Jeannine Bortels, pour son aide précieuse. Ses explications sur le fonctionnement du laboratoire, la mise en collection d'insectes, ainsi que le prêt de livres et d'outils de travail, m'ont permis de progresser efficacement, même en dehors des horaires habituels.

Je souhaite remercier Severin Hatt pour le partage de son expérience dans le projet des bandes fleuries, ainsi que Jérôme Pierreux pour sa disponibilité envers mes sollicitations.

Un grand merci à Charlie, sans qui je n'aurais jamais pu terminer ce travail.

Je tiens également à souligner que ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ADOPT-IPM, fruit d'une collaboration entre l'UE et la Chine, dont l'objectif est d'optimiser et de développer des outils de lutte intégrée contre les ravageurs. Contribuer à ce projet m'a permis de comprendre l'importance de relier les recherches de terrain à des initiatives internationales visant la protection durable des cultures.

RÉSUMÉ

L'intensification agricole a conduit à une forte dépendance aux pesticides. La lutte intégrée tente de réduire l'usage de ces intrants en s'appuyant sur des mécanismes naturels de régulation de type *bottom-up* et *top-down*. Dans les cultures de froment, la diversification des agroécosystèmes, notamment par les associations culturales et les bandes fleuries, constitue un levier prometteur pour limiter les populations de ravageurs et favoriser leurs ennemis naturels (spécialistes, généralistes et parasitoïdes). Les dynamiques des différents groupes fonctionnels (ravageurs du froment et ennemis naturels) sont explorées à travers trois questions : (1) Les associations culturales et les bandes fleuries influencent-elles significativement les paramètres d'abondance et de diversité de différents groupes fonctionnels ? (2) L'abondance des différents ravageurs est-elle corrélée à l'abondance et à la diversité des ennemis naturels ? (3) Au sein des BF, la disponibilité des ressources alimentaires (couverture florale et proies alternatives) influence-t-elle l'abondance et la diversité des ennemis naturels ? L'étude a été menée sur trois années, entre 2023 et 2025, en région wallonne, dans un total de 2 cultures de froment d'hiver conduites en monoculture, 4 cultures en association pois-froment et 14 cultures de céréales adjacentes à des bandes fleuries. L'entomofaune a été suivie par piégeage (pièges jaunes) et comptage afin d'évaluer l'abondance et la diversité des groupes fonctionnels.

Les résultats montrent (1) une forte variabilité temporelle (inter et intra-annuelle) de l'abondance et de la diversité des arthropodes du froment, soulignant l'importance de facteurs environnementaux externes qui peuvent masquer les effets des pratiques intégrées. Que ce soit pour les AC ou les BF, peu d'effets ont été détectés sur les groupes fonctionnels. Les associations pois-froment ont favorisé les populations de pucerons du froment mais ont réduit le nombre de cécidomyies. Les bandes fleuries favorisent une présence plus précoce et plus élevée des ennemis naturels à proximité des cultures, en particulier en début de saison, sans toutefois entraîner de réduction significative des populations de ravageurs. (2) Plus les ravageurs sont abondants, plus leurs ennemis naturels le sont aussi (relation densité-dépendance positive), mais moins la communauté d'ennemis est diversifiée. (3) Enfin, la disponibilité des ressources florales n'influence pas l'abondance et la diversité des ennemis naturels, mais structure légèrement la composition de leurs populations.

Cette étude souligne la complexité des effets des pratiques de lutte intégrée sur le court terme. Cela illustre la nécessité de poursuivre les recherches dans des contextes variés pour identifier les mécanismes orchestrant les dynamiques des groupes fonctionnels d'arthropodes.

Mots clés Lutte intégrée, contrôle biologique, froment, association culturale, bande fleurie, entomofaune, ravageurs, pucerons, ennemis naturels.

ABSTRACT

Agricultural intensification has led to a strong reliance on pesticides. Integrated pest management (IPM) seeks to reduce the use of such inputs by promoting natural regulatory mechanisms operating through bottom-up and top-down pathways. In winter wheat cropping systems, the diversification of agroecosystems, notably through intercropping and flower strips, represents a promising lever for suppressing pest populations and enhancing the communities of natural enemies (specialists, generalists, and parasitoids). The dynamics of distinct functional groups (wheat pests and their natural enemies) are investigated through three research questions: (1) Do intercropping systems and flower strips significantly influence the abundance and diversity parameters of different functional groups? (2) Is the abundance of pest species correlated with the abundance and diversity of natural enemies? (3) Within flower strips, does the availability of food resources (floral cover and alternative prey) influence the abundance and diversity of natural enemies?

The study was conducted over three years, from 2023 to 2025, in the Walloon region of Belgium, encompassing a total of two winter wheat monocultures, four pea-wheat intercrops, and fourteen cereal fields adjacent to flower strips. Entomofaunal communities were monitored through trapping (yellow water traps) and direct counts to assess the abundance and diversity of functional groups.

The results reveal (1) high temporal variability (both inter- and intra-annual) in the abundance and diversity of wheat arthropod communities, underscoring the overriding influence of external environmental factors that may obscure the effects of integrated management practices. Few significant effects on functional groups were detected, whether for intercropping systems or flower strips. Pea-wheat intercrops promoted aphid populations on wheat while reducing cecidomyiid abundance. Flower strips facilitated earlier and greater establishment of natural enemies in adjacent crop fields, particularly early in the season, yet did not result in a significant reduction of pest populations. (2) Pest abundance was positively associated with natural enemy abundance, consistent with a positive density-dependent relationship, but inversely associated with natural enemy community diversity. (3) Finally, floral resource availability did not influence the abundance or diversity of natural enemies, but marginally structured the composition of their communities.

This study highlights the complexity of the short-term effects of integrated pest management practices on arthropod functional groups, and illustrates the need for further research across diverse agroecological contexts to elucidate the mechanisms governing the dynamics of arthropod functional groups in diversified cropping systems.

Keywords

Integrated Pest Management, biological control, wheat, intercropping, flower strip, entomofauna, pests, aphids, natural enemies.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	1
1.1. Dépendance aux intrants de synthèse et nécessité de réduire les intrants 1	
1.2. Lutte contre les ravageurs et diversité dans le paysage agricole	2
1.2.1. Agroécologie et pratiques intégrées	2
1.2.2. Le concept de lutte intégrée (IPM)	2
1.2.3. Approche bottom-up : contrôle cultural	4
1.2.4. Approche top-down : lutte biologique intégrée.....	5
1.2.5. Synthèse : Résistance par association	9
1.3. Froment et lutte intégrée	9
1.3.1. La culture du froment	9
1.3.2. Associations culturales de froment d'hiver.....	10
1.3.3. Les bandes fleuries en culture de froment	11
1.4. Ravageurs du froment et ennemis naturels	14
1.4.1. Les principaux ravageurs du froment.....	14
1.4.2. Les principaux auxiliaires (régulation top-down).....	17
1.5. Méthodes d'analyse des communautés d'insectes.....	20
1.5.1. Mesures de la biodiversité	20
1.5.2. Diversité alpha	20
1.5.3. Diversité bêta.....	21
1.5.4. Diversité gamma	22
1.6. Objectifs.....	22
2. Matériel et méthode	23
2.1. Plan expérimental	23
2.1.1. Généralités	23
2.1.2. Précisions par année.....	25
2.2. Collecte de données	25
2.2.1. Captures : Pièges et filet.....	26
2.2.2. Observations : Comptages.....	26
2.2.3. Détail par année	26
2.2.4. Limites d'identification des Aphididae en AC	28
2.3. Analyses statistiques	28
2.3.1. Préparation et structuration des données	28
2.3.2. Qualité d'échantillonnage	29
2.3.3. Calcul des indices.....	30
2.3.4. Objectif 1 : Influence des pratiques sur les guildes	30

2.3.5.	Objectif 2 : Corrélations entre ravageurs et ennemis	31
2.3.6.	Objectif 3 : Corrélations entre ressources disponibles (BF) et ennemis	
	31	
3.	Résultats	31
3.1.	Jeu de données	31
3.1.1.	Captures	31
3.1.2.	Comptages	34
3.2.	(Q1) Influence des pratiques sur les guildes	34
3.2.1.	Associations culturelles	34
3.2.2.	Bandes fleuries 2025	39
3.3.	(Q2) Liens entre ravageurs et ennemis	40
3.3.1.	Associations culturelles	40
3.3.2.	Bandes fleuries 2025	41
3.4.	(Q3) Disponibilité des ressources et ennemis	42
3.4.1.	Quantité de ressources florales (QRF)	42
3.4.2.	Disponibilité proies alternatives (QRP)	44
4.	Discussion	45
4.1.	Biais de l'étude (campagne 2025)	45
4.1.1.	Associations culturelles	45
4.1.2.	Bandes fleuries	46
4.2.	Jeu de données	46
4.3.	(Q1) Influence des pratiques sur les guildes	47
4.3.1.	Messages principaux	47
4.3.2.	Associations culturelles	47
4.3.3.	Bandes fleuries 2025	49
4.4.	(Q2) Liens entre ravageurs et ennemis	52
4.4.1.	Messages principaux	52
4.4.2.	Associations culturelles	52
4.4.3.	Bandes fleuries	54
4.5.	(Q3) Disponibilité des ressources et ennemis	54
4.6.	Rentabilité	56
4.6.1.	Associations culturelles	56
4.6.2.	Bandes fleuries	57
5.	Contribution personnelle de l'étudiant	58
6.	Conclusion	59
7.	Bibliographie	61
8.	Annexes	76

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Principes de la lutte intégrée contre les ravageurs (IPM)	3
Figure 2 : Colonie de pucerons se nourrissant d'un plant de moutarde.....	3
Figure 3 : Illustration des mécanismes de contrôle bottom-up favorisés.....	4
Figure 4: Illustration des mécanismes de contrôle top-down favorisés par l'installation de BF	7
Figure 5 : Syrphidae adultes s'accouplant et se nourrissant au sein d'une	8
Figure 6 : AC en mélange de froment d'hiver et pois	10
Figure 7 : Bande fleurie de printemps	12
Figure 8 : Pollinisateurs visitant des BF de printemps.	13
Figure 9 : Aphididae sur des feuilles de froment d'hiver	15
Figure 10 : Larve de criocère et dégâts associés.	15
Figure 11 : Cephus pygmaeus adulte	16
Figure 12 : Cecidomyiidae adulte.	16
Figure 13 : Larves aphidiphages. De gauche à droite : Chrysopidae, Syrphidae et Coccinellidae.....	18
Figure 14 : Exemples de prédateurs polyphages	19
Figure 15 : Micro-hyménoptères parasitoïdes du genre Aphidius.....	20
Figure 16 : Localisation des sites d'expérimentation pour 2024 et 2025.....	23
Figure 17 : Cartes des sites d'expérimentation utilisés pour le suivi des AC.....	24
Figure 18 : Abondance des arthropodes piégés et identifié réunis par guildes selon l'année et la pratique étudiée.	32
Figure 19 : Courbe d'accumulation et estimation de la richesse spécifique des aphidiphages en BF selon chaque année.....	33
Figure 20 : Courbe d'accumulation et estimation de la richesse spécifique des ennemis aphidiphages en culture de PF ou F selon les années.	33
Figure 21 : Évolution de l'abondance des Aphididae selon le stade phénologique de chaque culture, sur base des données standardisées de 2024 et 2025.....	35
Figure 22 : Évolution temporelle de l'abondance des Aphididae comptés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment	35
Figure 23 : Évolution temporelle de l'abondance des Aphididae capturés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment	36
Figure 24 : Évolution temporelle de l'abondance des Cecidomyiidae capturés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment.	36

Figure 25 : Évolution de l'abondance des aphidiphages spécialistes selon le stade phénologique de chaque culture, sur base des données standardisées de 2024 et 2025.	37
Figure 26 : Évolution de l'abondance des parasitoïdes selon le stade phénologique de chaque culture, sur base des données standardisées de 2024 et 2025.	38
Figure 27 : Évolution temporelle des indices de diversité des aphidiphages spécialisés piégés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment	39
Figure 28 : Boxplots de différents indices de diversité en genres de la communauté d'ennemis naturels au sein des BF selon le relevé en 2025.	42
Figure 29 : Graphique de l'évolution moyenne de la couverture totale moyenne et de la composition spécifique des BF de 2025.	43
Figure 30 : Boxplots de la quantité de ressource florale disponible selon le relevé dans les BF en 2025.	43
Figure 31 : Proportion moyenne de plantes semées sur lesquelles la présence de pucerons a été observée lors de chacun des relevés dans les BF en 2025.	44
Figure 32 : Boxplots de la quantité de ressource alimentaire entomologique disponible selon le relevé dans les BF en 2025. L'axe vertical présente la proportion de la surface de la bande sur laquelle des pucerons sont présents.	45
Figure 33 : Cinq hypothèses pour expliquer l'échec du biocontrôle	51
Figure 34 : Tige de vesce envahie de pucerons au sein d'une BF de 2025	55

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Effort d'échantillonnage par année pour chaque pratique agricole. .	27
Tableau 2 : Ennemis naturels ciblés par l'étude des BF en 2025.	28
Tableau 3 : Synthèse des résultats concernant les ravageurs en associations culturales	34
Tableau 4 : Synthèse des résultats concernant les ennemis naturels en associations culturales	37
Tableau 5 : Résultats des modèles linéaires mixtes généralisés pour prédire la valeur des indices de diversité des ennemis comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la BF adjacente.	39
Tableau 6 : Résultats des tests de corrélation entre les indices de diversité des ravageurs et des ennemis naturels (capture et comptage) en 2025.	40

Tableau 7 : Analyse économique coûts/bénéfices des surfaces de BF en comparaison aux surfaces cultivées en 2025.	58
Tableau 8 : Seuils de rentabilité des BF en 2025 selon la proportion de terrain agricole occupé.	58

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Informations sur les champs liées aux expérimentations sur les cultures intercalaires en 2023-24-25	76
Annexe 2 : Détail de la composition des mélanges floraux chaque année et densité de semis pour 2024 et 2025.....	77
Annexe 5 : Étapes de la collecte de donnée	79
Annexe 6 : Niveau d'identification minimal des individus capturés	80
Annexe 7 : Abondances des différents taxons étudiés issues des données de piégeage lors des campagnes sur les AC.....	80
Annexe 8 : Richesse estimée des groupes fonctionnels selon la pratique étudiée chaque année.	81
Annexe 9 : Abondance des différents taxons observés en 2025 dans les parcelles échantillonnées, selon la pratique étudiée et les modalités concernées.	82
Annexe 10 : Résultats des GLMM basés sur les données interannuelles standardisées :	82
Annexe 11 : Résultats des test statistiques concernant les effets des AC sur les pucerons comptés et piégés et 2025.....	83
Annexe 12 : Résultats des tests de comparaison de l'abondance de différents groupes selon la parcelle en 2025.	83
Annexe 13 : Résultats des tests de comparaison des indices de diversité des ravageurs (hors Aphididae) et auxiliaires selon la parcelle en 2025.	84
Annexe 14 : Évolution temporelle de l'abondance de différents groupes comptés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment	84
Annexe 15 : Évolution temporelle des indices de diversité des ennemis naturels piégés en 2025 dans les cultures de froment et de pois-froment	85
Annexe 16 : Évolution temporelle de l'abondance des groupes d'insectes comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie	85

Annexe 17 : Résultats des tests de comparaison de l'abondance des certains groupes comptés dans des cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie adjacente en 2025.....	86
Annexe 19 : Évolution du taux de présence d'ennemis naturels comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie adjacente en 2025.....	86
Annexe 21 : Résultats des tests de corrélation entre les abondances des pucerons piégés et des ennemis naturels pour les valeurs standardisées de 2024 et 2025.	87
Annexe 22 : Résultats des PERMANOVA et RDA de l'abondance des ravageurs sur les communautés d'ennemis en 2025.....	88
Annexe 23 : Résultats de la PCoA des communautés d'ennemis naturels en 2025 selon la période phénologique du froment et la culture	88
Annexe 24 : Résultats des tests de comparaison de différents indices de diversité de la communauté des ennemis naturels dans les BF selon le relevé en 2025. .	88
Annexe 26 : Résultats des tests de corrélation entre les indices de diversité des ennemis naturels et la quantité de ressources disponible dans les bandes fleuries en 2025.	89
Annexe 27 : RDA : effet de la quantité de ressources disponible sur la composition des communautés d'ennemis naturels dans les bandes fleuries en 2025.	89
Annexe 28 : Stade phénologique du froment en culture pure et en pois-froment	90
Annexe 29 : Graphique ombrothermique de la commune de Gembloux lors de la campagne d'échantillonnage de 2025.....	91

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AC	Association culturelle
AIC	Critère d'Information d'Akaike
ANOVA	Analyse de la variance
BF	Bande fleurie
CE	Commission européenne
DJ	Degré jour
F	Froment
GLMM	Modèle linéaire généralisé mixte
IPM	<i>Integrated Pest Management</i> = Lutte intégrée contre les ravageurs
JNO	Jaunisse nanisante de l'orge
NA	Non attribué
PERMANOVA	ANOVA avec permutation
PCoA	Principal Coordinates Analysis
PF	Pois-froment
PPP	Produit phytopharmaceutique
QRF	Quantité de ressources florales
QRP	Quantité de ressources en pucerons
RDA	Analyse de redondance
SPW	Service public de Wallonie
UE	Union Européenne

TERMINOLOGIE

Terme	Définition	Synonyme
Agroécologie	Approche transdisciplinaire visant à repenser les systèmes agricoles selon des principes écologiques et sociaux. Elle s'appuie notamment sur la biodiversité et sur le non-recours aux intrants chimiques.	
Association culturale	Culture simultanée de plusieurs espèces sur la même parcelle.	Culture associée, <i>intercropping</i>
Bande fleurie	Habitat linéaire semé de diverses espèces florales non cultivées, généralement implanté en bordure de parcelle agricole.	Jachère mellifère
Biocides	Substances actives destinées à lutter contre les organismes nuisibles (pesticides à usage non agricole).	
Ennemis naturels	Agents de lutte biologique contre les ravageurs, constitués de leurs prédateurs, parasites et microorganismes pathogènes	Auxiliaires
Groupe fonctionnel	Ensemble d'espèces jouant un rôle comparable dans un écosystème, indépendamment de leur groupe taxonomique.	Guilde
Insecticides	Pesticides ciblant spécifiquement les insectes ravageurs.	
Intrant	Tout produit ou substance introduit dans un système agricole ayant une origine externe à ce système.	
Lutte biologique	Pratique de lutte intégrée consistant en l'utilisation d'organismes vivants ou de leurs produits pour protéger les cultures des ravageurs.	Biocontrôle
Lutte intégrée contre les ravageurs	Approche de gestion des ravageurs visant à protéger les cultures en considérant toutes les méthodes de lutte disponibles, en limitant au maximum les intrants chimiques.	IPM
Pesticides	Terme large, couvrant les produits phytopharmaceutiques et les biocides.	
Pesticides de synthèse	Pesticides produits par l'industrie chimique par des procédés de synthèse.	Pesticides chimiques
Pratiques agricoles intégrées	Ensemble de pratiques agricoles visant à soutenir la durabilité des systèmes, en limitant notamment l'usage d'intrants.	
Produits phytopharmaceutiques	Substances actives utilisées spécifiquement dans l'agriculture, destinées à protéger les végétaux des organismes nuisibles.	

1. Introduction

1.1. Dépendance aux intrants de synthèse et nécessité de réduire les intrants

La croissance démographique entraîne une augmentation continue et accrue de la demande alimentaire mondiale (Tilman *et al.*, 2011; ONU, 2025), poussant les systèmes agricoles européens et mondiaux vers une intensification progressive aux conséquences bien documentées depuis le milieu du 20^e siècle : augmentation des rendements, chute du nombre d'exploitations, perte de biodiversité, etc (Robinson *et al.*, 2002). Cette intensification a transformé une large partie du paysage agricole mondial (Foley *et al.*, 2011; Tilman *et al.*, 2011), s'appuyant notamment sur l'emploi massif d'engrais et de pesticides (Evenson *et al.*, 2003).

Cette promotion des outils chimiques a normalisé l'usage de pesticides de synthèse, rendant les systèmes agricoles dépendants de ces produits, délaissant les autres stratégies de lutte (Wratten, 1993). D'après la réglementation européenne, les pesticides comprennent d'une part les produits biocides, et de l'autre les produits phytopharmaceutiques (PPP), dont les herbicides, fongicides, acaricides et insecticides, qui assurent la protection des cultures contre les organismes nuisibles (UE, 2009a, 2009b, 2012).

Historiquement, les ravageurs indigènes étaient pourtant naturellement régulés par leurs prédateurs locaux. Cependant, l'intensification du commerce mondial a mené à l'introduction d'espèces exotiques sans ennemis indigènes, aggravant les dégâts aux cultures et entraînant l'essor des pesticides chimiques (Wratten, 1993). Aux États-Unis, leur utilisation a ainsi triplé entre 1965 et 1985 (Postel, 1987).

Bien que cet usage intensif ait permis d'améliorer la sécurité alimentaire mondiale, particulièrement dans les pays en développement, ses conséquences négatives sont considérables (Pinstrup-Andersen *et al.*, 1985; Evenson *et al.*, 2003) : dégradation des sols et des systèmes aquatiques par lessivage, perte de biodiversité (Giller *et al.*, 1997; Tilman *et al.*, 2002; Malézieux *et al.*, 2009), risques pour la santé humaine par ingestion ou simple exposition (Tilman *et al.*, 2002; Gullan *et al.*, 2014), et répercussions socio-économiques et sociétales plus larges (Pearse, 1980; Cherin *et al.*, 2012).

Par ailleurs, l'efficacité sur le long terme de cet usage à grande échelle est remise en question par le consensus scientifique (Wratten, 1993). Le recours massif aux pesticides peut paradoxalement amplifier les infestations en contribuant parallèlement à la sélection génétique de populations

résistantes (Wratten, 1993; Gullan *et al.*, 2014) et à l'extinction des communautés d'ennemis naturels des ravageurs, qui développent une résistance plus lentement que ces derniers (Thomas *et al.*, 1997; Gullan *et al.*, 2014; Tschardtke *et al.*, 2016). Coulson illustre ces effets avec l'exemple du DDT en Californie dans les années 1940, ayant conduit à l'extinction de la coccinelle *Rodolia cardinalis* (Mulsant) (Wratten, 1993).

1.2. Lutte contre les ravageurs et diversité dans le paysage agricole

1.2.1. Agroécologie et pratiques intégrées

Malgré leur nocivité environnementale et la diminution de leur efficacité à long terme, les pesticides chimiques restent massivement utilisés dans le monde agricole (Adjei, 2025). Repenser le système agroalimentaire semble dès lors impératif, en l'orientant vers un modèle plus durable qui implique notamment une réduction des intrants de synthèse (Hatt, 2017; Altieri *et al.*, 2024).

Cette volonté de transition est portée par le concept d'agroécologie, une approche holistique et transdisciplinaire qui promeut une agriculture durable reposant sur trois piliers : équité sociale, viabilité économique et respect de l'environnement (Altieri *et al.*, 2005). Un de ses enjeux majeurs est d'améliorer l'autosuffisance des agroécosystèmes en soutenant les interactions et processus écologiques à l'origine des mécanismes naturels de régulation des services écosystémiques (Altieri *et al.*, 2005; Levidow *et al.*, 2014; Dendoncker *et al.*, 2018). Les **pratiques intégrées** jouent un rôle clé dans cette transition en proposant des alternatives durables aux intrants chimiques, notamment via le recours à des sources biologiques de nutriments et à la lutte intégrée contre les ravageurs (Colignon *et al.*, 2004a; Altieri *et al.*, 2005; Hatt, 2017).

1.2.2. Le concept de lutte intégrée (IPM)

La lutte intégrée contre les ravageurs (*Integrated Pest Management* - IPM) vise à protéger les cultures en considérant toutes les méthodes de gestion disponibles. Elle mobilise en priorité des mesures préventives (Figure 1) : rotation des cultures, techniques adaptées, mesures d'hygiène, cultivars, protection des organismes utiles (European Research Executive Agency, 2022; CE, 2023). L'objectif poursuivi n'est pas l'éradication des nuisibles, mais le maintien de leurs populations sous des seuils tolérables grâce à un suivi actif. Les méthodes physiques et mécaniques sont privilégiées pour prévenir des infestations, suivies des méthodes biologiques (ennemis naturels, biopesticides) si besoin de réponse directe (Figure 1). Moins rigide que l'idéal agroécologique, la lutte intégrée ne cherche pas à bannir les PPP, mais à les réserver à des situations de dernier recours (European Research Executive Agency, 2022).

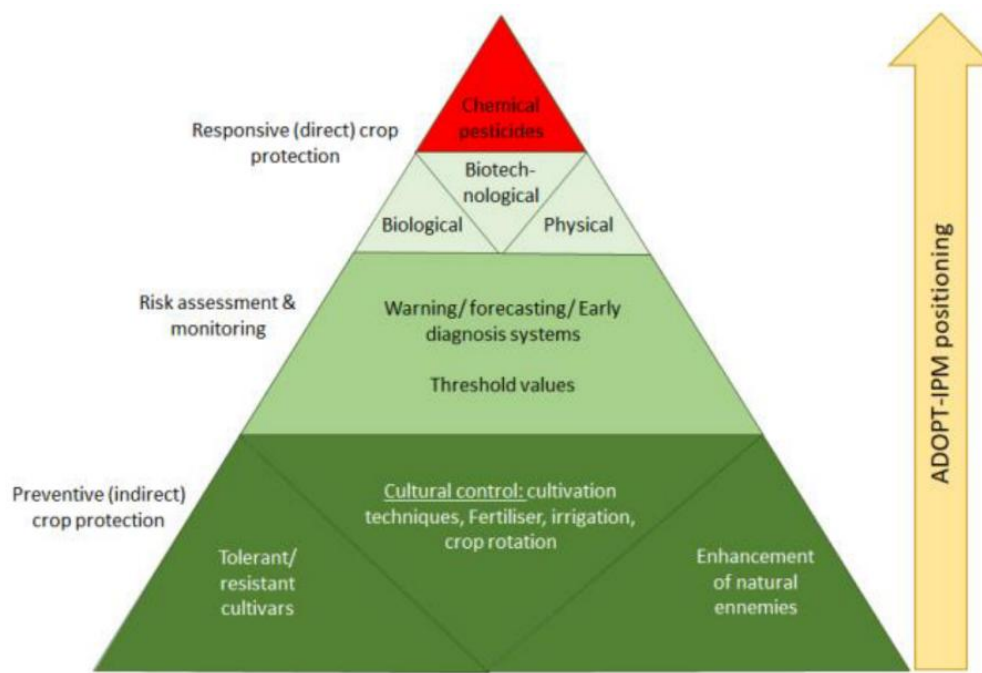


Figure 1 : Principes de la lutte intégrée contre les ravageurs (IPM), basée sur Kogan (1998) et Boller et al. (2004). Source : (European Research Executive Agency, 2022).

Développée dans les années 1960 en réponse aux préoccupations environnementales concernant les pesticides (), la lutte intégrée s'inscrit aujourd'hui en Europe dans le cadre de la directive 2009/128/CE, qui impose aux États membres des plans nationaux de réduction des risques pesticides et promeut les méthodes alternatives non chimiques (Directive 2009/128/CE, 2009). La lutte intégrée fait ainsi la belle part aux processus de régulation naturelle, issus de l'interaction de facteurs biotiques (ennemis naturels, compétition inter- et intraspécifique, ressources alimentaires) et abiotiques (climat, contraintes spatiales) (Wratten, 1993 ; Directive 2009/128/CE, 2009).



Figure 2 : Colonie de pucerons se nourrissant d'un plant de moutarde, largement parasitée (nombreuses momies) et prédatée par des larves de coccinelles (©T. Soenens).

Parmi les méthodes préventives de la lutte intégrée, deux approches complémentaires sont souvent distinguées : la **régulation bottom-up**, qui agit sur les ravageurs par le biais de l'environnement culturel, et la **régulation top-down**, qui soutient l'activité des ennemis naturels (Gurr *et al.*, 2003). Ces deux approches reflètent la position de consommateur primaire des insectes nuisibles au sein du réseau trophique : ils se nourrissent de plantes cultivées, mais sont eux-mêmes régulés par une série d'organismes entomophages (Figure 2).

1.2.3. Approche bottom-up : contrôle culturel

Dans un paysage agricole façonné par l'intensification, les cultures homogènes et monospécifiques sont vulnérables aux ravageurs, la sélection variétale ayant favorisé rendements et qualités gustatives aux dépens des capacités de résistance naturelle (Altieri *et al.*, 2005). La régulation *bottom-up* vise donc à agir directement sur les cultures pour les rendre moins propices aux ravageurs (Han *et al.*, 2022), au moyen de pratiques désignées par le terme « contrôle culturel » : diversification temporelle (rotations), génétique (variétés résistantes, mélanges variétaux) et spatiale (cultures intercalaires, polycultures, agroforesterie...) (Altieri *et al.*, 2005; CE, 2023). Cette diversification fonctionnelle, applicable de la parcelle au paysage agricole (Wezel *et al.*, 2014), constitue un atout clé dans la régulation des nuisibles à l'échelle régionale (European Research Executive Agency, 2022; Han *et al.*, 2022).

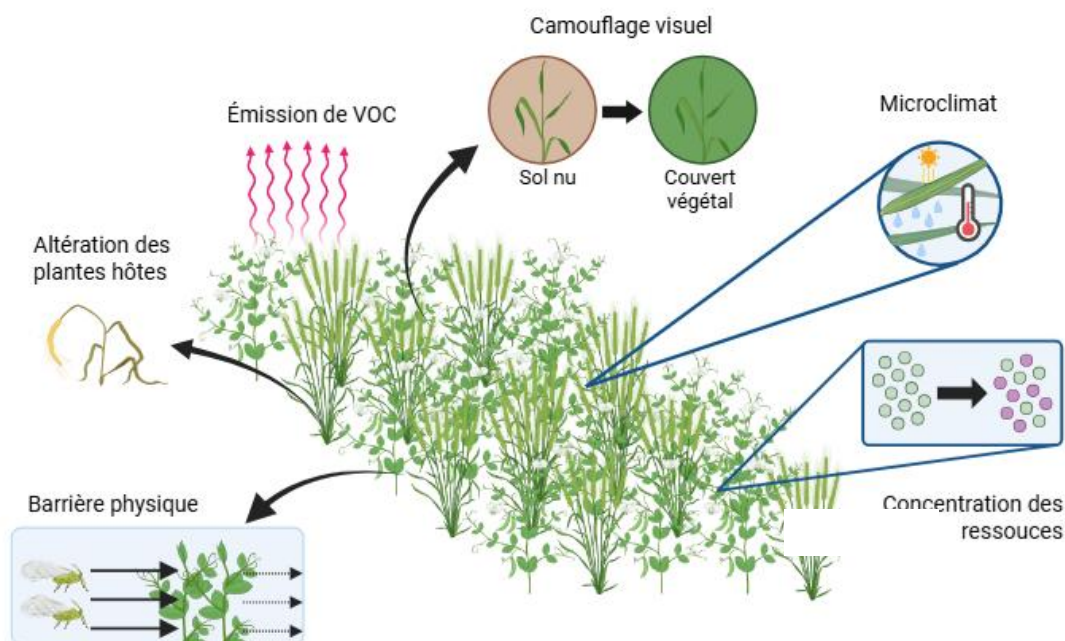


Figure 3 : Illustration des mécanismes de contrôle bottom-up favorisés par le contrôle culturel
(© T. Soenens, created with biorender).

Les mécanismes écologiques impliqués restent toutefois largement débattus (Han *et al.*, 2022). Les hypothèses les plus populaires sont les suivantes (Figure 3) :

- **Hypothèse de la concentration des ressources** : Les ravageurs localisent et colonisent plus aisément un hôte en monoculture (Root, 1973). Cet effet augmente avec la proportion d'espèces non-hôtes (Trenbath, 1993).
- **Barrières physiques** : Les plantes accompagnatrices obstruent l'accès aux plantes hôtes (Perrin *et al.*, 1978; Yousefi *et al.*, 2024).
- **Camouflage visuel** : La présence de végétation supplémentaire réduit le contraste visuel plantes/sol nu, rendant les cultures moins repérables pour les ravageurs volants (Kennedy *et al.*, 1961; Ogenga-Latigo *et al.*, 1992).
- **Modification du microclimat** : La diversité végétale modifie les paramètres microclimatiques locaux (luminosité, température, humidité), perturbant parfois les comportements des ravageurs (alimentation, reproduction, oviposition...) (Tonhasca *et al.*, 1994; Alarcón-Segura *et al.*, 2022; Yousefi *et al.*, 2024).
- **Altération des plantes hôtes** : La compétition interspécifique dégrade l'état physiologique des plantes hôtes, les rendant moins attractives (revu par Finch *et al.*, 2000).
- **Emission de composés organiques volatiles (VOC)** : Des plantes secondaires répulsives (*push plants*) peuvent émettre des composés masquant l'odeur des plantes hôtes ou repoussant les ravageurs (Uvah *et al.*, 1984; Parolin, Bresch, Poncet, *et al.*, 2012; Han *et al.*, 2022; Yousefi *et al.*, 2024).
- Théorie unificatrice de l'atterrissage approprié/inapproprié (2000) ² : Les insectes atterrissent aléatoirement sur les surfaces vertes, mais seuls certains atterrissages aboutissent à une colonisation réussie (Finch *et al.*, 2000).

La diversification présente néanmoins des limites. Certaines plantes introduites peuvent quelquefois servir d'hôtes aux ravageurs ciblés (Landis *et al.*, 2000). Cela souligne l'importance d'une connaissance étendue des interactions écologiques des espèces.

1.2.4. Approche top-down : lutte biologique intégrée

L'intensification agricole, en spécialisant et simplifiant les paysages, conduit à une raréfaction des habitats naturels et un déclin massif de la biodiversité, notamment des populations d'ennemis

² : Finch et Collier (2000) remettent certaines hypothèses en question, comme l'effet des VOC, les estimant improbable en conditions réelles, et proposent une approche synthétique de différentes théories existantes. (Finch *et al.*, 2000)

naturels, affaiblissant la résilience des agroécosystèmes (Robinson *et al.*, 2002; Altieri *et al.*, 2005; Nicholls *et al.*, 2013). L'approche *top-down* vise à rétablir le service écosystémique de régulation biologique en protégeant et renforçant ces organismes bénéfiques via des infrastructures écologiques.

La lutte biologique intégrée, ou biocontrôle, désigne l'utilisation d'organismes vivants (prédateurs, parasitoïdes, pathogènes) pour maintenir les ravageurs sous des seuils tolérables (Wratten, 1993). Sur le long terme, le biocontrôle réduit le besoin de PPP, représentant ainsi la meilleure alternative aux pesticides pour la régulation des pucerons (Liu *et al.*, 2025).

Cette pratique est ancienne : dès le IV^e siècle av. J.-C., les Chinois utilisaient des fourmis (*Oecophylla smaragdina* Fabricius) contre les ravageurs des citronniers (Wratten, 1993). La lutte biologique moderne débute en 1888 avec l'importation de la coccinelle *R. cardinalis* en Californie, qui a permis le contrôle d'une cochenille nuisible, avant d'être décimée par les pesticides moins d'un siècle plus tard (cf. section 1.1) (Wratten, 1993).

Trois stratégies principales coexistent : l'**introduction** d'ennemis non indigènes (lutte dite « classique », particulièrement indiquée contre les espèces exotiques) (Altieri *et al.*, 2005; Gullan *et al.*, 2014), l'**augmentation** par lâchers périodiques d'ennemis indigènes (Wratten, 1993), et la **conservation**, qui implique la manipulation de l'habitat pour améliorer les conditions de vie des ennemis déjà présents (Wratten, 1993; Barbosa, 1998; Balzan *et al.*, 2014; Gullan *et al.*, 2014).

Cette dernière stratégie, approche préventive sans introduction externe, est celle promue par l'IPM (Figure 1) (Hatt *et al.*, 2024; Saleem *et al.*, 2025). Elle pourrait jouer un rôle clé dans la transition vers une agriculture durable (Barbosa, 1998), d'autant que, dans les agroécosystèmes, la majorité des espèces potentiellement nuisibles sont déjà régulées par leurs prédateurs naturels (Barbosa, 1998; Altieri *et al.*, 2005).

La restauration d'un habitat favorable aux ennemis repose sur la diversification fonctionnelle de la végétation en périphérie (haies, bandes fleuries (BF) ou enherbées, lisières boisées) et à l'intérieur des champs (rotations, associations culturales (AC), agroforesterie) (Barbosa, 1998; Hatt *et al.*, 2015; CE, 2023). Cette introduction de biodiversité pour favoriser la régulation fait écho à l'hypothèse des ennemis naturels, émise en 1973 et abondamment vérifiée par la littérature depuis lors (Root, 1973; Russell, 1989).

Autour des cultures, les zones non cultivées et habitats semi-naturels abritent une diversité entomologique supérieure aux champs adjacents (Alhmedi *et al.*, 2006; Balzan *et al.*, 2014; Hatt *et al.*, 2017), majoritairement composée d'espèces bénéfiques ou neutres (Tscharntke *et al.*, 2016). Le maintien de ces milieux est crucial pour les ennemis (Wezel *et al.*, 2014; Franin *et al.*, 2016), ceux-ci influençant directement l'abondance des communautés entomologiques des cultures par *spillover* (Colignon *et al.*, 2001; Tscharntke *et al.*, 2005, 2012). Ce terme désigne un mouvement des organismes vers les cultures depuis leur périphérie, essentiel pour l'IPM et dépendant de la capacité de dispersion des espèces, la densité des bordures et la complexité paysagère (Barbosa, 1998; Tscharntke *et al.*, 2012). Une méta-analyse montre une tendance positive (sept cas sur dix) entre la proportion d'habitats semi-naturels et l'efficacité de la régulation (Veres *et al.*, 2013), et un seuil d'environ 20% d'habitats non cultivé dans le paysage est recommandé pour maintenir biodiversité et processus écosystémiques (Tscharntke *et al.*, 2012). La diversité culturelle paysagère joue également un rôle central, parfois plus important même que les habitats semi-naturels (Redlich *et al.*, 2018). Augmenter le nombre de types de cultures à petite échelle améliore par exemple le biocontrôle des pucerons du froment de 8 à 33% (Redlich *et al.*, 2018).

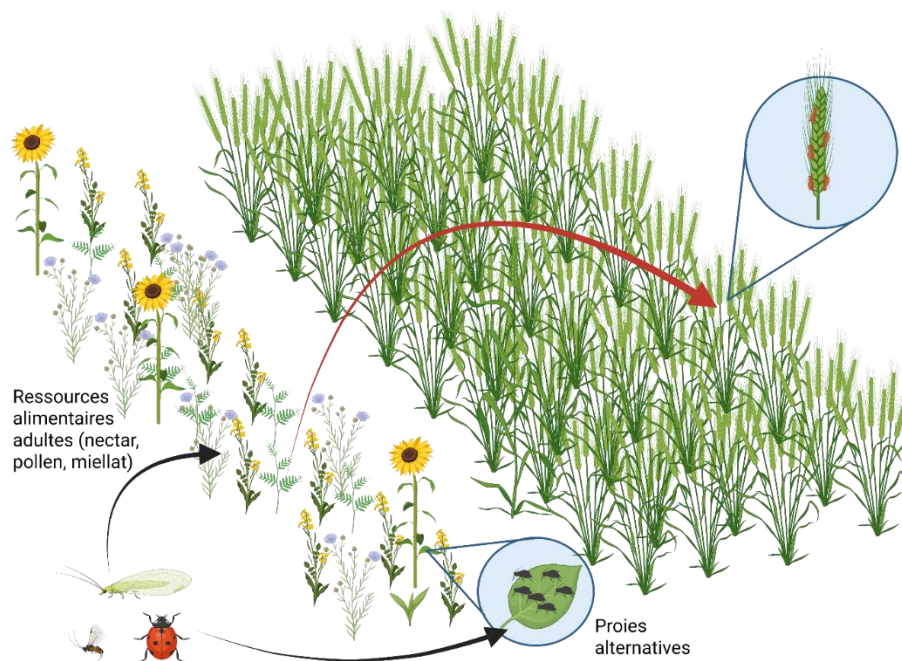


Figure 4: Illustration des mécanismes de contrôle top-down favorisés par l'installation de BF (© A. Segers, created with biorender).

La diversification végétale bénéficie aux ennemis naturels par l'action conjointe de plusieurs mécanismes écologiques (Figures 4 et 5) :

- **Ressources supplémentaires** : fourniture de proies/hôtes alternatifs et de ressources florales (nectar et pollen) aux ennemis adultes (Altieri *et al.*, 1982a; Zangger, 1994; Landis *et al.*, 2000; Rand *et al.*, 2006; Nicholls *et al.*, 2013).
- **Abri** : lieu de cachette/reproduction/ponte ; préservation des populations lors des périodes sans cultures, stabilisant les interactions prédateurs-proies sur le long terme (effet refuge) (Altieri *et al.*, 1982a; Russell, 1989; Wratten, 1993; Landis *et al.*, 2000; Langellotto *et al.*, 2004; Wezel *et al.*, 2014).
- **Microclimat** : Conditions plus favorables à la survie et la reproduction (Landis *et al.*, 2000; Langellotto *et al.*, 2004).



Figure 5 : *Syrphidae* adultes s'accouplant et se nourrissant au sein d'une BF (©T. Soenens).

Cette approche présente néanmoins des **limites**. Tout d'abord, si la diversité végétale favorise généralement les ennemis, peu de lien ont pu être démontrés avec l'efficacité de la régulation des ravageurs (Roschewitz *et al.*, 2005; Macfadyen *et al.*, 2009; Veres *et al.*, 2013). Dans certains cas, elle peut même favoriser les ravageurs ciblés ou attirer d'autres herbivores généralistes (Wratten, 1993; Norris *et al.*, 2005; Plath *et al.*, 2012).

De plus, les effets sur les ennemis varient selon le contexte écologique et les taxons ciblés (Langellotto *et al.*, 2004; Giffard *et al.*, 2022; Yousefi *et al.*, 2024). Des ressources alternatives trop attractives peuvent notamment retenir les auxiliaires hors des cultures, par mutualisme apparent (Rand *et al.*, 2006; Poveda *et al.*, 2008; Hatt, 2017), et les effectifs d'auxiliaires peuvent se réduire en même temps que ceux des ravageurs en cas de relation densité-dépendante (Wratten, 1993). Ces deux situations soulignent la nécessité de s'adapter à l'écologie des ennemis ciblés.

1.2.5. Synthèse : Résistance par association

La diversification fonctionnelle de l'environnement agricole à l'échelle du paysage occupe donc une place centrale dans la protection intégrée des cultures (Hatt *et al.*, 2018), en mobilisant des mécanismes *bottom-up* et *top-down*.

Le concept de **résistance par association** (*associational resistance*) décrit bien cet effet global : dans des communautés végétales diversifiées, les plantes bénéficient d'une protection mutuelle qui limite la pression des ravageurs, en particulier les espèces spécialistes, tout en favorisant les ennemis naturels (White *et al.*, 2000; Langellotto *et al.*, 2004; Plath *et al.*, 2012; Wezel *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2016).

Une méta-analyse portant sur 552 expériences confirme que la diversification végétale entraîne une réduction des ravageurs dans 72% des cas, une augmentation des ennemis naturels dans 74% des cas et une diminution moyenne des dégâts de 23% (Letourneau *et al.*, 2011). En prime, en plus de la régulation biologique, elle engendre une série d'avantages économiques (revenus alternatifs, meilleure productivité, réduction des adventices) et environnementaux (conservation de l'énergie, fertilité et structure des sols, pollinisation) (Altieri *et al.*, 2005; Nicholls *et al.*, 2013; Wezel *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2016; Alarcón-Segura *et al.*, 2022; Noël, 2023).

Ces bénéfices ne se traduisent toutefois en augmentation du rendement que dans environ un tiers des cas (Poveda *et al.*, 2008). La diversité végétale aurait même tendance à le réduire légèrement (-14% en moyenne), surtout dans le cas de design substitutifs (Letourneau *et al.*, 2011).

Par ailleurs, une augmentation des dégâts dans les milieux diversifiés est parfois rapportée liée à une forte appétence des végétaux pour les phytophages généralistes (Brown *et al.*, 1987; White *et al.*, 2000; Plath *et al.*, 2012). Certaines plantes entourées d'espèces très attractives peuvent subir davantage de dégâts, par un phénomène de *susceptibilité associative* (Brown *et al.*, 1987; White *et al.*, 2000). Ce concept, inverse de la résistance par association, souligne l'importance d'une diversité sélectionnée pertinemment, et non pas simplement accrue (Brown *et al.*, 1987).

1.3. Froment et lutte intégrée

1.3.1. La culture du froment

Céréale la plus cultivée en Europe (60 millions d'hectares), le froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) contribue à hauteur de 20 % de l'apport mondial de calories, et sa demande est en constante augmentation (European Research Executive Agency, 2022; Saleem *et al.*, 2025)

Cependant, en Europe, sa culture repose sur l'usage de pesticides chimiques, notamment contre les pucerons et les champignons (Jørgensen *et al.*, 2009; Carmona *et al.*, 2020), avec des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine (Cherin *et al.*, 2012; European Research Executive Agency, 2022; Saleem *et al.*, 2025). Le développement de nouveaux outils permettant de réduire leur usage tout en maintenant la productivité et le contrôle des ravageurs semble dès lors crucial. Les associations culturales et les bandes fleuries, présentées ci-dessous, s'inscrivent dans cette démarche.

1.3.2. Associations culturales de froment d'hiver

1.3.2.1. Présentation pratique

Les associations culturales (AC, ou *intercropping*) correspondent à la coexistence de plusieurs espèces cultivées simultanément sur le même champ (Figure 6) (Wezel *et al.*, 2014; Hatt, 2017). Bien qu'encore faiblement implantée en Europe, elles font partie des alternatives durables les plus prometteuses pour diminuer les dégâts des ravageurs et réduire l'usage de pesticides à faible coût (Ouyang *et al.*, 2020; CE, 2023). Plusieurs schémas d'association existent : en bandes, en rangs, en relai/déphasées ou en mélange (Malézieux *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2020).



Figure 6 : AC en mélange de froment d'hiver et pois (©T. Soenens).

Usant des mécanismes de la résistance par association, les AC peuvent être considérées comme une approche intégrée, mobilisant à la fois des mécanismes **bottom-up** (la diversification intra-parcellaire limite la colonisation et la prolifération des nuisibles), et **top-down**, en créant des conditions favorables aux auxiliaires (Khan *et al.*, 1997).

Associé au froment, le pois cultivé (*Pisum sativum* L.) illustre ce double rôle : il agit directement sur les ravageurs ou indirectement en soutenant les ennemis naturels, et profite également au

froment en fixant l'azote atmosphérique (Parolin *et al.*, 2012). En Wallonie, les cultures de pois protéagineux bénéficient d'un soutien couplé dans le cadre de la PAC 2023-2027 (375€/ha), qui peut également concerner les mélanges avec des céréales si la culture protéagineuse reste dominante dans le mélange (SPW, February-27-2026d).

Les principales contraintes des AC concernent les ressources matérielles et temporelles supplémentaires nécessaires à leur gestion et leur récolte, ainsi que les risques de compétition interspécifique (Wezel *et al.*, 2014).

1.3.2.2. Effets connus sur les différents groupes fonctionnels

Les AC entraînent souvent une réduction significative de l'abondance des herbivores nuisibles (Letourneau *et al.*, 2011; Lopes *et al.*, 2016; Yousefi *et al.*, 2024). Une diminution des ravageurs est observée dans 53% des cas, et une augmentation dans près d'un cinquième des cas (Risch, 1983). Dans une étude de 2022, les densités de *S. avenae* ont diminué d'environ 50 % sur les bandes de froment en AC (Alarcón-Segura *et al.*, 2022).

Les effets sur les ennemis naturels sont cependant plus discrets. Leur abondance n'est généralement pas supérieure dans des cultures hétérogènes (Lopes *et al.*, 2016; Alarcón-Segura *et al.*, 2022).

D'après une méta-analyse ciblant le froment, si les AC réduisent bien l'abondance des ravageurs, cette réduction ne semble pas liée à un meilleur biocontrôle (Hatt, 2017). Des facteurs tels que la plus forte présence de proies en monoculture, l'altération des conditions microclimatiques des cultures ou l'inadéquation morphologique et nutritionnelle des plantes associées peuvent limiter l'efficacité de la pratique sur les ennemis naturels (Lopes *et al.*, 2016; Hatt, 2017).

Par ailleurs, les AC réduisent également la propagation de certains pathogènes, comme la rouille jaune du froment, par effet de dilution des hôtes sensibles (Mundt *et al.*, 2011).

1.3.3. Les bandes fleuries en culture de froment

1.3.3.1. Présentation pratique

Les bandes fleuries (BF) sont des zones semées de diverses espèces florales non cultivées, généralement implantées en bordure de parcelle agricole, assimilables à des jachères mellifères de faible largeur (Figure 7). Elles visent à renforcer la biodiversité fonctionnelle en soutenant les pollinisateurs et les ennemis, améliorant ainsi la régulation **top-down** des nuisibles.



Figure 7 : Bande fleurie de printemps semée entre un champ de triticales et un champ de betteraves (©T. Soenens).

Des mélanges floraux adaptés sont aujourd'hui disponibles, permettant de cibler des groupes fonctionnels spécifiques. Leur efficacité dépend davantage de la diversité fonctionnelle des plantes (traits architecturaux, chimiques et phénologiques) que de leur composition taxonomique (Colignon *et al.*, 2004b; Hatt *et al.*, 2017). Les BF peuvent être mise en place toute l'année ou durant une période ciblée. Les bandes annuelles offrent une grande flexibilité, permettant de cibler certains auxiliaires selon les cultures, tandis que les bandes pérennes favorisent davantage les pollinisateurs (Haaland *et al.*, 2011; Uyttenbroeck *et al.*, 2016). Les familles les plus bénéfiques pour les principaux prédateurs sont les *Apiaceae*, *Asteraceae* et *Chenopodiaceae* (Colignon *et al.*, 2004b; Franin *et al.*, 2016).

Malgré un coût d'implantation encore jugé élevé, la Commission européenne estime leur potentiel de réduction des pesticides de moyen à élevé et leur durabilité à long terme importante (CE, 2023).

En Wallonie, les BF s'inscrivent dans le cadre du Plan Stratégique wallon de la PAC 2023-2027. Jusqu'en 2025, la réglementation imposait aux agriculteurs de consacrer une part de leurs terres cultivables à des surfaces non productives (SPW, October-5-2025a). Cette obligation a été abrogée en 2025 et remplacée par l'éco-régime « Maillage écologique », dans lequel les BF sont éligibles à des aides financières (SPW, October-5-2025b). L'installation de ces bandes, sur base volontaire, est subventionnée à hauteur de 900 €/ha, avec une majoration à 1350 €/ha, sous réserve de certaines conditions (maintien minimum six mois, interdiction de PPP) (SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, 2025).

1.3.3.2. Effets connus sur les différents groupes fonctionnels

Les effets des BF varient fortement selon les contextes écologiques, en raison notamment de la dépendance des communautés d'insectes entomophages à la composition et à la structure de la végétation environnante (Altieri *et al.*, 1982b). Les bandes annuelles sont notamment généralement moins attractives que les pérennes (Blümel *et al.*, 2024).

Dans des contextes favorables, les BF peuvent favoriser significativement l'abondance et la diversité des ennemis naturels (prédateurs et parasitoïdes), notamment à proximité de cultures de froment (Letourneau *et al.*, 2011; Franin *et al.*, 2016; Hatt *et al.*, 2017; Yousefi *et al.*, 2024). Elles améliorent également la fécondité, la longévité et la persistance de ces organismes (Wezel *et al.*, 2014), et sont plus efficaces que les haies et les bordures herbacées pour soutenir la régulation biologique (Haaland *et al.*, 2011; Holland *et al.*, 2016). Une largeur de bande de cinq mètres serait optimale pour attirer les prédateurs dans les cultures. Au-delà, les auxiliaires auraient alors tendance à rester dans la jachère (Yousefi *et al.*, 2024).

La simple présence d'ennemis ne suffit pas à assurer une régulation efficace (Yousefi *et al.*, 2024), celle-ci étant également régie par d'autres mécanismes écologiques, dont le partage des ressources et la probabilité de présence d'espèces clés dans une communauté diversifiée (effet d'échantillonnage) (Hatt *et al.*, 2017).

De cette manière, les effets des BF sur les ravageurs restent très hétérogènes, comme le constate une méta-analyse de 2016 : sur 26 études, 13 ont observé un effet positif sur la régulation des ravageurs, 5 un effet négatif et 8 un effet neutre (Uyttenbroeck *et al.*, 2016). Une diminution des dégâts dans les cultures à proximité des bandes est donc parfois observée, même si cet effet diminue avec la distance (Hatt *et al.*, 2017; Yousefi *et al.*, 2024). À savoir que les BF peuvent également agir comme des pièges à nuisibles, concentrant les ravageurs en leur sein, mais réduisant leurs dégâts dans les cultures adjacentes (Balzan *et al.*, 2014).



Figure 8 : Pollinisateurs visitant des BF de printemps (©T. Soenens).

Les BF profitent par ailleurs aux pollinisateurs en leur offrant nectar, pollen, sites de reproduction et d'hivernage (Figure 8) (Nicholls *et al.*, 2013). En Wallonie, la richesse spécifique et la densité d'insectes sont globalement plus élevées dans les bordures non cultivées qu'à l'intérieur des champs (Hatt *et al.*, 2017).

1.4. Ravageurs du froment et ennemis naturels

1.4.1. Les principaux ravageurs du froment

Une centaine d'espèces nuisibles au froment est aujourd'hui recensée dans la littérature (Qayyum *et al.*, 2021), responsables d'une perte de rendement estimée entre 5 et 10 % de la production mondiale (Oerke, 2006).

1.4.1.1. Les pucerons

Les pucerons (*Aphididae*) sont les ravageurs les plus connus et redoutés en culture de froment (Figure 9) (Akbar *et al.*, 2023). Ils affaiblissent et perturbent le développement des plantes par succion de leur sève (Xie *et al.*, 2020; Güllü *et al.*, 2024), par excrétion de miellat entravant la photosynthèse (De Proft, 2020; Liu *et al.*, 2025), et transmission de pathogènes tels que la jaunisse nanisante de l'orge (JNO) ou le virus de la mosaïque striée du blé (Xie *et al.*, 2020). Ainsi, les colonies de pucerons peuvent infliger des pertes de rendement de l'ordre de 30 %, soit plus de 2 t/ha (Kieckhefer *et al.*, 1992; De Proft, 2020; Saleem *et al.*, 2025).

En Europe, les trois espèces les plus fréquemment impliquées dans la dégradation de céréales sont *Sitobion avenae* (Fabricius), le puceron des épis, *Rhopalosiphum padi* (L.), le principal vecteur de la JNO, et *Metopolophium dirhodum* (Walker) (Vickerman *et al.*, 1979; Honek *et al.*, 2018). Les pucerons du froment comptent parmi leurs rangs des espèces d'importance économique plus marginale, comme *Rhopalosiphum maidis* (Fitch), *Schizaphis graminum* (Rondani), *Diuraphis noxia* (Kurdjumov) (Kröber *et al.*, 1991; Güllü *et al.*, 2024).



Figure 9 : *Aphididae* sur des feuilles de froment d'hiver (©T. Soenens).

1.4.1.2. Les criocères

Le criocère des céréales (*Oulema melanopus* L., *Chrysomelidae*) est un coléoptère défoliateur dont la larve, plus dommageable que l'adulte, ronge la couche chlorophyllienne des feuilles, laissant des sillons parallèles aux nervures (Figure 10) et pouvant entraîner d'importantes pertes de rendement (Császár *et al.*, 2021; Akbar *et al.*, 2023; Güllü *et al.*, 2024). Moins fréquent, le petit criocère des céréales (*Oulema gallaeciana* Heyden) est également un ravageur connu (Samu *et al.*, 2024).



Figure 10 : Larve de criocère et dégâts associés (©T. Soenens).

1.4.1.3. Les cèphes des chaumes

Cephus pygmaeus L. (*Cephidae* - Figure 11) est un hyménoptère dont les larves détruisent le système vasculaire des tiges, limitant donc le développement des grains, avec des pertes de rendement atteignant 35 %, et jusqu'à 80 % localement (Güllü *et al.*, 2024). Les PPP sont peu efficaces pour lutter contre ces insectes, alors que des hyménoptères parasites peuvent les réguler

efficacement (Shanower *et al.*, 2004; Güllü *et al.*, 2024). Autres symphytes, les larves de tenthrèdes du blé (*Dolerus* sp. - *Tenthredinidae*), causent également des dommages foliaires aux céréales (Haris, 1995).



Figure 11 : *Cephus pygmaeus* adulte (©T. Soenens).

1.4.1.4. Les cécidomyies

Trois espèces de *Cecidomyiidae* (Figure 12) sont principalement citées pour leurs effets sur les rendements en Europe : la cécidomyie orange du blé (*Sitodiplosis mosellana* Gehin), la cécidomyie jaune (*Contarinia tritici* Kirby) et la cécidomyie équestre (*Haplodiplosis marginata* Roser) (Censier *et al.*, 2015).



Figure 12 : *Cecidomyiidae* adulte (©T. Soenens).

La plus redoutée, *S. mosellana*, peut sérieusement endommager les grains en formation, particulièrement en cas de pullulations pendant la phase sensible du froment, de l'épiaison à la floraison (De Proft, 2011; Dufton *et al.*, 2022; Akbar *et al.*, 2023). La lutte biologique et l'utilisation de cultivars résistants apparaissent capitaux dans le contrôle de *S. mosellana*, aucun PPP n'étant

complètement efficace pour se débarrasser de cet insecte de plus en plus préoccupant en Belgique (Olfert *et al.*, 2009; De Proft, 2020; Dufton *et al.*, 2022).

1.4.1.5. Autres ravageurs

Parmi les ravageurs secondaires du froment figurent plusieurs diptères (*Delia coarctata* Fallén, *Delia platura* Meigen, *Opomyza florum* Fabricius, *Oscinella frit* L., *Mayetiola destructor* Say) dont les risques restent généralement trop faibles pour justifier des mesures spécifiques (Schmid *et al.*, 2018; De Proft, 2020), ainsi que des taupins (*Elateridae*), thrips (*Thysanoptera*), hémiptères (*Eurygaster* spp., *Aelia* spp., *Coccoidea*, *Cicadomorpha*) et lépidoptères (*Noctuidae*) (Traugott *et al.*, 2015 ; Akbar *et al.*, 2023 ; Güllü *et al.*, 2024).

1.4.2. Les principaux auxiliaires (régulation top-down)

La protection *top-down* du froment contre les ravageurs repose sur la valorisation d'un ensemble d'ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes, pathogènes) afin d'assurer une lutte biologique par conservation (Tscharntke *et al.*, 2007). Ces trois groupes d'ennemis contribuent chacun à la réduction des pucerons des céréales, avec des effets généralement additifs voire synergiques (Thies *et al.*, 2011). L'importance relative de chaque groupe varie selon les contextes régionaux, bien que la présence des parasitoïdes semble la plus cruciale pour la régulation (Schmidt *et al.*, 2003; Thies *et al.*, 2011). On distingue généralement deux grands groupes d'ennemis : les généralistes, opportunistes et à large spectre alimentaire, et les spécialistes, à forte spécificité aphidiphage (Hatt *et al.*, 2015).

1.4.2.1. Les prédateurs spécialistes

Parmi les spécialistes, trois familles sont régulièrement mentionnées dans le cadre du biocontrôle des pucerons.

Les **Chrysopidae** (*Neuroptera*) sont des prédateurs actifs au stade larvaire (Figure 13), reconnus pour leur forte voracité envers pucerons, cochenilles et mites (Wratten, 1993; Balasubramani *et al.*, 1994). La chrysope verte (*Chrysoperla carnea* Stephens), régulièrement observée dans les cultures céréalières européennes, consomme en moyenne plus de 400 pucerons au cours de son développement larvaire (Khan *et al.*, 2013).

Les larves de **Syrphidae** (*Diptera* - Figure 13) sont également des prédateurs essentiels contre les pucerons, à l'image d'*Episyrphus balteatus* (De Geer), très commun dans les champs de froment et dont la larve peut consommer une centaine de pucerons quotidiennement (Tenhumberg

et al., 1995). Le régime alimentaire des adultes est généralement composé de nectar et de pollen, contribuant donc à la pollinisation (Wratten, 1993; Altieri et al., 2005).

Enfin, les **Coccinellidae** (Coleoptera – Figure 13), abondamment étudiées dans la littérature sur le biocontrôle (Michaud, 2012), consomment de grandes quantités de proies (Michaud, 2012). À titre d'exemple, la coccinelle asiatique *Harmonia axyridis* (Pallas) peut éliminer jusqu'à 370 pucerons durant son stade larvaire (Koch, 2003). Les pucerons entrent aussi dans le régime alimentaire de certaines coccinelles adultes, dont la coccinelle à 7 points *Coccinella septempunctata* (L.) (Triltsch, 2013).

Ces prédateurs spécialistes sont particulièrement efficaces à faibles densités de proies, endiguant la croissance exponentielle des colonies de pucerons (Wratten, 1993).



Figure 13 : Larves aphidiphages. De gauche à droite : Chrysopidae, Syrphidae et Coccinellidae (©T. Soenens).

1.4.2.2. Les prédateurs généralistes

Les prédateurs généralistes (Figure 14), souvent davantage favorisés par la diversification des agroécosystèmes (Yousefi et al., 2024), participent activement à la régulation des nuisibles (Symondson et al., 2002). Ils peuvent s'établir avant même l'arrivée des ravageurs et exercer une pression précoce sur les populations encore faibles (Welch et al., 2014).



Figure 14 : Exemples de prédateurs polyphages. *Cantharidae* (gauche) et *Anthocoridae* (Hemiptera, droite) (©T. Soenens).

Parmi eux, les coléoptères *Carabidae*, *Cantharidae* et *Staphylinidae* sont régulièrement cités pour la régulation des ravageurs des céréales (Wratten, 1993; Safarzoda *et al.*, 2014), de même que les *Araneae*, *Acaridae*, *Odonata* et certaines espèces d'*Hymenoptera* et d'*Hemiptera* (Wratten, 1993). Ces prédateurs sont notamment efficaces pour réguler les populations de *O. melanopus* (Kheirodin *et al.*, 2019).

1.4.2.3. Les parasitoïdes

Les **parasitoïdes** accomplissent un stade de leur développement au sein d'un hôte, et se distinguent des autres parasites par leur conséquence inévitablement létale, en faisant des alliés de choix en lutte biologique (Figure 15) (Wratten, 1993). Certaines familles d'hyménoptères (*Braconidae*, *Ichneumonidae*, *Aphelinidae*) et de diptères (*Cecidomyiidae*) sont particulièrement documentées dans la protection des cultures céréalières (Wratten, 1993; Altieri *et al.*, 2005; Boivin *et al.*, 2012).

De nombreux hyménoptères sont mentionnés dans les programmes de régulation des pucerons, tels que les *Aphidiinae* et les *Aphelinidae* (Wei *et al.*, 2005; Boivin *et al.*, 2012), et surtout le genre *Aphidius*, particulièrement étudié pour la protection du froment (Figure 15) (El-Heneidy, 2004; Boivin *et al.*, 2012; Ortiz-Martínez *et al.*, 2019; Güllü *et al.*, 2024).



Figure 15 : Micro-hyménoptères parasitoïdes du genre *Aphidius* (©T. Soenens).

Certains parasitoïdes ciblent d'autres ravageurs : *Macroglènes penetrans* (Kirby) est ainsi mentionné pour la cécidomyie orange, *Braconidae*, *Ichneumonidae* et *Eulophidae* pour *C. pygmaeus* et les familles *Proctotrupidae*, *Bethylidae* et *Ichneumonidae* pour les taupins (Shanower *et al.*, 2004; Traugott *et al.*, 2015; Dufton *et al.*, 2022; Güllü *et al.*, 2024).

Bien que les parasitoïdes aient un effet plus important que les prédateurs sur les pucerons, leur faible capacité de dispersion les rend plus sensibles à une augmentation de la complexité du paysage à petite échelle (Schmidt *et al.*, 2003; Thies *et al.*, 2005, 2011).

1.4.2.4. Les pathogènes

Les organismes **pathogènes** (virus, bactéries, champignons, protozoaires, nématodes) causent des maladies mortelles chez les insectes nuisibles tout en restant sûrs pour l'homme et l'environnement (Wratten, 1993; Sharma *et al.*, 2023). Leurs effets peuvent être spectaculaires, notamment sur les pucerons du froment, mais leur capacité de dispersion reste faible et ils peinent à réguler des populations peu abondantes (Wratten, 1993; Ashraf *et al.*, 2024).

1.5. Méthodes d'analyse des communautés d'insectes

1.5.1. Mesures de la biodiversité

L'étude des effets des pratiques de biocontrôle sur les communautés d'arthropodes repose sur l'analyse de leur diversité dans différents habitats. Cette mesure, complexe, peut s'exprimer à trois niveaux : les diversités alpha, bêta et gamma (Whittaker, 1960; Marcon, 2025).

1.5.2. Diversité alpha

La **diversité alpha** correspond à la diversité locale à l'intérieur d'un habitat défini (Marcon, 2025). Elle se décompose en deux composantes principales : la richesse, correspondant au nombre de taxons différents, et l'équitabilité, qui traduit la régularité de la distribution des effectifs au sein

de ces taxons (McIntosh, 1967). Une troisième composante est parfois considérée : la disparité, qui tient compte des distances (taxonomiques ou fonctionnelles) entre les taxons (Marcon, 2025).

La richesse peut être approchée à l'aide d'estimateurs non paramétriques tels que les fonctions Chao, qui estiment le nombre d'espèces non observées à partir des singletons et doubletons (Chao, 1984), ou l'estimateur ACE, reposant sur les abondances des taxons rares (Chao *et al.*, 1992). Ces estimations peuvent être visualisées par des courbes d'accumulation d'espèces, et rapportées à la richesse observée pour calculer un taux de complétude de l'échantillonnage (Marcon, 2025).

Pour tenter de quantifier la diversité alpha en intégrant à la fois richesse et équitabilité, des indices de diversité peuvent être calculés à partir des données d'échantillonnage. L'indice de **Shannon** (H'), ou Shannon-Wiener, mesure la diversité en tenant compte du nombre d'espèces et de l'équité de leur répartition. Sa formule donne davantage d'influence aux taxons rares (Shannon, 1948; Spellerberg *et al.*, 2003). De son côté, l'indice de **Simpson** (D) mesure la probabilité que deux individus pris au hasard dans la communauté appartiennent à la même espèce. Cet indice est plus sensible aux taxons dominants (Simpson, 1949). Les **nombre de Hill**, issus de transformations des indices de Shannon et Simpson, sont utilisés pour interpréter de manière plus intuitive les mesures de diversité (Hill, 1973). Ils expriment la diversité sous la forme d'un nombre effectif d'espèces, correspondant « au nombre d'espèces équiprobables donnant la même valeur de diversité que la distribution observée » (Marcon, 2025). La diversité d'une communauté pour laquelle $Hill_1 = 8$ correspond ainsi à la diversité d'une communauté composée de 8 espèces d'abondances parfaitement égales. Les formules de l'ensemble des indices mentionnés sont reprises dans la section 2.3.

1.5.3. Diversité bêta

La **diversité beta** mesure le degré de différenciation de la composition des communautés entre systèmes locaux (Moreno *et al.*, 2010; Marcon, 2025). Elle peut être quantifiée par des indices de similarité par paires, tels que les indices de Jaccard ou de Sørensen, fondés sur des données de présence-absence (Jaccard, 1901; Dice, 1945; Sørensen, 1948). La dissimilarité de Bray-Curtis, basée sur les abondances, permet quant à elle d'estimer une différence quantitative entre communautés, c'est-à-dire de quantifier une distance entre deux échantillons. Ces indices permettent de former des matrices de dissimilarité, visualisables notamment à l'aide d'analyses en coordonnées principales (PCoA), et constituent la base d'analyses multivariées permettant d'identifier les variables structurant les communautés (Marcon, 2025). À savoir qu'une forte diversité beta des ennemis naturels est observée dans les paysages agricoles diversifiés

(Tscharntke *et al.*, 2007) et que, bien que favorable à la lutte biologique, son effet semble moins déterminant qu'une forte variation de la diversité alpha (Tylianakis *et al.*, 2006; Tscharntke *et al.*, 2007).

1.5.4. Diversité gamma

Enfin, la **diversité gamma** représente la richesse spécifique globale. Sa mesure est similaire à la diversité alpha, rapportée à l'échelle de l'ensemble du système étudié (Marcon, 2025).

1.6. Objectifs

Cette étude s'inscrit dans le contexte de lutte intégrée contre les ravageurs du froment d'hiver. Elle vise à explorer les dynamiques de différents groupes fonctionnels, à savoir les ravageurs et leurs ennemis naturels (groupes des spécialistes, des généralistes et des parasitoïdes) dans le cadre de deux pratiques de lutte intégrée : les associations culturales (AC) et les bandes fleuries (BF). Trois objectifs distincts sont poursuivis :

(1) Le premier objectif est l'évaluation de l'efficacité des mécanismes *bottom-up* et *top-down*, donc des effets des différentes pratiques sur les communautés d'arthropodes.

Q1 : Les AC et les BF influencent-elles significativement les paramètres d'abondance et de diversité des différents groupes fonctionnels ?

Hypothèses : Les AC et les BF ont un effet négatif sur l'abondance et la diversité des ravageurs, et favorisent au contraire leurs ennemis naturels.

(2) Les interactions ravageurs-ennemis dans un contexte de biocontrôle sont relativement peu documentées dans la littérature (Stell *et al.*, 2022). Le second objectif est donc d'explorer les liens pouvant exister entre les populations de nuisibles et leurs ennemis.

Q2 : L'abondance des différents ravageurs est-elle corrélée à l'abondance et à la diversité des ennemis naturels ?

Hypothèses : En raison de la régulation biologique, les populations d'ennemis denses, riches et équitables sont associées à des abondances de ravageurs plus faibles.

(3) Le dernier objectif consiste à comprendre quels sont les facteurs d'attractivité des BF aux yeux des ennemis naturels.

Q3 : Au sein des BF, la disponibilité des ressources alimentaires (couverture florale et proies alternatives) influence-t-elle l'abondance et la diversité des ennemis naturels ?

Hypothèses : Une forte couverture florale et une forte disponibilité en proies attirent les ennemis naturels et sont donc associées à une grande abondance et diversité d'ennemis.

2. Matériel et méthode

2.1. Plan expérimental

2.1.1. Généralités

Les expérimentations ont été conduites entre 2023 et 2025 en région limoneuse wallonne (Belgique – Figure 16), vaste région agricole aux sols riches et bien drainés, produisant la moitié des céréales wallonnes (SPW, 2025c).

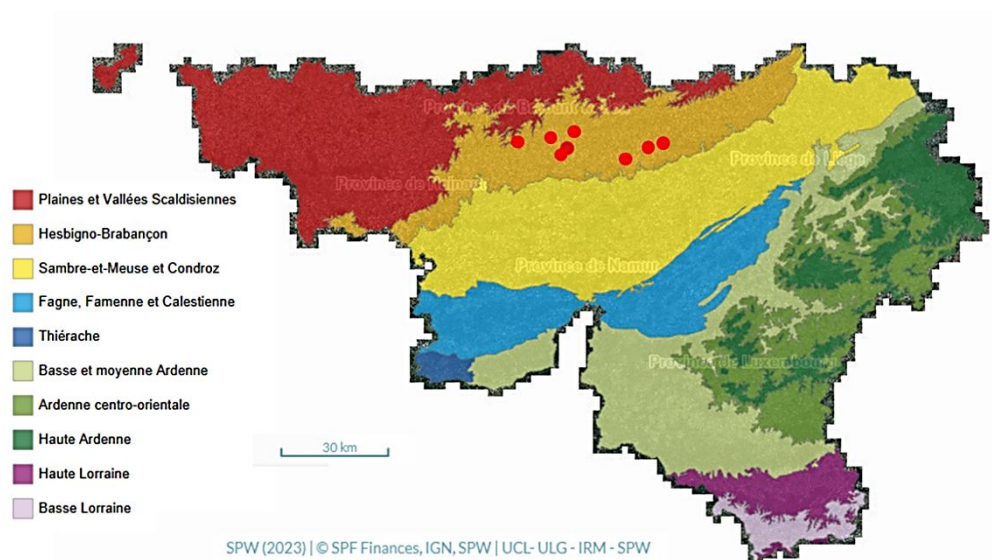


Figure 16 : Localisation des sites d'expérimentation pour 2024 et 2025. © A. Segers

Pour les AC, la phase d'expérimentation s'est déroulée annuellement à Gembloux, dans des cultures associant pois protéagineux d'hiver (*P. sativum*) et froment d'hiver (*T. aestivum*), avec un champ de froment pur en qualité de témoin en 2024 et 2025. La localisation des parcelles a changé chaque année (Figure 17). Les localisations et les itinéraires techniques sont détaillées dans l'Annexe 1.

Les études concernant l'impact des bandes fleuries (BF) se sont déroulées sur des sites comportant un champ de céréales, généralement *T. aestivum*, adjacent à une BF annuelle. Le nombre de sites

suivis a varié selon les années (2 en 2023, 3 en 2024 et 9 en 2025), tout comme la composition florale des bandes (Annexe 2). La localisation des bandes est détaillée dans l'Annexe 3.

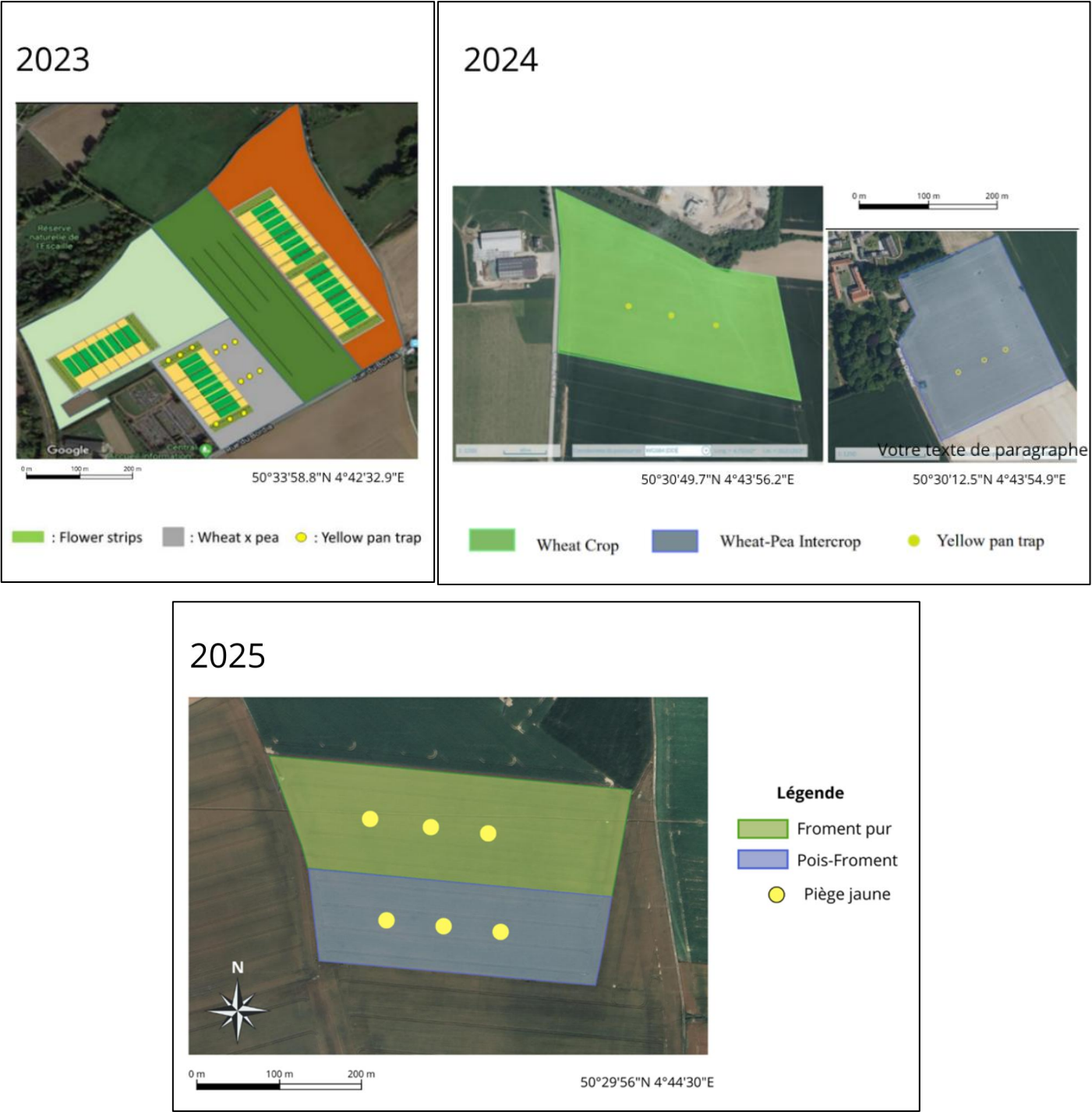


Figure 17 : Cartes des sites d'expérimentation utilisés pour le suivi entomologique dans le cadre des AC © A. Segers © T. Soenens

2.1.2. Précisions par année

2.1.2.1. 2023

Selon un livre blanc édité par divers services, dont Gembloux Agro-Bio Tech et le CRA-W Gembloux, la saison 2022-2023 a été marquée par de fortes alternances climatiques (gel/dégel, sols détrempés), compliquant fertilisation et désherbage, et entraînant de fortes pressions de maladies (septoriose, rouille jaune) jusqu'en mai. Les pucerons, bien régulés par les auxiliaires, et les cécidomyies, peu présentes, n'ont pas causé de pertes de rendement particulières (Dumont *et al.*, 2023).

2.1.2.2. 2024

Les BF ont été établies par un semis à une densité de 50 g/ha comprenant 24,6 g/ha d'engrais TMS et 26,4 g/ha d'un mélange de cinq espèces à floraisons décalées, assurant une couverture florale continue (Annexe 2).

La saison agricole 2023-2024 est caractérisée par un excès d'eau généralisé, ayant entraîné des semis tardifs, de faibles rendements et un décalage de développement entre BF et AC (Dumont *et al.*, 2024). Les conditions humides ont favorisé septoriose et rouille brune, tout en limitant la pression des pucerons, cécidomyies et criocères (Dumont *et al.*, 2024).

2.1.2.3. 2025

Le suivi des AC pois-froment en 2025 a été conduit sur deux parcelles adjacentes : une culture de froment pur (F) et une association pois-froment en mélange (PF) (Figure 17). Un incident observé le 06/06/25 (fauchage d'une bande dans la parcelle F) a entraîné le repositionnement de deux pièges (Annexe 4).

L'expérimentation portant sur les BF s'est déroulée sur neuf sites (Annexe 3), avec un mélange floral identique à 2024 (Annexe 2).

La saison 2024-2025, caractérisée par un hiver doux et un printemps-été sec et ensoleillé, a offert des conditions favorables et des rendements élevés, malgré une présence tardive de pucerons ayant fréquemment nécessité des traitements contre la JNO (Dumont *et al.*, 2025).

2.2. Collecte de données

L'étude repose sur deux types de données : (1) Arthropodes capturés et (2) observations de terrain.

2.2.1. Captures : Pièges et filet

Les échantillons capturés ont été récoltés par piégeage, parfois complété par des captures au filet. Des triplets de **pièges jaunes** (*yellow pan traps*), ajustés à hauteur de végétation, ont permis le suivi de l'entomofaune volante (Annexe 5). La couleur jaune est la plus efficace pour la capture d'insectes, notamment de pucerons (Southwood *et al.*, 2000; A.A.Yattara *et al.*, 2013). Les pièges ont été remplis d'eau dans laquelle du Triton X100 a été dilué. Le détergent permet de casser la tension superficielle de l'eau pour piéger les insectes (Jally, n.d.), sans quoi moins de la moitié des prises peut être escomptée (Harper *et al.*, 1962). La collecte au **filet**, simple et efficace pour les insectes de grande taille, reste sensible aux conditions météorologiques et au moment de la journée (Roth, 1963; Southwood *et al.*, 2000).

Les échantillons ont été conservés en éthanol 70%, puis épinglés ou placés en tubes Eppendorf avant d'être inclus dans des bases de données annuelles (Annexe 5). Tous les insectes ont été identifiés sommairement à l'ordre ou à la famille pour attribution d'un groupe fonctionnel, puis plus finement si nécessaire (Annexes 6), à l'aide de clés entomologiques (Berland, 1947; Smith, 1969; Gilbert, 2015; "Mikes Insect Keys," October-7-2025; "Helophilus trivittatus | NatureSpot," October-12-2025) et avec l'appui de l'équipe du laboratoire d'entomologie de Gembloux Agro-Bio Tech. Divers documents ont été consultés pour vérifier les régimes alimentaires de taxons capturés (Hoffmann, 1950; Rogers *et al.*, 1972; Sunderland *et al.*, 1980; Forsythe, 1983; Jessop, 1986; Jolivet *et al.*, 1988; Larochelle *et al.*, 1990; Gonget, 1997; Jørgensen *et al.*, 1997; Hastir *et al.*, 2002; Svatopluk, 2002; Hurka *et al.*, 2003; Koch, 2003; Traugott, 2003; Legalov, 2005; Omkar *et al.*, 2005; Evans *et al.*, 2007; Ameixa *et al.*, 2008; Sutherland *et al.*, 2009a, 2009b; Pervez *et al.*, 2011; Gültekin *et al.*, 2012; Hodek *et al.*, 2012; Roger *et al.*, 2013; Carcamo *et al.*, 2015; Cassar, 2015; Gilbert, 2015; Kulkarni *et al.*, 2015; Traugott *et al.*, 2015; Majerus, 2016; Talarico *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018; CABI, 2019, 2021; Kozlov *et al.*, 2020; Leroy *et al.*, 2020; Neculiseanu, 2020; Bellifa *et al.*, 2021; Motyka *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024).

2.2.2. Observations : Comptages

Ces données ont été complétées par des **relevés visuels** en culture : comptage des ravageurs, ennemis naturels et momies de pucerons, selon un protocole distinct en 2024 et 2025 (Annexe 5).

2.2.3. Détail par année

2.2.3.1. 2023

Les pièges jaunes ont été placés au centre de chacune des quatre parcelles (2 AC et 2 BF), espacés de 20 mètres (Figure 17). Ils ont été relevés hebdomadairement durant six semaines (Tableau 1).

2.2.3.2. 2024

Pour le suivi des AC, trois pièges espacés de 25 mètres et distants d’au moins 20 mètres des bordures des parcelles, ont été relevés à quatre reprises, entre le 29 avril et le 20 mai, suivant des intervalles hebdomadaires (Tableau 1).

Le suivi des sites de BF a été effectué toutes les deux semaines à partir de mi-mai jusqu’à mi-juillet. La collecte de l’entomofaune dans les BF a été réalisée via des piégeages au moyen de pièges jaunes, actifs pendant 48 heures, couplés à des captures au filet (Tableau 1). Un suivi des pucerons et des ennemis naturels a également été réalisé par comptage sur 20 tiges aléatoires dans trois zones : (1) à 10 mètres de la bande, (2) à 20 mètres (3) aléatoirement en pleine culture.

Tableau 1 : Effort d’échantillonnage par année pour chaque pratique agricole.

Pratique	Année	Nb Parc.	Période	Δt Période (jours)	Nb. Relevés	Δt Activ. (jours)	Δt Parc. (jours)	Δt Total (jours)
PF	2023	2	06/06 - 18/07	42	6	7	42	84
	2024	1	22/04 - 20/05	28	4	7	28	28
	2025	1	02/05 - 27/06	60	17	3-4	6	60
F	2023	-	-	-	-	-	-	-
	2024	1	29/04 - 20/05	28	4	7	28	28
	2025	1	02/05 - 27/06	60	17	3-4	60	60
BF	2023	2	06/06 - 18/07	42	6	7	42	84
	2024	3	19/06 - 17/07	28	4	2	8	24
	2025	9	27/05 - 27/06	31	3	2	6	54

2.2.3.3. 2025

Concernant les AC, trois pièges espacés de 50 mètres ont été relevés hebdomadairement dans chaque culture entre mi-avril et fin juin, complétés par des comptages des ravageurs et un suivi phénologique sur 20 tiges de froment (et 20 tiges de pois en AC) afin de déterminer le stade des cultures. Les régimes alimentaires des espèces récoltées ont été identifiés par lecture de la littérature afin de les catégoriser en groupes fonctionnels (Ravageurs, spécialistes, généralistes, parasitoïdes ou autres).

Pour l’étude des BF, conduite de début mai à fin juin, un triplet de pièges jaunes a été installé dans chaque bande (Tableau1). Les auxiliaires ciblés (Tableau 2) ont été identifiés à l'espèce. Des relevés visuels ont été effectués sur 20 tiges aléatoires de froment dans deux zones : (1) à 5

mètres de la bande, (2) à 50 mètres. L'évolution temporelle des ressources florales et alimentaires fournies par la bande a été suivie via des relevés phénologiques.

Tableau 2 : Ennemis naturels ciblés par l'étude des BF en 2025.

Guilde	Taxons ciblés
Aphidiphages	- Aphidius spp. (Braconidae)
	- Chrysopidae
	- Coccinellidae
	- Syrphidae
Généralistes	- Anthocoridae
	- Cantharidae
	- Carabidae
	- Staphylinidae

2.2.4. Limites d'identification des Aphididae en AC

Cette étude se concentre sur les **guildes liées au froment** : les ravageurs du froment et leurs ennemis naturels. Une exception concerne toutefois les pucerons piégés dans les AC : n'ayant pas été identifiés à l'espèce, aucune distinction entre pucerons du froment et pucerons du pois n'a été possible. Les comparaisons entre les cultures F et PF concernent donc les populations totales de pucerons dans chaque culture. Ce biais concerne uniquement les pucerons piégés, les comptages visuels ayant bien été réalisés exclusivement sur des tiges de froment. Par ailleurs, afin d'éviter un biais dans l'analyse de la diversité de la communauté des ravageurs piégés en AC, les *Aphididae* ont été exclus de cette analyse.

2.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio (Version 2025.05.1-513) pour étudier les structures et dynamiques des communautés d'arthropodes : l'abondance et la diversité des groupes fonctionnels ainsi que les relations ravageurs-ennemis naturels. L'unité expérimentale correspond à un relevé par parcelle (données groupées par date-parcelle), les trois pièges par parcelle sont donc traités comme réplicats internes.

2.3.1. Préparation et structuration des données

La diversité dépendant de la résolution taxonomique (Marcon, 2025), l'analyse de diversité n'a été effectuée qu'au sein de groupes identifiés au même niveau taxonomique.

Les comparaisons interannuelles, rendues délicates par les différences de protocoles, ont été limitées à l'étude des AC en 2024 et 2025. En raison des différences d'effort d'échantillonnage

entre les campagnes, une harmonisation des données a été nécessaire : Les dynamiques temporelles des deux années ont été exprimées en **degrés-jours cumulés (DJ)**, les analyses restreintes à quatre relevés par année, et les abondances capturées standardisées en valeurs quotidiennes (simplification tolérable pour les analyses d'abondance, mais ne permet aucune analyse de diversité).

En complément de ces analyses interannuelles limitées, une étude plus poussée a été réalisée sur la saison 2025, intégrant l'ensemble des données récoltées durant l'année.

2.3.2. Qualité d'échantillonnage

La qualité de l'échantillonnage a été caractérisée en calculant le **taux de complétude** des échantillonnages (équation 1), sur base des estimations de leur richesse réelle via **Chao1** (équation 2) et **ACE** (équation 3).

Afin de conserver des niveaux taxonomiques homogènes, la richesse (observée et estimée) n'a pas été calculée sur l'ensemble des individus d'un milieu, mais séparément par guildes, identifiées à un rang homogène. Ainsi, elle a été estimée pour les aphidiphages (espèce) en BF, et pour les aphidiphages (espèce), auxiliaires (espèce) et ravageurs (genre) en PF et F. Des courbes d'accumulation ont ensuite été tracées pour chaque guildes.

Formules :

Equation 1 :
$$Chao1 = S_{obs} + \frac{F_1^2}{2F_2} \quad (\text{Chao, 1984})$$

Où S_{obs} correspond au nombre d'espèces observées, F_1 au nombre d'espèces représentées par un seul individu (singletons) et F_2 au nombre d'espèces représentées par deux individus (doubletons).

Equation 2 :
$$\hat{S}_{ACE} = s_{>\kappa}^n + \frac{s_{\leq \kappa}^n}{\hat{C}_{rares}} + \frac{s_1^n}{\hat{C}_{rares}} \hat{\gamma}_{rares} \quad (\text{Chao et al., 1992})$$

Où $s_{>\kappa}$ est le nombre d'espèces dites abondantes, observées plus de κ fois, $s_{\leq \kappa}$ le nombre d'espèces dites rares, observées κ fois ou moins, $\hat{C}_{rares}$ est le taux de couverture ne prenant en compte que les espèces rares.

Equation 3 :
$$\text{Taux de complétude} = \frac{S_{obs}}{S_{estimé}} \times 100 \quad (\text{Marcon, 2025})$$

où Sobs correspond au nombre d'espèces observées et Sestimé au nombre d'espèces estimées avec Chao1 et ACE

2.3.3. Calcul des indices

La diversité alpha des différentes guildes au sein d'un échantillon a été quantifiée à l'aide d'un panel d'indices : l'**abondance**, la **richesse observée** et les **nombre de Hill 1 et 2**. Le calculs de ces derniers paramètres (équations 3 et 4) a nécessité la réalisation a priori de ceux des indices de Shannon (H') et Simpson (D) (équations 1 et 2).

Formules (via Marcon, 2025) :

Equation 1 :
$$H' = -\sum_{i=1}^n p_i \times \ln(p_i) \quad (\text{Shannon, 1948})$$

où p_i représente la proportion de l'espèce i dans l'échantillon

Equation 2 :
$$D = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (\text{Simpson, 1949})$$

où p_i représente la proportion de l'espèce i dans l'échantillon

Equation 3 :
$$\text{Hill 1} = e^{H'} \quad (\text{Hill, 1973})$$

où H' représente l'indice de Shannon

Equation 4 :
$$\text{Hill 2} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{Hill, 1973})$$

où D représente l'indice de Simpson

En cas de faibles abondance et richesse au sein d'une guildes, les valeurs de **présence**/absence ont été comparées selon les modalités.

2.3.4. Objectif 1 : Influence des pratiques sur les guildes

L'effet des pratiques sur les abondances et les indices de **diversité alpha** a été évalué au moyen de tests de Student appariés (si les hypothèses paramétriques sont vérifiées par Shapiro ou Bartlett), ou de tests non paramétriques de Wilcoxon appariés (ou Wilcoxon-Pratt en cas de forte présence de valeurs nulles ou égales).

L'influence de la variabilité temporelle et des variables environnementales (température de l'air, vent, pluie) ont été explorées via des modèles linéaires mixtes généralisés (loi binomiale pour

présence/absence et loi négative binomiale pour les abondances, préférée à Poisson en raison de la fréquente surdispersion des données)

La **diversité bêta** a été explorée sur la base de la dissimilarité de Bray-Curtis, plus adaptée aux données d'abondance que la distance euclidienne (Marcon, 2025). L'effet des variables explicatives (abondance des ravageurs, stades phénologiques, etc.) a été évalué par PERMANOVA, permettant d'estimer la part de variance expliquée (R^2) et la significativité des effets via permutations. L'homogénéité des dispersions multivariées a été vérifiée préalablement avec betadisper.

Des PCoA ont permis de visualiser la variabilité des auxiliaires, et des analyses de redondance (RDA) ont été utilisées pour quantifier la part de variance directement expliquée par une variable explicative.

2.3.5. *Objectif 2 : Corrélations entre ravageurs et ennemis*

L'influence des ravageurs sur les communautés d'ennemis naturels a été explorée par des corrélations de Spearman (adaptées aux données non normales et relations non linéaires). Les analyses ont été conduites séparément pour les abondances capturées, les comptages, ainsi que pour les indices de diversité (Hill 1, Hill 2, richesse). Concernant l'étude de l'effet des BF, les corrélations se sont restreintes aux ennemis à 5m afin de tester les interactions ravageurs-ennemis dans la zone d'influence de la bande.

2.3.6. *Objectif 3 : Corrélations entre ressources disponibles (BF) et ennemis*

L'influence de la disponibilité en ressources florales (QRF) et en proies alternatives (QRP) sur les communautés d'ennemis naturels a été analysée par corrélations de Spearman, en suivant une méthodologie similaire à l'objectif 2.

3. Résultats

3.1. *Jeu de données*

3.1.1. *Captures*

Les données de capture proviennent de trois types de parcelles : monocultures de froment (F), associations pois-froment (AC), et bandes fleuries (BF) en bordure de champs.

Au cours des trois années d'expérimentation, plus de 16 000 arthropodes ont été capturés et identifiés, parmi lesquels 12 469 en 2025. Ces chiffres incluent les insectes identifiés et non

assimilés à une guildes (NA), mais font abstraction des individus capturés et non identifiés. Au sein de chaque type de parcelle, les abondances relatives et absolues des guildes varient largement d’une année à l’autre (Figure 18).

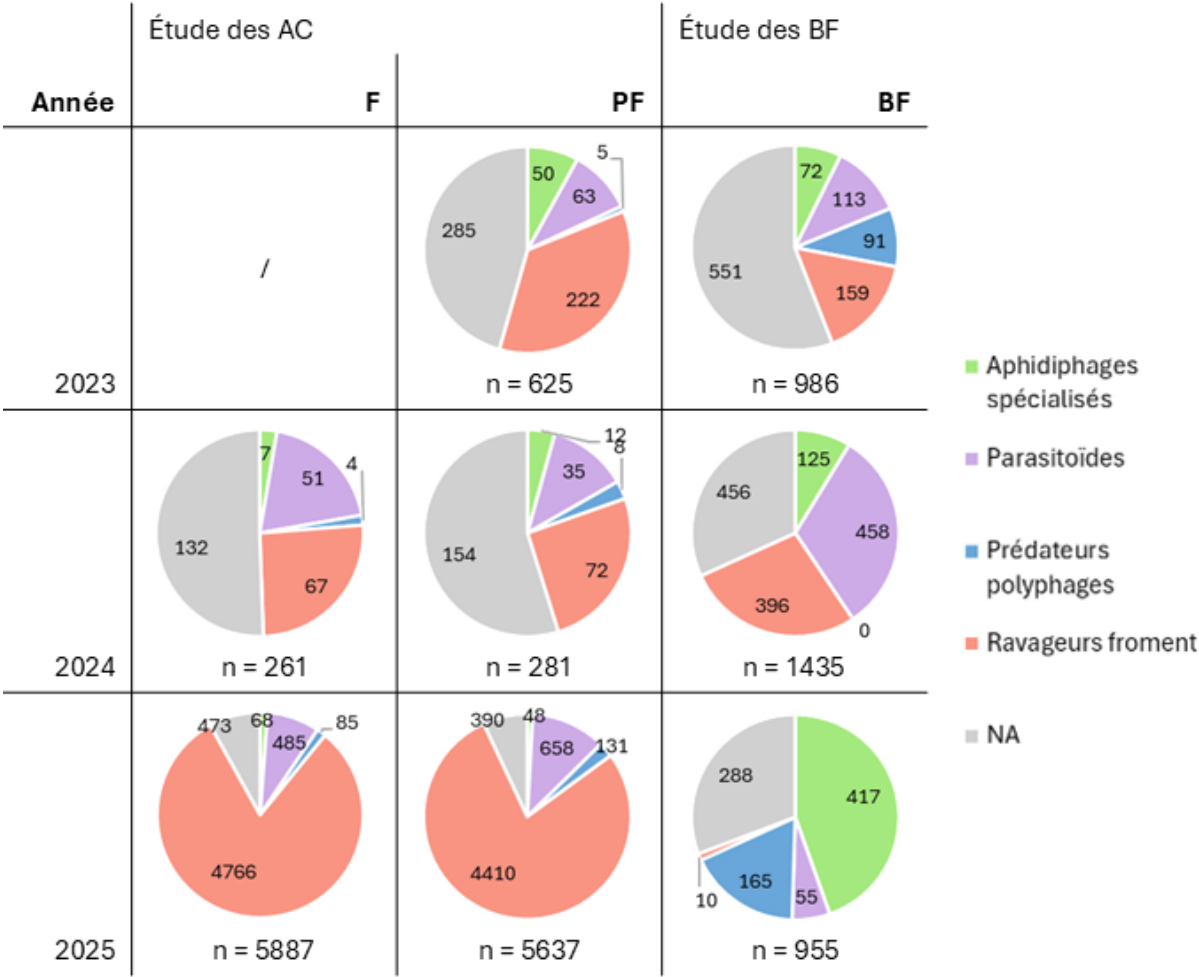


Figure 18 : Abondance des arthropodes piégés et identifié réunis par guildes (couleur) selon l’année et la pratique étudiée.

Pour les cultures F et PF, le détail des abondances au sein de chaque guildes est présenté en Annexe 7. On y aperçoit notamment que la densité élevée de ravageurs en 2025 est liée à une forte abondance de pucerons (7068 individus, contre 221 en 2023 et 46 en 2024).

Les estimations Chao1 et ACE indiquent des efforts d'échantillonnage globalement acceptables pour les BF, même si quelques espèces rares supplémentaires auraient pu être capturées avec des relevés additionnels en 2024 et 2025 (Figure 19 et Annexe 8).

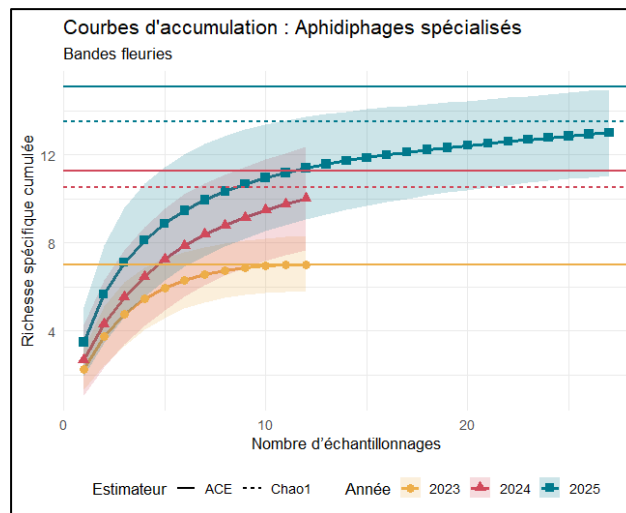


Figure 19 : Courbe d'accumulation et estimation de la richesse spécifique (Chao1, ACE) des aphidiphages en BF selon chaque année.

Pour les AC, l'effort est satisfaisant en PF, voire quasiment exhaustif pour les groupes les moins riches (aphidiphages et ravageurs) (Figure 20). En revanche, il s'avère insuffisant en monoculture F pour les guildes d'auxiliaires, dont le taux de complétude dépasse rarement 50% (Annexes 8). Par ailleurs, alors que la richesse observée en 2024 est systématiquement inférieure à celle de 2025, cette différence s'atténue à nombre de relevés équivalent (Figure 20).

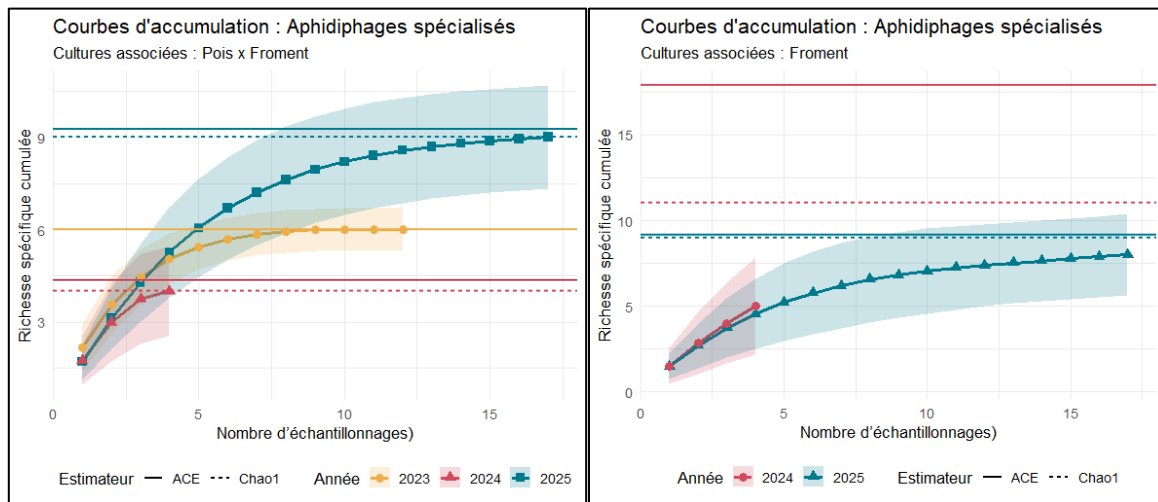


Figure 20 : Courbe d'accumulation et estimation de la richesse spécifique (Chao1, ACE) des ennemis aphidiphages en culture de PF (pois-froment) ou F (froment) selon les années.

3.1.2. Comptages

En 2025, 2387 arthropodes ou trace de leur présence ont été observés dans les cultures : 872 dans les parcelles liées aux AC, et 1515 dans celles liées aux BF (Annexe 9). Les *Aphididae* dominent largement les comptages (81,064 % des observations).

3.2. (Q1) Influence des pratiques sur les guildes

3.2.1. Associations culturelles

3.2.1.1. Ravageurs

Tableau 3 : Synthèse des résultats concernant les ravageurs en associations culturelles

Année	Groupe	Type donnée	Culture(s) ciblée(s)	Indice	Résultat	Développement
Interannuelle (2024-25)	Pucerons	Piège	Pois et froment	Abondance	41% supérieure en PF (**)	Figure 21, Annexe 10
2025	Pucerons	Comptage	Froment	Abondance	99% supérieure en PF (*)	Figure 22, Annexe 11
		Piège	Pois et froment	Abondance	NS	Figure 23, Annexe 11
	Cécidomyies	Piège	Froment	Abondance	59% supérieure en F (*)	Figure 24, Annexe 12
	Criocères	Comptage	Froment	Abondance	NS	Annexe 12
	Ravageurs	Comptage	Froment	Abondance	80% supérieure en PF (*)	
	Ravageurs (hors pucerons)	Piège	Froment	Abondance	NS	Annexe 13
				Richesse	NS	
				Hill1	NS	
				Hill2	NS	

Guilde des ravageurs : données interannuelles

Sur base des données interannuelles (2024-2025), les modèles linéaires mixtes montrent une abondance de **pucerons des cultures** comptés environ 41% plus élevée en AC, indépendamment du stade phénologique (DJ) (Annexe 10). Cette différence est marquée en début de saison mais s'atténue avec le temps (Figure 21).

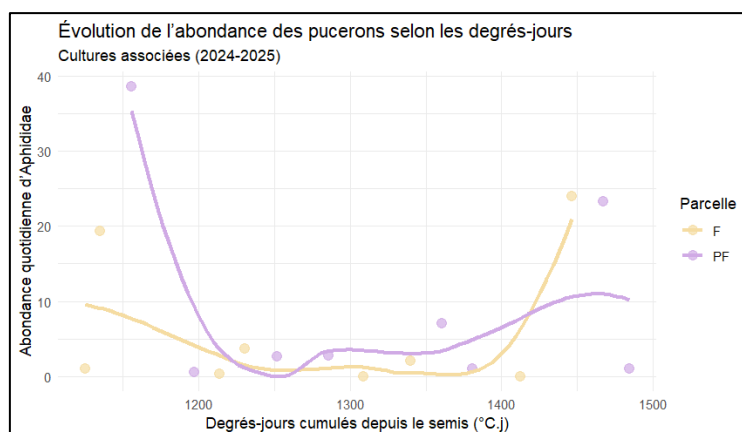


Figure 21 : Évolution de l'abondance des *Aphididae* selon le stade phénologique de chaque culture (F et PF), sur base des données standardisées de 2024 et 2025.

Les interactions Parcelle $\times$ DJ n'étant pas significatives, la dynamique temporelle peut être considérée similaire en F et en PF. L'abondance des pucerons diminue significativement avec l'augmentation de la température de l'air et de la vitesse du vent (Annexe 10).

Guilde des ravageurs : 2025

En 2025, les **pucerons comptés** sur les tiges de froment sont en grande majorité aptères (97,5%) et significativement plus abondants en PF (+98,7%, test de Student apparié) (Annexe 11). Le modèle mixte (Date en variable aléatoire) ne confirme toutefois pas cette différence ($p = 0,101$). L'inclusion des covariables environnementales dans le modèle n'apporte pas plus de précision. Les pucerons connaissent un pic simultané autour du 10 juin (BBCH 71 pour F, BBCH 69 pour PF) dans les deux parcelles (Figure 22).

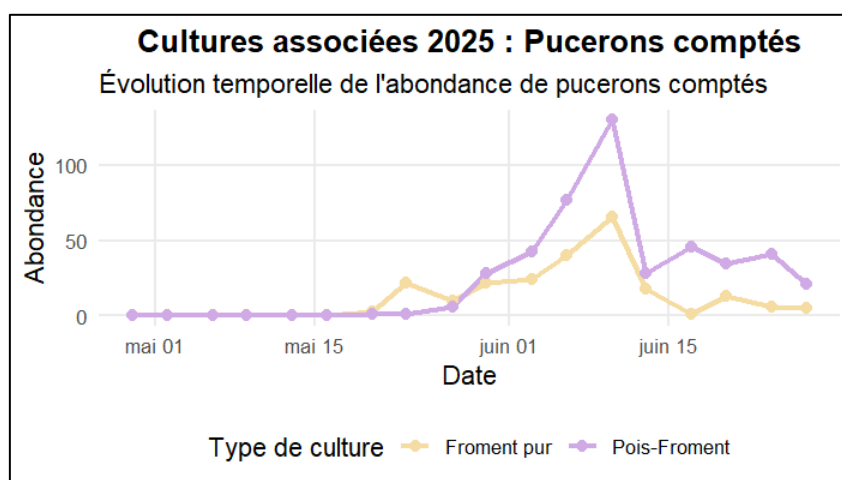


Figure 22 : Évolution temporelle de l'abondance des *Aphididae* comptés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).

Concernant les **pucerons piégés**, du pois ou du froment, les populations sont 100% ailées et aucune différence significative n'est observée entre F et PF ($p = 0,158$, Wilcoxon-Pratt) (Figure 23 et Annexe 11).

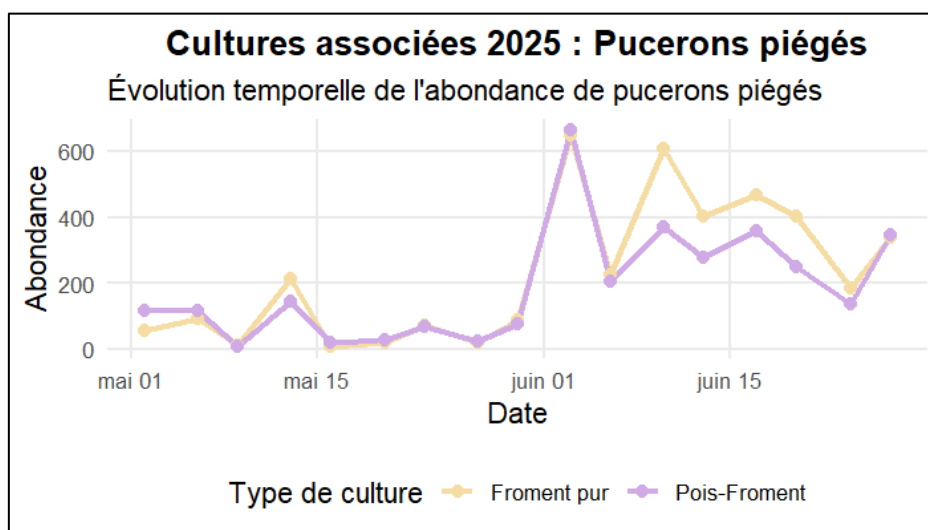


Figure 23 : Évolution temporelle de l'abondance des *Aphididae* capturés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).

Chez les pucerons, la variabilité temporelle explique 90 à 97% des fluctuations de densité, la part expliquée par le type de parcelle étant négligeable ($\sim 1\%$) (Annexe 11).

Les **cécidomyies** piégées présentent des pics de densité simultanés dans les deux parcelles, mais le second pic (24/06/25) est significativement plus important en F. Selon le GLMM, elles sont 41,4% moins présentes en PF (Figure 24, Annexe 12).

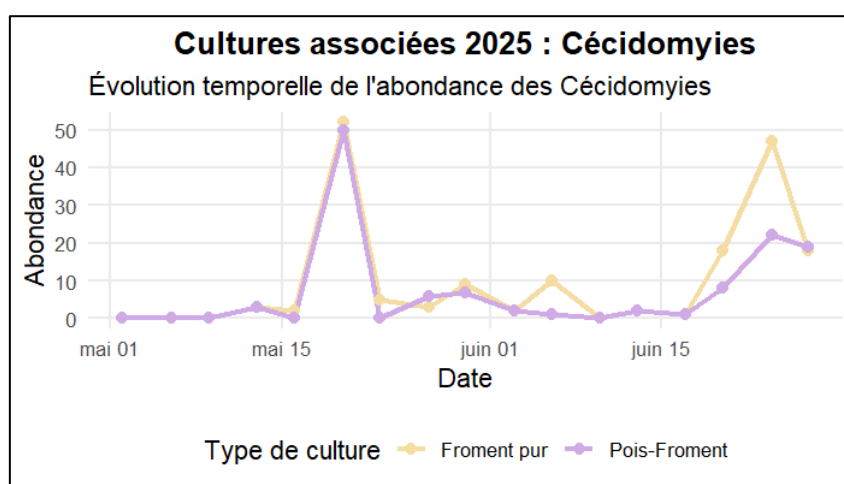


Figure 24 : Évolution temporelle de l'abondance des *Cecidomyiidae* capturés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).

Concernant les données de comptages, aucune différence significative entre F et PF n’est observée chez les criocères, momies et ennemis naturels (Annexe 12).

Enfin, l’analyse de la diversité de la communauté des ravageurs piégés (hors pucerons) semble révéler que ni la richesse ni la diversité des ravageurs ne sont significativement influencés par le type de culture (Annexe 13).

3.2.1.2. Ennemis naturels

Tableau 4 : Synthèse des résultats concernant les ennemis naturels en associations culturales

Année(s)	Groupe	Type donnée	Indice	Résultat	Développement
Interannuelle (2024-25)	Aphidiphages	Capture	Abondance	NS	Figure 25
	Parasitoïdes	Capture	Abondance	NS	Figure 26
2025	Ennemis	Capture	Abondance	NS	Annexes 13 et 15
			Richesse	NS	
			Hill1	NS	
			Hill2	NS	
	Ennemis	Comptage	Abondance	NS	Annexe 14
	Aphidiphages	Capture	Abondance	NS	Figure 27, annexe 13
			Richesse	NS	
			Hill1	NS	
			Hill2	NS	

Ennemis naturels : Données interannuelles

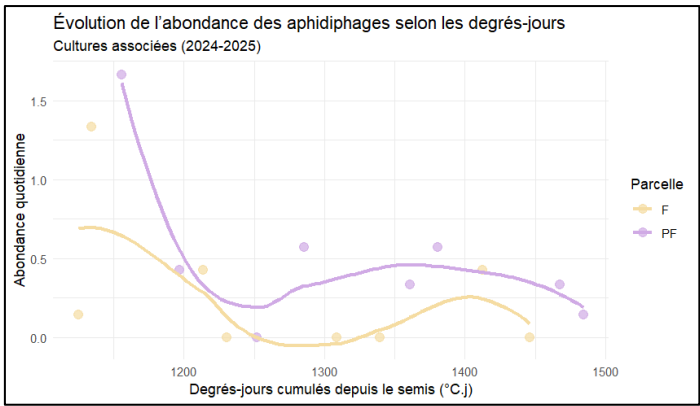


Figure 25 : Évolution de l’abondance des aphidiphages spécialistes selon le stade phénologique de chaque culture (F et PF), sur base des données standardisées de 2024 et 2025.

Sur base des données standardisées de 2024 et 2025, bien qu'il semble y avoir plus d'aphidiphages en PF et de parasitoïdes en monoculture F (Figures 25 et 26), ces tendances ne sont pas significatives (Annexe 10).

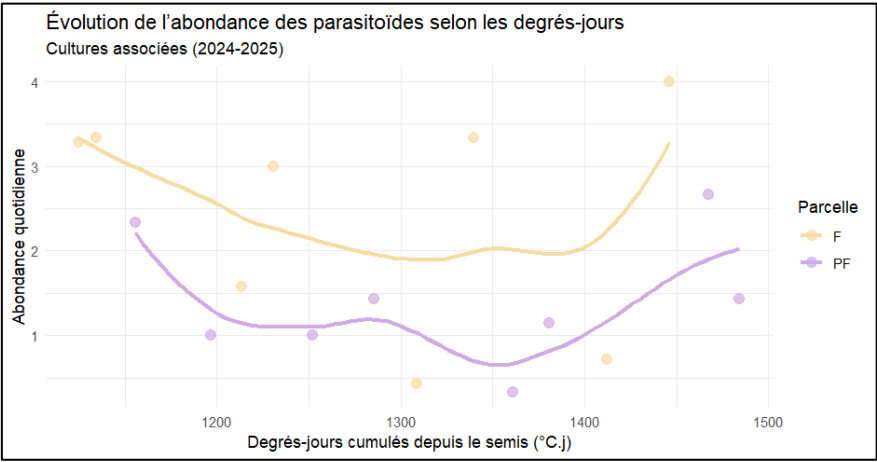
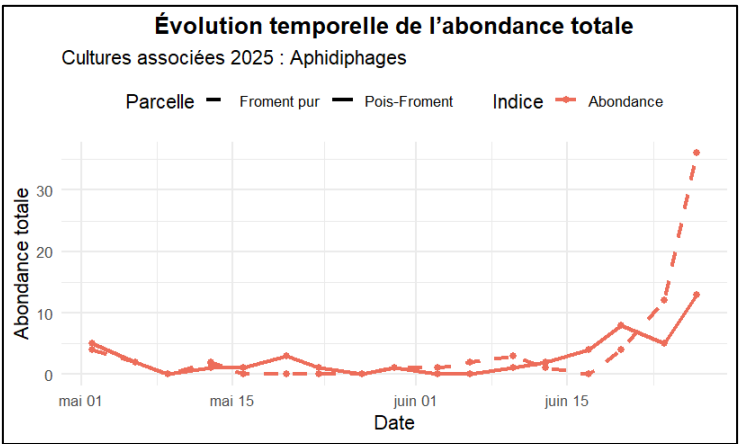


Figure 26 : Évolution de l'abondance des parasitoïdes selon le stade phénologique de chaque culture (F et PF), sur base des données standardisées de 2024 et 2025.

Ennemis naturels : 2025

Ni l'abondance ni la diversité des ennemis naturels, y compris aphidiphages, ne sont significativement influencées par le type de culture (Annexe 13). Qu'il s'agisse des données issues de piège ou d'observations, leur abondance et leur diversité semblent augmenter avec le temps sans chuter avant la fin de l'expérimentation (Figure 27, Annexes 14 et 15).



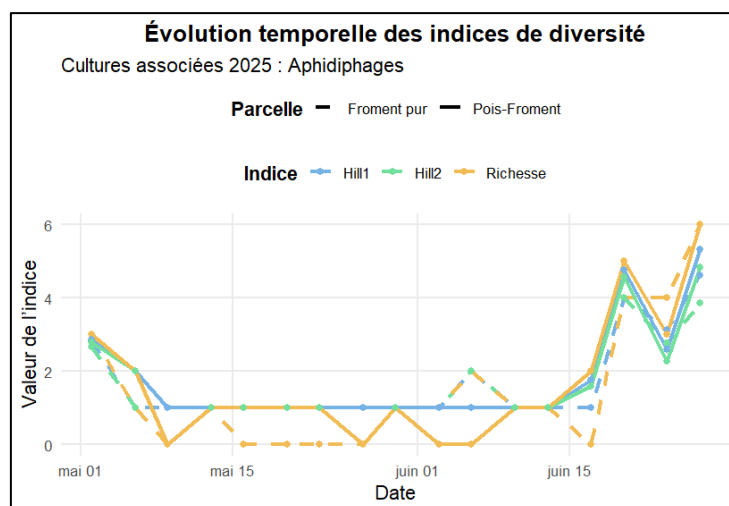


Figure 27 : Évolution temporelle des indices de diversité des aphidiphages spécialisés piégés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).

3.2.2. Bandes fleuries 2025

3.2.2.1. Ravageurs

Les **pucerons** dominent largement les comptages (Annexe 16). Alors qu'ils semblent plus nombreux à 50 m qu'à proximité des bandes, les tests statistiques ne confirment aucune influence de la distance sur leur abondance (Annexe 17), même si une différence presque significative est observée lors du pic de la deuxième semaine ($p = 0,0747$).

La population de **criocères** observés diminue lentement mais constamment, tandis que celle des **auxiliaires**, quasi nulle au départ, augmente au fil des relevés (croissance plus importante à 50 m). La densité de **momies** est significativement supérieure à proximité des BF (**), mais cette différence s'atténue avec le temps (Annexes 16 et 17).

3.2.2.2. Ennemis naturels

Tableau 5 : Résultats des modèles linéaires mixtes généralisés pour prédire la valeur des indices de diversité des ennemis comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la BF adjacente.

GLMM : Indice ~ Distance + (1 Parcelle) + (1 Date)					
Indice	Distribution	Estimation	Écart-type	z	p.value
Présence	Binomiale (logit)	13,469	4,515	2,983	0,00285**

Richesse	Nég. binomiale	0,098	0,256	0,384	0,70101
Abondance	Nég. binomiale	0,575	0,257	2,240	0,02506*
Hill1	Nég. binomiale	-0,022	0,235	-0,095	0,92428
Hill2	Nég. binomiale	/	/	/	/

Les syrphes sont les prédateurs aphidiphages les plus présents au sein des BF (Annexe 18), confirmant une tendance déjà observée par comptage dans les champs adjacents (Annexe 9).

La présence (**) et l'abondance (**) des ennemis sont plus élevées à 5 m (Tableau 5), bien que cette différence s'atténue en fin de saison (Annexes 19 et 20).

3.3. (Q2) Liens entre ravageurs et ennemis

3.3.1. Associations culturelles

3.3.1.1. Données interannuelles

La relation de densité entre les pucerons des cultures et leurs ennemis (aphidiphages et parasitoïdes) est positive et plus ou moins importante selon les années, mais jamais significative (Annexe 21).

3.3.1.2. Données de 2025

En 2025, une forte corrélation positive ($\rho > 0,6$, $p < 0,001^{***}$) est observée entre l'abondance des ennemis et celle des différents groupes de ravageurs, indiquant des dynamiques temporelles comparables, présentant une forte hausse en fin de saison de relevés (Tableau 6). L'abondance des ravageurs capturés (hors *Aphididae*) est corrélée positivement à la diversité des ennemis (Hill 1 et Hill 2), tandis que les comptages révèlent une corrélation négative entre diversité (Hill 2) des ennemis et abondance des ravageurs (Tableau 6).

Tableau 6 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les indices de diversité des ravageurs et des ennemis naturels (capture et comptage) en 2025.

Groupe de ravageurs	Type données	Indice div. ennemis	ρ	$p.value$
Pucerons des cultures (abondance)	Capture	Abondance	0,602	1,68E-04***
		Hill1	0,179	0,312
		Hill2	0,116	0,512

		Richesse	0,308	0,0760
Pucerons du froment (abondance)	Comptage	Abondance	0,623	8,30E-05***
		Hill1	-0,329	0,0577
		Hill2	-0,441	9,10E-03**
		Richesse	0,016	0,930
Ravageurs du froment (abondance hors pucerons)	Capture	Abondance	0,61	1,28E-04***
		Hill1	0,467	5,38E-03**
		Hill2	0,367	0,0328*
		Richesse	0,681	9,00E-06***
Ravageurs du froment (abondance)	Comptage	Abondance	0,618	9,80E-05***
		Hill1	-0,292	0,0932
		Hill2	-0,4	0,0189*
		Richesse	0,048	0,787

Les PERMANOVA indiquent par ailleurs des effets très significatifs de la densité de pucerons (capturés ou comptés) et de la densité totale de ravageurs sur la composition des communautés d'ennemis ($R^2 = 11,8$ à $14,2\%$), tandis que l'abondance des ravageurs hors pucerons n'a pas d'influence significative ($p = 0,409$) (Annexe 22).

La PCoA montre que la variation temporelle influence fortement la communauté des ennemis (Annexe 23). De ce fait, sa structure varie fortement selon les stades de développement du froment, facteur expliquant 36,1 % de la variance totale (PERMANOVA, $p = 0,001***$, variabilité intra-périodique homogène), ce diagnostic est confirmé par une RDA où la variable temporelle (groupée en périodes), choisie comme axe contraint, explique 23,69 % de la variance totale ($p = 0.008**$).

3.3.2. Bandes fleuries 2025

En 2025, l'abondance, la richesse et la diversité des ennemis naturels augmentent au cours du temps (même si non significatif pour Hill 2) (Figure 28, Annexe 24). D'après les tests post-hoc (Dunn pour l'abondance, Tukey pour la richesse et Hill1), les croissances sont particulièrement marquées entre les deux premiers relevés.

Ces dynamiques peuvent être comparées avec celles observées chez les ravageurs à 5 m de la bande (cf. section 3.2.2.1.). Les analyses indiquent que le lien entre le nombre de ravageurs dans un champ et la diversité de la communauté des ennemis à proximité est faible, presque toujours positif, mais jamais significatif (Annexe 25). La PERMANOVA ne révèle pas d'effet significatif de l'abondance des pucerons sur la composition des communautés d'ennemis dans les BF ($F = 0,96$, $p = 0,48$, $R^2 = 0,037$). Ce résultat est confirmé par une RDA dans laquelle l'abondance des pucerons (axe contraint) n'explique que 4,618 % de la variance (Confirmation par ANOVA).

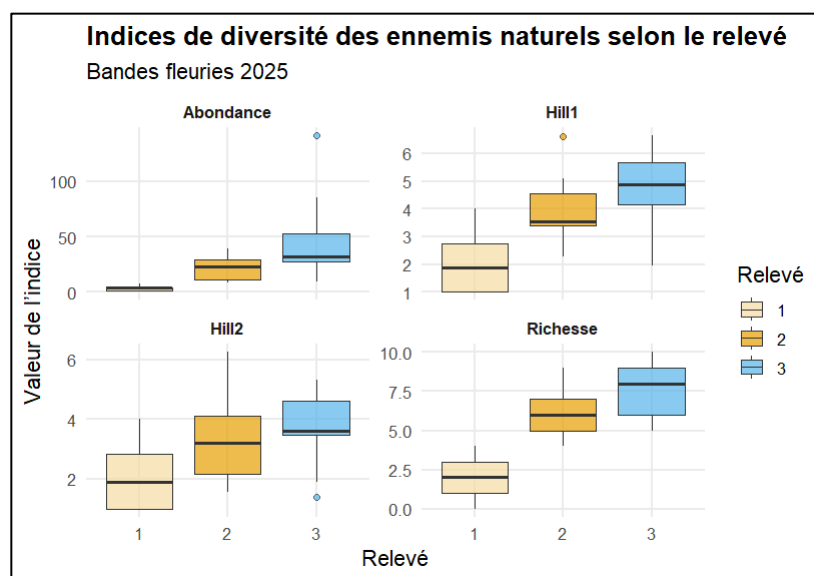


Figure 28 : Boxplots de différents indices de diversité en genres de la communauté d'ennemis naturels au sein des BF selon le relevé en 2025.

3.4. (Q3) Disponibilité des ressources et ennemis

3.4.1. Quantité de ressources florales (QRF)

En 2025, la couverture végétale occupe une grande partie des BF et s'accroît légèrement sur la période (de 75% à plus de 80%). Un pic de floraison est observé lors du second relevé (11-12/06/25), dominé par la moutarde (*Sinapis alba* L.), le radis cultivé (*Raphanus sativus* L.) et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum* Moench). La vesce (*Vicia sativa* L.) et le tournesol (*Helianthus annuus* L.), moins abondants, se développent davantage après ce pic (Figure 29). Une vingtaine d'espèces supplémentaires ont également été observées en fleur.

Visuellement, la QRF présente un pic au second relevé, contrairement aux indices de diversité des ennemis, strictement croissants (Figure 30). De ce fait, aucun lien significatif n'est détecté entre ces variables (Annexe 26). La PERMANOVA révèle néanmoins un effet faible mais significatif de la QRF sur la structuration des communautés d'ennemis ($p = 0,035$, $R^2 = 7,16\%$), de nature non linéaire (RDA non significative, $p = 0,584$). D'après l'observation visuelle de la RDA, aucun taxon particulier, y compris les espèces nectarivores/pollinivores, ne semble particulièrement influencé par la QRF (Annexe 27).

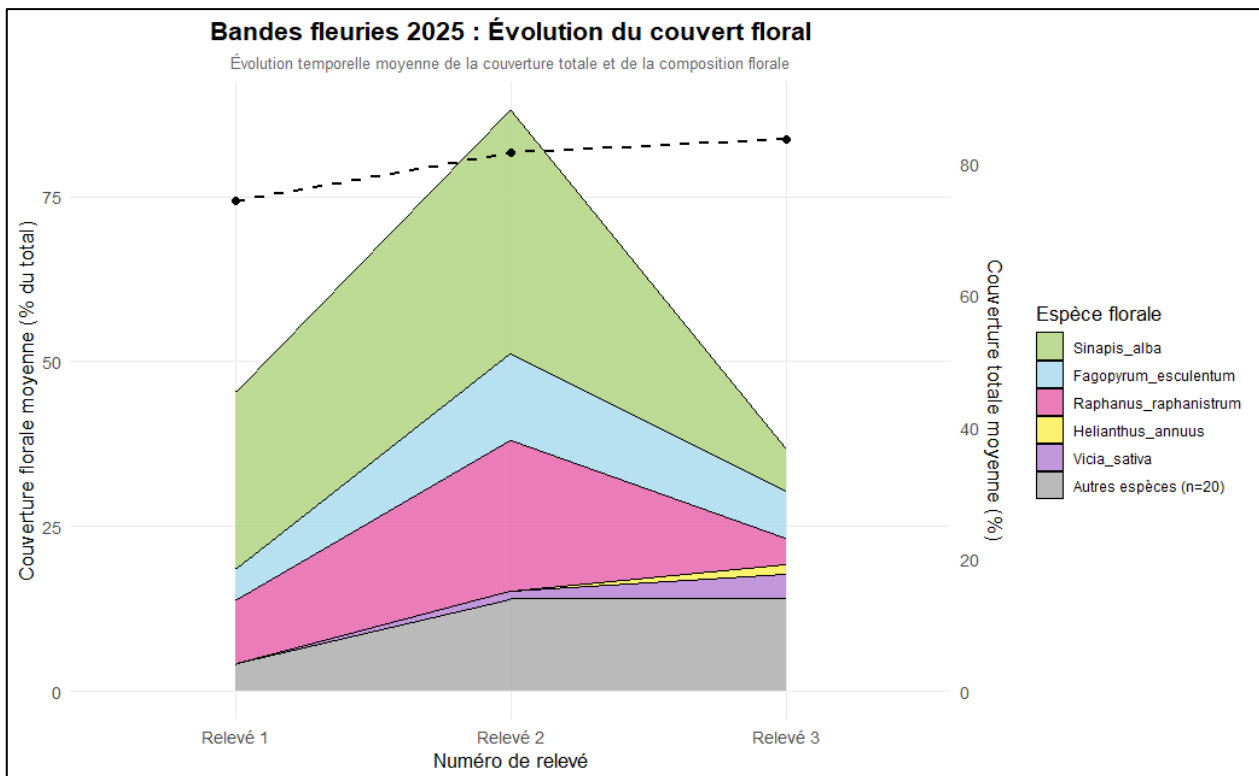


Figure 29 : Graphique de l'évolution moyenne de la couverture totale moyenne (trait interrompu) et de la composition spécifique des BF de 2025.

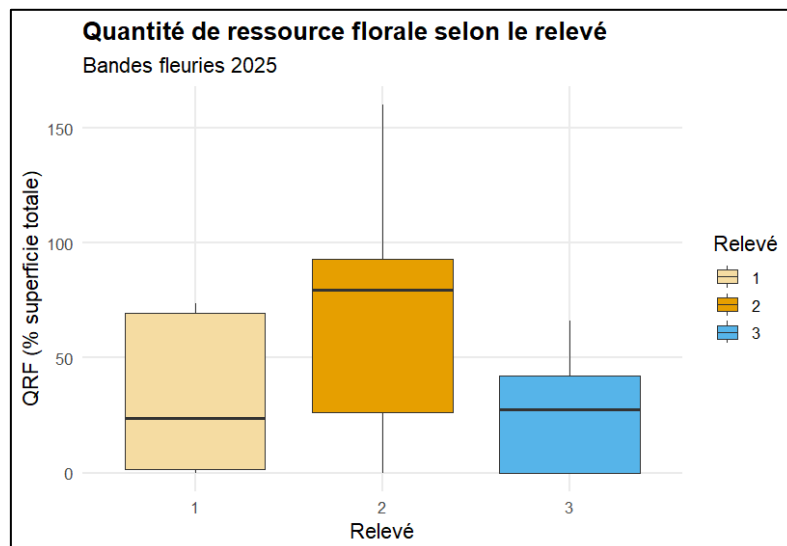


Figure 30 : Boxplots de la quantité de ressource florale disponible selon le relevé dans les BF en 2025.

3.4.2. Disponibilité proies alternatives (QRP)

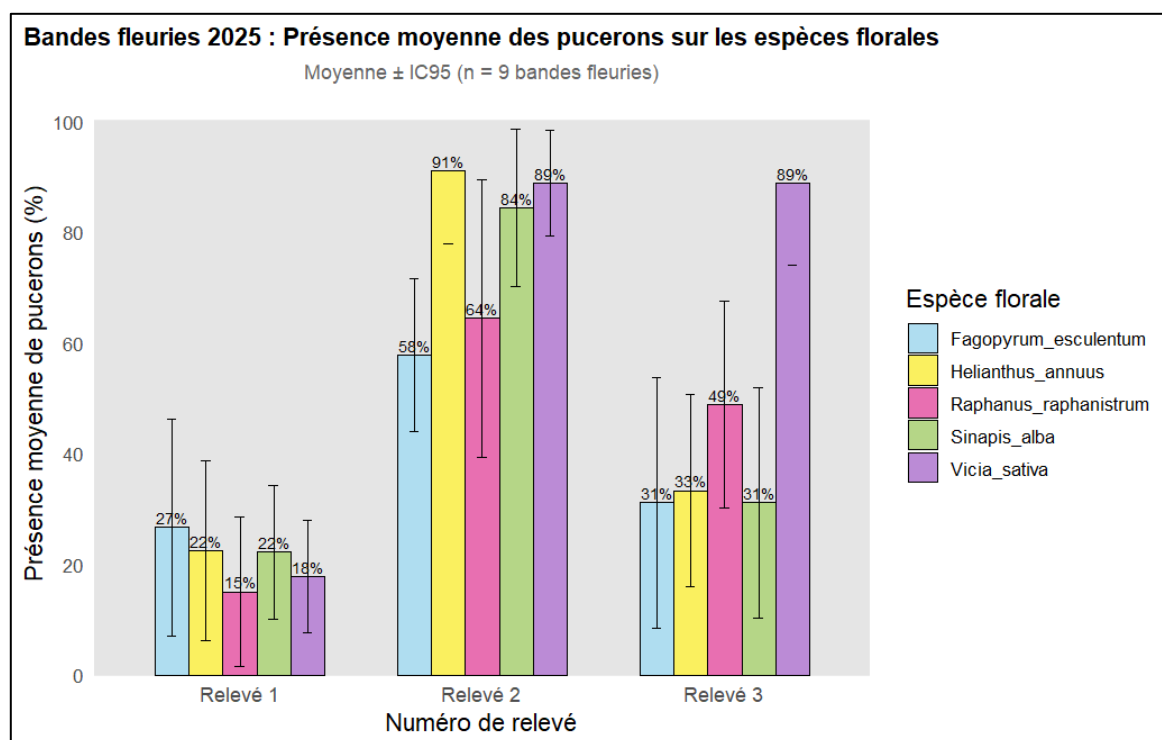


Figure 31 : Proportion moyenne de plantes semées (%) sur lesquelles la présence de pucerons a été observée lors de chacun des relevés dans les BF en 2025.

Les pucerons sont relativement peu présents en début d'expérimentation, puis très abondants au second relevé (présents sur plus de la moitié des plantes, et sur près de 9 individus sur 10 de vesce et de tournesol) (Figure 31). La vesce, à floraison tardive, conserve un taux élevé de pucerons au-delà du second relevé, tandis que ce taux diminue chez les autres espèces (Figure 31).

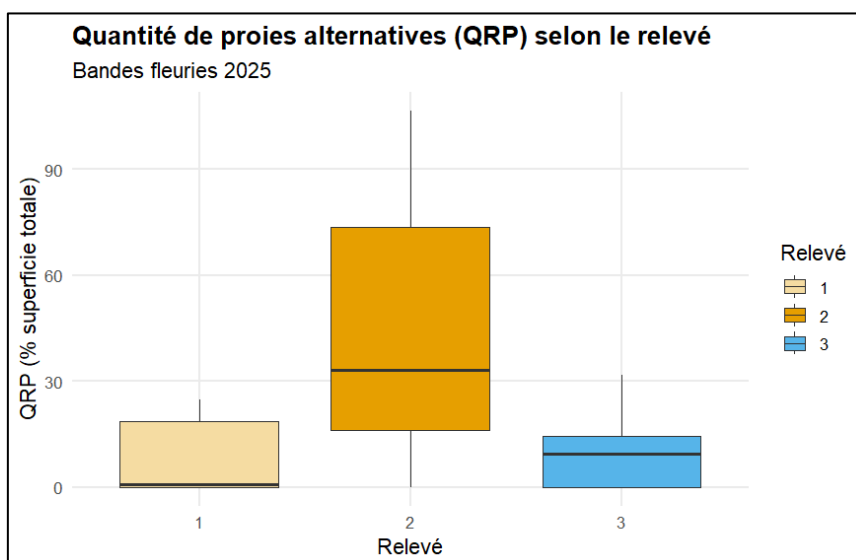


Figure 32 : Boxplots de la quantité de ressource alimentaire entomologique (proies alternatives) disponible selon le relevé dans les BF en 2025. L'axe vertical présente la proportion de la surface de la bande sur laquelle des pucerons sont présents.

Similairement à la QRF, aucune corrélation significative n'est détectée entre la QRP (Figure 32) et les indices de diversité des ennemis (Annexe 26). La PERMANOVA indique néanmoins un effet faible mais très significatif de la QRP sur la composition des communautés d'ennemis ($p = 0,001^{***}$, $R^2 = 10,58\%$), également non linéaire (RDA : $p = 0,163$). L'observation visuelle ne révèle pas non plus de taxon particulièrement lié à cette ressource (Annexe 27).

4. Discussion

4.1. Biais de l'étude (campagne 2025)

4.1.1. Associations culturelles

Plusieurs sources de biais potentiels sont à considérer. Tout d'abord, une **bande a été fauchée** entre le 02 et le 06/06/2025 à proximité des pièges en monoculture F (Annexe 4). Cette fauche a pu modifier le comportement des arthropodes.

Ensuite, les pièges en PF semblent avoir régulièrement servi de perchoir à des **oiseaux**, altérant potentiellement le comportement des insectes volants (Annexe 4).

La présence **d'espèces florales adventices** en PF (dont matricaire – *Matricaria sp.*, gaillet – *Galium sp.*, cirse des champs – *Cirsium arvense* L., coquelicot – *Papaver rhoeas* L.) a augmenté la disponibilité de ressources attractives pour les auxiliaires (abri, pollen, nectar, proies alternatives). En effet, certaines de ces plantes sont notamment très attractives pour les syrphes (Wäckers *et al.*, 2012; Hatt *et al.*, 2018), et d'autres peuvent abriter une grande diversité de nuisibles (Marshall *et al.*, 2003). De denses colonies de pucerons à l'apex de ces adventices (Annexe 4) ont ainsi pu diluer l'effort de prédation des ennemis, détournés vers ces proies plus accessibles au détriment des pucerons du froment, mieux abrités par la végétation.

De plus, les différentes variétés de froment se distinguent notamment par leur niveau de précocité à l'épiaison et à la maturité : la variété Celebrity (monoculture) est très précoce, tandis que KWS Emerick (PF) est demi-tardive (Walagri, 2024; "Livre Blanc Céréales," March-13-2026). De ce fait, un **décalage phénologique** a été constaté, le froment en PF a observé un retard de plus d'une semaine en début de saison, réduit à quelques jours en fin de campagne (Annexe 28). Ce décalage

a pu modifier les dynamiques de développement des populations de nuisibles en exposant ou masquant différemment les stades sensibles.

Enfin, la composition des guildes étudiées n'intègre pas toutes les espèces connues. Même si un nombre important de taxons ont été considérés pour chaque groupe fonctionnel (Annexe 7), cette liste n'est **pas exhaustive**. Ce biais existe également dans l'étude des BF.

4.1.2. Bandes fleuries

Deux sources principales de biais doivent être considérées. D'une part, **les BF diffèrent** par leur superficie et leur environnement immédiat (céréales, maïs, betteraves, routes). D'autre part, les relevés ont été effectués par **différents opérateurs**, malgré l'établissement d'un protocole standardisé pour homogénéiser les pratiques.

4.2. Jeu de données

Les richesses et abondances observées en 2025 sont quasiment toujours supérieures à celles des années précédentes, quel que soit le groupe fonctionnel et la pratique agricole considérés (Figure 18). Cela pourrait être lié aux conditions climatiques favorables aux arthropodes (hiver doux, printemps sec et ensoleillé) (Dumont *et al.*, 2025) ou à un échantillonnage plus efficace, grâce à la multiplication des répétitions spatiales (BF) et à une couverture temporelle plus large (AC).

La qualité d'échantillonnage est irrégulière à travers les guildes et les années. Si le taux de complétude est correct, voire idéal, en BF et en PF (82,2-100%), l'inventaire en monoculture F semble insuffisant (Annexe 8). Chao1 et ACE prédisent une richesse taxonomique bien supérieure, suggérant que la diversité des auxiliaires en F est probablement sous-estimée. Ce biais affecte potentiellement les comparaisons interannuelles et inter-pratiques, en particulier pour les guildes d'auxiliaires.

Les importantes fluctuations annuelles illustrent la nécessité d'un suivi régulier pluriannuel afin de distinguer les effets des pratiques agroécologiques des variations temporelles. Pour de futures campagnes, il serait judicieux d'adopter un effort d'échantillonnage standardisé suivant ces recommandations :

- Favoriser une large couverture temporelle, quitte à laisser les pièges inactifs entre deux relevés.
- Introduire des répétitions spatiales (3 répétitions en BF semblent insuffisantes)

- Conserver un effort d'échantillonnage important : en BF, l'effort de 2025 (54 jours) semble adapté, mais pour AC, 53 jours semblent insuffisants en monoculture F.

4.3. (Q1) Influence des pratiques sur les guildes

4.3.1. Messages principaux

Les AC ont significativement réduit les cécidomyies mais pas les pucerons du froment. Les BF semblent favoriser les ennemis naturels en début de saison, sans effet significatif clair sur les ravageurs. Bien qu'inattendus, la littérature confirme que de tels résultats ne sont pas rares en raison de la variabilité des conséquences de la diversification spatiale (Roschewitz *et al.*, 2005; Macfadyen *et al.*, 2009; Hatt *et al.*, 2018).

4.3.2. Associations culturelles

Les résultats indiquent une **absence de tendance générale** de l'effet des AC sur les groupes fonctionnels, tous taxons et années confondus (Tableaux 3 et 4). Comme observé dans d'autres études (Thies *et al.*, 2005; Alignier *et al.*, 2014; Tscharrntke *et al.*, 2016), la principale source de variation correspond aux écarts temporels (inter et intra-annuels) plutôt qu'aux pratiques culturelles. Les fortes fluctuations interannuelles traduisent une dépendance à des facteurs environnementaux externes : la vitesse du vent et les précipitations sont notamment défavorables au développement des pucerons (Engel *et al.*, 2022; Stell *et al.*, 2022). Les variations restent cependant majoritairement inexpliquées, masquant l'effet potentiel des pratiques agroécologiques.

Chez les **pucerons**, les abondances sont en moyenne supérieures en PF. Ce résultat a été observé aussi bien chez l'ensemble des pucerons des cultures (pucerons piégés : 41% supérieurs) que chez les pucerons spécifiques au froment (pucerons comptés : 99% supérieurs). Ces résultats semblent s'opposer à l'existence des mécanismes *bottom-up* qui réduiraient la colonisation des pucerons (dilution, barrière, camouflage). D'autant que deux arguments pourraient soutenir l'absence d'effet des AC sur la colonisation. Premièrement, les dynamiques temporelles saisonnières semblent similaires entre F et PF (Figures 22 et 23), suggérant que les AC modifient le niveau d'abondance moyen sans affecter les dynamiques de colonisation. Deuxièmement, en 2025, l'abondance des pucerons capturés (ailés) est particulièrement proche en F et PF (Figure 23), laissant supposer que les AC n'influencent pas le flux migratoire.

Ces résultats sont importants, d'autant plus que les individus ailés pourraient être à l'origine des infestations : les pics d'abondance des pucerons ailés (03/06) précèdent ceux des aptères (10/06). Ce rapide développement des populations intervient durant un épisode climatique favorable

(températures douces, précipitations réduites) (Annexe 29). Cette fenêtre coïncide avec la fin de floraison du froment et le début du stade aqueux (Z69-Z71) (Annexe 28), période de forte nuisibilité des pucerons des feuilles et des épis (De Proft, 2020).

La densité supérieure de pucerons en AC, bien que surprenante (Risch, 1983; Lopes *et al.*, 2016), est néanmoins évoquée dans la littérature. En effet, selon une revue d'environ 150 études, une réduction des herbivores n'est rapportée que dans 53% des cas, et une augmentation dans 18% des cas. Plusieurs mécanismes conjoints peuvent l'expliquer :

1. **Effet d'abri** offert par la structure complexe des PF, réduisant l'exposition aux prédateurs ou aux conditions environnementales extrêmes (Wratten, 1993; Hatt *et al.*, 2018).
2. **Absence d'effet top-down** significatif. Pour commencer, les ennemis ont une importance moindre dans les systèmes annuels : la colonisation imprévisible des plantes annuelles protège les ravageurs des prédateurs (Risch, 1983). De plus, l'établissement des ennemis peut être trop tardif, empêchant une pression suffisante dès l'émergence (Annexe 15), pourtant cruciale pour le biocontrôle des nuisibles (Welch *et al.*, 2014; Stell *et al.*, 2022).
3. Biais expérimentaux (section 4.1).

À l'inverse des pucerons, les **cécidomyies** sont moins abondantes en PF en fin de saison 2025, suggérant un rôle des AC dans la régulation de leur second pic d'abondance. Cette réduction pourrait s'expliquer par une régulation *bottom-up* ou un effet *top-down*, les AC favorisant potentiellement des ennemis naturels comme le parasitoïde *M. penetrans* (Shrestha *et al.*, 2023; Dufton *et al.*, 2024). Actuellement, les effets des AC sur *S. mosellana* demeurent peu documentés, des études sur d'autres cécidomyies ayant même conclu à une absence d'effet des AC (Brion, 2015; Hodgdon *et al.*, 2019). Alors qu'aujourd'hui le contrôle cultural de ce ravageur repose principalement sur l'utilisation de cultivars, de labour, de dates et de densités de semis stratégiques (Elliott *et al.*, 2009, 2011; Dufton *et al.*, 2024), les résultats obtenus suggèrent que les AC pourraient constituer un levier de lutte supplémentaire.

Ensuite, aucune influence significative des AC n'a été détectée sur l'abondance ou la diversité des **ennemis naturels** (captures et comptages), confirmant des travaux antérieurs sur les AC de froment (Lopes *et al.*, 2016). Ces résultats peuvent justifier l'absence d'effet *top-down* sur les pucerons, mentionnée précédemment. Parmi toutes les espèces, seul *M. mellinum* semble marquer une préférence pour les AC (Annexe 7). La présence de colonies de pucerons sur les adventices supplémentaires (Annexe 4) a pu favoriser l'installation de *M. mellinum*, dont la femelle

est facultativement aphidiphage, au même titre que la présence de coquelicot (*Papaver rhoeas*), lieu de ponte idéal pour cette espèce (Cowgill *et al.*, 1993).

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer l'absence d'effet sur les ennemis, malgré une présence de proies (pucerons) plus élevée en PF :

1. **Proximité géographique** des parcelles F et PF testées (adjacentes) permettant le passage des arthropodes, d'autant plus que l'étude cible des espèces ailées dotées d'une grande capacité de déplacement (Tscharntke *et al.*, 2005).
2. **Inadaptation des fleurs** de pois aux pièces buccales des ennemis nectarivores et pollinivores. En effet, les syrphes et les parasitoïdes ne sont pas attirés par les fleurs à corolle fermée (Colignon *et al.*, 2004a; Campbell *et al.*, 2012).
3. Disponibilité des ressources **non synchronisée** avec les besoins des auxiliaires.

Dans l'ensemble, les analyses montrent que les AC n'influencent jamais la diversité des guildes, seulement l'abondance de certains taxons (réduction des cécidomyies et promotion des pucerons). La dominance de la variabilité temporelle suggère que les communautés sont majoritairement régulées par des mécanismes indépendants du type de culture, probablement modulés par divers facteurs environnementaux.

4.3.3. Bandes fleuries 2025

Au sein des cultures, les groupes fonctionnels évoluent selon des schémas propres (Annexe 16). Les ennemis naturels et momies augmentent au cours de la saison, en cohérence avec la littérature (Sutherland *et al.*, 2001). L'augmentation des momies doit par ailleurs être interprétée avec précaution, celles-ci pouvant s'accumuler sur les plantes sans jamais se décrocher, ne reflétant donc pas une activité parasitaire récente.

La probabilité de présence et l'abondance moyenne des **ennemis naturels** dans le froment sont significativement plus élevées à 5 m qu'à 50 m des BF, particulièrement en début de saison (Annexes 19 et 20). La densité de momies, également supérieure à proximité des BF en début de saison, semble confirmer une activité parasitaire plus intense près des habitats floraux. Cela suggère que les BF facilitent une installation précoce des ennemis dans les cultures, un avantage pouvant être déterminant pour la régulation des pucerons (Sutherland *et al.*, 2001; Tscharntke *et al.*, 2016). L'atténuation des différences entre 5 m et 50 m en fin de saison est possiblement en lien avec la diminution des ressources disponibles dans les bandes ou la baisse des populations

de pucerons. Quoi qu'il en soit, ces données semblent confirmer l'effet positif des BF sur les ennemis dans les cultures adjacentes, détaillé précédemment dans la section 1.2.4.

L'effet bénéfique des BF varie selon le type d'ennemis naturel. En effet, si une différence marquée de densité entre bordure et centre de parcelle est observée chez les parasitoïdes, elle est plus ténue chez les prédateurs (Annexe 16). Cela pourrait s'expliquer par la différence de capacité de déplacement. Les parasitoïdes ne se déplaçant que sur de courtes distances, leur population décroît rapidement avec la distance à la BF (Tylianakis *et al.*, 2004; Tscharntke *et al.*, 2005). Cette même répartition spatiale est observée chez les chrysopes (Freeman Long *et al.*, 1998) et autres espèces écotones, qui colonisent les milieux culturels à partir des bordures, mais dont les densités sont faibles au cœur des champs (Tscharntke *et al.*, 2016). À l'inverse, des prédateurs tels que les syrphes, ubiquistes, peuvent se déplacer sur plusieurs centaines de mètres autour de la BF pour s'alimenter ou pondre (Freeman Long *et al.*, 1998; Tscharntke *et al.*, 2005). Les observations de 2025, bien que peu nombreuses, semblent confirmer cette différence entre espèces écotones et ubiquistes (Annexe 9).

Pourtant, malgré l'effet positif des BF sur les auxiliaires, aucune réduction significative de la pression des **ravageurs** n'est détectée entre les zones à 5 m et à 50 m. Cela rejoint les résultats contrastés de la littérature (Hickman *et al.*, 1996; Pywell *et al.*, 2015; Holland *et al.*, 2016; Blümel *et al.*, 2024). Les effets *top-down* des ennemis sont en effet souvent rares ou non détectés (González *et al.*, 2022). Parmi les cinq hypothèses proposées par Tscharntke *et al.* (2016) pour expliquer l'échec du biocontrôle dans un agroécosystème diversifié (Figure 33), les hypothèses (a), (c) et (e) semblent peu pertinentes ici car les BF abritent bien une communauté d'ennemis efficaces et aucun insecticide n'a été appliqué. Deux hypothèses demeurent alors :

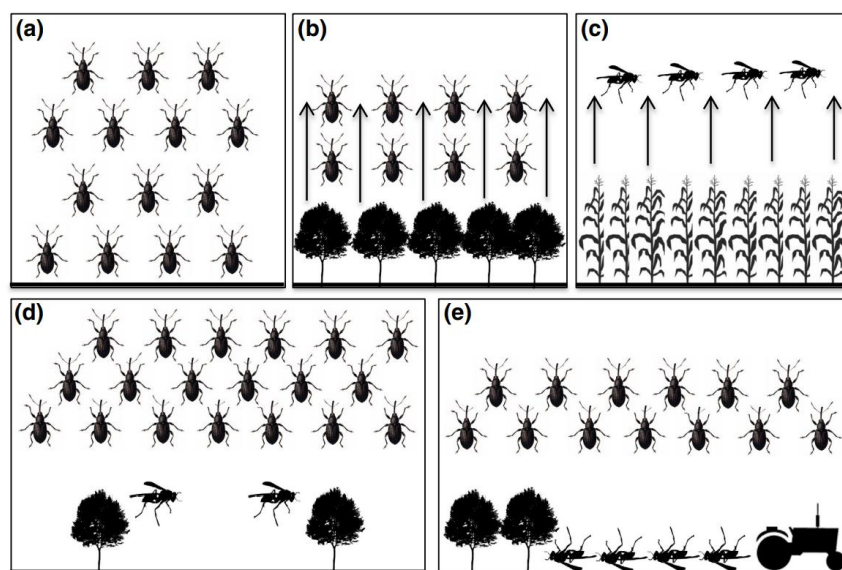


Figure 33 : Cinq hypothèses pour expliquer l'échec du biocontrôle : (a) les ravageurs n'ont pas d'ennemis efficaces dans la région, (b) la diversité naturelle agit comme une source de ravageurs plus que d'auxiliaires, (c) les cultures fournissent plus de ressources que la diversité naturelle, (d) la diversité naturelle est insuffisante (en quantité, proximité, composition ou configuration) pour supporter suffisamment les ennemis, et (e) les pratiques agricoles neutralisent l'attractivité pour les auxiliaires. Source : (Tscharntke et al., 2016).

(b) **La diversité comme source de ravageurs** : Les BF pourraient avoir favorisé simultanément la colonisation du froment d'hiver par les pucerons, compensant les pertes liées à la prédation (Thies et al., 2005, 2011). Cette hypothèse paraît cependant improbable, les espèces de pucerons du froment n'étant pas celles retrouvées dans les BF annuelles, et la colonisation via les BF repose sur l'hivernage des pucerons dans un habitat pérenne (Thies et al., 2005). De plus, certaines études montrent au contraire que la croissance des ravageurs répond négativement à la complexité paysagère (Chaplin-Kramer et al., 2011).

(d) **Diversité insuffisante** : La simple présence d'habitats naturels ne garantit pas le contrôle biologique (Thies et al., 1999; Martin et al., 2016; Tscharntke et al., 2016). À nouveau, certains arguments s'opposent à cette hypothèse. Pour commencer, alors qu'une diversité insuffisante est liée à des configuration et connectivité des habitats inadaptées (Tscharntke et al., 2016), les auxiliaires majoritaires (syrphes et coccinelles) sont peu influencés par la taille des zones fleuries en raison de leur mobilité (Sutherland et al., 2001). De plus, les effets d'une diversité insuffisante sont généralement visibles dans les parcelles éloignées (Lys et al., 1994; Chaplin-Kramer et al., 2011), alors que la présente étude se concentre précisément sur la zone d'influence immédiate des bandes. Cette explication ne semble donc pas entièrement satisfaisante non plus.

Si les hypothèses précédentes ne semblent pas fournir de justification complète, une autre idée pourrait alors être étudiée : l'existence d'un effet trop faible pour être détecté. L'observation des résultats semble soutenir cette idée. En effet, lors du pic de pucerons (second relevé), même si la différence n'est pas statistiquement significative, leur abondance est en moyenne 40% inférieure à proximité des bandes (Annexe 16). La présence d'ennemis en début de saison, phase cruciale du biocontrôle, pourrait alors avoir freiné le développement de ces populations de pucerons. Par ailleurs, les effets des habitats non cultivés sont fort variables et peuvent mettre plusieurs années à s'exprimer, les bénéfices sur le rendement n'étant par exemple généralement visibles que quatre ans après l'aménagement (Pywell *et al.*, 2015). Les fortes variations interannuelles, liées notamment aux phénomènes migratoires, compliquent l'interprétation sur une seule année (Sutherland *et al.*, 2001).

Enfin, l'absence de résultat significatif peut être liée aux limites du dispositif expérimental : La simple comparaison entre les populations à 5 m et 50 m pourrait avoir empêché de déceler un effet plus large des BF, l'influence des ennemis pouvant parfois être observée sur plusieurs centaines de mètres autour de la bande (Tscharntke *et al.*, 2005; Holland *et al.*, 2016).

Chacune des idées mentionnées apporte des éléments potentiels de réponses sans être complètement satisfaisante. Dans le futur, une comparaison interannuelle intégrant des champs témoins dans des écosystèmes non diversifiés permettrait d'approfondir ces hypothèses, et ainsi confirmer ou infirmer la tendance non significative observée.

4.4. (Q2) Liens entre ravageurs et ennemis

4.4.1. Messages principaux

L'étude des AC semble indiquer une relation densité dépendante positive entre ravageurs et ennemis ainsi qu'une corrélation négative entre l'abondance des pucerons et la diversité de leurs ennemis, tandis qu'aucun lien n'a été détecté entre les auxiliaires dans les BF et leurs proies dans les champs adjacents. Les **lacunes scientifiques** concernant la modélisation réaliste de ces interactions au cœur de la lutte biologique, déjà soulignées par Risch il y a 50 ans, persistent dans les travaux récents (Risch, 1983; Stell *et al.*, 2022).

4.4.2. Associations culturelles

Les résultats semblent montrer l'existence d'une influence de la densité des ravageurs sur la communauté d'ennemis. En effet, les paramètres des auxiliaires, qu'il s'agisse de leur (a) abondance, (b) richesse ou (c) diversité, sont directement corrélés à la densité des ravageurs

présents (Tableau 6). Ce lien semble également confirmé par les PERMANOVA, qui soulignent un effet structurant significatif de la densité de pucerons sur la composition des communautés d'auxiliaires (jusqu'à 14% de la variance). En revanche, les RDA non significatives suggèrent que cette relation est non linéaire et affectée par des facteurs abiotiques.

(a) L'analyse des données interannuelles suggère l'existence de corrélations fortement positives entre **abondances** de ravageurs et d'ennemis, confirmées par les données plus exhaustives de 2025 (Tableau 6). Bien que ce ne soit pas le cas dans la plupart des études (Welch *et al.*, 2014), une telle corrélation a déjà été observée dans des champs de froment (Ali *et al.*, 2012). Cette synchronisation des dynamiques suggère une **relation densité-dépendante**, dans laquelle la disponibilité en proies favorise l'abondance des prédateurs. Cependant, le lien unissant ravageurs et ennemis peut également être indirect, des facteurs explicatifs indépendants pouvant entraîner des conséquences similaires dans les deux groupes (comme des conditions climatiques favorables).

(b) La **richesse** des ennemis n'est pas corrélée à celle des pucerons, mais croît fortement avec l'abondance des autres ravageurs ($\rho = 0,681$, ***). Le développement de ces ravageurs plus rares pourrait possiblement attirer d'autres espèces de prédateurs, notamment généralistes, expliquant l'augmentation de richesse.

(c) La **diversité** des auxiliaires (Hill 1 et Hill 2) est corrélée négativement à la densité des pucerons comptés sur le froment, mais positivement à la densité du reste des ravageurs du froment. Cette spécialisation avec l'augmentation des pucerons peut s'interpréter de deux façons :

- Soit l'augmentation du nombre de pucerons entraîne une homogénéisation de la communauté d'ennemis en profitant à quelques espèces efficaces et bien adaptées. Cela pourrait permettre une meilleure régulation, l'équitabilité des ennemis ayant un effet négatif sur la lutte biologique (Dainese *et al.*, 2019). À l'inverse, l'augmentation de la communauté des ravageurs hors pucerons, variée, favorise une plus grande diversité d'ennemis, moins spécifiques.
- Soit l'augmentation de la diversité des ennemis favorise la régulation des pucerons, expliquant la réduction de leur densité et soutenant ainsi que la complémentarité de l'action des différents ennemis entraîne un effet synergique sur les ravageurs (Thies *et al.*, 2011; Gontijo *et al.*, 2015; Alhadidi *et al.*, 2018). La composition des ennemis pourrait d'ailleurs jouer un rôle plus important que leur richesse dans la suppression des pucerons (Alhadidi *et al.*, 2018).

Enfin, si la communauté d'auxiliaires est potentiellement liée à l'abondance des ravageurs, les résultats montrent que la principale source de variation reste le facteur temporel. En effet, la PCoA montre que la **variation temporelle** structure l'essentiel des communautés : les périodes phénologiques sont clairement distinguables tandis que l'influence des pratiques agricoles l'est nettement moins (Annexe 23). La variation temporelle explique effectivement près de 36 % de la variance totale (PERMANOVA). Cette évolution temporelle pourrait refléter la succession saisonnière des taxons dominants (parasitoïdes, anthocorides, syrphes, etc.), réagissant différemment aux conditions climatiques et à la disponibilité en proies.

4.4.3. Bandes fleuries

Bien que l'abondance, la richesse et la dominance des ennemis aient un effet positif reconnu sur la régulation des ravageurs (Dainese *et al.*, 2019), aucun lien n'a été détecté entre ces indices et la densité des pucerons observés à proximité des BF. La PERMANOVA confirme cette absence d'influence, même non linéaire, des pucerons sur la structure des communautés d'ennemis. Plusieurs hypothèses peuvent l'expliquer :

1. **Faible nombre et espacement des réplifications temporelles** (3 relevés espacés de 2 semaines), pouvant limiter la détection des nuances des dynamiques communautaires.
2. **Décalage temporel entre les guildes**, les variations de densité des ravageurs et de leurs ennemis n'étant pas toujours synchrones (Welch *et al.*, 2014; Engel *et al.*, 2022).
3. Présence d'**autres facteurs (a)biotiques** (stade phénologique du blé, conditions météorologiques, structure florale) pouvant davantage structurer les guildes. Les variations environnementales, comme la température et les précipitations, peuvent notamment les paramètres écologiques des espèces et la synchronicité de leurs dynamiques (Engel *et al.*, 2022; Stell *et al.*, 2022).

4.5. (Q3) Disponibilité des ressources et ennemis

En 2025, les BF représentent une source potentielle de nectar/pollen pour les adultes et de proies alternatives pour les stades entomophages. En effet, lors du second relevé, la couverture moyenne dépasse 80% et des pucerons sont présents sur une grande majorité des plantes (Figures 29 et 31). Malgré cela, l'abondance et la diversité des ennemis ne semblent corrélées ni avec la quantité de ressources florales (QRF), ni avec la quantité de proies alternatives (QRP). Les PERMANOVA révèlent toutefois un effet faible mais significatif des ressources sur la composition de la guildes. Cet effet modeste pourrait alors suggérer que des caractères qualitatifs (morphologie, phénologie, diversité taxonomique des fleurs) sont plus décisifs que la simple abondance de ressource pour

soutenir les auxiliaires. Malgré tout, ces résultats limités sont cohérents avec la variabilité des effets des ressources alternatives rapportée dans une méta-analyse (Stell *et al.*, 2022), même si certains travaux font état de relations prédateurs-densité florale positive (Sutherland *et al.*, 2001; González *et al.*, 2022; Blümel *et al.*, 2024).

Si les résultats concernant l'influence des ressources se révèlent limités, l'examen attentif des données fournit plusieurs renseignements notables, bien que subsidiaires :

- *Variabilité du couvert floral* : Malgré les floraisons décalées des fleurs semées, la qualité de la couverture est très variable dans le temps. La moutarde, le radis et le sarrasin dominant rapidement le couvert floral et sont attractifs pour syrphes et parasitoïdes (Colley *et al.*, 2000; Campbell *et al.*, 2012). La vesce et le tournesol, plus tardifs, supportent la couverture florale en fin de période.
- *Statut particulier de la vesce* : La morphologie florale des légumineuses comme la vesce complique l'accès au nectar et au pollen pour de nombreux auxiliaires (Colley *et al.*, 2000; Colignon *et al.*, 2004a). Des effets négatifs des fabacées sur les chrysopes ont également été reportés (Blümel *et al.*, 2024). La vesce se distingue néanmoins par son attractivité pour le puceron de la vesce (*Megoura viciae* Buckton), présent sur 90% des plantes dans le second relevé et conservant ce taux pour le troisième (Figure 31 et 34).
- *Réponse décalée* : La croissance de la population d'auxiliaires s'intensifie à partir du second relevé (Annexe 20), pouvant alors suggérer un décalage temporel de leur réponse à la disponibilité des ressources. Dans ce cas, les ressources pourraient donc favoriser le maintien et le développement de leurs populations.



Figure 34 : Tige de vesce envahie de pucerons au sein d'une BF de 2025 (©T. Soenens)

Ces observations soulignent l'importance de concevoir des BF à floraison échelonnée dans le temps et intégrant des plantes hébergeant des pucerons non nuisibles, afin de maintenir ressources florales et des proies attractives pour les aphidiphages. Le choix des espèces semées est ainsi crucial, d'autant plus que la composition des BF influence habituellement l'abondance des ennemis, chaque plante possédant un potentiel d'attractivité distinct (Blümel *et al.*, 2024). Même si elle demeure faible, l'influence structurante des ressources sur les communautés d'ennemis laisse envisager une influence à plus long terme. La disponibilité des ressources pourrait ainsi renforcer la régulation biologique à l'échelle paysagère.

4.6. Rentabilité

La rentabilité des pratiques agroécologiques dépend des coûts et bénéfices en termes de rendement et d'économies sur les insecticides (Tschumi *et al.*, 2015). À ceux-ci s'ajoutent des avantages indirects, sans gains financiers immédiats mais apportant une stabilité économique sur le long terme. La diversification du paysage agricole soutient en effet de nombreux services écosystémiques : pollinisation, résilience écologique, fertilité des sols, accès aux nutriments/à la lumière, régulation de l'érosion et avantage esthétique (Tscharncke *et al.*, 2012; Aziz *et al.*, 2015; Hatt *et al.*, 2018).

4.6.1. Associations culturales

Selon la littérature, les AC ont généralement un effet positif sur le rendement, bien que des effets neutres ou négatifs aient été rapportés (Risch, 1983; Aziz *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2016). Le design joue un rôle déterminant : l'ajout de plantes sans remplacer la culture principale est généralement bénéfique, contrairement aux designs substitutifs qui ont un effet négatif (également vrai pour les BF) (Letourneau *et al.*, 2011). Par ailleurs, une augmentation de rendement n'est pas nécessairement due à une meilleure régulation des ravageurs, mais peut être explicable par d'autres facteurs : amélioration de l'utilisation des nutriments, du contrôle des adventices, de la disponibilité en eau ou de la structure du sol (Risch, 1983).

En 2025 à Gembloux, le froment pur a montré un rendement légèrement supérieur à l'AC (9,75 vs 9,32 t/ha) (données non publiées, Ferme Expérimentale GXABT ASBL, 2025), sans qu'un lien direct puisse être établi avec la présence de ravageurs. Aucune corrélation n'a en effet été démontrée entre le rendement et le nombre de ravageurs en AC (Lopes *et al.*, 2016). Ces résultats sont comparables à ceux du CePiCOP sur la période 2022-2025 à Gembloux (Vannoppen *et al.*, 2023). En outre, à densité de semis égale, la proportion de froment et de pois varie fortement d'une année à l'autre (de 6 à 68%), et l'année 2025 a été très favorable au pois (Vannoppen *et*

al., 2023). La prédominance du pois en 2025 pourrait ainsi expliquer le maintien des rendements en AC malgré une infestation de pucerons plus importante des froment associés.

Le calcul de la rentabilité ne se limite cependant pas aux rendements, et doit notamment faire intervenir les économies sur les insecticides (Tschumi *et al.*, 2015). À titre indicatif, en Wallonie, les traitements phytopharmaceutiques représentent environ 266 €/ha pour le froment d'hiver en 2024, soit près de la moitié des charges opérationnelles ("Froment d'hiver - Etat de l'Agriculture Wallonne," March-13-2026). Pour un prix de vente du froment variant entre 160 et 200 €/tonne en 2025 (SPW, 2026), toute économie sur ces intrants revêt une importance économique non négligeable.

Sans oublier que le pois protéagineux améliore les stocks d'azote organique des sols par fixation bactérienne, se traduisant souvent par une augmentation de la productivité (Rodriguez *et al.*, 2020; Cartrysse *et al.*, 2024), et que l'association de pois au froment entraîne des rendements plus avantageux via une utilisation plus optimale des ressources (Willey, 1979), ainsi qu'une réduction importante de la densité de puceron vert du pois, *Acyrtosiphon pisum* (Harris) (Lopes *et al.*, 2015). De plus, dans certains cas, la culture de pois et la réduction d'intrants peuvent donner accès à des subventions publiques (SPW, February-27-2026e).

Dès lors, il n'est pas possible d'établir avec certitude les conséquences économiques des AC sur base des seules données de 2025.

4.6.2. Bandes fleuries

Des travaux menés en Angleterre montrent que convertir jusqu'à 8% des terres en bordure des parcelles cultivées en habitats naturels ne réduit pas le rendement global du froment (Pywell *et al.*, 2015) : ces zones marginales, moins productives (-10%) en raison de la compaction du sol, la compétition pour l'eau et la lumière, et la pression accrue des ravageurs, peuvent ainsi être transformées en habitats sans perte de rendement, notamment grâce au biocontrôle qui s'en retrouve favorisé (Pywell *et al.*, 2015). Les BF offrent une alternative fonctionnelle aux insecticides, en particulier dans les systèmes à faible intrants, et sont d'autant plus avantageuses quand elles sont soutenues financièrement par des politiques agro-environnementales (Tschumi *et al.*, 2015).

Tableau 7 : Analyse économique coûts/bénéfices des surfaces de BF en comparaison aux surfaces cultivées en 2025.

Composantes économiques des BF	Coûts/Bénéfices
Perte de production (en considérant un rendement du froment de 9.75 t/ha, un prix de vente du froment de 180 €/tonne et une réduction de la production de 10% en zone marginale)	-1535,625 €/ha
Charges opérationnelles installation bande fleuries (CRA-W, 2026)	-300 €/ha
Economie sur les charges opérationnelles des cultures de froment ("Froment d'hiver - Etat de l'Agriculture Wallonne," March-13-2026)	600 €/ha
Subventions minimales éco-régime (SPW, October-5-2025b)	900 €/ha
Bilan provisoire	-335,625 €/ha

En 2025, une bande fleurie génère donc environ 335 €/ha de moins qu'une surface cultivée en froment (ou environ 115 €/ha de plus en cas de majoration des subsides) (Tableau 7). Pour être économiquement bénéfique, le gain apporté par une BF sur les terres adjacentes doit au moins compenser cette perte. Ce gain, qu'il provienne d'une réduction de la pression des ravageurs ou d'une diminution des frais d'insecticides, varie selon la proportion de terrain agricole occupée par la BF (Tableau 8).

Tableau 8 : Seuils de rentabilité des BF en 2025 selon la proportion de terrain agricole occupé.

Surface BF	Gain minimal requis (€/ha de culture)	Équivalent en production de froment
1%	3,35 €/ha	18,6 kg/ha
5%	16,75 €/ha	93 kg/ha
10%	33,50 €/ha	186 kg/ha

5. Contribution personnelle de l'étudiant

Ce travail a été conduit dans le cadre du projet Adopt-IPM, au sein de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Les objectifs ont été définis en concertation avec les encadrants du laboratoire d'entomologie (A. Segers, G. Noël).

L'étudiant T. Soenens a assuré la collecte de données entre fin avril et début juillet 2025, dans six parcelles agricoles à proximité de la faculté : les deux cultures relatives à l'étude des AC ainsi que dans quatre des neuf BF échantillonnées en 2025. L'étudiant a ensuite réalisé le tri des échantillons et l'identification des insectes collectés en 2025 (AC : 11 514 individus ; BF : 670 individus), avec l'aide de G. Noël pour l'identifications spécifique de l'ensemble des *Apoidea*. Une détermination taxonomique plus fine a été effectuée sur les insectes de 2023 et 2024, initialement identifiés au niveau familial, notamment pour 935 individus déterminés à l'espèce ou morpho-espèce. Enfin, les analyses statistiques (Excel, RStudio) et la rédaction du présent document ont été réalisées par l'étudiant.

6. Conclusion

Ce travail visait à étudier l'influence des AC pois-froment et des BF sur la communauté d'arthropodes en analysant (1) l'influence de chaque pratique sur l'abondance et la diversité des guildes, (2) les relations entre ravageurs et leurs ennemis dans ces contextes et (3) l'effet des ressources disponibles dans les bandes sur les ennemis.

(1) Concernant les AC, aucun effet n'a été détecté sur la diversité des ravageurs. Les AC ont toutefois influencé l'abondance de deux taxons considérés isolément : (a) Les AC semblent réguler le second pic de **cécidomyies**, phénomène actuellement peu documenté et méritant des études d'approfondissement ciblées sur *S. mosellana* et ses parasitoïdes. (b) Les AC ont favorisé les populations de **pucerons**, sans pour autant sembler modifier leurs dynamiques de colonisation/extinction. L'absence d'effet positif sur la régulation des pucerons, bien que minoritaire dans la littérature, reste courant et peut s'expliquer par un effet d'abri ou une régulation peu efficace par les prédateurs. Les AC n'ont en effet montré aucun effet sur les **ennemis naturels** : ni sur leur abondance ni sur leur diversité.

Du côté des BF, une augmentation significative de l'abondance des **ennemis** et une activité **parasitaire** accrue ont été détectées à 5 m des bandes en début de saison 2025. Cet effet n'a néanmoins pas entraîné de réduction détectable de la pression des ravageurs, les BF abritant potentiellement une diversité insuffisante ou source de ravageurs. Cette absence d'effet pourrait également résulter d'une faille expérimentale : les zones à 50 m, considérées comme témoins, pourraient avoir aussi bénéficié de l'effet des prédateurs mobiles. Des études intégrant des cultures totalement exemptes de BF comme témoins permettraient de tester cette hypothèse et d'évaluer l'effet à l'échelle paysagère.

(2) L'analyse des interactions ravageurs-ennemis en AC semble indiquer que la densité des ravageurs structure les communautés d'ennemis : une relation densité-dépendante positive est relevée entre les deux groupes, la richesse des ennemis croît avec la densité des ravageurs différents des pucerons, et une faible abondance des ravageurs est associée à une plus forte diversité chez les ennemis. Les interactions ravageurs-ennemis qui sous-tendent le biocontrôle étant peu documentées, ces résultats constituent une piste méritant d'être approfondie.

(3) Les ressources disponibles dans les **BF influencent faiblement** la structure et la composition de la communauté d'ennemis. Comme l'attractivité des bandes fleuries pour les ennemis adultes ne garantit pas un service de régulation, il est nécessaire de cibler des ennemis efficaces. Il est donc crucial d'adapter la composition des bandes à chaque situation en ciblant des taxons ou espèces clés.

Il faut rappeler que, au-delà de la rentabilité économique immédiate, l'introduction de diversité dans le paysage agricole soutient de nombreux services écosystémiques de régulation (pollinisation, fertilité des sols, résilience écologique), bénéfiques sur le long terme à la fois pour l'environnement, la stabilité des rendements et la santé humaine. Cette étude n'a pas pu mettre en lumière tous les bénéfices des pratiques intégrées, qui s'inscrivent généralement dans une perspective sur une grande échelle temporelle et spatiale.

Enfin, la principale limite de cette étude découle de la difficulté d'expérimenter en conditions réelles : Les fortes fluctuations annuelles liées à des facteurs externes et les biais imprévisibles sont difficilement quantifiables et limitent la portée des conclusions. Cette complexité souligne la nécessité de répliquer de telles expérimentations dans des contextes similaires mais également éloignés, dans le but d'identifier les tendances généralisables. Des pistes pour des études complémentaires ont été évoquées dans ce travail : Instaurer un suivi pluriannuel avec protocole standardisé, intégrer des parcelles témoins exemptes de BF, approfondir l'étude des interactions ravageurs-ennemis et des effets spécifiques sur *S. mosellana* en AC, etc. La compilation de nouvelles données au sein de méta-analyses permettra de construire une vision d'ensemble plus robuste. Les projets collaboratifs internationaux comme Adopt-IPM jouent ainsi un rôle crucial en mutualisant les efforts de recherche, une nécessité pour révéler pleinement le potentiel des pratiques intégrées dans la régulation des ravageurs.

7. Bibliographie

- A.A.Yattara A. & Francis F., 2013. Impact des méthodes de piégeage sur l'efficacité de surveillance des pucerons: illustration dans les champs de pommes de terre en Belgique. *Entomol. Faun. - Faun. Entomol.*
- Adjei F., 2025. Pesticides in modern agriculture: Assessing health effects, risk perception and policy implications for safer food systems. *World J. Adv. Res. Rev.* **27**(1), 1119–1129, DOI:10.30574/wjarr.2025.27.1.2623.
- Akbar M., Aleem K., Sandu K., Shamoan F., Fatima T., Ehsan M. & Shaukat F., 2023. A Mini Review on Insect Pests of Wheat and Their Management Strategies. *Int. J. Agric. Biosci.* **12**(2), 110–115, DOI:10.47278/journal.ijab/2023.052.
- Alarcón-Segura V., Grass I., Breustedt G., Rohlf M. & Tschardt T., 2022. Strip intercropping of wheat and oilseed rape enhances biodiversity and biological pest control in a conventionally managed farm scenario. *J. Appl. Ecol.* **59**(6), 1513–1523, DOI:10.1111/1365-2664.14161.
- Alhadidi S.N., Griffin J.N. & Fowler M.S., 2018. Natural enemy composition rather than richness determines pest suppression. *BioControl* **63**(4), 575–584, DOI:10.1007/s10526-018-9870-z.
- Alhmedi A., Francis F., Bodson B. & Haubruge E., 2006. Étude de la diversité des pucerons et des auxiliaires aphidiphages relatives à la présence d'ortie à Gembloux. *Notes Fauniques Gembloux 2006 59 2* 121–124 *Univ. Liege Belg.* **59**, 121–124.
- Ali A., Malik H., Noor-ul-Islam, Sumaira R., Saleem M. & Mushtaq-ul-Hassan, 2012. arietal variation in population of aphids and their predators in wheat. *J. Agric. Food Res.*
- Alignier A., Raymond L., Deconchat M., Menozzi P., Monteil C., Sarthou J.-P., Vialatte A. & Ouin A., 2014. The effect of semi-natural habitats on aphids and their natural enemies across spatial and temporal scales. *Biol. Control* **77**, 76–82, DOI:10.1016/j.biocontrol.2014.06.006.
- Altieri M.A. & Letourneau D.K., 1982a. Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Prot.* **1**(4), 405–430, DOI:10.1016/0261-2194(82)90023-0.
- Altieri M.A. & Letourneau D.K., 1982b. Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Prot.* **1**(4), 405–430, DOI:10.1016/0261-2194(82)90023-0.
- Altieri M.A. & Nicholls C.I., 2005. *Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture*, Mexico D.F., Mexico: United Nations Environmental Programme, Environmental Training Network for Latin America and the Caribbean.
- Altieri M.A., Nicholls C.I., de Molina M.G. & Rojas A.S., 2024. Landscape Agroecology: Methodologies and Applications for the Design of Sustainable Agroecosystems. *Land* **13**(11), 1746, DOI:10.3390/land13111746.
- Ameixa O. & Kindlmann P., 2008. Agricultural policy-induced landscape changes: Effects on carabid abundance and their biocontrol potential. *Eur. J. Entomol.* **105**, 467–476, DOI:10.14411/eje.2008.060.
- Ashraf M., Hussain D., Hussain S., Din N., Ali Q., Shah Jahan M., Yasin M. & Farooq M., 2024. Potential of two entomopathogenic fungi, *Beauveria bassiana* and *metarhizium anisopliae* as biocontrol agents of *Rhopalosiphum padi* and *Shizaphis graminum*, (Homoptera: Aphididae) in laboratory and field. *Int. J. Trop. Insect Sci.* **44**(1), 307–312, DOI:10.1007/s42690-024-01160-5.
- Aziz M., Mahmood A., Asif M. & Ali A., 2015. Wheat-based intercropping A review. *J. Anim. Plant Sci.* **25**, 896–907.

Balasubramani V. & Swamiappan M., 1994. Development and feeding potential of the green lacewing *Chrysoperla carnea* Steph. (Neur. Chrysopidae) on different insect pests of cotton. *Anz. Für Schädlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz* **67**(8), 165–167, DOI:10.1007/BF01905539.

Balzan M.V. & Moonen A., 2014. Field margin vegetation enhances biological control and crop damage suppression from multiple pests in organic tomato fields. *Entomol. Exp. Appl.* **150**(1), 45–65, DOI:10.1111/eea.12142.

Barbosa P. (Ed.), 1998. *Conservation biological control*, San Diego: Academic Press, 396.

Bellifa M. & Chapelin-Viscardi J.-D., 2021. Synthesis of the interactions between the European species of the genus *Bruchus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) and their natural enemies. *Ann. Société Entomol. Fr. NS* **57**(3), 189–204, DOI:10.1080/00379271.2021.1927180.

Blümel S., Beule L., Bissantz N., Kirchner W.H. & Haberlah-Korr V., 2024. Taxon-specific response of natural enemies to different flower strip mixtures. *J. Appl. Ecol.* **61**(10), 2405–2417, DOI:10.1111/1365-2664.14761.

Boivin G., Hance T. & Brodeur J., 2012. Aphid parasitoids in biological control. *Can. J. Plant Sci.* **92**(1), 1–12, DOI:10.4141/cjps2011-045.

Brion G.L., 2015. Swede Midge, *Contarinia Nasturtii* (diptera: Cecidomyiidae), Response To Brassica Oleracea In Simulated Intercropping Systems.

Brown B.J. & Ewel B.J., 1987. Herbivory in complex and simple tropical successional ecosystems. *Ecol. Publ. Ecol. Soc. Am.* **68**.

CABI, 2019. *Agriotes lineatus* (wireworm).

CABI, 2021. *Dolerus*. *CABI Compend.* **CABI Compendium**, 19459, DOI:10.1079/cabicompendium.19459.

Campbell A.J., Biesmeijer J.C., Varma V. & Wäckers F.L., 2012. Realising multiple ecosystem services based on the response of three beneficial insect groups to floral traits and trait diversity. *Basic Appl. Ecol.* **13**(4), 363–370, DOI:10.1016/j.baae.2012.04.003.

Carcamo H.A., Herle C.E. & Lupwayi N.Z., 2015. *Sitona lineatus* (Coleoptera: Curculionidae) Larval Feeding on *Pisum sativum* L. Affects Soil and Plant Nitrogen. *J. Insect Sci.* **15**(1), 74–74, DOI:10.1093/jisesa/iev055.

Carmona M., Sautua F., Pérez-Hernández O. & Reis E.M., 2020. Role of Fungicide Applications on the Integrated Management of Wheat Stripe Rust. *Front. Plant Sci.* **11**, DOI:10.3389/fpls.2020.00733.

Cartrysse C., Van der Verren B., Vannoppen N., Silvestre P., Champion M. & Wavreille J., 2024. Le pois protéagineux : Une légumineuse à graines riches en protéines et en énergie. Seconde édition. (Livret informatif), CePiCOP asbl - CRA-W.

Cassar T., 2015. *Rhagonycha fulva* (Scopoli), a new record of soldier beetle (Coleoptera, Cantharidae) from Malta DOI:10.17387/BULLENTSOCMALTA.2015.15.

CE D.-G. for A. and R.D. (European C., 2023. *Farmer's toolbox for integrated pest management: final report*, Publications Office of the European Union.

Censier F., De Proft M. & Bodson B., 2015. The saddle gall midge, *Haplodiplosis marginata* (von Roser) (Diptera: Cecidomyiidae): Population dynamics and integrated management. *Crop Prot.* **78**, 137–145, DOI:10.1016/j.cropro.2015.09.002.

- Chao A., 1984. Nonparametric Estimation of the Number of Classes in a Population. *Scand. J. Stat.* **11**(4), 265–270.
- Chao A. & Lee S.-M., 1992. Estimating the Number of Classes via Sample Coverage. *J. Am. Stat. Assoc.* **87**(417), 210–217, DOI:10.1080/01621459.1992.10475194.
- Chaplin-Kramer R., O'Rourke M.E., Blitzer E.J. & Kremen C., 2011. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecol. Lett.* **14**(9), 922–932, DOI:10.1111/j.1461-0248.2011.01642.x.
- Chen L., Shi Y., Wang K., Sun Y. & Hao Y., 2024. Morphology of the Mouthparts of Ladybeetle *Vibidia duodecimguttata* (Coleoptera: Coccinellidae), with Emphasis on Their Sensilla. *Insects* **15**, 854, DOI:10.3390/insects15110854.
- Cherin P., Voronska E., Fraoucene N. & De Jaeger C., 2012. Toxicité aiguë des pesticides chez l'homme. *Médecine Longévité* **4**(2), 68–74, DOI:10.1016/j.mlong.2012.05.003.
- Colignon P., Francis F., Fadeur G. & Haubruge E., 2004a. Aménagement de la composition floristique des mélanges agri-environnementaux afin d'augmenter les populations d'insectes auxiliaires. *Parasitica* **60**(3–4).
- Colignon P., Francis F., Fadeur G. & Haubruge E., 2004b. Aménagement de la composition floristique des mélanges agri-environnementaux afin d'augmenter les populations d'insectes auxiliaires **60**, 3–43.
- Colignon P., Haubruge E., Hastir P., Gaspar C. & Francis F., 2001. Effet de l'environnement proche sur la biodiversité entomologique en culture maraîchères de plein champ.
- Colley M.R. & Luna J.M., 2000. Relative Attractiveness of Potential Beneficial Insectary Plants to Aphidophagous Hoverflies (Diptera: Syrphidae). *Environ. Entomol.* **29**(5), 1054–1059, DOI:10.1603/0046-225X-29.5.1054.
- Cowgill S.E., Wratten S.D. & Sotherton N.W., 1993. The effect of weeds on the numbers of hoverfly (Diptera: Syrphidae) adults and the distribution and composition of their eggs in winter wheat. *Ann. Appl. Biol.* **123**(3), 499–515, DOI:10.1111/j.1744-7348.1993.tb04922.x.
- CRA-W, 2026. Jachères & bande bordure de champ Eco-régime 143 : Maillage écologique, Centre wallon de Recherches agronomiques.
- Császár O., Tóth F. & Lajos K., 2021. Estimation of the expected maximal defoliation and yield loss caused by cereal leaf beetle (*Oulema melanopus* L.) larvae in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Crop Prot.* **145**, 105644, DOI:10.1016/j.cropro.2021.105644.
- Dainese M., Martin E.A., Aizen M.A., Albrecht M., Bartomeus I., Bommarco R., Carvalheiro L.G., Chaplin-Kramer R., Gagic V., Garibaldi L.A., Ghazoul J., Grab H., Jonsson M., Karp D.S., Kennedy C.M., Kleijn D., Kremen C., Landis D.A., Letourneau D.K., Marini L., Poveda K., Rader R., Smith H.G., Tscharrntke T., Andersson G.K.S., Badenhausser I., Baensch S., Bezerra A.D.M., Bianchi F.J.J.A., Boreux V., Bretagnolle V., Caballero-Lopez B., Cavigliasso P., Četković A., Chacoff N.P., Classen A., Cusser S., Da Silva E Silva F.D., De Groot G.A., Dudenhöffer J.H., Ekroos J., Fijen T., Franck P., Freitas B.M., Garratt M.P.D., Gratton C., Hipólito J., Holzschuh A., Hunt L., Iverson A.L., Jha S., Keasar T., Kim T.N., Kishinevsky M., Klatt B.K., Klein A.-M., Krewenka K.M., Krishnan S., Larsen A.E., Lavigne C., Liere H., Maas B., Mallinger R.E., Martinez Pachon E., Martínez-Salinas A., Meehan T.D., Mitchell M.G.E., Molina G.A.R., Nesper M., Nilsson L., O'Rourke M.E., Peters M.K., Plečaš M., Potts S.G., Ramos D.D.L., Rosenheim J.A., Rundlöf M., Rusch A., Sáez A., Scheper J., Schleuning M., Schmack J.M., Sciligo A.R., Seymour C., Stanley D.A., Stewart R., Stout J.C., Sutter L.,

Takada M.B., Taki H., Tamburini G., Tschumi M., Viana B.F., Westphal C., Willcox B.K., Wratten S.D., Yoshioka A., Zaragoza-Trello C., Zhang W., Zou Y. & Steffan-Dewenter I., 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Sci. Adv.* **5**(10), eaax0121, DOI:10.1126/sciadv.aax0121.

De Proft M., 2011. Protection contre les ravageurs - février 2011 (Livre blanc), Livre Blanc Céréales.

De Proft M., 2020. Protection contre les ravageurs - février 2020 (Livre blanc), Livre Blanc Céréales.

Dendoncker N., Boeraeve F., Crouzat E., Dufrêne M., König A. & Barnaud C., 2018. How can integrated valuation of ecosystem services help understanding and steering agroecological transitions? *Ecol. Soc.* **23**(1), art12, DOI:10.5751/ES-09843-230112.

Dice L.R., 1945. Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology* **26**(3), 297–302, DOI:10.2307/1932409.

Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2009. , OJ L.

Dufton S.V., Jorgensen A.M., Olfert O.O. & Otani J.K., 2024. *Sitodiplosis mosellana* (Géhin), Orange Wheat Blossom Midge / Cécidomyie du blé (Diptera: Cecidomyiidae). In: Vankosky, M.A., Martel, V. eds. *Biological Control Programmes in Canada, 2013-2023*. GB: CABI, 359–366.

Dufton S.V., Olfert O.O., Laird R.A., Floate K.D., Ge X. & Otani J.K., 2022. A global review of orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae), and integrated pest management strategies for its management. *Can. Entomol.* **154**(1), e30, DOI:10.4039/tce.2022.15.

Dumont B. & Henriët F., 2023. Livre Blanc Céréales - Septembre 2023 (Livre blanc No. Édition Septembre 2023), Livre Blanc Céréales, Gembloux Agro-Bio Tech, CRA-W Gembloux.

Dumont B. & Henriët F., 2024. Livre Blanc Céréales - Septembre 2024 (Livre blanc No. Édition Septembre 2024), Livre Blanc Céréales, Gembloux Agro-Bio Tech, CRA-W Gembloux.

Dumont B. & Henriët F., 2025. Livre Blanc Céréales - Septembre 2025 (Livre blanc No. Édition Septembre 2025), Livre Blanc Céréales, Gembloux Agro-Bio Tech, CRA-W Gembloux.

El-Heneidy A., 2004. Biological aspects and life table analysis of cereal aphid species and their parasitoid *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Aphidiidae). *Egypt. J. Pest Control*.

Elliott B., Olfert O. & Hartley S., 2011. Management practices for wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin). *Insects Dis.* **4**.

Elliott R.H., Mann L. & Olfert O., 2009. Calendar and degree-day requirements for emergence of adult wheat midge, *Sitodiplosis mosellana* (Géhin) (Diptera: Cecidomyiidae) in Saskatchewan, Canada. *Crop Prot.* **28**(7), 588–594, DOI:10.1016/j.cropro.2009.03.005.

Engel E., Lau D., Godoy W.A.C., Pasini M.P.B., Malaquias J.B., Santos C.D.R., Pivato J. & Pereira P.R.V.D.S., 2022. Oscillation, synchrony, and multi-factor patterns between cereal aphids and parasitoid populations in southern Brazil. *Bull. Entomol. Res.* **112**(2), 143–150, DOI:10.1017/S0007485321000729.

European Research Executive Agency, 2022. Grant Agreement Project 101060430 — ADOPT-IPM.

Evans H.F., Moraal L.G. & Pajares J.A., 2007. Biology, Ecology and Economic Importance of Buprestidae and Cerambycidae. In: Lieutier, F., Day, K.R., Battisti, A., Grégoire, J.-C., Evans, H.F. eds. *Bark and Wood Boring Insects in Living Trees in Europe, a Synthesis*. Dordrecht: Springer Netherlands, 447–474.

Evenson R.E. & Gollin D., 2003. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science* **300**(5620), 758–762, DOI:10.1126/science.1078710.

Finch S. & Collier R. h., 2000. Host-plant selection by insects – a theory based on ‘appropriate/inappropriate landings’ by pest insects of cruciferous plants. *Entomol. Exp. Appl.* **96**(2), 91–102, DOI:10.1046/j.1570-7458.2000.00684.x.

Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O’Connell C., Ray D.K., West P.C., Balzer C., Bennett E.M., Carpenter S.R., Hill J., Monfreda C., Polasky S., Rockström J., Sheehan J., Siebert S., Tilman D. & Zaks D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* **478**(7369), 337–342, DOI:10.1038/nature10452.

Forsythe T.G., 1983. Mouthparts and feeding of certain ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Zool. J. Linn. Soc.* **79**(4), 319–376, DOI:10.1111/j.1096-3642.1983.tb01170.x.

Franin K., Barić B. & Kuštera G., 2016. The role of ecological infrastructure on beneficial arthropods in vineyards. *Span. J. Agric. Res.* **14**, e0303, DOI:10.5424/sjar/2016141-7371.

Freeman Long R., Corbett A., Lamb C., Reberg-Horton C., Chandler J. & Stimmann M., 1998. Beneficial insects move from flowering plants to nearby crops. *Calif. Agric.* **52**(5), 23–26, DOI:10.3733/ca.v052n05p23.

Froment d’hiver - Etat de l’Agriculture Wallonne, March-13-2026. . https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-C_III_b_2.html, (13/03/2026).

Giffard B., Winter S., Guidoni S., Nicolai A., Castaldini M., Cluzeau D., Coll P., Cortet J., Le Cadre E., d’Errico G., Forneck A., Gagnarli E., Griesser M., Guernion M., Lagomarsino A., Landi S., Bissonnais Y.L., Mania E., Mocali S., Preda C., Priori S., Reineke A., Rusch A., Schroers H.-J., Simoni S., Steiner M., Temneanu E., Bacher S., Costantini E.A.C., Zaller J. & Leyer I., 2022. Vineyard Management and Its Impacts on Soil Biodiversity, Functions, and Ecosystem Services. *Front. Ecol. Evol.* **10**, DOI:10.3389/fevo.2022.850272.

Gilbert F., 2015. Naturalists’ handbooks. 5: Hoverflies.

Giller K.E., Beare M.H., Lavelle P., Izac A.-M.N. & Swift M.J., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function. *Appl. Soil Ecol.* **6**(1), 3–16, DOI:10.1016/S0929-1393(96)00149-7.

Gonget H., 1997. . In: The Brentidae (Coleoptera) of Northern Europe. BRILL, 34–38.

Gontijo L.M., Beers E.H. & Snyder W.E., 2015. Complementary suppression of aphids by predators and parasitoids. *Biol. Control* **90**, 83–91, DOI:10.1016/j.biocontrol.2015.06.002.

González E., Bianchi F.J.J.A., Eckerter P.W., Pfaff V., Weiler S. & Entling M.H., 2022. Ecological requirements drive the variable responses of wheat pests and natural enemies to the landscape context. *J. Appl. Ecol.* **59**(2), 444–456, DOI:10.1111/1365-2664.14062.

Gullan P.J. & Cranston P.S., 2014. *The insects: an outline of entomology*, Chichester: Wiley Blackwell, 595.

Güllü M., Gözüağık C. & Konuksal A., 2024. Wheat Insect Pests. In: Zencirci, N., Altay, F., Baloch, F.S., Nadeem, M.A., Ludidi, N. eds. *Advances in Wheat Breeding*. Singapore: Springer Nature Singapore, 391–451.

Gültekin L. & Korotyaev B.A., 2012. Ecological Description of Two Seed-Feeding Weevils of the Genus *Mononychus* Germar (Coleoptera: Curculionidae) on *Iris iberica* Hoffmann and *Iris spuria* L. in Northeastern Turkey. *Coleopt. Bull.* **66**(2), 155–161, DOI:10.1649/072.066.0213.

Guo W., Li C., Ahemaiti T., Jiang W., Li G., Jiahe W. & Fu K., 2017. Colorado Potato Beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Say). 195–217.

- Gurr G.M., Wratten S.D. & Luna J.M., 2003. Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic Appl. Ecol.* **4**(2), 107–116, DOI:10.1078/1439-1791-00122.
- Haaland C., Naisbit R.E. & Bersier L.-F., 2011. Sown wildflower strips for insect conservation: a review: Wildflower strips for insect conservation. *Insect Conserv. Divers.* **4**(1), 60–80, DOI:10.1111/j.1752-4598.2010.00098.x.
- Han P., Lavoie A.-V., Rodriguez-Saona C. & Desneux N., 2022. Bottom-Up Forces in Agroecosystems and Their Potential Impact on Arthropod Pest Management. *Annu. Rev. Entomol.* **67**(1), 239–259, DOI:10.1146/annurev-ento-060121-060505.
- Haris A., 1995. Further data on the food-choice of Wheat-sawflies (*Dolerus* spp., Hymenoptera, Tenthredinidae). *Acta Phytopathol. Entomol. Hung.* **30**, 255–263.
- Hastir P. & Gaspar C., 2002. Les « richards » (Coleoptera – Buprestidae) de la faune de Belgique : éthologie, phénologie, classification et systématique. *In: Notes Fauniques de Gembloux.* 3–40.
- Hatt S., 2017a. Spatial diversification of agroecosystems towards biological control of insect pests: A focus on intercropping and wildflower strips.
- Hatt S., Boeraeve F., Artru S., Dufrene M. & Francis F., 2018. Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: An agroecological perspective. *Sci. Total Environ.* **621**, 600–611, DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.11.296.
- Hatt S. & Döring T.F., 2024. The interplay of intercropping, wildflower strips and weeds in conservation biological control and productivity. *J. Pest Sci.* DOI:10.1007/s10340-024-01801-1.
- Hatt S., Uyttenbroeck R., Bodson B., Piqueray J., Monty A. & Francis F., 2015. Des bandes fleuries pour la lutte biologique : état des lieux, limites et perspectives en Wallonie – Une synthèse bibliographique. *Entomol. Faun. - Faun. Entomol.*
- Hatt S., Uyttenbroeck R., Lopes T., Mouchon P., Chen J., Piqueray J., Monty A. & Francis F., 2017. Do flower mixtures with high functional diversity enhance aphid predators in wildflower strips? *Eur. J. Entomol.* **114**, 66–76, DOI:10.14411/eje.2017.010.
- Hatt S.M.M., 2017b. Spatial diversification of agroecosystems towards biological control of insect pests: A focus on intercropping and wildflower strips. *BIO TECH.*
- Hickman J.M. & Wratten S.D., 1996. Use of *Phelia tanacetifolia* Strips To Enhance Biological Control of Aphids by Overfly Larvae in Cereal Fields. *J. Econ. Entomol.* **89**(4), 832–840, DOI:10.1093/jee/89.4.832.
- Hill M.O., 1973. Diversity and Evenness: A Unifying Notation and Its Consequences. *Ecology* **54**(2), 427–432, DOI:10.2307/1934352.
- Hodek I. & Evans E.W., 2012. Food Relationships. *In: Hodek, I., Van Emden, H.F., Honěk, A. eds. Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae).* Wiley, 141–274.
- Hodgdon E.A., Chen Y.H., Hoepting C.A. & Hallett R. h., 2019. Organic Management of Swede Midge. *Univ. Vt.*
- Hoffmann A., 1950. *Coléoptères Curculionides, Part 1*, Faune de France, Fédération Française des Sociétés de Sciences Naturelles, 486.
- Holland J.M., Bianchi F.J., Entling M.H., Moonen A., Smith B.M. & Jeanneret P., 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Manag. Sci.* **72**(9), 1638–1651, DOI:10.1002/ps.4318.

- Honek A., Martinkova Z., Saska P. & Dixon A.F.G., 2018. Aphids (Homoptera: Aphididae) on Winter Wheat: Predicting Maximum Abundance of *Metopolophium dirhodum*. *J. Econ. Entomol.* **111**(4), 1751–1759, DOI:10.1093/jee/toy157.
- Hurka K. & Jarosik V., 2003. Larval omnivory in *Amara aenea* (Coleoptera: Carabidae). *Eur. J. Entomol.* **100**, 329–335, DOI:10.14411/eje.2003.052.
- Jaccard P., 1901. Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura. *Bull. Société Vaudoise Sci. Nat.* **37**(142), 547, DOI:10.5169/seals-266450.
- Jessop L., 1986. Dung Beetles & chafers. In: *Coleoptera: Scarabaeoidea.*, Handbooks for the Identification of British Insects. 56.
- Jolivet P., Petitpierre E. & Hsiao T.H. (Eds.), 1988. *Biology of Chrysomelidae*, Dordrecht: Springer Netherlands.
- Jørgensen H.B. & Toft S., 1997. Role of granivory and insectivory in the life cycle of the carabid beetle *Amara similata*. *Ecol. Entomol.* **22**(1), 7–15, DOI:10.1046/j.1365-2311.1997.00045.x.
- Jørgensen L., Nielsen G., Ørum J.E. & Noe E., 2009. Controlling cereal disease with reduced agrochemical inputs, a challenge for both growers and advisors.
- Kennedy J.S., Booth C.O. & Kershaw W.J.S., 1961. Host finding by aphids in the field: III. Visual attraction. *Ann. Appl. Biol.* **49**(1), 1–21, DOI:10.1111/j.1744-7348.1961.tb03587.x.
- Khan J., Javed H.I., Mahmood T., Rasool A., Akhtar N. & Abid S., 2013. Biological parameters and predatory potential of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) feeding on wheat aphid *Schizaphis graminum* (Homiptera: Aphididae) under laboratory conditions. *Pak. J. Agric. Res.*
- Khan Z.R., Ampong-Nyarko K., Chiliswa P., Hassanali A., Kimani S., Lwande W., Overholt W.A., Overholt W.A., Picketta J.A., Smart L.E. & Woodcock C.M., 1997. Intercropping increases parasitism of pests. *Nature* **388**(6643), 631–632, DOI:10.1038/41681.
- Kheirodin A., Costamagna A.C. & Cárcamo H.A., 2019. Laboratory and field tests of predation on the cereal leaf beetle, *Oulema melanopus* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Biocontrol Sci. Technol.* **29**(5), 451–465, DOI:10.1080/09583157.2019.1566437.
- Kieckhefer R.W. & Gellner J.L., 1992. Yield Losses in Winter Wheat Caused by Low-Density Cereal Aphid Populations. *Agron. J.* **84**(2), 180–183, DOI:10.2134/agronj1992.00021962008400020011x.
- Koch R., 2003. The multicolored Asian lady beetle, *Harmonia axyridis*: A review of its biology, uses in biological control, and non-target impacts. *J. Insect Sci.* **3**, DOI:10.1093/jis/3.1.32.
- Kozlov M.V., Prosvirov A.S. & Zvereva E.L., 2020. Can Larvae of Forest Click Beetles (Coleoptera: Elateridae) Feed on Live Plant Roots? *Insects* **11**(12), 850, DOI:10.3390/insects11120850.
- Kröber T. & Carl K., 1991. Cereal aphids and their natural enemies in Europe-a literature review. *Biocontrol News Inf.* **12**(4), 357–371.
- Kulkarni S., Dosdall L. & Willenborg C., 2015. The Role of Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae) in Weed Seed Consumption: A Review. *Weed Sci.* **63**, 150304133636004, DOI:10.1614/WS-D-14-00067.1.
- Landis D.A., Wratten S.D. & Gurr G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annu. Rev. Entomol.* **45**, 175–201, DOI:10.1146/annurev.ento.45.1.175.
- Langellotto G.A. & Denno R.F., 2004. Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. *Oecologia* **139**(1), 1–10, DOI:10.1007/s00442-004-1497-3.

- Larochelle A. & Québec A. des entomologistes amateurs du, 1990. *The Food of Carabid Beetles: (coleoptera: Carabidae, Including Cicindelinae)*, Association des entomologistes amateurs du Québec, 132.
- Legalov A., 2005. Trophic Links of Leaf-Rolling Weevils (Coleoptera, Rhynchitidae and Attelabidae).
- Leroy J., Chapelin-Viscardi J.-D., GENSON G., Haran J., Pierre É. & Streito J.-C., 2020. Distinct barcodes for the Cereal leaf beetles *Oulema melanopus* and *Oulema duftschmidi* (Coleoptera: Chrysomelidae), two syntopical sibling species. *Eur. J. Entomol.* **117**, 490–503, DOI:10.14411/eje.2020.052.
- Letourneau D.K., Armbrrecht 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. & Trujillo A.R., 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecol. Appl.* **21**(1), 9–21, DOI:10.1890/09-2026.1.
- Levidow L., Pimbert M. & Vanloqueren G., 2014. Agroecological Research: Conforming—or Transforming the Dominant Agro-Food Regime? *Agroecol. Sustain. Food Syst.* **38**(10), 1127–1155, DOI:10.1080/21683565.2014.951459.
- Li C., Hoffland E., Kuyper T.W., Yu Y., Zhang C., Li H., Zhang F. & Van Der Werf W., 2020. Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nat. Plants* **6**(6), 653–660, DOI:10.1038/s41477-020-0680-9.
- Liu T.-X. & Chen X.-X., 2025. Biological Control of Aphids in China: Successes and Prospects. *Annu. Rev. Entomol.* **70**(1), 401–419, DOI:10.1146/annurev-ento-121423-012130.
- Liu Y., Erwin T.L. & Yang X., 2018. Mordellidae (Coleoptera) Research: A Review Based on the Zoological Record from 1864 through 2013. *Insects* **9**(3), 113, DOI:10.3390/insects9030113.
- Livre Blanc Céréales, March-13-2026. . <https://livre-blanc-cereales.be/>, (13/03/2026).
- Lopes T., Bodson B. & Francis F., 2015. Associations of Wheat with Pea Can Reduce Aphid Infestations. *Neotrop. Entomol.* **44**(3), 286–293, DOI:10.1007/s13744-015-0282-9.
- Lopes T., Hatt S., Xu Q., Chen J., Liu Y. & Francis F., 2016a. Wheat (*Triticum aestivum* L.)-based intercropping systems for biological pest control: Wheat-based intercropping for biological control. *Pest Manag. Sci.* **72**(12), 2193–2202, DOI:10.1002/ps.4332.
- Lopes T., Hatt S., Xu Q., Chen J., Liu Y. & Francis F., 2016b. Wheat (*Triticum aestivum* L.)-based intercropping systems for biological pest control. *Pest Manag. Sci.* **72**(12), 2193–2202, DOI:10.1002/ps.4332.
- Macfadyen S., Gibson R., Polaszek A., Morris R.J., Craze P.G., Planqué R., Symondson W.O.C. & Memmott J., 2009. Do differences in food web structure between organic and conventional farms affect the ecosystem service of pest control? *Ecol. Lett.* **12**(3), 229–238, DOI:10.1111/j.1461-0248.2008.01279.x.
- Majerus M.E.N. (Ed.), 2016. What Ladybirds Eat. In: *A Natural History of Ladybird Beetles*. Cambridge: Cambridge University Press, 86–121.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tourdonnet S. & Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **29**(1), 43–62, DOI:10.1051/agro:2007057.
- Marcon E., 2025. Mesures de la Biodiversité.

Marshall E.J.P., Brown V.K., Boatman N.D., Lutman P.J.W., Squire G.R. & Ward L.K., 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Res.* **43**(2), 77–89, DOI:10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x.

Martin E.A., Seo B., Park C., Reineking B. & Steffan-Dewenter I., 2016. Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields. *Ecol. Appl.* **26**(2), 448–462, DOI:10.1890/15-0856.

McIntosh R.P., 1967. An Index of Diversity and the Relation of Certain Concepts to Diversity. *Ecology* **48**(3), 392–404, DOI:10.2307/1932674.

Michaud J.P., 2012. Coccinellids in Biological Control. In: Hodek, I., Van Emden, H.F., Honěk, A. eds. *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae)*. Wiley, 488–519.

Moreno C.E. & Rodríguez P., 2010. A consistent terminology for quantifying species diversity? *Oecologia* **163**(2), 279–282, DOI:10.1007/s00442-010-1591-7.

Motyka M., Kusy D., Biffi G., Geiser M., Kazantsev S.V., Bilkova R., Jahodarova E., Vogler A.P. & Bocak L., 2023. Untangling the evolution of soldier beetles (Coleoptera: Cantharidae) and the evaluation of the morphological phylogenetic signal in a soft-bodied elateroid lineage. *Cladistics* **39**(6), 548–570, DOI:10.1111/cla.12555.

Mundt C.C., Sackett K.E. & Wallace L.D., 2011. Landscape heterogeneity and disease spread: experimental approaches with a plant pathogen. *Ecol. Appl.* **21**(2), 321–328, DOI:10.1890/10-1004.1.

Neculiseanu Z., 2020. Checklist of the clown beetles (Coleoptera, Histeridae) from the Republic of Moldova. *Trav. Muséum Natl. D'Histoire Nat. "Grigore Antipa"* **63**(1), 69–78, DOI:10.3897/travaux.63.e48000.

Nicholls C.I. & Altieri M.A., 2013. Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **33**(2), 257–274, DOI:10.1007/s13593-012-0092-y.

Noël G., 2023. Leverages of floral and nesting resources on foraging ecology and community structure of pollinators throughout disturbed landscapes. *Impact des ressources florales et de nidification sur l'écologie de butinage et la structure des communautés des pollinisateurs à travers des paysages perturbés*.

Norris R.F. & Kogan M., 2005. Ecology of interactions between weeds and arthropods. *Annu. Rev. Entomol.* **50**(1), 479–503, DOI:10.1146/annurev.ento.49.061802.123218.

Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* **144**(1), 31–43, DOI:10.1017/S0021859605005708.

Ogenga-Latigo M.W., Ampofo J.K.O. & Baliddawa C.W., 1992. Influence of maize row spacing on infestation and damage of intercropped beans by the bean aphid (*Aphis fabae* Scop.). I. Incidence of aphids. *Field Crops Res.* **30**(1–2), 111–121, DOI:10.1016/0378-4290(92)90060-M.

Olfert O., Elliott R.H. & Hartley S., 2009. Non-native insects in agriculture: strategies to manage the economic and environmental impact of wheat midge, *Sitodiplosis mosellana*, in Saskatchewan. *Biol. Invasions* **11**(1), 127–133, DOI:10.1007/s10530-008-9324-0.

Omkar O. & Pervez A., 2005. Ecology of two-spotted ladybird, *Adalia bipunctata*: A review. *J. Appl. Entomol.* **129**, 465–474, DOI:10.1111/j.1439-0418.2005.00998.x.

ONU U.N.D. of E. and S.A., 2025. *World Population Prospects 2024: summary of results*, S.I.: UNITED NATIONS.

- Ortiz-Martínez S., Pierre J.-S., Van Baaren J., Le Lann C., Zepeda-Paulo F. & Lavandero B., 2019. Interspecific competition among aphid parasitoids: molecular approaches reveal preferential exploitation of parasitized hosts. *Sci. Rep.* **9**(1), 19641, DOI:10.1038/s41598-019-56187-3.
- Ouyang F., Su W., Zhang Y., Liu X., Su J., Zhang Q., Men X., Ju Q. & Ge F., 2020. Ecological control service of the predatory natural enemy and its maintaining mechanism in rotation-intercropping ecosystem via wheat-maize-cotton. *Agric. Ecosyst. Environ.* **301**, 107024, DOI:10.1016/j.agee.2020.107024.
- Parolin P., Bresch C., Desneux N., Brun R., Bout A., Boll R. & Poncet C., 2012. Secondary plants used in biological control: A review. *Int. J. Pest Manag.* **58**(2), 91–100, DOI:10.1080/09670874.2012.659229.
- Parolin P., Bresch C., Poncet C. & Desneux N., 2012. Functional characteristics of secondary plants for increased pest management. *Int. J. Pest Manag.* **58**(4), 369–377, DOI:10.1080/09670874.2012.734869.
- Pearse A., 1980. Seeds of plenty, seeds of want: social and economic implications of the green revolution, Oxford: Clarendon Pr, 262.
- Perrin R.M. & Phillips M.L., 1978. SOME EFFECTS OF MIXED CROPPING ON THE POPULATION DYNAMICS OF INSECT PESTS. *Entomol. Exp. Appl.* **24**(3), 585–593, DOI:10.1111/j.1570-7458.1978.tb02820.x.
- Pervez A. & Omkar O., 2011. Ecology of aphidophagous ladybird Propylea species: A review. *J. Asia-Pac. Entomol. - J ASIA-PAC ENTOMOL* **14**, 357–365, DOI:10.1016/j.aspen.2011.01.001.
- Pinstrup-Andersen P. & Hazell P.B.R., 1985. The impact of the green revolution and prospects for the future. *Food Rev. Int.* **1**(1), 1–25, DOI:10.1080/87559128509540765.
- Plath M., Dorn S., Riedel J., Barrios H. & Mody K., 2012. Associational resistance and associational susceptibility: specialist herbivores show contrasting responses to tree stand diversification. *Oecologia* **169**(2), 477–487, DOI:10.1007/s00442-011-2215-6.
- Postel S., 1987. *Defusing the toxics threat: controlling pesticides and industrial waste*, Worldwatch paper, Washington, D.C.: Worldwatch Institute, 69.
- Poveda K., Gómez M.I. & Martínez E., 2008. Diversification practices: their effect on pest regulation and production. *Rev. Colomb. Entomol.* **34**(2), 131–144, DOI:10.25100/socolen.v34i2.9269.
- Pywell R.F., Heard M.S., Woodcock B.A., Hinsley S., Ridding L., Nowakowski M. & Bullock J.M., 2015. Wildlife-friendly farming increases crop yield: evidence for ecological intensification. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **282**(1816), 20151740, DOI:10.1098/rspb.2015.1740.
- Qayyum A., Al Ayoubi S., Sher A., Bibi Y., Ahmad S., Shen Z. & Jenks M.A., 2021. Improvement in drought tolerance in bread wheat is related to an improvement in osmolyte production, antioxidant enzyme activities, and gaseous exchange. *Saudi J. Biol. Sci.* **28**(9), 5238–5249, DOI:10.1016/j.sjbs.2021.05.040.
- Rand T.A., Tylianakis J.M. & Tscharntke T., 2006. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecol. Lett.* **9**(5), 603–614, DOI:10.1111/j.1461-0248.2006.00911.x.
- Redlich S., Martin E.A. & Steffan-Dewenter I., 2018. Landscape-level crop diversity benefits biological pest control. *J. Appl. Ecol.* **55**(5), 2419–2428, DOI:10.1111/1365-2664.13126.
- Risch S.J., 1983. Intercropping as cultural pest control: Prospects and limitations. *Environ. Manage.* **7**(1), 9–14, DOI:10.1007/BF01867035.
- Robinson R.A. & Sutherland W.J., 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *J. Appl. Ecol.* **39**(1), 157–176, DOI:10.1046/j.1365-2664.2002.00695.x.

Rodriguez C., Carlsson G., Englund J.-E., Flöhr A., Pelzer E., Jeuffroy M.-H., Makowski D. & Jensen E.S., 2020. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. *Eur. J. Agron.* **118**, 126077, DOI:10.1016/j.eja.2020.126077.

Roger J.-L., Jambon O. & Bouger G., 2013. Clé de détermination des Carabides. Paysages agricoles du Nord-Ouest de la France.

Rogers C.E., Jackson H.B., Angalet G.W. & Eikenbary R.D., 1972. Biology and Life History of *Propylea 14-punctata* (Coleoptera: Coccinellidae), an Exotic Predator of Aphids,. *Ann. Entomol. Soc. Am.* **65**(3), 648–650, DOI:10.1093/aesa/65.3.648.

Root R.B., 1973. Organization of a Plant-Arthropod Association in Simple and Diverse Habitats: The Fauna of Collards (Brassica Oleracea). *Ecol. Monogr.* **43**(1), 95–124, DOI:10.2307/1942161.

Roschewitz I., Hücker M., Tscharntke T. & Thies C., 2005. The influence of landscape context and farming practices on parasitism of cereal aphids. *Agric. Ecosyst. Environ.* **108**(3), 218–227, DOI:10.1016/j.agee.2005.02.005.

Roth M., 1963. Comparaisons de méthodes de capture en écologie entomologique. *Rev. Pathol. Végétale Entomol. Agric. Fr.* **42**(3), 178–197.

Russell E.P., 1989. Enemies Hypothesis: A Review of the Effect of Vegetational Diversity on Predatory Insects and Parasitoids. *Environ. Entomol.* **18**(4), 590–599, DOI:10.1093/ee/18.4.590.

Safarzoda S., Bahlai C.A., Fox A.F. & Landis D.A., 2014. The Role of Natural Enemy Foraging Guilds in Controlling Cereal Aphids in Michigan Wheat. *PLoS ONE* **9**(12), e114230, DOI:10.1371/journal.pone.0114230.

Saleem S., Farooq M.O., Razaq M., Hatt S. & Shah F.M., 2025. Wheat intercropping with canola promotes biological control of aphids by enhancing enemy diversity. *Biol. Control* **200**, 105677, DOI:10.1016/j.biocontrol.2024.105677.

Samu F., Szita É., Simon J., Cséplő M., Botos E., Pertics B., Růžicková J., Gerstenbrand R., Rakszegi M., Elek Z., Vida G. & Tholt G., 2024. Cereal leaf beetle (*Oulema* spp.) damage reduces yield and is more severe when natural enemy action is prevented. *Crop Prot.* **185**, 106893, DOI:10.1016/j.cropro.2024.106893.

Schmid R.B., Knutson A., Giles K.L. & McCornack B.P., 2018. Hessian Fly (Diptera: Cecidomyiidae) Biology and Management in Wheat. *J. Integr. Pest Manag.* **9**(1), DOI:10.1093/jipm/pmy008.

Schmidt M.H., Lauer A., Purtauf T., Thies C., Schaefer M. & Tscharntke T., 2003. Relative importance of predators and parasitoids for cereal aphid control. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **270**(1527), 1905–1909, DOI:10.1098/rspb.2003.2469.

Shannon C.E., 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* **27**(3), 379–423, DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Shanower T. & Hoelmer K., 2004. Biological control of wheat stem sawflies: Past and future. *J. Agric. Urban Entomol.* **21**, 197–221.

Sharma A., Sharma S. & Yadav P.K., 2023. Entomopathogenic fungi and their relevance in sustainable agriculture: A review. *Cogent Food Agric.* **9**(1), 2180857, DOI:10.1080/23311932.2023.2180857.

Shrestha G. & Reddy G.V.P., 2023. Wheat midge (*Sitodiplosis mosellana*): management in the Northern Great Plains of the United States and Canada. In: Oregon State University, USA, Southern Insect

Management Research Unit, USA eds. *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, 79–92.

Simpson E.H., 1949. Measurement of Diversity. *Nature* **163**(4148), 688–688, DOI:10.1038/163688a0.

Sørensen T., 1948. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitude in Plant Sociology Based on Similarity of Species Content: And Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons, Munksgaard in Komm., 34.

Southwood T. & Henderson P., 2000. *Ecological Methods 3rd edition*.

Spellerberg I.F. & Fedor P.J., 2003. A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon–Wiener' Index. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **12**(3), 177–179, DOI:10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x.

SPW, October-5-2025a. BCAA 8 Maintien des particularités topographiques et interdiction de tailler les haies et les arbres en période de nidification et de reproduction des oiseaux (Nouveauté 2025) - Portail de l'agriculture wallonne. *Agric. En Wallonie*. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/conditionnalite-renforcee-nouveaute-2025/bcae-8-part-minimale-de-terres-arables-consacree-a-des-surfaces-et-des-elements-non-productifs-nouveaute-2024.html>, (05/10/2025).

SPW, October-5-2025b. Eco-régime maillage écologique (Nouveauté 2025) - Portail de l'agriculture wallonne. *Agric. En Wallonie*. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/eco-regimes-nouveaute-2025/eco-regime-maillage-ecologique-nouveaute-2025.html>, (05/10/2025).

SPW, November-24-2025c. Régions agricoles de Wallonie. *Etat Agric. Wallonie*. https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A_I_d_2.html, (24/11/2025).

SPW, 2026. Prix de marché officiels belges Céréales - Bourse de Bruxelles.

SPW, February-27-2026d. Soutien couplé aux cultures de protéines végétales (Nouveauté 2026) - Portail de l'agriculture wallonne. *Agric. En Wallonie*. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/soutien-couple/soutien-couple-aux-cultures-de-proteines-vegetales.html>, (27/02/2026).

SPW, February-27-2026e. Pac 2023-2027 - Description des interventions. *Agric. En Wallonie*. <https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions.html>, (27/02/2026).

SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, 2025. Nouvelle Politique Agricole Commune 2023 - 2027 Comment remplir la déclaration de superficie en 2025? Manuel d'aide.

Stell E., Meiss H., Lasserre-Joulin F. & Therond O., 2022. Towards Predictions of Interaction Dynamics between Cereal Aphids and Their Natural Enemies: A Review. *Insects* **13**(5), 479, DOI:10.3390/insects13050479.

Sunderland K.D. & Vickerman G.P., 1980. Aphid Feeding by Some Polyphagous Predators in Relation to Aphid Density in Cereal Fields. *J. Appl. Ecol.* **17**(2), 389–396, DOI:10.2307/2402334.

Sutherland A. & Parrella M., 2009a. Mycophagy in Coccinellidae: Review and synthesis. *Biol. Control* **51**, 284–293, DOI:10.1016/j.biocontrol.2009.05.012.

Sutherland A. & Parrella M., 2009b. Biology and Co-Occurrence of *Psyllobora vigintimaculata taedata* (Coleoptera: Coccinellidae) and Powdery Mildews in an Urban Landscape of California. *Ann. Entomol. Soc. Am.* **102**, 484–491, DOI:10.1603/008.102.0319.

Sutherland J.P., Sullivan M.S. & Poppy G.M., 2001. Distribution and abundance of aphidophagous hoverflies (Diptera: Syrphidae) in wildflower patches and field margin habitats. *Agric. For. Entomol.* **3**(1), 57–64, DOI:10.1046/j.1461-9563.2001.00090.x.

Svatopluk B., 2002. Summary of the bionomy of the Buprestid beetles of Central Europe (Coleoptera: Buprestidae), Acta Entomologica Musei Nationalis Pragae.

Symondson W.O.C., Sunderland K.D. & Greenstone M.H., 2002. Can Generalist Predators be Effective Biocontrol Agents? *Annu. Rev. Entomol.* **47**(1), 561–594, DOI:10.1146/annurev.ento.47.091201.145240.

Talarico F., Giglio A., Pizzolotto R. & Brandmayr P., 2016. A synthesis of feeding habits and reproduction rhythm in Italian seed-feeding ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *EurJ Entomol* **113**, 325–336, DOI:10.14411/eje.2016.042.

Tenhumberg B. & Poehling H.-M., 1995. Syrphids as natural enemies of cereal aphids in Germany: Aspects of their biology and efficacy in different years and regions. *Agric. Ecosyst. Environ.*, Augmentation and Enhancement of Aphidophaga **52**(1), 39–43, DOI:10.1016/0167-8809(94)09007-T.

Thies C., Haenke S., Scherber C., Bengtsson J., Bommarco R., Clement L.W., Ceryngier P., Dennis C., Emmerson M., Gagic V., Hawro V., Liira J., Weisser W.W., Winqvist C. & Tscharntke T., 2011. The relationship between agricultural intensification and biological control: experimental tests across Europe. *Ecol. Appl.* **21**(6), 2187–2196, DOI:10.1890/10-0929.1.

Thies C., Roschewitz I. & Tscharntke T., 2005. The landscape context of cereal aphid–parasitoid interactions. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **272**(1559), 203–210, DOI:10.1098/rspb.2004.2902.

Thies C. & Tscharntke T., 1999. Landscape Structure and Biological Control in Agroecosystems. *Science* **285**(5429), 893–895, DOI:10.1126/science.285.5429.893.

Thomas C.F.G. & Jepson P.C., 1997. Field-scale effects of farming practices on linyphiid spider populations in grass and cereals. *Entomol. Exp. Appl.* **84**(1), 59–69, DOI:10.1046/j.1570-7458.1997.00198.x.

Tilman D., Balzer C., Hill J. & Belfort B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108**(50), 20260–20264, DOI:10.1073/pnas.1116437108.

Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R. & Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418**(6898), 671–677, DOI:10.1038/nature01014.

Tonhasca A. & Byrne D.N., 1994. The effects of crop diversification on herbivorous insects: a meta-analysis approach. *Ecol. Entomol.* **19**(3), 239–244, DOI:10.1111/j.1365-2311.1994.tb00415.x.

Traugott M., 2003. The prey spectrum of larval and adult *Cantharis* species in arable land: An electrophoretic approach. *Pedobiologia* **47**(2), 161–169, DOI:10.1078/0031-4056-00179.

Traugott M., Benefer C.M., Blackshaw R.P., Van Herk W.G. & Vernon R.S., 2015a. Biology, Ecology, and Control of Elaterid Beetles in Agricultural Land. *Annu. Rev. Entomol.* **60**(1), 313–334, DOI:10.1146/annurev-ento-010814-021035.

Traugott M., Benefer C.M., Blackshaw R.P., Van Herk W.G. & Vernon R.S., 2015b. Biology, Ecology, and Control of Elaterid Beetles in Agricultural Land. *Annu. Rev. Entomol.* **60**(1), 313–334, DOI:10.1146/annurev-ento-010814-021035.

- Trenbath B.R., 1993. Intercropping for the management of pests and diseases. *Field Crops Res.* **34**(3–4), 381–405, DOI:10.1016/0378-4290(93)90123-5.
- Triltsch H., 2013. Food remains in the guts of *Coccinella septempunctata*(Coleoptera: Coccinellidae) adults and larvae. *EJE* **96**(4), 355–364.
- Tscharntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T.O., Kleijn D., Rand T.A., Tylianakis J.M., Nouhuys S.V. & Vidal S., 2007a. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol. Control* **43**(3), 294–309, DOI:10.1016/j.biocontrol.2007.08.006.
- Tscharntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T.O., Kleijn D., Rand T.A., Tylianakis J.M., Nouhuys S.V. & Vidal S., 2007b. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale. *Biol. Control* **43**(3), 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. & Zhang W., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control – Five hypotheses. *Biol. Conserv.* **204**, 449–458, DOI:10.1016/j.biocon.2016.10.001.
- Tscharntke T., Rand T.A. & Bianchi F., 2005. The landscape context of trophic interactions: Insect spillover across the crop-noncrop interface. *Ann. Zool. Fenn.* **42** 2005 **42**.
- Tscharntke T., Tylianakis J.M., Rand T.A., Didham R.K., Fahrig L., Batáry P., Bengtsson J., Clough Y., Crist T.O., Dormann C.F., Ewers R.M., Fründ J., Holt R.D., Holzschuh A., Klein A.M., Kleijn D., Kremen C., Landis D.A., Laurance W., Lindenmayer D., Scherber C., Sodhi N., Steffan-Dewenter I., Thies C., Van Der Putten W.H. & Westphal C., 2012. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biol. Rev.* **87**(3), 661–685, DOI:10.1111/j.1469-185X.2011.00216.x.
- Tschumi M., Albrecht M., Entling M.H. & Jacot K., 2015. High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **282**(1814), 20151369, DOI:10.1098/rspb.2015.1369.
- Tylianakis J.M., Didham R.K. & Wratten S.D., 2004. Improved fitness of aphid parasitoids receiving resource subsidies. *Ecology* **85**(3), 658–666, DOI:10.1890/03-0222.
- Tylianakis J.M., Tscharntke T. & Klein A.-M., 2006. Diversity, ecosystem function, and stability of parasitoid-host interactions across a tropical habitat gradient. *Ecology* **87**(12), 3047–3057, DOI:10.1890/0012-9658(2006)87[3047:DEFASO]2.0.CO;2.
- UE, 2009a. Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), OJ L.
- UE, 2009b. Règlement (CE) n o 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil, OJ L.
- UE, 2012. Règlement (UE) n ° 528/2012 du Parlement européen et du Conseil du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, OJ L.
- Uvah I.I.I. & Coaker T.H., 1984. Effect of mixed cropping on some insect pests of carrots and onions. *Entomol. Exp. Appl.* **36**(2), 159–167, DOI:10.1111/j.1570-7458.1984.tb03422.x.

Uyttenbroeck R., Hatt S., Paul A., Boeraeve F., Piqueray J., Francis F., Danthine S., Frédéric M., Dufrêne M., Bodson B. & Monty A., 2016. Pros and cons of flowers strips for farmers. A review. *BASE* 225–235, DOI:10.25518/1780-4507.12961.

Vannoppen N., Pierreux J. & Detilleux L., 2023. Cultures associées : froment d'hiver – protéagineux d'hiver (Livre blanc No. 3), Livre Blanc Céréales, Gembloux Agro Bio Tech - CePiCOP.

Veres A., Petit S., Conord C. & Lavigne C., 2013. Does landscape composition affect pest abundance and their control by natural enemies? A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* **166**, 110–117, DOI:10.1016/j.agee.2011.05.027.

Vickerman G.P. & Wratten S.D., 1979. The biology and pest status of cereal aphids (Hemiptera: Aphididae) in Europe: a review. *Bull. Entomol. Res.* **69**(1), 1–32, DOI:10.1017/S0007485300017855.

Wäckers F.L. & Van Rijn P.C.J., 2012. Pick and Mix: Selecting Flowering Plants to Meet the Requirements of Target Biological Control Insects. In: Gurr, G.M., Wratten, S.D., Snyder, W.E., Read, D.M.Y. eds. *Biodiversity and Insect Pests*. Wiley, 139–165.

Walagri, 2024. Catalogue Céréales 2024-2025.

Wei J.N., Bai B.B., Yin T.S., Wang Y., Yang Y., Zhao L.H., Kuang R.P. & Xiang R.J., 2005. Development and use of parasitoids (Hymenoptera: Aphidiidae & Aphelinidae) for biological control of aphids in China. *Biocontrol Sci. Technol.* **15**(6), 533–551, DOI:10.1080/09583150500086961.

Welch K.D. & Harwood J.D., 2014. Temporal dynamics of natural enemy–pest interactions in a changing environment. *Biol. Control* **75**, 18–27, DOI:10.1016/j.biocontrol.2014.01.004.

Wezel A., Casagrande M., Celette F., Vian J.-F., Ferrer A. & Peigné J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **34**(1), 1–20, DOI:10.1007/s13593-013-0180-7.

White J.A. & Whitham T.G., 2000. ASSOCIATIONAL SUSCEPTIBILITY OF COTTONWOOD TO A BOX ELDER HERBIVORE. *Ecology* **81**(7), 1795–1803, DOI:10.1890/0012-9658(2000)081[1795:ASOCTA]2.0.CO;2.

Whittaker R.H., 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecol. Monogr.* **30**(3), 279–338, DOI:10.2307/1943563.

Willey R.W., 1979. Intercropping - its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstr.* **32**(1).

Wratten S.D., 1993. Biological Control by Natural Enemies. (Second edition.) By P. Debach and D. Rosen. Cambridge: Cambridge University Press (1991), pp. 440, £37.50. ISBN 0-521-39191-1. *Exp. Agric.* **29**(1), 131–131, DOI:10.1017/S0014479700020470.

Xie H., Shi J., Shi F., Xu H., He K. & Wang Z., 2020. Aphid fecundity and defenses in wheat exposed to a combination of heat and drought stress. *J. Exp. Bot.* **71**(9), 2713–2722, DOI:10.1093/jxb/eraa017.

Yousefi M., Marja R., Barmettler E., Six J., Dray A. & Ghazoul J., 2024. The effectiveness of intercropping and agri-environmental schemes on ecosystem service of biological pest control: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **44**(2), 15, DOI:10.1007/s13593-024-00947-7.

Zangger A., 1994. The positive influence of strip-management on carabid beetles in a cereal field: accessibility of food and reproduction in *Poecilus cupreus*. In: Desender, K., Dufrêne, M., Loreau, M., Luff, M.L., Maelfait, J.-P. eds. *Carabid Beetles: Ecology and Evolution*. Dordrecht: Springer Netherlands, 469–472.

8. Annexes

Annexe 1 : Informations sur les champs liées aux expérimentations sur les cultures intercalaires en 2023-24-25

Saison	2022-23		2023-24		2024-25	
Culture	PF (1)	PF (2)	PF	F	PF	F
Région	Limoneuse	Limoneuse	Limoneuse	Limoneuse	Limoneuse	Limoneuse
Localité	Gembloux	Gembloux	Isnes	Golzinne	Temploux	Temploux
Coordonnées géographiques	50°33'58.6"N 4°42'32.8"E	50°33'58.6"N 4°42'32.8"E	50°30'12"N 4°43'55"E	50°30'48"N 4°43'56"E	50°29'53"N 4°44'30"E	50°29'57"N 4°44'30"E
Altitude (m)	161,4	161,4	175	162,6	164	168
Superficie (ha)	NA	NA	4,5	6,35	3,5	5,4
Travail du sol	NA	NA	Labour	Labour	Labour 6 socs (6-11-2024)	Labour 6 socs (7-11-2024)
Précédent cultural	NA	NA	Beta vulgaris (Bioko)	Beta vulgaris (Lysanna)	Pomme de terre	Pomme de terre
Date du semis	NA	NA	22-11-2023	2-12-2023	6-11-2024	8-11-2024
Densité de semis	NA	NA	200 graines/m ² (froment KWS) et 50 graines/m ² (pois)	400 graines/m ² (froment)	200 graines/m ² (froment Emerick) et 50 graines/m ² (pois Fresnel)	350 graines/m ² (froment Celebrity)
Traitement	NA	NA	NA	NA	Fertilisations solides (2)	Fertilisations solides (2) et liquide (1)
Commentaire	NA	NA	Proximité avec couvert forestier (7000 m ²)	NA	Protection de la culture : Désherbage chimique, houe rotative et fongicide	Protection de la culture : Houe rotative, désherbage, régulateur, désherbage chimique et fongicide

Annexe 2 : Détail de la composition des mélanges floraux chaque année et densité de semis pour 2024 et 2025.

Composition florale bandes fleuries				
2023		2024 et 2025		
	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Nom vernaculaire
1	Agrostis capillaris	Agrostide commune	Fagopyrum esculentum	Sarrasin commun
2	Festuca rubra	Fétuque rouge	Helianthus annuus	Tournesol
3	Poa pratensis	Pâturin des prés	Vicia sativa	Vesce commune
4	Lotus corniculatus	Lotier corniculé	Raphanus sativus	Radis cultivé
5	Medicago lupulina	Luzerne lupuline	Sinapis alba	Moutarde blanche
6	Plantago major	Grand plantain		
7	Angelica sylvestris	Angélique des bois		
8	Achillea millefolium	Achillée millefeuille		
9	Crepis biennis	Crépide bisannuelle		
10	Ligustrum vulgare	Troène commun		
11	Centaurea jacea	Centaurée jacée		
12	Origanum vulgare	Origan		
13	Borago officinalis	Bourrache officinale		

Variété		Poids semis (kg/ha)	Ratio (%)
Asteraceae			
Helianthus annuus	Peredovick	4	15,6
Brassicaceae			
Raphanus sativus	Romesa	2	7,8
Sinapis alba	Maryna	1,6	6,2
Fabaceae			
Vicia sativa	Gravesa	8	31,3
Polygonaceae			
Fagopyrum esculentum	Korona	10	39,1
Total		25,6	100

Annexe 3 : Informations relatives aux bandes fleuries de 2023-24-25.

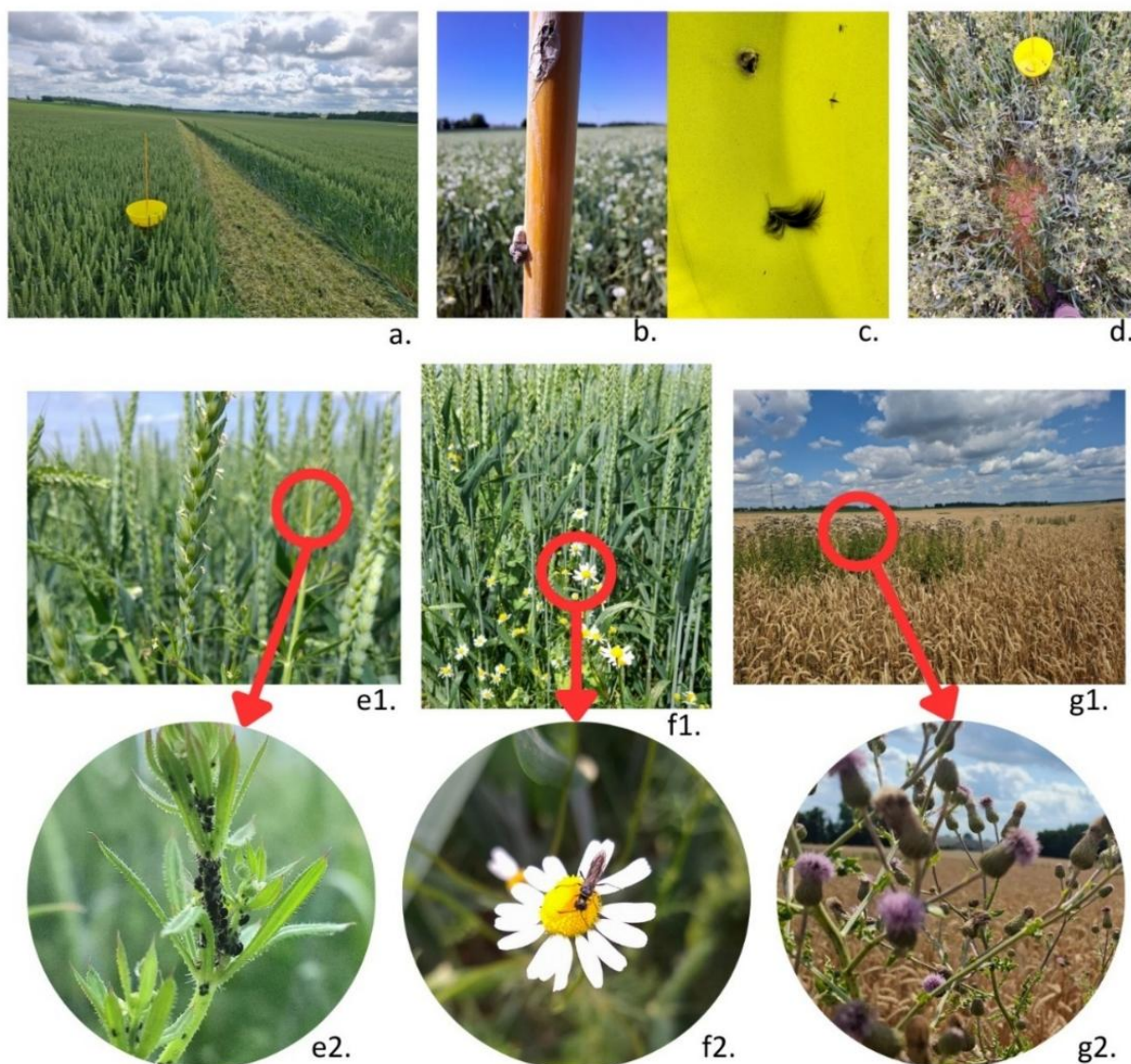
Année	ID parcelle	Localité	Région	Coordonnées	Surface (ares)	Altitude (m)	Cultures adjacentes	Date de semis
2023	Gbx_1	Gembloux	Limoneuse	50°33'58.6"N 4°42'32.8"E	NA	161,4	Pois et froment	NA
	Gbx_2	Gembloux	Limoneuse	50°33'58.6"N 4°42'32.8"E	NA	161,4	Pois et froment	NA
2024	Golzinne	Golzinne	Limoneuse	50°30'48"N 4°43'56"E	NA	162,6	Froment	NA
	Ferooz_1	Ferooz	Limoneuse	50°32'21"N 4°43'33"E	NA	159,7	Froment	NA
	Ferooz_2	Ferooz	Limoneuse	50°32'06"N 4°42'05"E	NA	161,1	Froment	NA
2025	JL	Perwez	Limoneuse	50°36'10.3"N 4°46'08.8"E	14	157	Triticale bio	18-03-2025
	SL	Sauvenière	Limoneuse	50°35'19.2"N 4°41'56.9"E	20	165	Froment	18-03-2025

OL	Franc-Waret	Limoneuse	50°30'57.7"N 4°59'09.0"E	11	195	Froment	21-04-2025
MR_J1	Couthuin	Limoneuse	50°32'00.6"N 5°07'17.1"E	20	169	Orge brassicole	20-04-2025
JA	Burdinne	Limoneuse	50°33'36.5"N 5°04'44.8"E	55	187	Froment	~01-04-25
MR_J2	Héron	Limoneuse	50°32'34.3"N 5°06'38.6"E	110	168	Froment	~01-04-25
VDC	Golzine	Limoneuse	50°31'01.2"N 4°43'33.6"E	35	160	Froment bio	28-03-2025
GxABT	Isnes	Limoneuse	50°29'54.1"N 4°43'56.4"E	9	164	Froment	28-03-2025
CG	Marbais	Limoneuse	50°33'58.1"N 4°34'11.3"E	60	155	Froment	4-04-2025

Annexe 4 : Photographies de biais potentiels pour l'études des AC en 2025 (©T. Soenens).

a. Bande fauchée en F ; b. à c. Traces de passage d'oiseaux sur les pièges en PF (déjections et plume) ; d. Sol mis à nu lors des collectes des pièges en PF ; e. à g. Présence de diverse espèces florales en PF.

AC 25 : Biais potentiels



Annexe 5 : Photographies illustrant différentes étapes de la collecte de donnée (©T. Soenens).

a. à b. Pièges jaunes ; c. Observation du stade phénologique du froment ; d. à i. Diverses traces pouvant être observées lors du comptage (d. Pucerons ; e. Puceron vert et larve de syrpe ; f. Cocon de lépidoptère ; g. Pupa de syrpe ; h. Œufs de chrysope ; i. Momie de puceron) ; j. Pots à remplir d'alcool, utilisés pour le relevé des pièges ; k. Épinglage

Collecte de données



a.



b.



c.



d.



e.



f.



j.



g.



h.



i.



k.

Annexe 6 : Niveau d'identification minimal des individus capturés selon leur guildes et la base de données considérée (MACRO ou MICRO).

Guilde	MACRO	MICRO
Ravageurs	(Morpho-)Espèce	Sous-ordre, famille
Aphidiphages	(Morpho-)Espèce	/
Polyphages	(Morpho-)Espèce	Famille
Parasitoïdes	Famille	- BF 25 - Aphidius : Genre - Autres : Sous-ordre
Pollinisateurs	(Morpho-)Espèce	/
NA	- Araneae, Lepidoptera, Thysanoptera : Ordre - Autres : Famille	/

Annexe 7 : Abondances des différents taxons étudiés issues des données de piégeage lors des campagnes sur les AC.

NA = Donnée non disponible (sans distinction entre valeur nulle ou absence de mesure lors de cette campagne)

Guilde	Famille	Taxons	2023	2024		2025	
			PF	F	PF	F	PF
Ravageurs cultures	Aphididae		221	9	37	3854	3214
Ravageurs froment	Carabidae		NA	NA	NA	24	41
	Cecidomyiidae		NA	NA	NA	172	121
	Cephalidae		NA	NA	NA	176	103
	Chrysomelidae		1	58	34	20	12
	Cicadellidae		NA	NA	NA	1	2
	Curculionidae		NA	NA	NA	316	548
	Elateridae		NA	NA	NA	1	0
	Tenthredinidae		NA	0	1	0	0
	NA		NA	NA	NA	202	369
Aphidiphages spécialisés	Chrysopidae	Chrysoperla_carnea	4	0	0	7	6
	Coccinellidae	Coccinella_septempunctata	5	3	3	10	9
		Harmonia_axyridis	10	1	0	1	3
		Propylea_quatuordecimpunctata	0	0	4	5	5
		Tytthaspis_sedecimpunctata	0	1	1	0	0
	Syrphidae	Episyrphus_balteatus	3	0	0	22	8
		Eupeodes_corollae	23	0	0	13	4
		Melanostoma_mellinum	0	1	4	1	8
		Sphaerophoria_scripta	5	0	0	9	4
Parasitoïdes	Crabronidae	Crabronidae	1	3	0	0	1
	Ichneumonidae	Ichneumonidae	6	NA	NA	4	6

	Micro_hymenoptera	Micro_hymenoptera	56	32	51	654	478
	Apocrita (Sous-ordre)						
Prédateurs polyphages	Anthocoridae	Anthocoridae_sp1.	NA	NA	NA	33	88
	Araneae (Ordre)	Araneae	NA	NA	NA	33	35
	Cantharidae	Cantharis_lateralis	0	NA	NA	2	1
		Cantharis_sp1.	0	NA	NA	1	0
		Rhagonycha_sp1.	3	NA	NA	0	0
	Carabidae	Anchomenus_dorsalis	0	0	1	0	0
		Demetrias_atricapillus	1	0	2	1	1
		Poecilus_cupreus	0	1	0	0	0
		Trechus_sp1.	0	0	0	2	0
		Trechus_sp2.	1	0	0	1	0
	Nabidae	Nabis_sp1.	NA	NA	NA	1	0
	Staphylinidae	Philonthus_cognatus	NA	3	4	6	6
		Staphylinidae_sp1.	NA	0	1	0	0
		Staphylininae_sp1.	NA	0	0	1	0
		Staphylininae_sp2.	NA	0	0	1	0
		Staphylininae_sp3.	NA	0	0	1	0
		Tachyporinae_sp1.	NA	0	0	1	0

Annexe 8 : Richesse estimée des groupes fonctionnels selon la pratique étudiée chaque année.

Pratique	Gilde	Culture	Année	Δt jours	Richesse	Chao 1	se.chao 1	ACE	se.ACE	%Chao 1	%ACE
BF	Aphidiphages	/	2023	84	7	7	0	7	1,309	100,0	100,0
			2024	24	10	10,5	1,278	11,042	1,436	95,2	90,6
			2025	54	13	13,5	1,283	15,102	1,899	96,3	86,1
AC	Aphidiphages	PF	2023	84	6	6	0	6	0,913	100,0	100,0
			2024	28	4	4	0,433	4,364	0,662	100,0	91,7
			2025	53	9	9	0,471	9,269	0,514	100,0	97,1
		F	2023	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
			2024	28	5	11	7,013	17,889	1,361	45,5	28,0
			2025	53	8	9	2,248	9,143	1,451	88,9	87,5
	Auxiliaires (tout)	PF	2023	84	12	15	4,517	13,955	1,685	80,0	86,0
			2024	28	10	11,5	2,560	11,428	1,418	87,0	87,5
			2025	53	16	19	4,548	17,262	1,737	84,2	92,7
		F	2023	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
			2024	28	8	18	10,128	17,5	1,642	44,4	45,7
			2025	53	25	47	17,437	46,872	3,726	53,2	53,3r
	Auxiliaires (Id. sp)	PF	2023	84	9	10	2,258	10,226	1,331	90,0	88,0
			2024	28	8	9,5	2,552	9,729	1,270	84,2	82,2
			2025	53	12	13	2,279	12,685	1,181	92,3	94,6
		F	2023	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
			2024	28	7	17	10,102	16,5	1,633	41,2	42,4
			2025	53	21	39,333	15,039	42,863	3,632	53,4	49,0
	Ravageurs	PF	2023	84	2	2	0,354	NA	NA	100,0	NA

			2024	28	3	3	0,408	NA	NA	100,0	NA
			2025	53	7	7	0	7	0,926	100,0	100,0
		F	2023	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
			2024	28	2	2	0	2	0,707	100,0	100,0
			2025	53	8	9	2,248	NA	NA	88,9	NA

Annexe 9 : Abondance des différents taxons observés en 2025 dans les différentes parcelles échantillonnées, selon la pratique étudiée et les modalités concernées.

Cultures associées 2025				Bandes fleuries 2025			
Observations	Froment	Pois-Froment	Total	Observations	50m	5m	Total
Pucerons	230	457	687	Pucerons	758	490	1248
Criocères	46	53	99	Criocères	53	38	91
Chenilles	1	1	2	Coccinelles	5	3	8
Cocons de lépidoptère	9	1	10	Syrphes	24	13	37
Punaies	1	1	2	Chrysopes	3	5	8
Cicadelles	0	1	1	Cantharides	0	2	2
Syrphes	8	1	9	Momies	39	82	121
Chrysopes	2	2	4	Total	882	633	1515
Araignées	1	1	2				
Momies	28	28	56				
Total	326	546	872				

Légende

Ravageurs
Aphidiphages spécialisés
Prédateurs polyphages
Parasitoïdes

Annexe 10 : Résultats des modèles linéaires mixtes généralisés basés sur les données interannuelles standardisées (2024-25) : Modèles utilisés pour prédire l’abondance des *Aphididae*, des parasitoïdes ainsi que des aphidiphages selon le type de culture (Parcelle) et la variation phénologique (DJ).

DJ = somme des degrés-jours depuis le semis, T_moy = Température de l’air moyenne, Pluv_moy = Pluviosité moyenne, Vent_moy = Vitesse moyenne du vent

Groupe	Résultats	
Aphididae	<i>Aphididae</i> ~ Parcelle * DJ + (1 Année/Date)	AIC = 91,1
	Facteur	Estimation
	ParcellePF	0,4123
	DJ	0,1007
	Interaction	- 0,225
		p-value
	ParcellePF	0,0363 *
	DJ	0,797
	Interaction	0,139
	<i>Aphididae</i> ~ Parcelle * DJ + variables environnementales + (1 Année)	AIC = 83,7
	Facteur	Estimation
	ParcellePF	0,503
	T_moy	- 0,720
		p-value
	ParcellePF	0,00965 **
	T_moy	0,0333 *

	Pluv_moy	- 0,604	0,0645
	Vent_moy	- 1,671	7,78E-09 ***
	DJ	- 0,346	0,334
	Interaction	- 0,223	0,140
Parasitoïdes	Parasitoïdes ~ Parcelle * DJ + (1 Année)		AIC = 58,8
	Facteur	Estimation	p-value
	ParcellePF	- 0,601	0,115
	Sum_DJ	- 0,0959	0,680
	Interaction	0,140	0,719
	Parasitoïdes ~ Parcelle * DJ + variables environnementales + (1 Année)		AIC = 63,2
Aphidiphages	Aphidiphages ~ Parcelle * DJ + (1 Année)		AIC = 33,0
	Facteur	Estimation	p-value
	ParcellePF	0,979	0,381
	Sum_DJ	- 0,844	0,329
	Interaction	0,2567	0,805
	Aphidiphages ~ Parcelle * DJ + variables environnementales + (1 Année)		AIC = 36,0

Annexe 11 : Résultats des test statistiques concernant les effets des AC sur les pucerons comptés et piégés et 2025.

P.shapiro = *p* value du test de normalité, *R² marg.* = Part variance expliquée par les effets fixes, *R² cond.* = Part variance expliquée par les effets fixes et aléatoires, *s.e.* = écart-type

Groupe	p.shapiro	Test	R ² marg.	R ² cond.	R ² date.	Statistique	s.e.	p.value
Pucerons comptés	0,1134	Student apparié	/	/	/	t = -2,5632	/	0,02084*
		GLMM (nbinom2)	9,19E-04	0,968	0,967	Z = 1,638	0,354	0,101
Pucerons piégés	0,0122	Wilcoxon-Pratt	/	/	/	Z = 1,302	/	0,201
		GLMM (nbinom2)	0,0115	0,917	0,905	Z = -0,884	0,0854	0,377

Annexe 12 : Résultats des tests de comparaison de l'abondance de différents groupes selon la parcelle (F ou PF) en 2025.

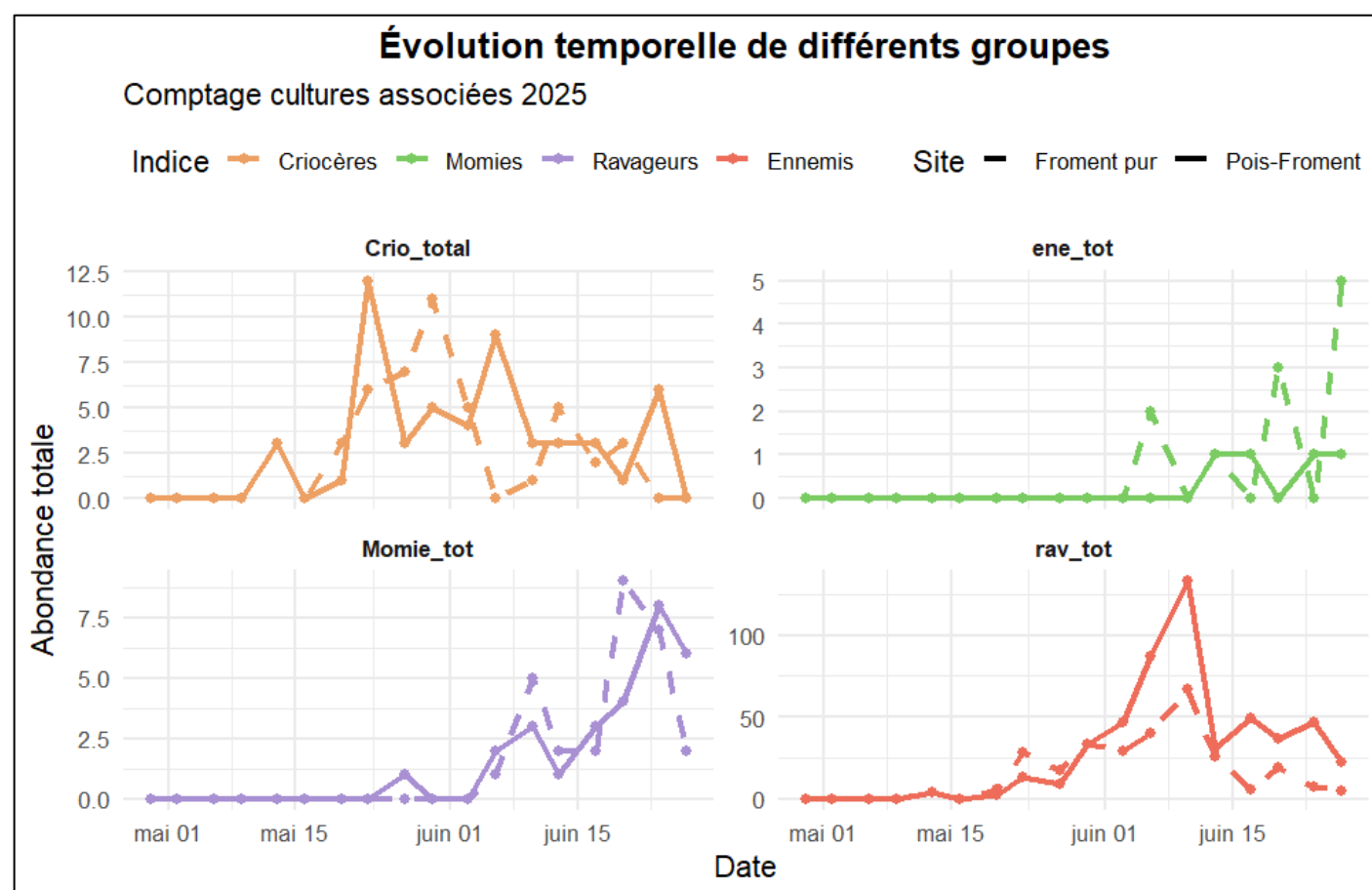
Données	Groupe	p.shapiro	p.bartlett	Test	Statistique	p_value
Piège	Cécydomyies	4,01E-05	0,404	Wilcoxon apparié	39	0,05714
				Wilcoxon-Pratt	1,837	0,0691
				GLMM (nbinom2)	Z=-2,298	0,0216 *
Comptage	Criocères	0,0442	0,8011	Wilcoxon apparié	31	0,8931
				Wilcoxon-Pratt	0,068	0,969
	Momies	8,00E-04	0,605	Wilcoxon apparié	17	0,9428
				Wilcoxon-Pratt	-0,531	0,683
	Ravageurs totaux (dont pucerons)	0,00661	0,00909	Wilcoxon apparié	8	0,0293*
				Wilcoxon-Pratt	-1,916	0,0585
	Ennemis	1,74-E05	1,47E-05	Wilcoxon apparié	12	0,797

			Wilcoxon-Pratt	0,613	0,279
--	--	--	----------------	-------	-------

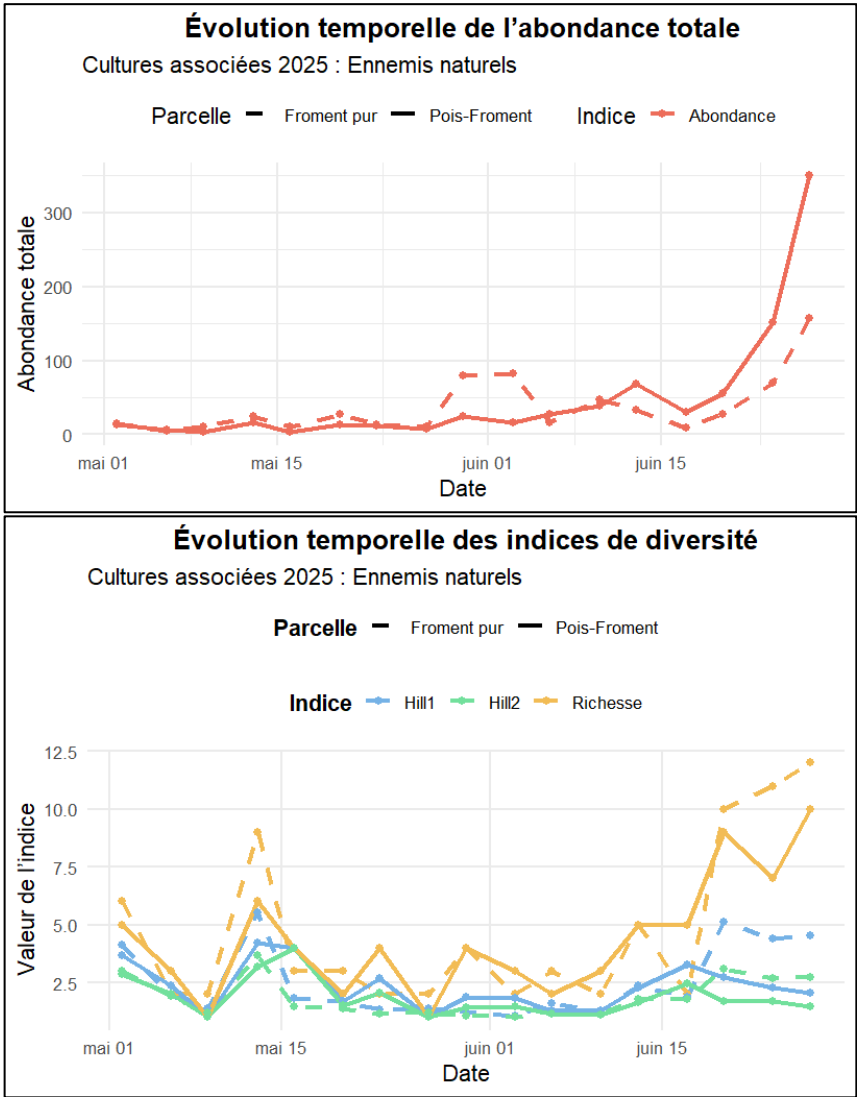
Annexe 13 : Résultats des tests de comparaison des indices de diversité des ravageurs (hors Aphididae) et auxiliaires selon la parcelle (F ou PF) en 2025.

Groupe	Indice	Normalite_p	Homoscedasticite_p	Test	Statistique	p_value
Ravageurs piégés (hors Aphididae)	Abondance	1,41E-05	8,01E-04	Wilcoxon apparié	69	0,740
	Richesse	0,00409	0,906	Wilcoxon apparié	22	0,188
	Hill1	0,993	0,0913	Student apparié	0,818	0,426
	Hill2	0,931	0,0937	Student apparié	0,225	0,825
Ennemis naturels (tous)	Abondance	8,57E-04	0,00386	Wilcoxon apparié	73,5	0,906
	Richesse	0,5758	0,1959	Student apparié	0,824	0,422
	Hill1	0,4479	0,0941	Student apparié	0,585	0,567
	Hill2	0,0681	0,952	Student apparié	-0,037	0,971
Aphidiphages	Abondance	1,84E-05	5,90E-04	Wilcoxon-Pratt	-0,024	0,993
	Richesse	0,0714	0,925	Student apparié	-0,765	0,455
	Hill1	0,00414	0,613	Wilcoxon-Pratt	-1,096	0,333
	Hill2	0,111	0,658	Student apparié	-1,434	0,190

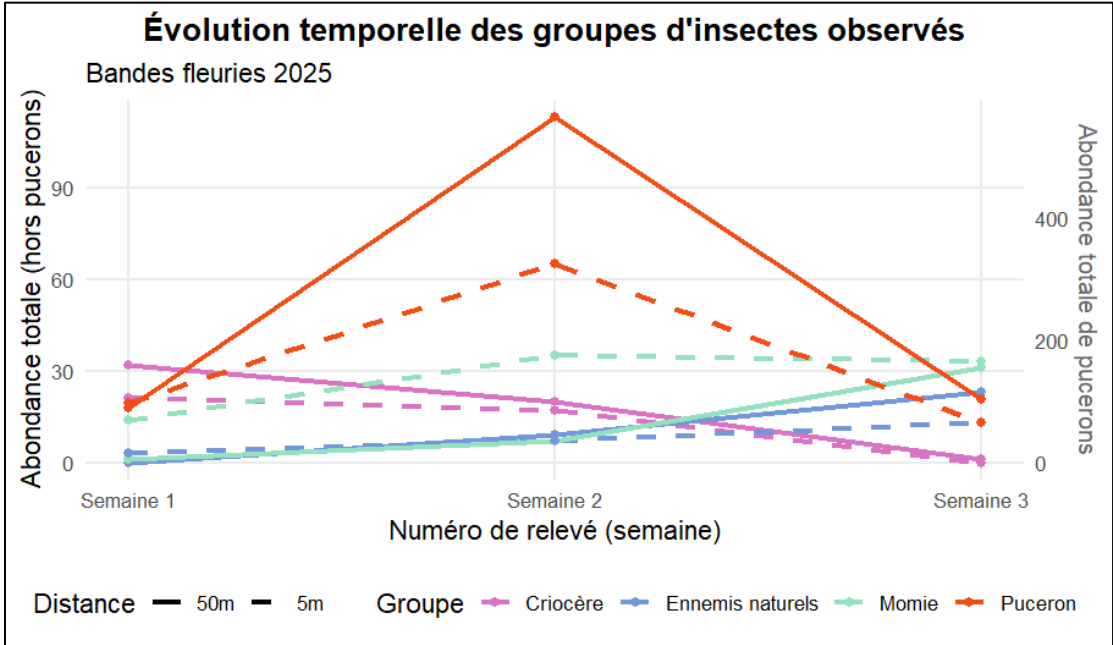
Annexe 14 : Évolution temporelle de l'abondance de différents groupes comptés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).



Annexe 15 : Évolution temporelle des indices de diversité des ennemis naturels piégés en 2025 dans les cultures de froment (F) et de pois-froment (PF).



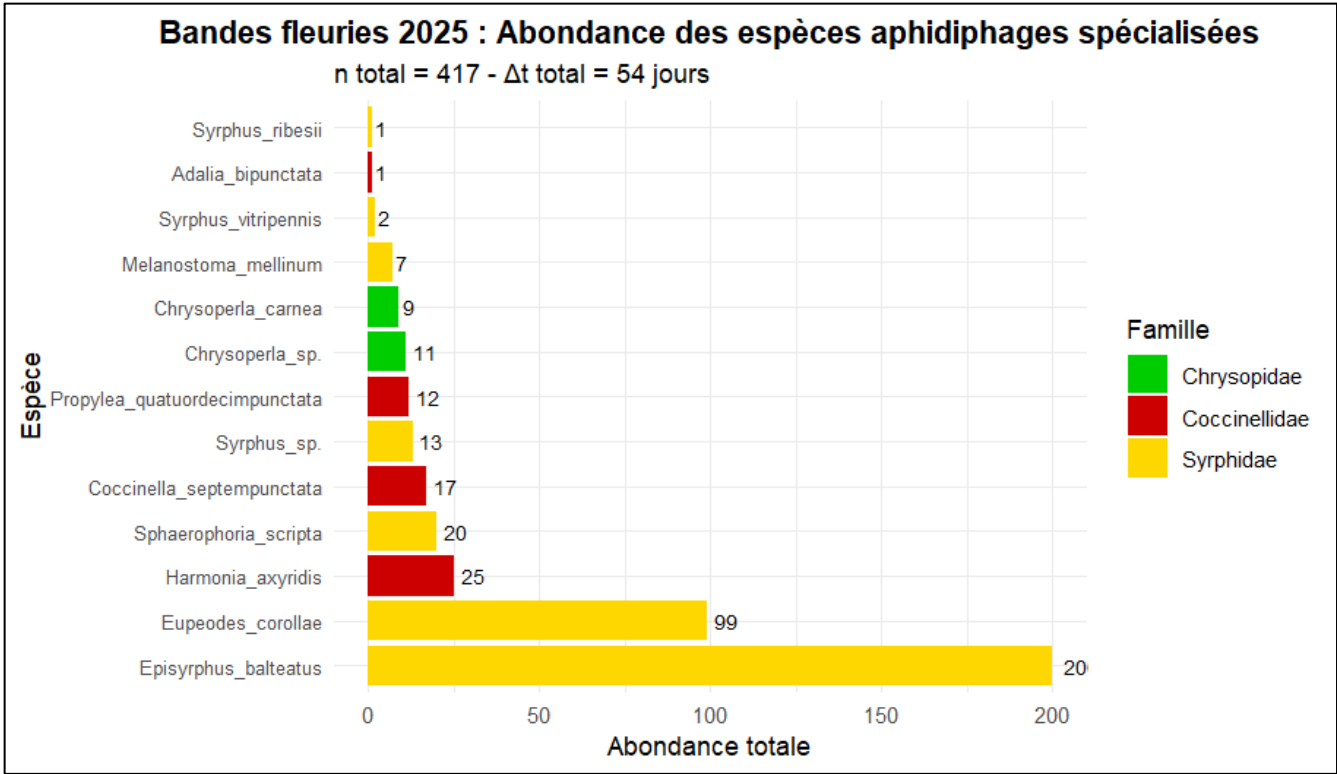
Annexe 16 : Évolution temporelle de l'abondance des groupes d'insectes comptés dans les cultures de céréales jouxtant une bande fleurie selon la distance à la bande.



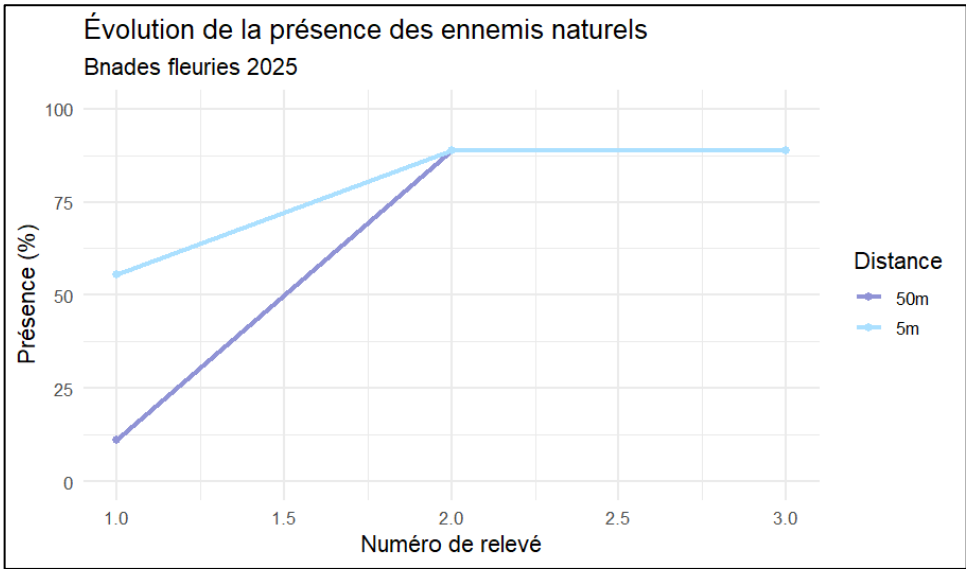
Annexe 17 : Résultats des tests de comparaison de l’abondance des certains groupes comptés dans des cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie adjacente en 2025.

Données	Groupe	Indice	Relevé(s)	Test	Statistique	p_value
Comptage	Pucerons	Abondance	Tous	Wilcoxon-Pratt	Z = -1,48	0,142
			2	Wilcoxon-Pratt	Z = -1,84	0,0747
			Tous	GLMM (nbinom2)	Z = 0,050	0,960
	Momies	Abondance	Tous	Wilcoxon-Pratt	Z = 2,66	0,00640**

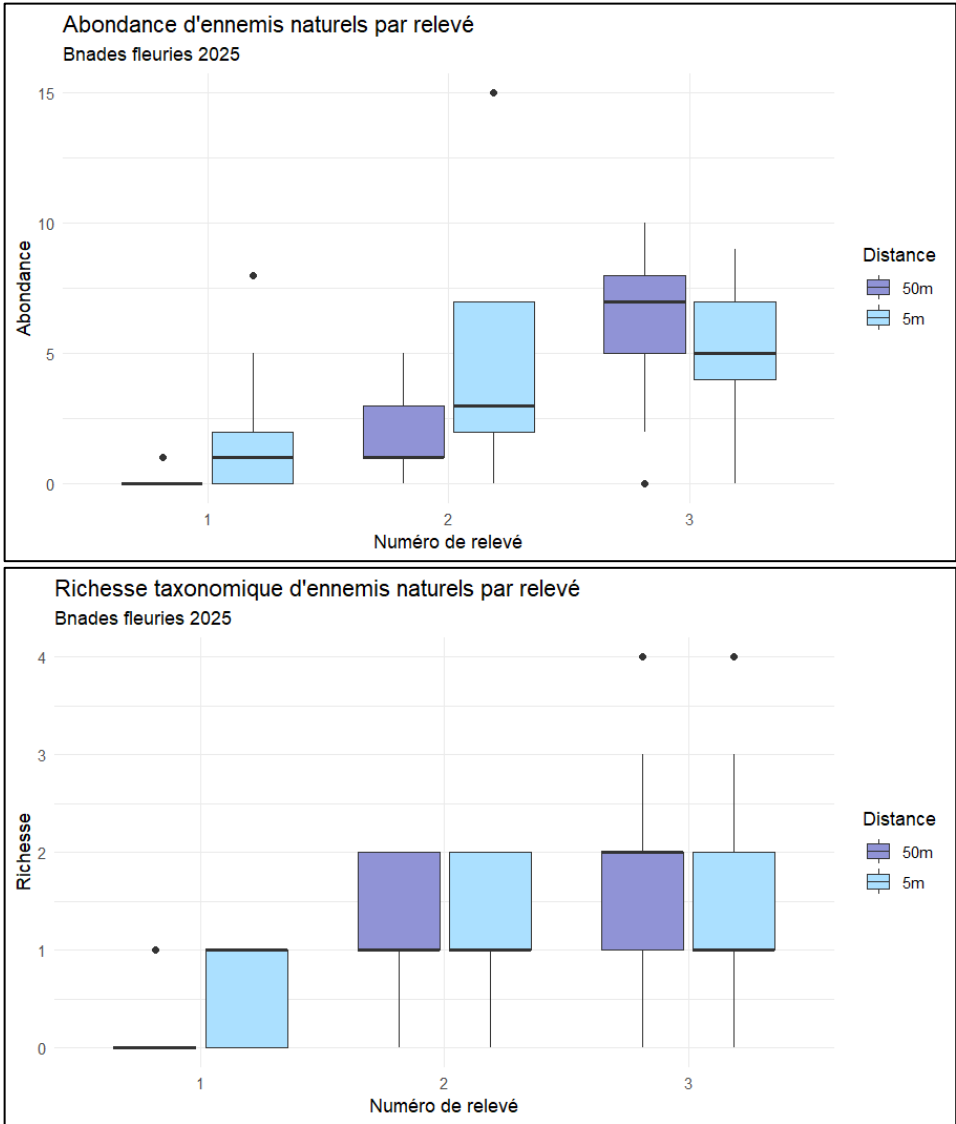
Annexe 18 : Abondances spécifiques des aphidiphages spécialistes par famille (couleur) au sein des bandes fleuries de 2025.



Annexe 19 : Évolution du taux de présence (% de relevés) d’ennemis naturels comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie adjacente en 2025.



Annexe 20 : Boxplots de l’abondance et la richesse taxonomique de la communauté d’ennemis naturels comptés dans les cultures de céréales selon la distance à la bande fleurie adjacente en 2025.



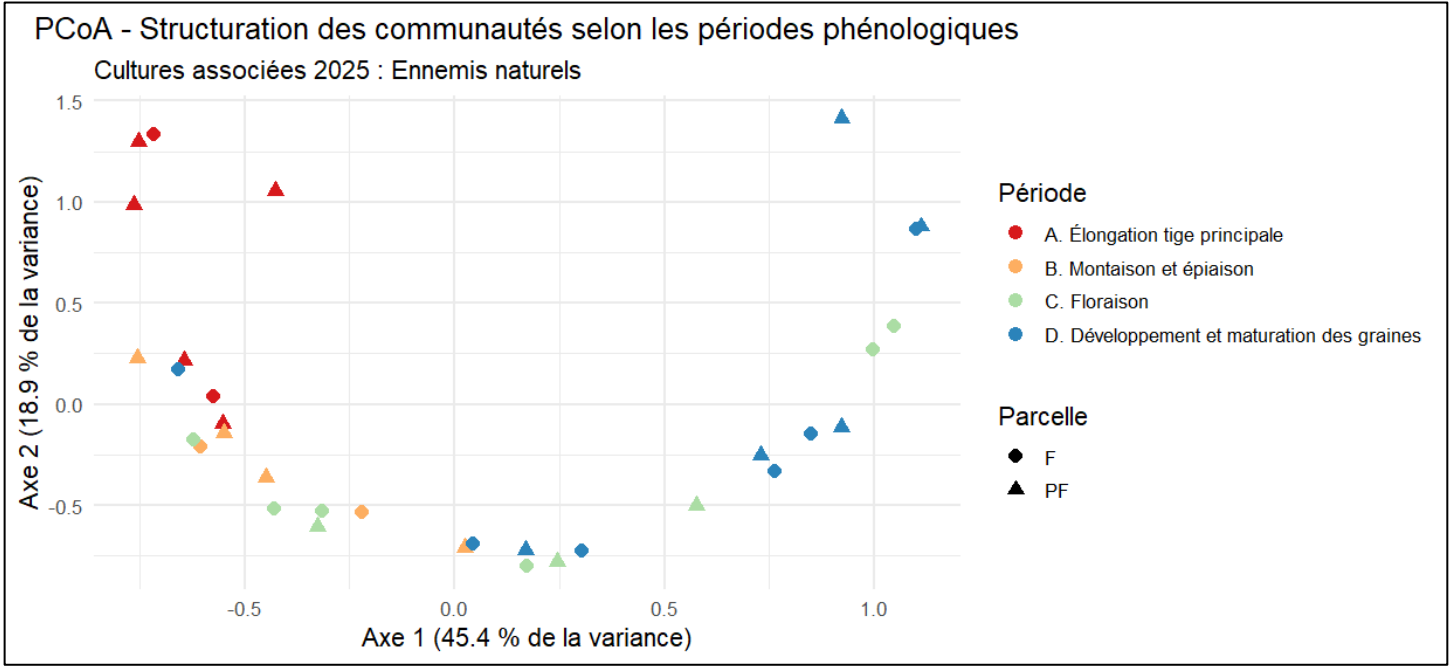
Annexe 21 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les abondances des pucerons piégés et des ennemis naturels (aphidiphages ou parasitoïdes) pour les valeurs standardisées de 2024 et 2025.

Groupe 1	Groupe 2	Année(s)	<i>rho</i>	<i>p.value</i>
Pucerons du froment et du pois (abondance)	Aphidiphage (abondance)	2024	0,433	0,284
		2025	0,626	0,0970
		2024 et 2025	0,111	0,681
	Parasitoïdes (abondance)	2024	0,578	0,134
		2025	0,0476	0,935
		2024 et 2025	0,465	0,0694

Annexe 22 : Résultats des PERMANOVA et RDA de l’abondance des ravageurs (piège et comptage) sur les communautés d’ennemis en 2025.

Groupe de ravageurs	Type données	F (PERMANOVA)	R ² (PERMANOVA)	p (PERMANOVA)	Variance contrainte (RDA, %)	p (RDA)
Pucerons (abondance)	Captures	4,26	0,118	0,008 **	7,95	0,109
	Comptages	4,99	0,135	0,002 **	2,81	0,272
Ravageurs (abondance hors pucerons)	Captures	0,991	0,030	0,409	1,38	0,389
Ravageurs (abondance)	Comptages	5,30	0,142	0,003 **	2,66	0,288

Annexe 23 : Résultats de l’analyse en coordonnées principales (PCoA) des communautés d’ennemis naturels en 2025 selon la période phénologique du froment (couleur) et la culture (forme).



Annexe 24 : Résultats des tests de comparaison de différents indices de diversité de la communauté des ennemis naturels dans les BF selon le relevé en 2025.

Indice	p.Shapiro	p.Bartlett	Test	df	Statistique	p.value
Abondance	6,54E-05	1,38-E09	Kruskal-Wallis	2	19,1	7,10E-05***
Richesse	0,547	0,906	Anova	2	31,6	1,9e-07 ***
Hill1	0,841	0,849	Anova	2	9,86	0,000751 ***
Hill2	0,792	0,886	Anova	2	3,16	0,0615

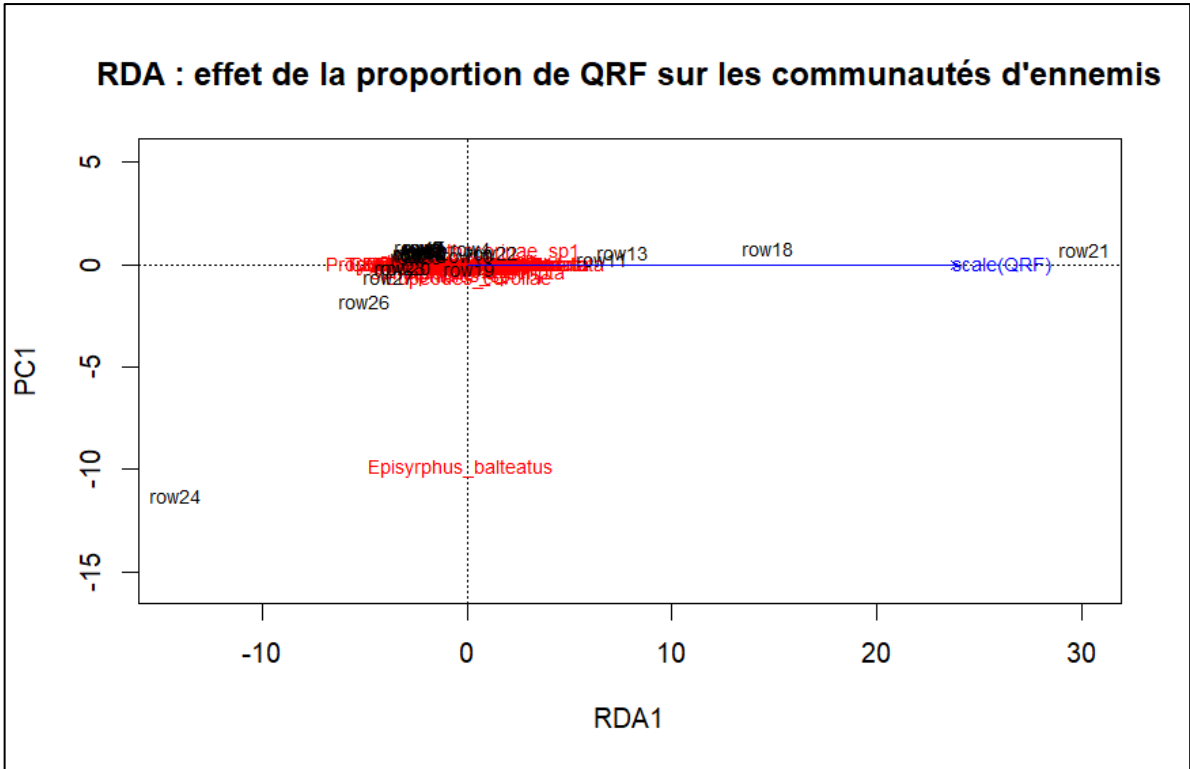
Annexe 25 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les indices de diversité des ennemis naturels dans une bande fleurie et l’abondance des pucerons comptés à cinq mètres de la bande en 2025.

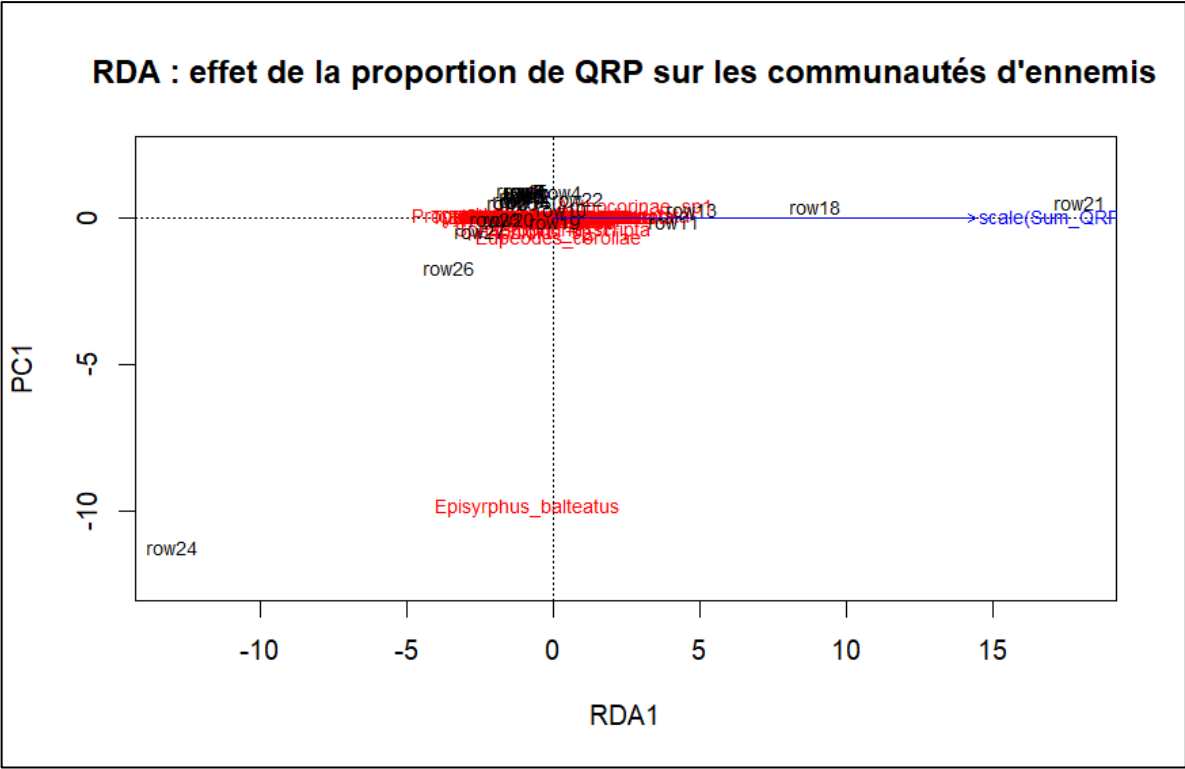
Indice ravageurs	Indice ennemis	rho	p.value
Abondance pucerons froment à 5m	Abondance	0,093	0,646
	Richesse	0,153	0,446
	Hill1	0,153	0,445
	Hill2	-0,038	0,851

Annexe 26 : Résultats des tests de corrélation de Spearman entre les indices de diversité des ennemis naturels et la quantité de ressources disponible dans les bandes fleuries en 2025.

Indice ressources	Indice ennemis	rho	p.value
Quantité de ressource florale disponible (QRF)	Abondance	0,108	0,590
	Richesse	-0,029	0,885
	Hill1	-0,179	0,372
	Hill2	-0,088	0,662
Quantité de proies alternatives disponible (QRP)	Abondance	0,275	0,165
	Richesse	0,206	0,303
	Hill1	-0,030	0,882
	Hill2	-0,220	0,271

Annexe 27 : Analyse de redondance (RDA) : effet de la quantité de ressources disponible (QRF et QRP) sur la composition des communautés d’ennemis naturels dans les bandes fleuries en 2025.





Annexe 28 : Stade phénologique du froment (échelle BBCH) en culture pure (F) et en pois-froment (PF).

Date	BBCH_F	BBCH_FP
02/05/25	NA	NA
06/05/25	NA	NA
09/05/25	37	NA
13/05/25	47	NA
16/05/25	59	34
20/05/25	61	49
23/05/25	65	55
27/05/25	65	59
30/05/25	69	59
03/06/25	69	69
06/06/25	69	69
10/06/25	71	69
13/06/25	73	71
17/06/25	75	73
20/06/25	75	75
24/06/25	80	77
27/06/25	85	83

Annexe 29 : Conditions météorologiques moyennes journalières (température de l'air, pluviosité, vitesse du vent) rencontrées dans la commune de Gembloux lors de la campagne d'échantillonnage de 2025.

