Ecole Supérieur d'Agriculture d'Angers
55 rue Rabelais
49007 Angers

INRAE – Angers
616 rue Norbert Gerbier 49070 Beaucouzé
Catherine Bernard
Frédérique Didelot

Influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers



Mémoire de fin d'étude
Promotion 124
01/10/2026

MALKA Alexandre
Elève-ingénieur

AUTEUR : Alexandre MALKA
Promotion : 124
Patron de mémoire : Nathalie Cassagne
Signalement du mémoire : *Influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers*. 99 p., 52 figures, 7 tableaux, 6 annexes, 48 bibliographies.
Mots-clés :
Pommier ; verger ; biodiversité ; arthropodes ; auxiliaires ; ravageurs ; bande enherbée ; éléments semi-naturels ; pratiques culturales ; agroécologie ; Cap Zéro Phyto ; INRAE.

Résumé d'auteur

PLAN INDICATIF	Le rapport débute par une présentation du contexte de l'étude et de l'origine de la commande. Une synthèse bibliographique replace ensuite le sujet dans son contexte. La problématique et les hypothèses sont ensuite formulées. La partie matériel et méthode présente les conditions de réalisation de l'étude. Les résultats sont ensuite présentés par hypothèse, puis discutés. Le rapport se termine par une critique de l'expérimentation, des perspectives, les annexes et la bibliographie.
BUTS DE L'ETUDE	Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet Cap Zéro Phyto et vise à analyser l'influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers expérimentaux. L'objectif principal était d'évaluer dans quelle mesure la végétation de l'inter-rang, les pratiques culturales, les éléments semi-naturels et les conditions climatiques pouvaient influencer la richesse, l'abondance et la fréquentation des arthropodes.
METHODES & TECHNIQUES	L'étude a été menée sur huit parcelles réparties entre deux sites expérimentaux de l'INRAE d'Angers-Nantes : Bois l'Abbé et la Rétuzière. Les arthropodes ont été échantillonnés à l'aide de pièges Barber, de filets fauchoirs et de parapluies japonais. Des relevés floristiques ont été réalisés par quadrat afin de caractériser la richesse végétale et les stades phénologiques. Les pratiques culturales, l'IFT, les éléments semi-naturels cartographiés sous QGIS et les conditions climatiques ont ensuite été mis en relation avec les données faunistiques à l'aide d'analyses statistiques sous RStudio.
RESULTATS	Les résultats montrent que la richesse végétale totale explique peu la fréquentation des groupes fonctionnels d'arthropodes. En revanche, le nombre d'espèces végétales en fleurs apparaît plus informatif et est associé à plusieurs groupes fonctionnels. Les traitements SDP, l'IFT total et le pourcentage d'éléments semi-naturels ne montrent pas d'effet statistiquement net à l'échelle des parcelles étudiées. Les relations entre ravageurs et auxiliaires spécialistes traduisent principalement une cooccurrence temporelle.
CONCLUSIONS	La biodiversité des vergers de pommiers résulte d'une combinaison de facteurs liés à la végétation, aux pratiques culturales, au contexte paysager, aux conditions climatiques et aux dynamiques temporelles entre groupes fonctionnels. Les résultats obtenus constituent une première base d'interprétation, mais nécessitent d'être confirmés par des suivis pluriannuels et des analyses plus fines des pratiques culturales et de la qualité des habitats.

AUTHOR: Alexandre MALKA
Class year: 124
Academic supervisor: Nathalie Cassagne
Thesis identification: *Influence of cultural practices and agroecological structures on the biodiversity of apple orchards*. 99 p., 52 figures, 7 tables, 6 appendices, 48 bibliographic references.
Keywords: Apple tree; orchard; biodiversity; arthropods; natural enemies; pests; grass strip; semi-natural elements; cultural practices; agroecology; Cap Zéro Phyto; INRAE.

Author's abstract

INDICATIVE OUTLINE	The report begins with a presentation of the study context and the origin of the request. A literature review then places the topic within its broader context. The research question and hypotheses are then formulated. The materials and methods section presents the conditions under which the study was carried out. The results are then presented by hypothesis and discussed. The report concludes with a critique of the experiment, perspectives, appendices and bibliography.
AIMS OF THE STUDY	This study is part of the Cap Zéro Phyto project and aims to analyse the influence of cultural practices and agroecological structures on the biodiversity of experimental apple orchards. The main objective was to assess to what extent inter-row vegetation, cultural practices, semi-natural elements and climatic conditions could influence the richness, abundance and occurrence of arthropods.
METHODS & TECHNIQUES	The study was conducted on eight plots distributed across two INRAE Angers-Nantes experimental sites: Bois l'Abbé and La Rétuzière. Arthropods were sampled using pitfall traps, sweep nets and beating trays. Floristic surveys were carried out using quadrats in order to characterise plant richness and phenological stages. Cultural practices, the Treatment Frequency Index (TFI), semi-natural elements mapped with QGIS and climatic conditions were then related to faunistic data using statistical analyses in RStudio.
RESULTS	The results show that total plant richness explains little of the occurrence of arthropod functional groups. However, the number of flowering plant species appears to be more informative and is associated with several functional groups. Plant defence stimulator treatments, total TFI and the percentage of semi-natural elements do not show a clear statistically significant effect at the scale of the studied plots. The relationships between pests and specialist natural enemies mainly reflect temporal co-occurrence.
CONCLUSIONS	The biodiversity of apple orchards results from a combination of factors related to vegetation, cultural practices, landscape context, climatic conditions and temporal dynamics between functional groups. The results obtained provide a first basis for interpretation, but need to be confirmed through multi-year monitoring and more detailed analyses of cultural practices and habitat quality.

RÉSUMÉ FRANÇAIS

La réduction de l'usage des produits phytosanitaires constitue un enjeu majeur pour les systèmes arboricoles, en particulier dans les vergers de pommiers, fortement exposés aux ravageurs et aux maladies. Dans ce contexte, la biodiversité fonctionnelle et les infrastructures agroécologiques peuvent contribuer au fonctionnement des agroécosystèmes, notamment en favorisant la présence d'auxiliaires. Cette étude, conduite dans le cadre du projet Cap Zéro Phyto, vise à analyser l'influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité de vergers de pommiers expérimentaux.

Les suivis ont été réalisés en 2026 sur deux sites de l'INRAE d'Angers-Nantes, Bois l'Abbé et la Rétuzière, à partir de huit parcelles. Les arthropodes ont été échantillonnés dans différentes strates du verger à l'aide de pièges Barber, de filets fauchoirs et de parapluies japonais. Des relevés floristiques ont également été réalisés dans l'inter-rang afin de caractériser la richesse végétale et les stades phénologiques. Les données ont ensuite été analysées en fonction des groupes fonctionnels, des pratiques culturales, de l'IFT, du pourcentage d'éléments semi-naturels et des conditions climatiques.

Les résultats montrent que la richesse végétale totale ne permet pas d'expliquer clairement la fréquentation des groupes fonctionnels d'arthropodes. En revanche, le nombre d'espèces végétales en fleurs apparaît plus informatif, avec des relations significatives pour plusieurs groupes, notamment les ravageurs, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons. Les traitements SDP et l'IFT total ne présentent pas de relation statistiquement significative avec l'abondance ou la présence des groupes fonctionnels étudiés. Les relations entre ravageurs et auxiliaires spécialistes traduisent principalement une cooccurrence temporelle, sans mise en évidence d'une diminution des ravageurs après la présence des auxiliaires. Enfin, les éléments semi-naturels et les variables climatiques semblent avoir des effets variables selon les parcelles, mais ne suffisent pas à expliquer seuls les dynamiques observées.

Cette étude montre que la biodiversité en verger de pommiers résulte d'une combinaison de facteurs liés à la végétation, aux pratiques culturales, au contexte paysager et aux conditions climatiques. Les résultats obtenus constituent une première base d'interprétation, mais nécessitent d'être confirmés par des suivis pluriannuels et des analyses plus fines des pratiques et des habitats.

Mots-clés : pommier ; biodiversité ; arthropodes ; auxiliaires ; ravageurs ; bande enherbée ; éléments semi-naturels ; agroécologie ; pratiques culturales ; Cap Zéro Phyto.

ENGLISH ABSTRACT

Reducing the use of plant protection products is a major challenge for fruit production systems, particularly in apple orchards, which are highly exposed to pests and diseases. In this context, functional biodiversity and agroecological infrastructures may contribute to the ecological functioning of orchards, especially by supporting natural enemies. This study, carried out within the Cap Zéro Phyto project, aimed to analyse the influence of cultural practices and agroecological structures on biodiversity in experimental apple orchards.

The survey was conducted in 2026 on two INRAE Angers-Nantes experimental sites, Bois l'Abbé and La Rétuzière, across eight plots. Arthropods were sampled in different orchard strata using pitfall traps, sweep nets and beating trays. Floristic surveys were also carried out in the inter-row vegetation in order to characterize plant richness and phenological stages. The data were then analysed according to functional groups, cultural practices, treatment frequency index, percentage of semi-natural elements and climatic conditions.

The results show that total plant richness alone did not clearly explain the occurrence of arthropod functional groups. However, the number of flowering plant species appeared to be a more informative variable, with significant relationships observed for several groups, including pests, specialist natural enemies and aphid-protecting ants. Plant defence stimulators and the total treatment frequency index were not significantly related to the abundance or occurrence of the functional groups studied. Relationships between pests and specialist natural enemies mainly reflected temporal co-occurrence, without evidence of a decrease in pest presence after the occurrence of natural enemies. Finally, semi-natural elements and climatic variables appeared to have variable effects depending on the plot, but did not alone explain the observed dynamics.

This study shows that biodiversity in apple orchards results from a combination of factors related to vegetation, cultural practices, landscape context and climatic conditions. The results provide an initial basis for interpretation, but should be confirmed through multi-year monitoring and more detailed analyses of management practices and habitats.

Keywords: apple orchard; biodiversity; arthropods; natural enemies; pests; grass strip; semi-natural elements; agroecology; cultural practices; Cap Zéro Phyto.

Table des matières

ABREVIATIONS 8
INTRODUCTION 9
1.ETAT DE L'ART 10
1.1 L'HISTORIQUE DE LA CULTURE DE POMME ET LES CONTRAINTES LIEES 10
1.2. MARCHE DE LA POMME 11
1.2.1 Un marché mondial dominé par quelques grands pays producteurs 11
1.2.2 Un marché mondial spécifique parmi les productions agricoles 12
1.2.3 La place de la France dans le marché européen et mondial 12
1.2.4 Un marché soumis à des contraintes économiques et climatiques 16
1.3 LE POMMIER 16
1.3.1 Description générale 16
1.3.2 Description des fleurs et des fruits 18
1.3.3 Reproduction 19
1.3.4 Cycle de développement 19
1.3.5 De la floraison à la formation du fruit 20
1.4. ITINERAIRE TECHNIQUE DU POMMIER 20
1.4.1 Architecture du verger, densité et formage des arbres 21
1.4.2 Choix variétal et caractéristiques des variétés 24
1.4.3 Les porte-greffes : types et rôles 27
1.4.4 Entretien du verger 28
1.4.5 Ravageurs et maladies du pommier et gestion phytosanitaire 31
1.4.6 Une culture très dépendante des pesticides 34
1.4.7 Mise en relation des pratiques culturales, du contexte paysager et des populations d'insectes 35
1.4.8 Gestion des bioagresseurs du pommier : pesticides et alternatives 36
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES 41
2. MATERIEL ET METHODE 42
2.1 CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE 42
2.2 SITES D'ETUDE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX 42
2.2.1 Sites d'expérimentation 42
2.2.2 Echantillonnage à la parcelle 43
2.2.3 Echantillonnage dans le rang 45
2.2.4 Protocoles de collecte des invertébrés 46
2.2.5 Relevés floristiques 49
2.3 CARACTERISATION DES PRATIQUES CULTURALES 49
2.4 CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS PAYSAGERS 50
2.5 BASE DE DONNEES BRUTE ET TRANSFORMEE 51

2.6 CALCUL DES INDICATEURS DE BIODIVERSITE....52
2.7 TESTS STATISTIQUES....53
2.8 UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE....53
3. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION....54
3.1 PRESENTATION DES RESULTATS....54
3.1.1 Hypothèse 1 : Les pratiques culturales ont un impact sur la présence d'insecte ..57
3.1.2 Hypothèse 2 : Les présences des ravageurs et des auxiliaires sont corrélées....60
3.1.3 Hypothèse 3 : Les infrastructures agroécologiques ont un effet sur l'abondance des arthropodes des vergers. 62
3.1.4 Hypothèse 4 : La diversité végétale de la bande enherbée influence les populations d'arthropodes des vergers. 63
3.1.5 Hypothèse 5 : L'effet d'attraction des arthropodes dépend du stade phénologique des espèces végétales de la bande enherbée....67
3.1.6 Hypothèse 6 : Les conditions climatiques ont un effet sur la diversité des groupes fonctionnels d'arthropodes des vergers. 69
3.1.7 Hypothèse 7 : Il existe des différences de fréquentation des arthropodes entre la campagne 2025 et 2026....72
3.1.8 Hypothèse 8 : Les parcelles ne se différencient pas selon un seul facteur isolé, mais selon une combinaison de variables liées à la végétation, aux pratiques culturales, au contexte paysager et aux groupes fonctionnels d'arthropodes.....74
3.2 ANALYSE ET DISCUSSION 77
3.3 CRITIQUE DE L'EXPERIMENTATION....83
3.4 PERSPECTIVES....84
CONCLUSION 86
BIBLIOGRAPHIE :....88
ANNEXES : 95

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné au cours de ce stage et qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie particulièrement mes encadrantes de stage, Catherine Bernard et Frédérique Didelot, pour leur accompagnement, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de cette période. Leur suivi m'a permis de mieux comprendre les enjeux scientifiques, techniques et méthodologiques liés à l'étude de la biodiversité en vergers expérimentaux.

Je remercie également l'équipe de l'unité expérimentale horticole de l'INRAE d'Angers-Nantes pour son accueil, son aide sur le terrain et les échanges qui ont accompagné les différentes étapes du stage. Ces discussions ont été précieuses pour comprendre le fonctionnement des dispositifs expérimentaux, les pratiques culturales mises en place et les contraintes propres aux vergers de pommiers.

Je remercie particulièrement Pauline Bénot qui m'a aidé à de nombreuses reprises lorsque je devais faire des prélèvements/ identifications de biodiversité.

Enfin, je remercie mon école, l'École Supérieure d'Agricultures d'Angers, ainsi que ma patronne de mémoire, Nathalie Cassagne, pour l'encadrement pédagogique de ce stage. Je remercie également mes proches pour leur soutien tout au long de cette période.

ABREVIATIONS

AB : Agriculture biologique
ACP : Analyse en composantes principales
AMM : Autorisation de mise sur le marché
BA : Bois l'Abbé
CEFEL : Centre d'expérimentation fruits et légumes
CpGV : Granulovirus du carpocapse des pommes
CTIFL : Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
DHS : Distinction, homogénéité, stabilité
ESN : Éléments semi-naturels
FAO : Food and Agriculture Organization / Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
IA : Intelligence artificielle
IIF : Institut international du froid
IFT : Indice de fréquence de traitement phytosanitaire
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
IRHS : Institut de recherche en horticulture et semences
ITK : Itinéraire technique
MSN : Milieu semi-naturel
OAD : Outil d'aide à la décision
PFI : Production fruitière intégrée
QGIS : Logiciel de système d'information géographique
QTL : Quantitative Trait Loci / loci de caractères quantitatifs
R&D : Recherche et développement
R4P : Réseau de réflexion et de recherches sur les résistances aux pesticides
RETU : La Rétuzière
SDP : Stimulateur de défense des plantes
UEH : Unité expérimentale horticole
UV-C : Rayonnement ultraviolet C

Unités et notations

% : Pourcentage
°C : Degré Celsius
cm : Centimètre
CO_2 : Dioxyde de carbone
ha : Hectare
j : Jour
K : Potassium
K_2O : Oxyde de potassium
m : Mètre
m² : Mètre carré
mm : Millimètre
N : Azote
O_2 : Dioxygène
P : Phosphore
P_2O_5 : Pentoxyde de phosphore
t/ha : Tonne par hectare

INTRODUCTION

La culture du pommier occupe une place importante dans les productions fruitières françaises et européennes. Elle repose cependant sur un système de production exigeant, soumis à de nombreuses contraintes agronomiques, économiques et sanitaires. En effet, le caractère pérenne du pommier, les exigences élevées en matière de qualité visuelle et de conformité, et les pressions face aux ravageurs et aux maladies, induit une pression phytosanitaire importante qui a historiquement conduit à un usage important de produits de protection des cultures, notamment contre la tavelure, les pucerons, le carpocapse ou encore les maladies de conservation.

Dans un contexte de transition agroécologique et de réduction des intrants phytosanitaires, la gestion des bioagresseurs ne peut plus autant reposer sur la protection chimique. Les systèmes arboricoles doivent progressivement intégrer une combinaison de leviers complémentaires, comme la résistance variétale, les stimulateurs de défense des plantes, les plantes de service, les outils d'aide à la décision, le biocontrôle ou encore la préservation des auxiliaires. Ces approches visent à repenser le verger comme un agroécosystème, dans lequel la biodiversité peut contribuer à certaines fonctions écologiques, notamment la pollinisation et la régulation naturelle des ravageurs.

Les infrastructures agroécologiques, telles que les haies, les prairies, les bosquets, les arbres isolés ou les zones herbacées, peuvent jouer un rôle important dans le maintien des communautés d'arthropodes. Elles fournissent des habitats, des zones refuges et des ressources alimentaires à de nombreux organismes, en particulier les auxiliaires. De la même manière, la végétation de l'inter-rang peut influencer la présence des insectes selon sa richesse, sa composition floristique ou son stade phénologique. La disponibilité en fleurs, en nectar ou en pollen peut notamment modifier l'attractivité des bandes enherbées pour certains groupes fonctionnels.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet Cap Zéro Phyto, conduit au sein de l'INRAE, qui vise à concevoir des stratégies de protection des cultures permettant de réduire fortement l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse. L'étude a été menée au sein de l'unité expérimentale horticole de l'INRAE d'Angers-Nantes, sur deux sites expérimentaux situés dans le Maine-et-Loire : Bois l'Abbé à Beaucouzé et la Rétuzière à Champigné. Huit parcelles présentant des contextes culturaux et paysagers contrastés ont été suivies au cours de la campagne 2026.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers expérimentaux. L'étude porte plus particulièrement sur les communautés d'arthropodes et la flore de l'inter-rang. Plusieurs facteurs ont été pris en compte : la richesse végétale, le stade phénologique des espèces végétales, les pratiques culturales, l'indice de fréquence de traitement, la présence d'éléments semi-naturels autour des parcelles et les conditions climatiques. À travers ces analyses, il s'agit de mieux comprendre quels facteurs peuvent expliquer les variations de richesse, d'abondance et de fréquentation des différents groupes fonctionnels observés dans les vergers.

1.ETAT DE L'ART

1.1 L'HISTORIQUE DE LA CULTURE DE POMME ET LES CONTRAINTES LIEES

La culture de la pomme s'inscrit dans une histoire longue, mêlant la domestication végétale, l'innovation génétique, l'évolution des systèmes agricoles et le développement de l'arboriculture fruitière. Les travaux de génétique et d'histoire de la domestication montrent que le pommier cultivé, *Malus domestica*, trouve son origine principale en Asie centrale, à partir de *Malus sieversii*, avec une apparition de formes proches des pommes domestiques actuelles il y a environ 4 000 ans au Proche-Orient. Cette diffusion ancienne a été facilitée par les échanges humains, puis par le greffage, qui a joué un rôle décisif dans la fixation et la multiplication clonale des variétés. Le pommier domestiqué a ensuite été diffusé vers l'Europe et l'Afrique du Nord par les Grecs et les Romains il y a environ 1 500 ans, avant de s'étendre à l'échelle mondiale. Le pommier domestique a subi de nombreuses modifications génétiques volontaire ou non au cours du temps, avec par exemple des croisements avec des espèces sauvages sur la route de la soie. (Cornille et al., 2012, 2014)

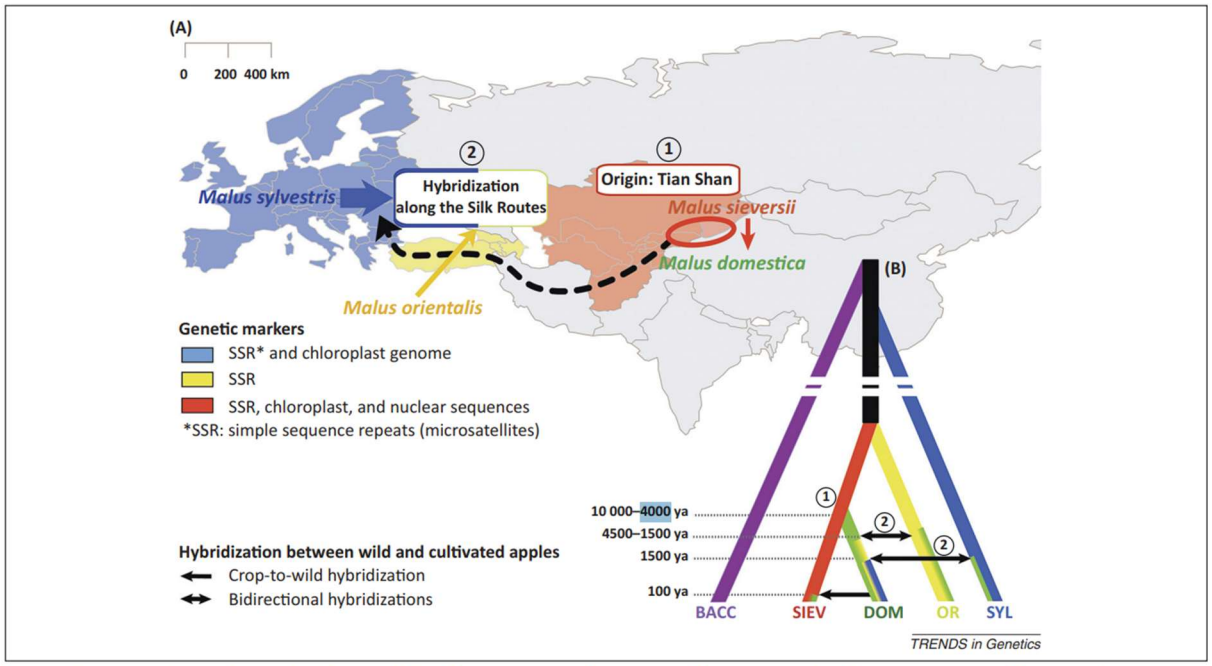


Figure 1. Evolutionary history of the cultivated apple. **(A)** This history was revealed by recent population studies using different types of molecular markers for evolutionary inferences. (1) Origin in the Tian Shan Mountains from *Malus sieversii*, followed by (2) dispersal from Asia to Europe along the Silk Route, facilitating hybridization and introgression from the Caucasian and European crabapples. Arrow thickness is proportional to the genetic contribution of various wild species to the genetic makeup of *Malus domestica*. **(B)** Genealogical relationships between wild and cultivated apples. Approximate dates of the domestication and hybridization events between wild and cultivated species are detailed in the legend. Abbreviations: BACC, *Malus baccata*; DOM, *M. domestica*; OR, *Malus orientalis*; SIEV, *M. sieversii*; SYL, *Malus sylvestris*; ya, years ago.

FIGURE 1 : CARTOGRAPHIE DE L'ORIGINE ET L'EXPANSION DU POMMIER AU COURS DES AGES (Cornille et al., 2014)

Dans l'histoire agricole européenne, l'arboriculture fruitière a longtemps reposé sur des vergers extensifs, souvent de haute tige, associés à des systèmes mixtes combinant prairie, élevage et arbres fruitiers. (Commission européenne, 2022) À partir du XXe siècle, et en particulier dans la période d'après seconde guerre, les transformations de l'agriculture ont profondément modifié ces vergers. Comme pour d'autres productions, l'arboriculture a été concernée par le mouvement général d'intensification agricole dans un contexte où la priorité était de nourrir la population et retrouver une autosuffisance alimentaire : à travers la

spécialisation des exploitations, sélection variétale, recours aux porte-greffes nanisants, augmentation de la densité de plantation, mécanisation partielle et augmentation de l'utilisation/ efficacité des produits phytosanitaires la productivité a grimpé en flèche. (Bellemain et al., 2017; Middleton, 2008) La densité de plantation est mesurée à partir du nombre d'arbres présents à l'hectare. On pourrait qualifier de peu dense un verger ne contenant que 150 -300 arbres/ ha, un verger dense pouvant aujourd'hui contenir jusqu'à 2000 arbres/ ha. (Commission européenne, 2022) La conduite du pommier est marquée par des changement de pratiques, passant de grands vergers peu denses à la généralisation de vergers denses, bas donc plus faciles à piloter, conçus pour optimiser le rendement, la qualité visuelle des fruits et la régularité de l'offre. (Middleton, 2008)

1.2. MARCHE DE LA POMME

La pomme (*Malus domestica* Borkh.) constitue l'un des fruits les plus produits et consommés au monde avec une production de 86 millions de tonnes en 2018, en comparaison la production de banane s'élevait à 125 millions la même année et celle de raisin à 80 millions, ces fruits faisant aussi parti des plus produits dans le monde. (FAO, 2026) Grâce à sa longue durée de conservation (qui varie en fonction des variétés), à la diversité de ses variétés et à la facilité de transport, elle s'est progressivement imposée comme un produit agricole globalisé. Les pommes peuvent être conservées 2 à 4 mois en chambre froide classique (0-4°C), jusqu'à 6 à 12 mois en atmosphère contrôlée ($O_2 \downarrow$ / $CO_2 \uparrow$), contre seulement quelques semaines en conditions ambiantes. (IIF, 2023) Le marché de la pomme présente néanmoins des spécificités importantes par rapport à d'autres productions agricoles : il reste fortement influencé par les contraintes phytosanitaires, les préférences variétales et la structuration des filières régionales. L'analyse du marché de la pomme nécessite ainsi de considérer simultanément les dynamiques mondiales de production et les particularités des marchés nationaux, en particulier celui de la France. (Lubello, 2020)

1.2.1 Un marché mondial dominé par quelques grands pays producteurs

Depuis la seconde moitié du XX^{e} siècle, la production mondiale de pommes a connu une forte croissance. Elle est passée d'environ 17 millions de tonnes en 1961 à plus de 80 millions de tonnes au début des années 2013, reflétant à la fois l'extension des surfaces cultivées et l'intensification des systèmes de production. (Lubello, 2020)

Cette croissance s'est accompagnée d'une transformation de la géographie mondiale de la production. Alors que l'Europe occidentale et l'Amérique du Nord dominaient historiquement la filière, la production s'est progressivement déplacée vers l'Asie, et plus particulièrement vers la Chine.

Aujourd'hui, la Chine représente à elle seule près de la moitié de la production mondiale de pommes, ce qui en fait l'acteur structurant du marché international. Les autres grands producteurs sont l'Union européenne, les États-Unis, la Turquie et l'Inde. Cette concentration de la production contribue à structurer les flux commerciaux internationaux et influence fortement les prix mondiaux. (Lubello, 2020)

Cependant, malgré cette dimension globale, le commerce international de pommes reste relativement limité comparé à la production totale où seulement 10% de la production mondiale est exportée. (CTIFL, 2022) Une part importante des volumes est consommée localement, notamment dans les pays producteurs. De plus, les échanges internationaux sont fortement contraints par des normes phytosanitaires et des barrières tarifaires, qui peuvent limiter l'accès aux marchés étrangers. Ces contraintes contribuent à une certaine régionalisation des échanges. (Lubello, 2020)

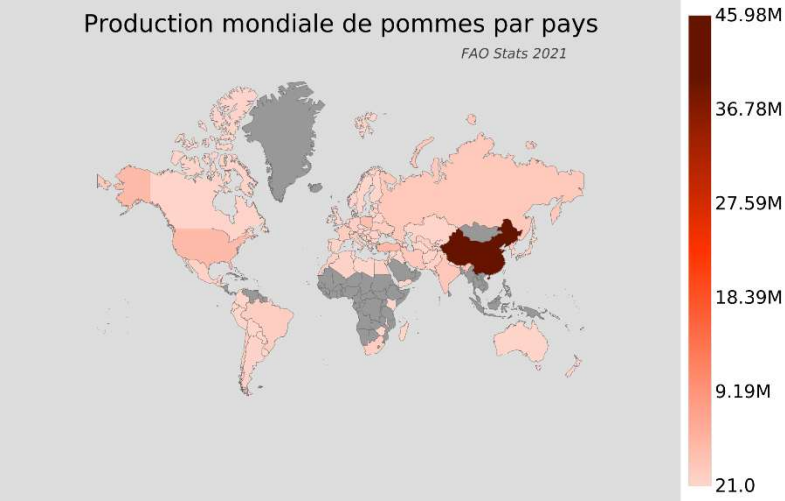


FIGURE 2 : PRODUCTION MONDIALE DE POMMES PAR PAYS EN MILLIONS DE TONNES (FAO STATS, 2021)

1.2.2 Un marché mondial spécifique parmi les productions agricoles

Comparé à d'autres cultures agricoles majeures telles que le blé ou le colza, le marché de la pomme présente plusieurs spécificités. Les grandes cultures comme le blé sont caractérisées par des marchés fortement internationalisés, avec des volumes d'échanges très importants et des prix largement déterminés à l'échelle mondiale.

A l'inverse la production fruitière est généralement plus intensive en main-d'œuvre et plus dépendante des conditions pédoclimatiques locales que les grandes cultures, c'est donc une culture plus hétérogène dont les volumes produits vont plus varier d'une année à l'autre. Ensuite, la pomme est un produit périssable, ce qui impose des contraintes logistiques importantes, malgré les progrès des techniques de stockage et de transport frigorifique. Enfin, la segmentation variétale du marché joue un rôle important : certaines variétés sont particulièrement recherchées sur certains marchés, ce qui limite la substituabilité entre produits. (Lubello, 2020)

1.2.3 La place de la France dans le marché européen et mondial

À l'échelle européenne, la France occupe une position importante dans la production de pommes avec une proportion d'environ 2,5% de la production mondiale de pomme en 2012 et entre 10% et 15% de la production européenne entre 2019 et 2024. (Nicolas et al., 2025) Elle se situe généralement parmi les trois premiers producteurs de l'Union européenne, derrière la Pologne et l'Italie. La production française est relativement stable et s'appuie sur plusieurs grands bassins de production, notamment dans le Sud-Est, la vallée de la Loire et le Sud-Ouest. (Lubello, 2020; Nicolas et al., 2025)

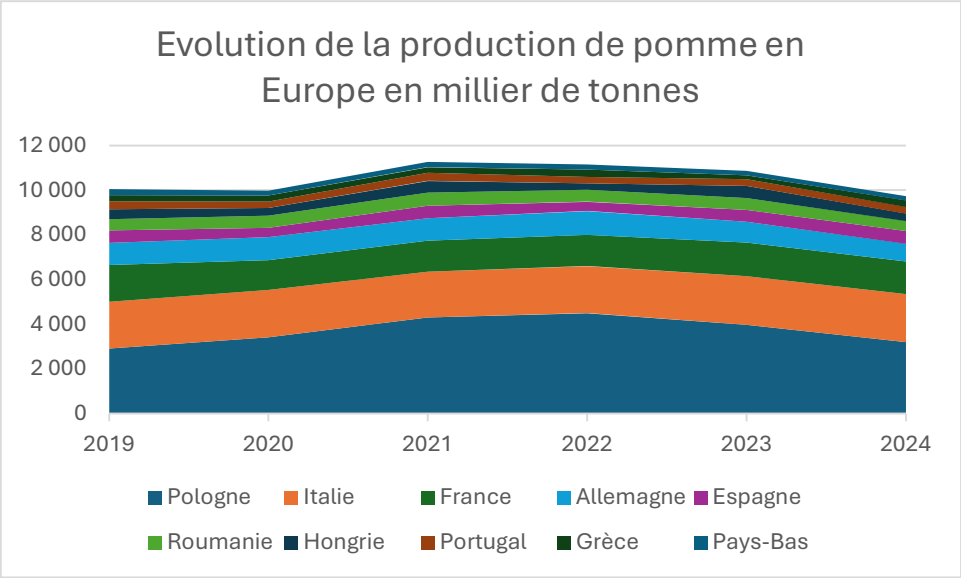


***FIGURE 3 : EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE POMME EN EUROPE EN MILLIERS DE TONNES* (Nicolas et al., 2025)**

La campagne 2024-2025 illustre cette stabilité relative. Selon les estimations disponibles, la production française recule légèrement d'environ 3 % par rapport à l'année précédente, tout en restant supérieure à la moyenne des cinq dernières années. Dans le même temps, la production européenne a connu une baisse plus marquée, notamment en raison d'aléas climatiques affectant certains grands pays producteurs comme la Pologne. (Nicolas et al., 2025)

La filière française se distingue également par une forte structuration autour de variétés commerciales bien identifiées, telles que Gala, Golden Delicious, Granny Smith ou encore Pink Lady. Ces variétés correspondent à des segments de marché spécifiques et permettent aux producteurs français de se positionner sur des marchés différenciés, notamment à l'export.



FIGURE 4 : PHOTOS DE QUELQUES VARIETES PARMI LES PLUS PRODUITES EN FRANCE (MENTTA, 2022)

En effet, bien que la majorité de la production soit destinée au marché intérieur, la France reste un exportateur significatif de pommes étant donné qu'elle exporte 1/3 de sa production, soit environ 600 000 tonnes. Les exportations concernent principalement les marchés européens, mais également certains pays du Moyen-Orient, d'Asie ou d'Amérique du Sud. Les performances à l'export dépendent toutefois fortement de la concurrence internationale, notamment celle des pays d'Europe de l'Est et de l'hémisphère Sud. (Lubello, 2020; Nicolas et al., 2025)

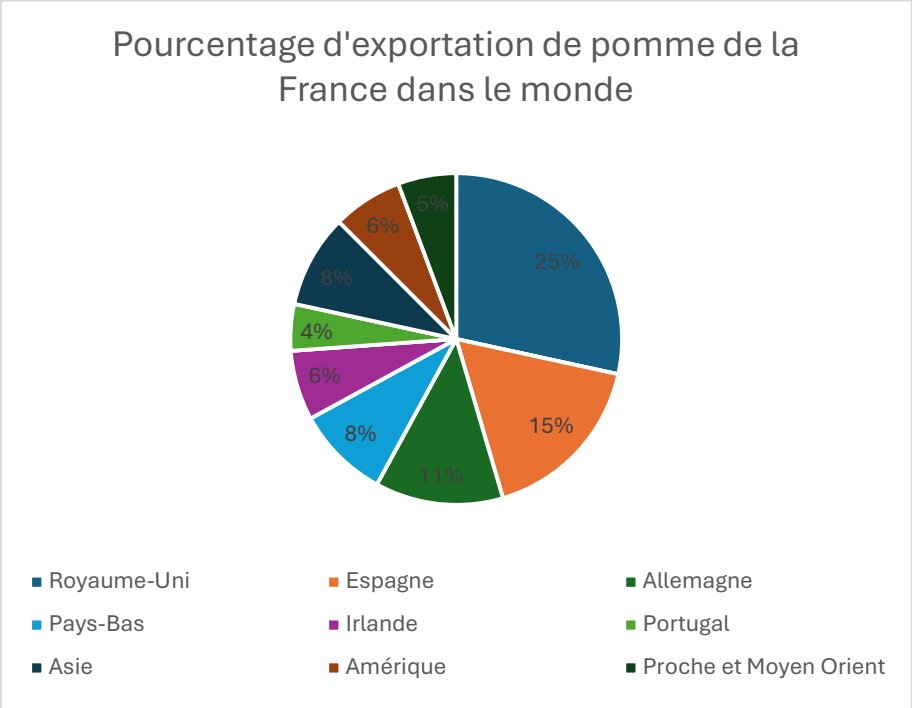


FIGURE 5 : POURCENTAGE D'EXPORTATION DE POMME DE LA FRANCE DANS LE MONDE EN 2023 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGRO-ALIMENTAIRE ET DE LA SOUVERAINETE ALIMENTAIRE, 2023)

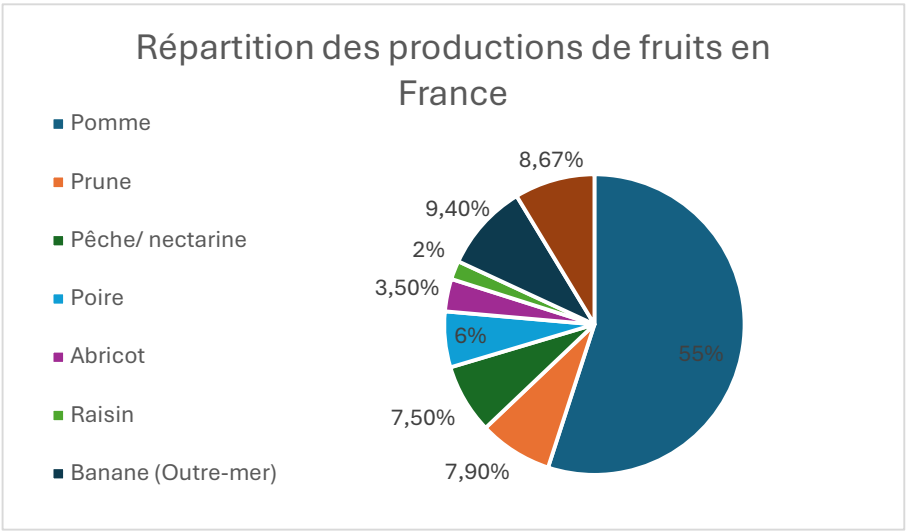


FIGURE 6 : REPARTITION DES PRODUCTIONS DE FRUITS EN FRANCE EN 2023 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGRO-ALIMENTAIRE ET DE LA SOUVERAINETE ALIMENTAIRE, 2023)

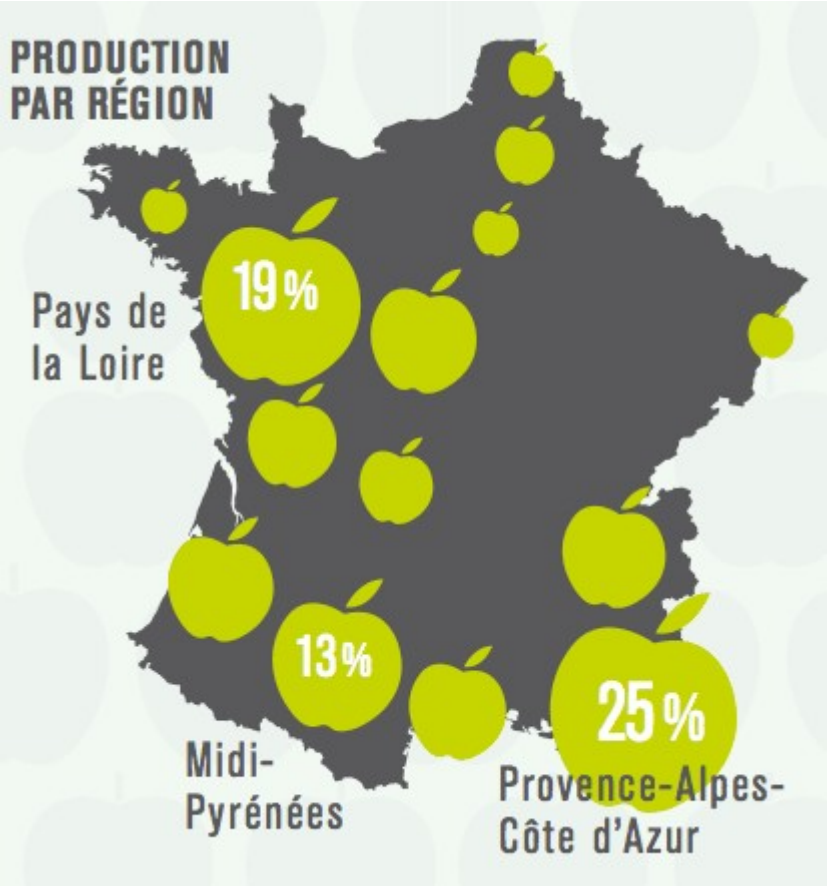


FIGURE 7 : REPARTITION DE LA PRODUCTION DE POMME PAR REGION FRANÇAISE (PLANETOSCOPE, 2012)

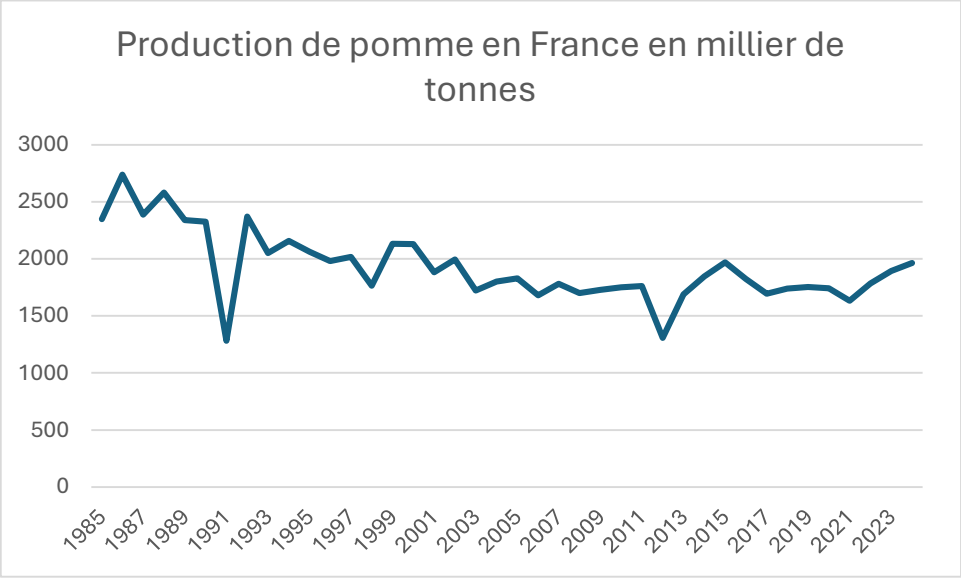


FIGURE 8 : PRODUCTION DE POMME EN FRANCE EN MILLIERS DE TONNES (FAO, 2026)

1.2.4 Un marché soumis à des contraintes économiques et climatiques

Le marché de la pomme en France est influencé par plusieurs facteurs structurels. D'une part, la consommation domestique reste relativement stable, mais peut être affectée par la concurrence d'autres fruits, en particulier les fruits à noyau en été ou les agrumes en hiver. D'autre part, les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans les volumes de production et la qualité des récoltes. (Balouria, 2020; Nicolas et al., 2025)

Les épisodes de gel printanier, les anomalies de température ou encore les excès de précipitations peuvent fortement perturber les vergers. Ces aléas ont des répercussions directes sur la production et peuvent entraîner des fluctuations de prix sur le marché. Par ailleurs, les enjeux environnementaux et les politiques de réduction des intrants phytosanitaires transforment progressivement les systèmes de production, notamment dans le cadre de démarches agroécologiques ou de programmes visant à réduire l'usage des pesticides. (Balouria, 2020)

1.3 LE POMMIER

1.3.1 Description générale

Le pommier (*Malus domestica Borkh.*) est un arbre fruitier caduc appartenant à la famille des Rosacées. Il présente une taille variable selon les conditions de culture et le porte-greffe, pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur à l'état naturel, mais restant plus compact en verger intensif (forme en palissade) pour faciliter son exploitation. Son port naturel est généralement étalé à arrondi, avec une ramification importante formant une couronne dense.



FIGURE 9 : COMPARAISON D'UN POMMIER EN HAUTE TIGE A GAUCHE ET EN PALISSADE A DROIT (BIOACTUALITES.CH, 2026 ; MA PASSION DU VERGER, S. D.)

Le pommier est constitué d'un tronc portant des branches principales (charpentières), elles-mêmes subdivisées en ramifications secondaires. Les organes végétatifs comprennent les bourgeons à bois et les bourgeons à fleurs, ainsi que les organes fructifères comme les dards et les lambourdes.

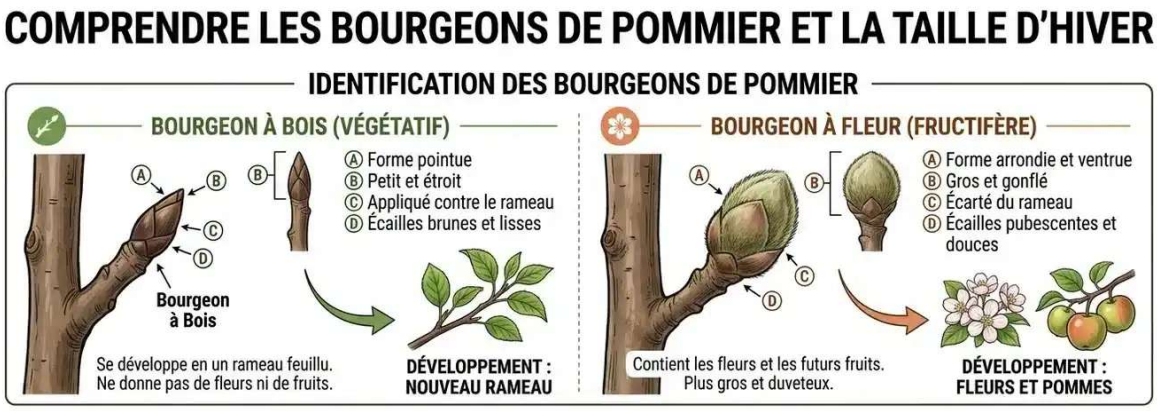


FIGURE 10 : SCHEMA DES BOURGEONS A BOIS ET A FLEUR (ÉLISE MALECOT-BOURDELLE, 2026)

Les feuilles sont simples, alternes, généralement ovales, à bord denté et à nervation marquée. Elles sont caduques et tombent à l'automne, marquant l'entrée en dormance de l'arbre. (Lauri et al., 2009 ; Lespinasse, INRAE).



FIGURE 11 : PHOTO D'UNE FEUILLE DE POMMIER (EPHYTIA, S. D.)

Le système racinaire varie fortement selon le type de porte-greffe que nous décrirons plus en détail dans la partie « Itinéraire technique ». Le système racinaire peut être profond et étendu sur franc, ou plus superficiel et fibreux sur porte-greffes nanisants. Ce système racinaire assure à la fois l'ancrage de l'arbre et l'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Le pommier est relativement résistant aux climats tempérés, mais reste sensible aux stress abiotiques comme le gel printanier ou les sécheresses prolongées. *(Inspection canadienne des aliments, 2011)*



FIGURE 12 : PHOTO D'UN RANG DE POMMIER SUR PORTE-GREFFE EN PALISSADE (CTIFL, 2014)

1.3.2 Description des fleurs et des fruits

Les fleurs du pommier sont typiques des Rosacées. Elles sont regroupées en inflorescences de type corymbe et comportent généralement cinq pétales de couleur blanche à rosée. Chaque fleur possède également cinq sépales et un nombre élevé d'étamines (environ 15 à 25) disposées autour d'un pistil composé de plusieurs carpelles.

Le fruit du pommier est une pomme, correspondant à un faux-fruit (pseudocarpe) issu du développement du réceptacle floral. Il est généralement de forme arrondie à légèrement allongée, avec une peau (épiderme) pouvant présenter différentes couleurs (vert, jaune, rouge ou bicolore). La chair est riche en sucres, en eau et en composés aromatiques. Le cœur du fruit contient les graines (pépins), issues de la fécondation des ovules. *(Inspection canadienne des aliments, 2011)*



FIGURE 13 : PHOTO D'UNE FLEUR DE POMMIER (SORBONNE UNIVERSITE, 2015)

1.3.3 Reproduction

Le pommier se reproduit naturellement par voie sexuée, grâce à la pollinisation entomophile. Le pollen est transporté par les insectes, principalement les abeilles, d'une fleur à une autre. La plupart des variétés de pommier sont auto-incompatibles, ce qui signifie qu'elles nécessitent la présence d'une autre variété compatible pour assurer la fécondation et la production de fruits. Il ne peut donc en général pas s'autoféconder mais utilise plutôt le processus de fécondation croisée.

Dans les systèmes de culture, cette contrainte est prise en compte lors de la conception des vergers, en intégrant des variétés pollinisatrices et en favorisant la présence d'insectes pollinisateurs. Si on prend l'exemple de la variété Golden, plusieurs variétés peuvent être les pollinisatrices de la Golden, comme par exemple les variétés Reine des reinettes et Clochard. Une fois le verger installé, la reproduction naturelle permet la formation des fruits chaque année.

Cependant, la multiplication du pommier en agriculture se fait majoritairement par greffage, afin de conserver les caractéristiques variétales. Cette technique consiste à associer un greffon (variété choisie) à un porte-greffe, permettant de contrôler la vigueur, la productivité et l'adaptation aux conditions de sol (voir partie IV itinéraire technique). *(Inspection canadienne des aliments, 2011)*

1.3.4 Cycle de développement

Le cycle de développement du pommier s'organise sur une année, avec une alternance entre phases de repos et phases actives.

En hiver (décembre à février), l'arbre est en phase d'endodormance. Les bourgeons sont fermés et protégés contre le froid. Cette période est nécessaire pour satisfaire les besoins en froid de l'arbre.

Au début du printemps (mars-avril), on observe le débourrement (levée de la dormance), correspondant à l'ouverture des bourgeons et au développement des premières feuilles. La croissance végétative s'intensifie progressivement.

Au printemps (avril-mai), intervient la floraison, suivie de la nouaison, c'est-à-dire la formation des jeunes fruits après fécondation.

En début d'été (mai-juin), les fruits entrent en phase de croissance, avec une augmentation rapide de leur taille. Cette période est souvent associée à une chute physiologique des fruits (chute de juin).

En été (juin-août), la croissance des fruits se poursuit, accompagnée d'une accumulation de sucres et de composés de qualité nutritionnels et organoleptiques.

À la fin de l'été et en automne (août-octobre), les fruits arrivent à maturité et sont récoltés. L'arbre commence ensuite sa phase de sénescence, avec le jaunissement et la chute des feuilles qui déclenche l'entrée en dormance.

Enfin, à l'automne (octobre-novembre), le pommier entre à nouveau en dormance. *(Inspection canadienne des aliments, 2011 ; Martínez et al., 2019)*

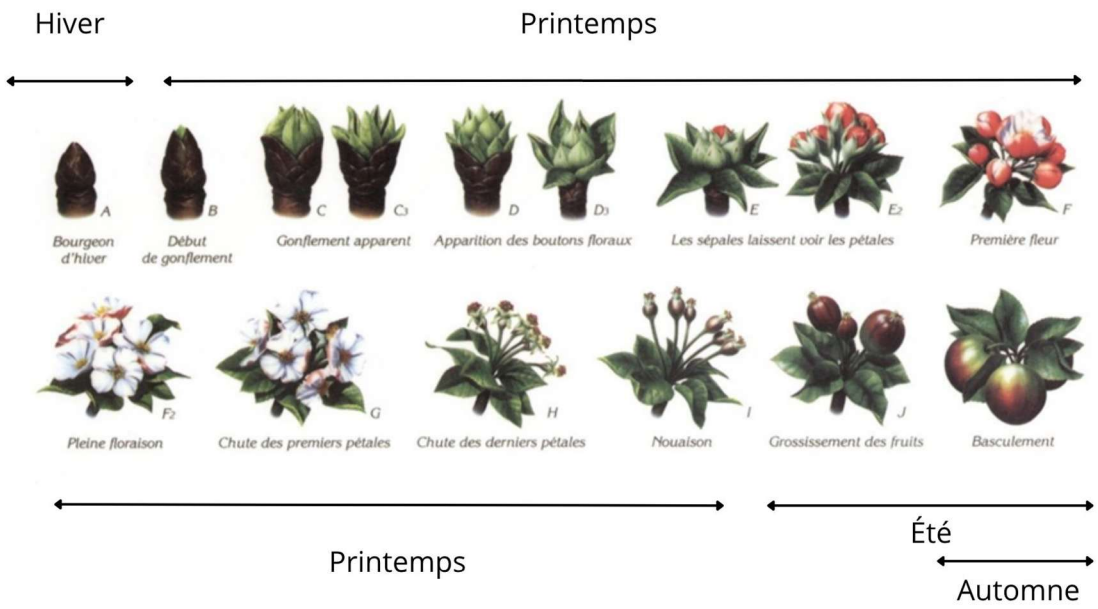


FIGURE 14 : STADES PHENOLOGIQUES DU POMMIER D'APRES FLECKINGER. (PLANCHE REALISEE PAR PHILIPPE DESTRES, 1986)

1.3.5 De la floraison à la formation du fruit

La transformation de la fleur en fruit constitue une étape clé du cycle du pommier. Après la pollinisation, le pollen germe sur le stigmate et le tube pollinique atteint l'ovaire, permettant la fécondation des ovules. Cette étape conditionne la formation des graines (pépins).

Suite à la fécondation, la fleur subit une série de transformations : les pétales tombent, les ovaires se développent et le réceptacle floral se transforme pour former le fruit. La croissance du fruit se déroule en plusieurs phases, incluant une phase initiale de division cellulaire, suivie d'une phase d'expansion cellulaire.

Le fruit évolue ensuite vers la maturité, avec des changements de couleur, de texture et de composition chimique (accumulation de sucres, diminution de l'acidité). La qualité finale du fruit dépend de nombreux facteurs, notamment la pollinisation, les conditions climatiques et les pratiques culturales. *(Inspection canadienne des aliments, 2011)*

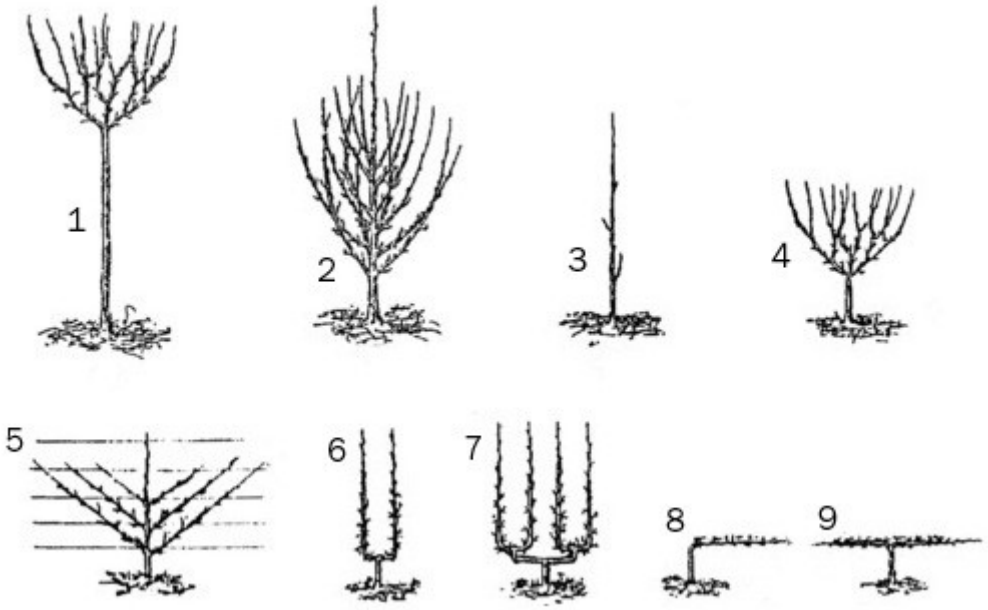
1.4. ITINERAIRE TECHNIQUE DU POMMIER

L'itinéraire technique du pommier repose sur une succession de choix structurants qui engagent le verger sur le long terme : choix du matériel végétal, forme donnée à l'arbre, densité de plantation, gestion de la vigueur, maîtrise de la charge, entretien du sol et protection phytosanitaire. Dans une culture pérenne comme le pommier, ces décisions sont particulièrement déterminantes, car elles conditionnent à la fois la mise à fruit, la régularité de production, la qualité des pommes, la sensibilité aux bioagresseurs et la rentabilité économique du verger pendant toute sa durée de vie. Le guide technique 2024 publié par Séverine Chastaing et ses collaborateurs rappelle ainsi que le triptyque sol/porte-greffe/variété est déterminant dans la réussite d'un verger de pommier. (Chastaing et al., 2024)

1.4.1 Architecture du verger, densité et formage des arbres

La tendance actuelle en pomiculture est à des vergers densifiés, conduits sous des formes relativement plates et étroites, afin de faciliter les interventions, d'améliorer l'interception lumineuse, de favoriser la précocité de mise à fruit et réduire les coûts de main-d'œuvre. Le mémoire de Hounkpe-Daho indique explicitement que la conduite du pommier évolue vers des formes plates, mises en œuvre à partir de plants préformés ou de la taille mécanique, avec un objectif de réduction des coûts et de préparation à la robotisation. (Hounkpe-Daho, 2024) Le formage durant les premières années est essentiel, il vise à construire une architecture régulière, bien hiérarchisée, capable de porter une production abondante tout en restant compatible avec la circulation de l'air, la pénétration de la lumière et les interventions mécaniques. (Chastaing et al., 2024)

Dans les essais conduits au CEFEL, deux formes de conduite sont notamment mentionnées : la conduite en axe et la conduite en double axe. La différence entre ces deux méthodes tient au nombre de branche charpentière, c'est-à-dire les branches principales qui vont porter l'ensemble de la production. Dans le cadre de la conduite en biaxe, les deux branches partent du tronc pour donner une forme en V au pommier. Il faut pour cela former le pommier une fois implanté en accrochant les branches à un tuteur horizontal (fil de fer le long du rang) pour qu'il prenne cette forme naturellement avec le temps.



1 : tige / 2 : pyramide / 3 : scion / 4 : gobelet / 5 : palmette / 6 : U simple / 7 : U double / 8 : cordon / 9 : cordon double

FIGURE 15 : SCHEMA DES DIFFERENTES FORMES DE POMMIERS (GERBEAUD, 2023)



FIGURE 16 : PHOTO D'UN POMMIER EN BIAXE (CTIFL, 2013)

Les distances de plantation rapportées sont de 4 × 0,90 m pour les vergers en axe, soit 2 778 arbres/ha, et de 4 × 1,20 m pour les vergers en bi-axe, soit 2 083 arbres/ha. (Hounkpe-Daho, 2024)

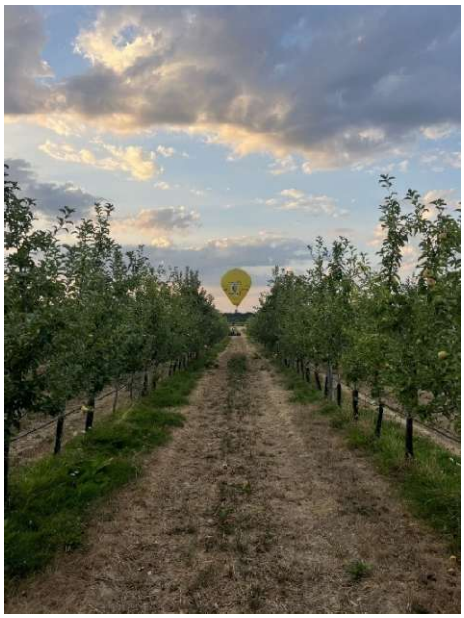


FIGURE 17 : PHOTO D'UNE PARCELLE DE POMMIER EN AXE SIMPLE (PHOTO PERSONNELLE)

Il existe d'autres formes, elles-mêmes parfois en simple ou double axe, par exemple la conduite en U (en axe ou biaxe) qui donne de beaux fruits et une bonne fructification malgré une taille d'entretien complexe et une formation longue. Il existe aussi la forme en palmette verrier 4 branches qui est assez similaire à la forme en U, les deux étant des formages dit « plats » ou en 2 dimensions. (cdn Paris, 2024)

Il existe aussi diverses formes en 3 dimensions comme celle en colonne avec un tronc principal qui va porter l'ensemble des branches de l'arbre, espacé de ses congénères de 1,50 m à 2 m. La forme en gobelet est une alternative, caractérisée par un tronc très court et plusieurs branches principales qui en partent sur lesquels vont pousser les fruits. Cette forme a l'avantage de permettre une bonne fructification mais a besoin d'être espacée de 3 m à 4 m des autres arbres et elle résulte, tout comme la forme en colonne, d'une taille complexe. (cdn Paris, 2024)

Pour les formations en basse-tige, demi-tige et haute-tige, qui sont des arbres aux formes proches de celle en gobelet, la nuance est faite à la hauteur du tronc et donc de la première branche. Pour la forme en basse-tige la première branche est à 0,4 m du sol, en demi-tige elle est à 1,2 m du sol et à 1,8 m du sol en haute-tige. Ces dispositions nécessitent un plus grand espacement entre les arbres allant jusqu'à 7 m ou 8 m, et elles peuvent être plus sensibles aux maladies et au risque de dessèchement. Elles sont en revanche plus facile à former, la taille est simple, la fructification est bonne et la durée de vie peut être plus longue. (cdn Paris, 2024)

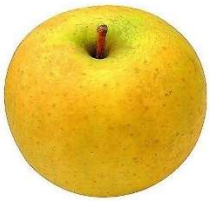
Le pommier est une culture pérenne dont la durée de vie économique dépend du système choisi. L'implantation d'un verger de pommiers bio coûte environ 40 000 à 50 000 €/ha, selon les choix techniques : irrigation, filets paragrêle, filets Alt'Carpo, densité, palissage, etc. En ajoutant les frais de mécanisation et de main-d'œuvre liés à la plantation, le coût global peut atteindre environ 50 000 à 65 000 €/ha. Selon le guide technico-économique, le verger est amorti sur 10 à 15 ans, ce qui donne une bonne indication sur sa durée d'exploitation économique dans les systèmes intensifs étudiés. (Chastaing et al., 2024)

1.4.2 Choix variétal et caractéristiques des variétés

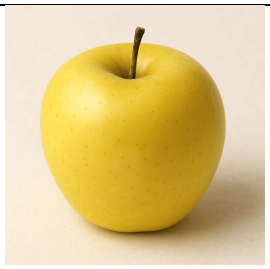
Le choix variétal est déterminant dans l'implantation d'un verger, étant donné la pérennité de la production. Ce choix ne repose pas seulement sur des critères gustatifs ou commerciaux, il faut raisonner ce choix selon l'adaptation au marché, le mode de commercialisation, le système de verger, la régularité de production, la sensibilité aux ravageurs et maladies et le potentiel de conservation. Séverine Chastaing et les autres co-auteurs insistent aussi sur le fait que, dans les systèmes à faibles intrants, la sensibilité à la tavelure et au puceron cendré est particulièrement déterminante. (Chastaing et al., 2024)

Les tableaux variétaux du guide de conduite de pommier montrent bien que les variétés diffèrent par leur vigueur, leur productivité, leur sensibilité à l'alternance, leur précocité de floraison, leur date de récolte, leur potentiel de conservation et leur sensibilité aux bioagresseurs et maladies. Par exemple, certaines variétés résistantes à la tavelure, comme Crimson Crisp, Goldrush, Juliet ou Choupette, semblent techniquement intéressantes en bio, alors que des variétés majeures du marché comme Gala, Granny Smith ou Fuji restent plus délicates à conduire du fait de leur sensibilité plus marquée à certaines maladies ou ravageurs qui nécessitent des traitements phytosanitaires particuliers. (Chastaing et al., 2024)

TABLEAU 1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES PRINCIPALES VARIETES DE POMMES PRODUITES EN FRANCE (Chastaing et al., 2024)

Variétés	Avantages	Inconvénients	Date maturité	Conservation en froid normal	Photo pomme
Crimson Crisp	Résistante à la tavelure et peu sensible au puceron cendré	Sensibles aux oïdiums, vigueur/ productivité faible à moyenne	Dernière décade d'août	Décembre	 https://www.dalival.com/pommes/crimson-crisp-coop-39/
Goldrush	Résistante à la tavelure, bonne qualité gustative et bonne conservation	Sensible au puceron cendré	2ème décade d'octobre	Fin Mars	 https://www.levergerdescoudreaux.fr/fr/catalog-14/pommes-acidulees/la-goldrush
Juliet	Bonne productivité, résistante à la tavelure	Vigueur moyenne, sensibilité moyenne aux	1ère décade d'octobre	Février	

		pucerons cendrés et à l'oïdium			 https://www.provincesbio.com/pommes/6730-5100947-7519600139704.html
Choupette	Bonne productivité et vigueur moyenne à forte, résistante à la tavelure	Un peu sensible à l'oïdium et au puceron cendré	2ème décade d'octobre	Fin Mars	 https://www.dalival.com/pommes/choupette-dalinette/
Gala	Bonne productivité	Sensible à l'alternance, vigueur moyenne	Fin août	Décembre	 http://luchyprimeurs.com/fruits-a-pepins/2-gala.html
Granny Smith	Bonne productivité, peu sensible à l'alternance	Vigueur moyenne	Mi-octobre	Mi-février	 https://www.istockphoto.com/fr/photos/pomme-granny-smith
Fuji	Bonne vigueur et productivité	Sensible à l'alternance	3ème décade d'octobre	Février	 https://terrabacchus.fr/shop/fruits-et-legumes/fruits/pomme-fuji/

Golden	Vigueur moyenne à forte, mise à fruit rapide et régulière	Sensible à la tavelure, assez sensible à l'oïdium, aux pertes d'eau	3ème décade de septembre	Mars	 https://au-fil-des-saveurs.com/produit/pomme-golden/

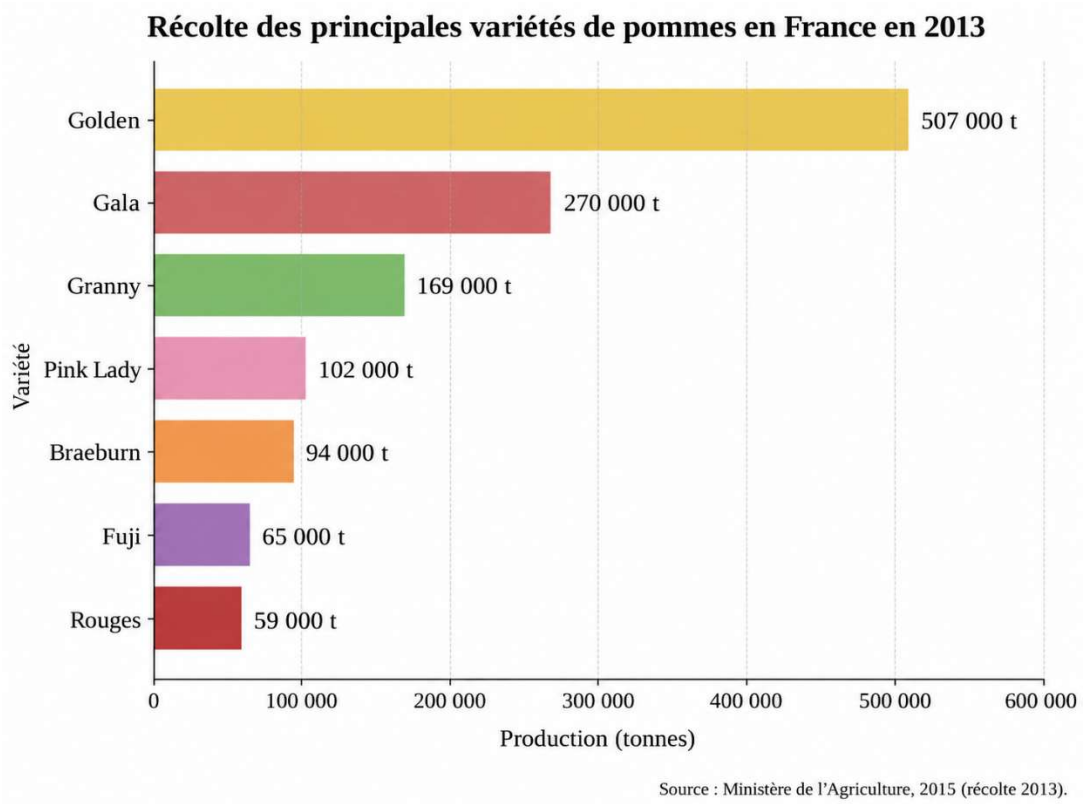


FIGURE 18 : RECOLTE DES PRINCIPALES VARIETES DE POMMES EN FRANCE EN 2013 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, 2015)

Il est aussi important de rappeler que la combinaison de plusieurs variétés rependue en pomiculture et permet de sécuriser la production de pomme en cultivant des variétés résistantes à différents types d'aléas, ravageurs ou maladies. La culture associée des différentes variétés mentionnées précédemment comme Crimson Crisp, Goldrush, Juliet et Ladina, Lory ou Opal permettent par exemple une bonne résistance à la fois à la tavelure et au puceron cendré. Même chose avec la Pink lady qu'il est très bénéfique d'avoir dans ses vergers étant donné que c'est l'une des espèces les plus précoces. Elle va donc fournir des pommes tôt et du pollen avant la majorité des plantes, favorisant la présence des auxiliaires des cultures. (Chastaing et al., 2024)

1.4.3 Les porte-greffes : types et rôles

Un porte-greffe est la partie inferieure d'un arbre (racinaire + tronc) que l'on prélève pour y implanter un greffon qui est la partie aérienne d'un autre arbre. Cette greffe passe par l'entaille de la partie supérieur du tronc et l'implantation du greffon sur celui-ci, le futur pommier sera alors composé du système racinaire du porte-greffe et des fleurs/ fruits de l'arbre sur lequel a été prélevé le greffon. Le choix du porte-greffe va dépendre de différents critères notamment son adaptation au sol et au climat, sa résistance aux maladies, sa capacité à soutenir vigoureusement le greffon et le futur arbre. Il pourra apporter les nutriments (eau + éléments minéraux) nécessaires grâce à son système racinaire. Le choix du porte-greffe est aussi conditionné par les perspectives de production de l'exploitation, en fonction de l'intensité de production, la capacité d'irrigation, la main d'œuvre disponible… (Grolleau, 2023)

Le porte-greffe est donc un levier fondamental dans la conduite technique du pommier car il influence directement la vigueur, l'ancrage, la précocité de mise à fruit, la productivité, l'adaptation au sol, la sensibilité à certaines maladies. Il influence aussi la compatibilité génétique avec le greffon, avec un besoin d'avoir deux individus proches génétiquement, du même genre ou même famille au minimum.

D'un point de vue général, les pommiers peuvent être conduits sur des porte-greffes francs (issus de semis) ou sur des porte-greffes clonaux. Les documents techniques consultés rappellent que les porte-greffes clonaux sont aujourd'hui largement recommandés en arboriculture commerciale car ils permettent de mieux contrôler la taille et la production de l'arbre et d'accélérer la mise à fruit par rapport aux porte-greffes de semis. Ils se répartissent classiquement en types nanisants, semi-nanisants et plus vigoureux. (Bourlès, 2008; Grolleau, 2023)

Dans les références mobilisées ici, les séries les plus importantes sont les séries M et MM issues d'East Malling, ainsi que les séries Geneva plus récentes. Le guide mentionne ainsi les M9 (EMLA, NAKB, Pajam 1 & 2), M7, MM106, mais aussi les G11, G41, G202, AR295-6 ou M116. Il précise que le groupe des M9 est le plus répandu et qu'il induit une entrée en production rapide et régulière avec des fruits de qualité, mais avec un enracinement superficiel et une sensibilité au puceron lanigère. À l'inverse, des porte-greffes plus vigoureux comme MM106 ou M7 offrent davantage de vigueur et d'ancrage, avec toutefois d'autres limites, par exemple la sensibilité du MM106 au phytophthora. Séverine Chastaing et les autres auteurs signalent aussi l'intérêt des porte-greffes Geneva, en particulier G11 et G202, pour leur comportement vis-à-vis de la fatigue des sols ou leur vigueur adaptée à certains contextes. (Chastaing et al., 2024)

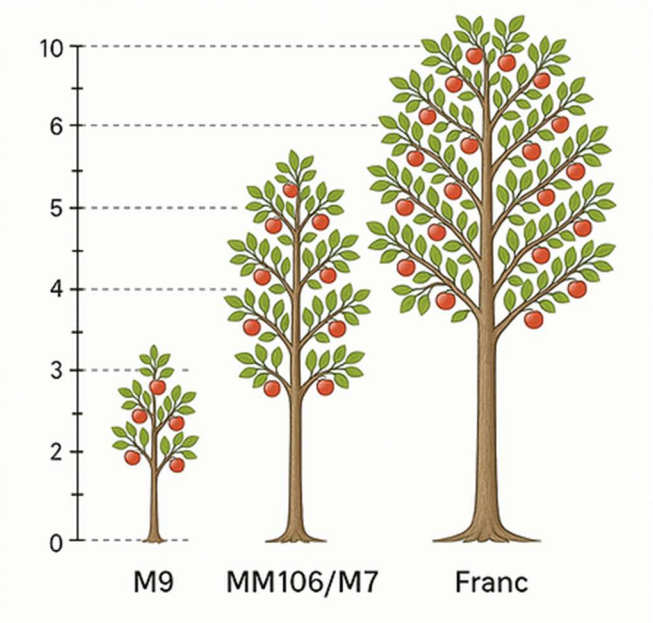


FIGURE 19 : SCHEMA DES DIFFERENTES TAILLES DE POMMIERS EXISTANTES EN FONCTION DU PORTE-GREFFE UTILISE (PEPINIERE DES FRUITIERS, 2025)

1.4.4 Entretien du verger

Après avoir expliqué comment étaient implantés les pommiers nous allons maintenant étudier l'ensemble des étapes d'entretien. Voici tout d'abord une frise chronologique des différentes interventions opérée sur un verger sur une campagne de production. Ces interventions sont ensuite détaillées dans la suite de la partie « 1.4.4 Entretien du verger ».

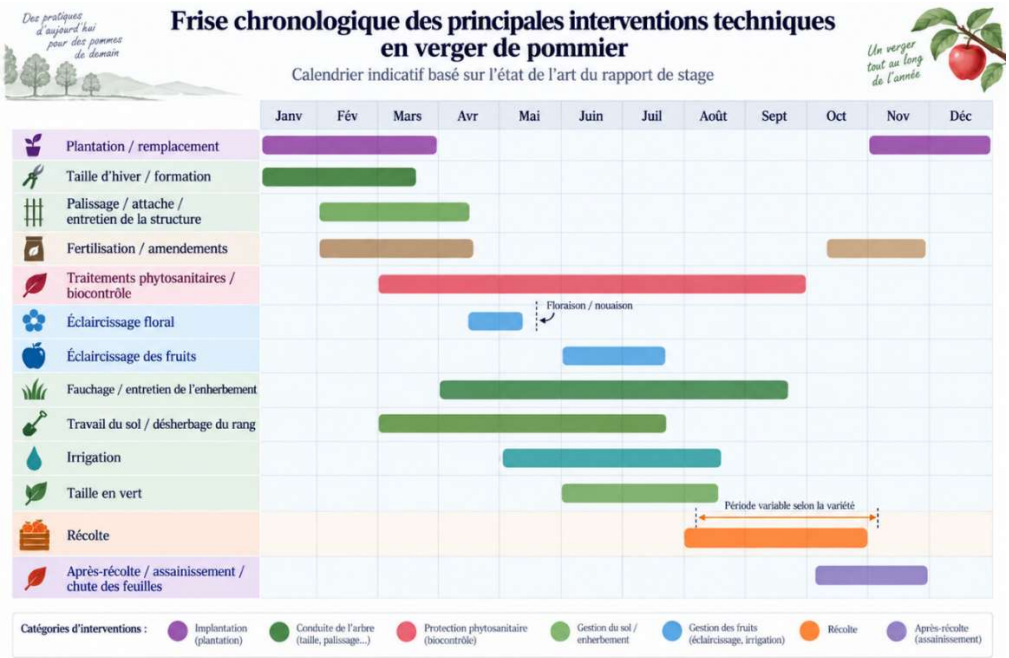


FIGURE 20 : FRISE CHRONOLOGIQUE DES PRINCIPALES INTERVENTIONS TECHNIQUES EN VERGER DE POMMIER GENEREE AVEC GPT-5.6 LUNA (HOUNKPE-DAHO, 2024 ; CHASTAING ET AL., 2024 ; YELLE, 2015)

1) Taille

L'entretien du verger comprend d'abord la taille, qui constitue le premier levier de maîtrise de la charge. C'est une étape importante puisqu'elle régule la production, optimise la qualité des fruits, favorise le retour à fleur, améliore la répartition spatiale des branches pour obtenir un arbre équilibré et faciliter l'accès à la lumière. La taille peut aussi avoir un intérêt dans le formage des pommiers comme nous l'avons vu précédemment. Elle est donc essentielle pour avoir un arbre bien formé dont les branches ne sont ni trop fines (risque de cassure au poids des pommes) ni trop épaisses (production fruitière plus faible). La taille peut s'effectuer sur une période assez large durant son développement végétatif en hiver, de novembre à mars. (Hounkpe-Daho, 2024)

Le guide bio ajoute que, sur certaines variétés, une extinction des bourgeons peut être pratiquée dès le stade D3 pour ajuster plus finement le nombre de boutons floraux au potentiel de l'arbre. (Chastaing et al., 2024)

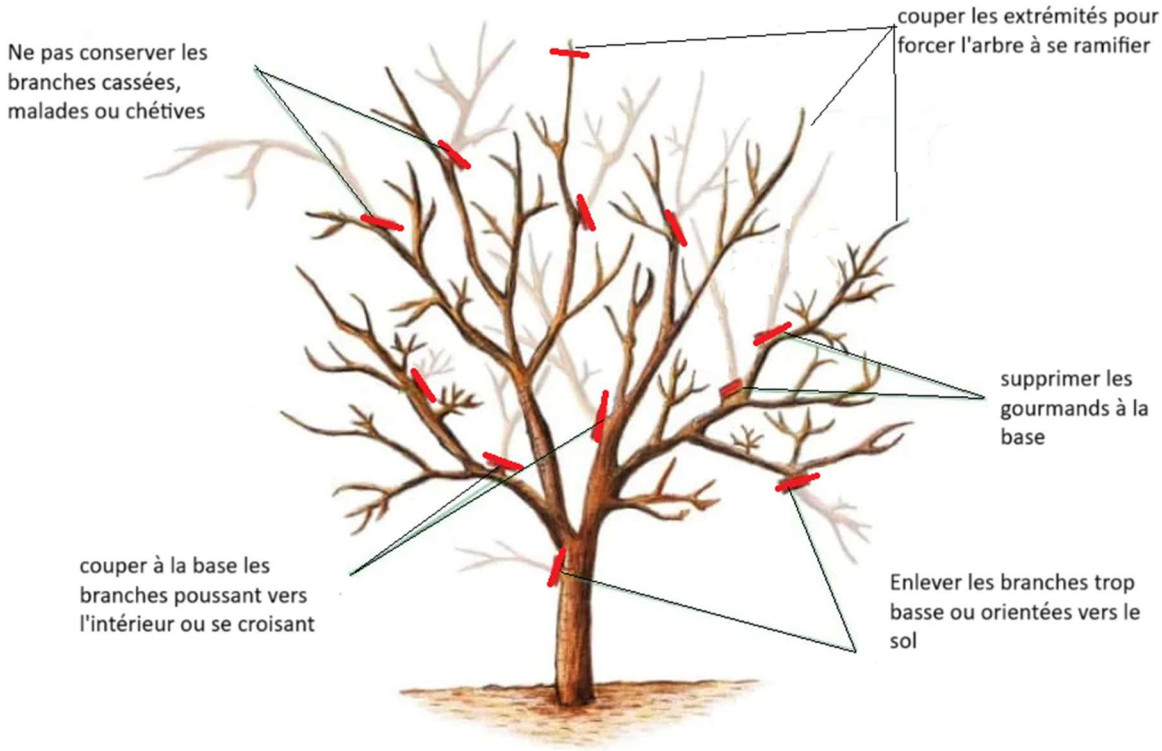


FIGURE 21 : SCHEMA DES TECHNIQUES DE TAILLE D'UN POMMIER (PEPINIERE DES FRUITIER, 2025)

2) Travail du sol

L'entretien du sol sur le rang est un autre volet majeur qui comprend plusieurs options : enherbement permanent, désherbage mécanique, travail du sol, paillage, système sandwich, voire désherbage thermique ou électrique. L'objectif est de limiter la concurrence hydrique et minérale tout en préservant la structure du sol et, autant que possible, la biodiversité auxiliaire. Mais chaque option a ses compromis : l'enherbement favorise la biodiversité mais accroît la concurrence ; le travail du sol réduit la concurrence et enfouit la matière organique mais peut endommager les racines et les habitats d'auxiliaires ; les paillages limitent les adventices mais peuvent favoriser les campagnols. (Chastaing et al., 2024)

L'absence totale de travail du sol est déconseillée car elle ne permet pas une bonne aération du sol, un renouvellement des couches du sol et un brassage des nutriments enrichissant le sol. A noter que l'enherbement permanent ne signifie pas qu'aucune action n'est menée mais plutôt que la flore est volontairement laissée autour des arbres, à l'exception de certaines espèces envahissantes ou pénalisantes. (Yelle, 2015)

3) Fertilisation

La fertilisation a pour objectif d'apporter les nutriments nécessaires au développement de l'arbre en vue de sa production de fruit. Trois composés sont principalement introduits dans les pommiers à savoir l'azote (N), le pentoxyde de phosphore (P2O5) et le l'oxyde de potassium (K2O). Ces nutriments sont ensuite transformés par les micro-organismes de l'arbre et du sol pour former trois nouveaux composés que sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). La nutrition doit, elle aussi, être ajustée au type de verger, à l'âge des arbres et au potentiel de production. Il convient aussi de connaitre les caractéristiques du sol sur lesquels sont implantés les pommiers pour identifier les éléments manquants et faire le choix entre engrais et amendement, le premier servant à nourrir les arbres et le second à améliorer la qualité (physico-chimique/ bactérienne) du sol. La période de fertilisation est elle aussi primordiale et peut-être fractionnée en plusieurs fois. (Chastaing et al., 2024)

TABLEAU 2 : RECAPITULATIFS DES BESOINS EN UNITE PAR HA DES ELEMENTS N, P_2O_5, K_2O (LARRIEU, 2019)

Objectif de production	**Azote N**	**Phosphore P_2O_5**	**Potasse K_2O**
30 t/ha	30 à 60 unités/ha	12 à 24 unités/ha	45 à 90 unités/ha
40 t/ha	40 à 80 unités/ha	16 à 32 unités/ha	60 à 120 unités/ha
50 t/ha	50 à 100 unités/ha	20 à 40 unités/ha	75 à 150 unités/ha
60 t/ha	60 à 120 unités/ha	24 à 48 unités/ha	90 à 180 unités/ha

La fertilisation du pommier est généralement raisonnée à partir de l'objectif de rendement, exprimé en tonnes de fruits par hectare. D'après le guide de fertilisation raisonnée en arboriculture fruitière, les besoins indicatifs du pommier sont estimés entre 1 et 2 unités d'azote, 0,4 à 0,8 unité de P_2O_5 et 1,5 à 3 unités de K_2O par tonne de fruits produite. Ainsi, pour un objectif de 40 t/ha, les besoins peuvent être estimés à environ 40 à 80 unités de N/ha, 16 à 32 unités de P_2O_5/ha et 60 à 120 unités de K_2O/ha. Ces valeurs doivent toutefois être ajustées selon l'analyse de sol, l'état nutritionnel des arbres, la vigueur, l'âge du verger, la variété et le porte-greffe. (Larrieu, 2019)

4) Eclaircissage

La dernière intervention qui est effectuée sur les pommiers est l'éclaircissage. Il a pour objectif de réduire la charge des pommiers c'est-à-dire réduire le nombre de pommes présentes sur les branches au moment de la récolte. L'intérêt de ne pas trop charger les pommiers est d'éviter que les branches cassent sous le poids des pommes, d'avoir un arbre bien équilibré avec une répartition homogène des pommes, des pommes de meilleure qualité et de réduire le phénomène d'alternance qui consiste à avoir beaucoup de pommes une année et beaucoup moins la suivante (l'arbre va produire plus de bois que de fruit). (Chastaing et al., 2024)

On peut distinguer deux types d'éclaircissage qui interviennent à deux périodes différentes de l'année. La première intervention se situe aux alentours de début à mi-mai en fonction des variétés et les secteurs, 4 à 6 semaines après la floraison, elle a pour but de réduire le nombre de fleurs sur l'arbre pour réguler la production et garantir un bon retour à fleur l'année suivante. (Chastaing et al., 2024)

Le second éclaircissage intervient en juin-début juillet, lorsque les fruits font 10 mm à 12 mm de diamètre, il est généralement manuel et a pour objectif de décrocher les trop petits fruits qui n'atteindront pas une taille suffisante pour être commercialisés et font de la concurrence aux autres fruits sur la branche. (Bellerive, 2004; Chastaing et al., 2024)

L'éclaircissage peut être manuel, après le basculement des fruits, pour ajuster la récolte et améliorer le calibre, mécanique, avec des outils comme la Darwin sur fleurs ou l'Eclairvale sur petits fruits, chimique, en conventionnel, avec différents bioregulateurs ou dessiccants selon les contextes, ou, en bio, avec des solutions plus limitées comme la bouillie sulfo-calcique (Curatio), souvent combinée à l'éclaircissage mécanique ou manuel. (Chastaing et al., 2024)

1.4.5 Ravageurs et maladies du pommier et gestion phytosanitaire

La culture du pommier est caractérisée par une pression phytosanitaire élevée, liée à la fois à la nature pérenne du verger, au changement climatique qui apporte de nouveaux ravageurs et aux résistances observées chez les bioagresseurs, à la forte valeur commerciale du fruit et aux exigences élevées en matière de qualité visuelle. Cette pression se traduit par la présence de nombreux ravageurs et agents pathogènes susceptibles d'affecter la production, tant en quantité qu'en qualité.

1) Principaux ravageurs du pommier

Parmi les ravageurs majeurs, le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*) constitue l'un des principaux ennemis de la culture. Les larves pénètrent dans le fruit et provoquent des dégâts internes, rendant les pommes impropres à la commercialisation. Sa gestion est donc centrale dans les stratégies de protection du verger.

Les pucerons, notamment le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*) et le puceron vert (*Aphis pomi*), sont également très problématiques en affaiblissant l'arbre en suçant la sève des feuilles et des fruits. Ils provoquent des déformations des feuilles et des fruits, une réduction de la croissance et peuvent induire des pertes économiques importantes.

D'autres ravageurs importants incluent l'hoplocampe du pommier (*Hoplocampa testudinea*), dont les larves détruisent les jeunes fruits après la floraison, ainsi que les psylles et diverses espèces de tordeuses. Ces insectes contribuent à une pression constante tout au long du cycle cultural.

À ces ravageurs s'ajoutent des organismes secondaires mais non négligeables, tels que les acariens, les punaises ou encore les campagnols, qui peuvent localement engendrer des dégâts significatifs, notamment dans les systèmes peu protégés ou en agriculture biologique. (Edgington, 2025; INRAE, 2025)

TABLEAU 3 : TABLEAU PRESENTANT LES CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX RAVAGEURS DU POMMIER (EPHYTIA, 2015-2026)

Ravageur	Symptômes	Période de sensibilité	Méthode de lutte	Bioagresseur
Carpocapse (Lépidoptère)	Dégâts causés par les larves qui pénètrent dans le fruit	Du début de formation des fruits jusqu'à la récolte (mai → septembre) Sensibilité maximale pendant le développement des fruits	Confusion sexuelle Piégeage (suivi des vols) Biocontrôle (Granulovirus CpGV, *Bacillus thuringiensis)* Filets anti-insectes Traitements insecticides si nécessaire	  (INRAE, 2026)
Puceron cendré (Hémiptère)	Enroulement des feuilles et déformations des fruits	Très forte sensibilité au débourrement jusqu'à la nouaison (mars → mai). Sensibilité des jeunes fleurs /fruits	Traitements (huiles minérales, insecticides spécifiques) Favorisation de la biodiversité Choix variétal (tolérance)	  (INRAE, 2026)
Psylles (Hémiptère)	Les psylles se nourrissent de la sèves dans les feuilles et boutons floraux, ce qui entraine la production de brûlures sur les feuilles et de dessèchement des inflorescences	Du débourrement au printemps jusqu'au début d'été lors de la reprise de végétation	Traitements ciblés si nécessaire Gestion de la vigueur Favorisation des auxiliaires	 (INRAE, 2026)

	(Psylle du pommier, 2022)			
Hoplocampe (Hyménoptère)	Les larves pénètrent dans le fruit et crée des tunnel marron visibles à la surface	Floraison → nouaison (avril – mai) Attaque des jeunes fruits après floraison	Piégeage (pièges chromatiques blancs) Surveillance à la floraison Travail du sol (perturber le cycle) Traitements ciblés si nécessaire	 (INRAE, 2026)
Punaises phytophages (Hémiptère)	Se nourrit de la sève des plantes en les piquant avec son rostre, cela provoque des capitons et une décoloration des fruits (Edgington, 2025)	Du stade nouaison jusqu'au grossissement des fruits (printemps – été) Les dégâts apparaissent surtout sur jeunes fruits (piqûres, déformations)	Surveillance des populations Favorisation des auxiliaires Gestion de l'environnement (limiter zones refuges proches) Traitements insecticides si forte pression Filets anti-insectes (en systèmes innovants)	 (INRAE, 2026)

2) Principales maladies du pommier

Les maladies fongiques dominent largement le cortège pathologique du pommier. La tavelure (*Venturia inaequalis*) est la maladie la plus redoutée. Elle affecte les feuilles et les fruits en provoquant des taches sombres et des déformations, entraînant un déclassement commercial important.

L'oïdium (*Podosphaera leucotricha*) constitue également une maladie fréquente, se manifestant par un feutrage blanc sur les organes jeunes et une réduction de la croissance.

Le feu bactérien est une maladie apportée aux pommiers par une bactérie (*Erwinia amylovora).* Il va toucher toutes les parties aériennes de l'arbre notamment les pousses qui vont brunir puis se dessécher et se courber en forme de crosse. C'est une des maladies les plus préoccupantes en pomiculture qui nécessitent l'arrachage du moindre plant contaminé et de ses voisins.

D’autres maladies peuvent intervenir, comme les maladies de conservation (pourritures), le chancre ou encore les maladies liées à des champignons secondaires. Leur importance varie selon les conditions climatiques, les variétés et les pratiques culturales. Pour se prémunir de ces ravageurs et maladies, différents moyens de lutte existent, notamment les traitements phytosanitaires qui sont abordés dans la partie suivante. (Edgington, 2025; Feu bactérien, 2025; INRAE, 2025)

1.4.6 Une culture très dépendante des pesticides

Cette modernisation productive s’est accompagnée d’une augmentation de l’utilisation de produits phytosanitaires, particulièrement marquée en arboriculture fruitière pour les raisons décrites précédemment. C’est pour ces différentes raisons que la pomiculture est la culture qui utilise le plus de pesticide en France selon agreste, qui mesure le taux d’utilisation grâce à l’IFT (indice de fréquence de traitement) à partir du nombre de traitements phytosanitaires sur une année. L’enquête d’Agreste en 2015 signalait déjà que les vergers de pommiers pouvaient dépasser quarante traitements annuels dans certains contextes de production. (Sédillot & Poullette, 2015) Un rapport de Solagro compare aussi l’IFT en 2018 de vergers de pomme équivalent à 31,5 en France avec d’autres vergers comme les pêches (deuxième culture la plus demandeuse en traitement phytosanitaire) avec un IFT de 18, et les vignes de 12,3. Les grandes cultures nécessitent beaucoup moins de traitement, seulement 4,3 IFT pour le blé dur, 2,8 pour le maïs grain, 2,6 pour le triticale. (Chayre & Pointereau, 2023)

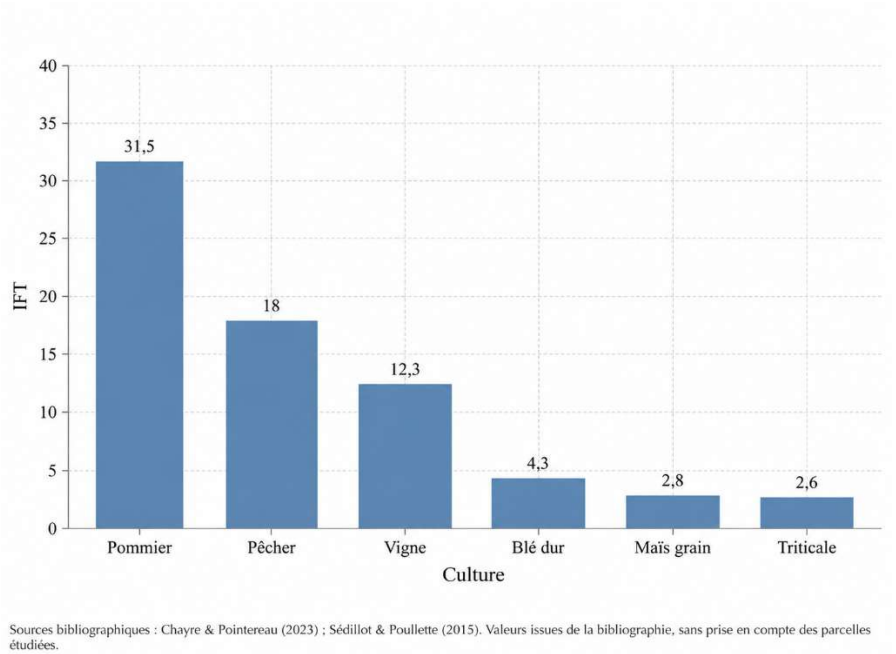


FIGURE 22 : HISTOGRAMME DES IFT MOYEN DE DIFFERENTES CULTURES DONT LE POMMIER (SEDILLOT & POULLETTE, 2015 ; CHAYRE & POINTEREAU, 2023)

Les travaux de Butault dans le rapport Ecophyto R&D soulignaient eux aussi la difficulté structurelle à réduire la dépendance aux pesticides en arboriculture, secteur où les marges de réduction apparaissaient plus limitées que dans d’autres systèmes de culture à niveau de production constant pour les raisons évoquées précédement. (Butault et al., 2010)

1.4.7 Mise en relation des pratiques culturales, du contexte paysager et des populations d'insectes

Les communautés d'invertébrés présentes dans les vergers sont influencées par une combinaison de facteurs liés aux pratiques agricoles et au contexte paysager. Deux grands types de déterminants sont généralement mis en avant : d'une part l'intensité des pratiques culturales, notamment l'usage de produits phytosanitaires, et d'autre part la présence de milieux semi-naturels à proximité des parcelles, tels que les haies, arbres isolés, bosquets ou zones herbacées (Herz, Cahenzli, Servan, et al., 2019).

Les produits phytosanitaires peuvent modifier la structure et la composition des communautés d'arthropodes. Dans les vergers de pommiers, il a été montré que les communautés de coléoptères de la canopée réagissent différemment selon les régimes de traitement, avec des effets variables selon les guildes écologiques (Markó et al., 2017). Certaines espèces peuvent être particulièrement sensibles à l'intensité des traitements, tandis que d'autres semblent plus tolérantes, ce qui entraîne des modifications dans l'équilibre des communautés.

À l'inverse, les milieux semi-naturels et les aménagements agroécologiques jouent un rôle favorable pour de nombreux auxiliaires. Les bandes fleuries implantées dans les interrangs de vergers de pommiers sont associées à une augmentation des ennemis naturels et à une réduction de certains ravageurs comme le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*) ou le carpocapse (*Cydia pomonella*) (Bianchi et al., 2006; Cahenzli et al., 2019). À l'échelle européenne, les bandes fleuries pérennes contribuent à renforcer les populations d'auxiliaires et peuvent limiter les dégâts sur fruits. Les milieux semi-naturels jouent un rôle important dans le maintien des populations d'auxiliaires en paysage agricole. Une synthèse de 24 études a montré que les paysages complexes, comprenant davantage d'habitats non cultivés tels que haies, bandes herbacées, prairies ou boisements, augmentaient les populations d'ennemis naturels dans 74,0 % des cas étudiés. À l'inverse, l'effet était neutre dans 20,8 % des cas et négatif dans seulement 5,1 % des cas. Les effets positifs concernaient différents groupes d'auxiliaires, notamment les parasitoïdes, carabes, coccinelles, syrphes, chrysopes, araignées et staphylins. Les augmentations observées pouvaient aller de 1,6 fois à 10 fois selon les études et les groupes considérés. Ces résultats suggèrent que les infrastructures agroécologiques, en fournissant des habitats, des ressources alimentaires et des zones refuges, peuvent favoriser la présence d'auxiliaires dans les agroécosystèmes. (Bianchi et al., 2006)

Les haies constituent également des éléments structurants du paysage agricole, mais leurs effets apparaissent plus contrastés. Elles influencent fortement les communautés de pollinisateurs et d'ennemis naturels (Bishop et al., 2023). Elles peuvent servir de refuges et de sources de ressources pour les auxiliaires en bordure de parcelle, mais leur influence à l'intérieur du verger dépend de leur gestion, de leur composition végétale et de la disponibilité d'autres ressources dans la parcelle. Dans une étude menée par Bishop et al. dans laquelle on compare 20 vergers commerciaux dont 10 sont bordés de haies et 10 ne le sont pas, les résultats montrent que les haies peuvent favoriser les ennemis naturels en bordure de verger, avec un effet positif sur leur richesse ($\beta = 0,6176$) et leur abondance ($\beta = 3,9867$). Dans cette étude, β indique le sens et la force de l'effet d'une variable explicative sur une variable réponse. Les bordures avec haies abritaient notamment deux fois plus d'espèces d'araignées que les bordures sans haies, avec 16 espèces contre 8.

La gestion des ressources florales est un levier important pour favoriser la biodiversité fonctionnelle. Une synthèse de la littérature souligne que la diversité florale améliore la lutte biologique, car de nombreux auxiliaires dépendent du nectar, du pollen ou d'habitats refuges pour compléter leur cycle de vie (Herz, Cahenzli, Servan, et al., 2019). La diversité végétale présente dans les inter rangs et dans les zones semi-naturelles peut ainsi influencer indirectement les populations de ravageurs en soutenant leurs ennemis naturels.

Dans une étude menée en verger de pommier biologique, Tougeron et al. (2023) ont testé l'effet de bandes fleuries implantées entre les rangs, en association avec des lâchers précoces de parasitoïdes, sur le contrôle du puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*). Les résultats montrent qu'au pic d'infestation, les arbres situés dans les parcelles sans bandes fleuries présentaient en moyenne 4 741,7 pucerons par arbre, contre 3 192,2 pucerons par arbre dans les parcelles avec bandes fleuries. Cela correspond à une réduction de 33,4 % du nombre de pucerons en présence de ressources florales. L'effet du traitement sur le nombre maximal de pucerons par arbre était significatif, avec $\chi^2 = 7,1$ et $p < 0,01$. (Tougéron et al., 2022)

Dans ce contexte, l'analyse conjointe des pratiques culturales et des caractéristiques paysagères apparaît essentielle pour comprendre les dynamiques des communautés d'invertébrés. L'intensité des traitements, la nature des produits utilisés, ainsi que la proportion de milieux semi-naturels autour des parcelles sont autant de facteurs susceptibles d'expliquer les variations observées dans l'abondance, la diversité et la structure des communautés d'insectes (Bishop et al., 2023; Cahenzli et al., 2019; Herz, Cahenzli, Servan, et al., 2019; Markó et al., 2017).

L'enjeu est ainsi d'identifier les facteurs déterminants de la présence ou de l'absence de certains groupes fonctionnels, afin de mieux comprendre comment les pratiques agricoles et les infrastructures agroécologiques influencent la biodiversité, qu'il s'agisse des prédateurs, parasitoïdes, pollinisateurs ou ravageurs.

1.4.8 Gestion des bioagresseurs du pommier : pesticides et alternatives

La gestion des ravageurs et maladies du pommier repose sur une combinaison de stratégies, historiquement dominée par l'usage de produits phytosanitaires. Toutefois, face aux enjeux environnementaux et réglementaires, des approches alternatives se développent progressivement. Il est donc pertinent de distinguer les pesticides utilisés d'une part, et les autres leviers de gestion d'autre part.

1) Les pesticides : types, usages et liens avec les bioagresseurs

Les insecticides sont principalement utilisés contre les ravageurs majeurs tels que le carpocapse (*Cydia pomonella*), les pucerons (*Dysaphis plantaginea*, *Aphis pomi*) ou encore les tordeuses. Pour le carpocapse, plusieurs types de substances sont mobilisés. En agriculture conventionnelle, on retrouve des insecticides de synthèse ciblant les larves ou les œufs, appliqués à des moments précis du cycle du ravageur. En parallèle, des solutions de biocontrôle comme les granulovirus (CpGV) sont largement utilisées, car ils infectent spécifiquement les larves du carpocapse. Le Bacillus thuringiensis peut également être mobilisé contre certains lépidoptères. Ces traitements nécessitent une bonne synchronisation

avec les stades de développement du ravageur pour être efficaces. (Chastaing et al., 2024; Edgington, 2025; INRAE, 2025)

Les pucerons, notamment le puceron cendré, sont également ciblés par des insecticides spécifiques. Les traitements peuvent inclure des huiles minérales appliquées en sortie d'hiver pour limiter les populations, ainsi que des substances insecticides en période végétative. Toutefois, la gestion des pucerons est rendue complexe par leur forte capacité de reproduction et leur variabilité de sensibilité aux produits. (Chastaing et al., 2024; INRAE, 2025)

Blommers et al. (2004) montrent qu'une jeune femelle peut produire 32 à 36 larves avant même que ses premiers descendants ne deviennent adultes et ne commencent à se reproduire à leur tour. En conditions expérimentales, une plante infestée avec 12 femelles reproductrices peut produire jusqu'à 5 000 migrants d'automne. Les auteurs estiment également qu'une seule gynopare (femelle de puceron née d'une sexupare et dont la descendance est composée de femelles sexuées et ovipares) peut théoriquement conduire au dépôt d'environ 100 œufs d'hiver via sa descendance. Cette dynamique de reproduction rend le ravageur difficile à maîtriser, car une infestation initialement limitée peut rapidement générer une population importante. (Blommers et al., 2004)

Cette difficulté de gestion est renforcée par la variabilité de sensibilité aux insecticides. La liste R4P/INRAE des cas de résistance indique que *D. plantaginea* présente des résistances au pirimicarbe, détectées localement dans le Sud-Ouest et le Sud-Est de la France dès 1996, avec des mécanismes liés à une résistance de cible et à des mécanismes non liés à la cible, notamment la détoxication. Des résistances au flonicamide sont également signalées, avec des fréquences élevées dans certaines parcelles à partir de 2017. Ces éléments montrent que la lutte chimique contre le puceron cendré peut perdre en efficacité selon les populations et les contextes locaux, ce qui justifie le développement de stratégies complémentaires, comme la conservation des auxiliaires, la gestion des habitats et l'utilisation raisonnée des traitements. (INRAE, 2018)

Concernant les maladies, la lutte repose majoritairement sur l'utilisation de fongicides. La tavelure (*Venturia inaequalis*), principale maladie du pommier, nécessite des traitements réguliers, souvent positionnés de manière préventive en fonction des conditions climatiques. En agriculture conventionnelle, une diversité de fongicides de synthèse est disponible, permettant une alternance des modes d'action afin de limiter les phénomènes de résistance. En agriculture biologique, les traitements reposent principalement sur le cuivre (efficace contre la tavelure) et le soufre (notamment contre l'oïdium), appliqués de manière répétée au cours de la saison. (Chastaing et al., 2024; Edgington, 2025; INRAE, 2025)

De manière générale, la protection phytosanitaire du pommier se caractérise par un nombre élevé d'interventions, en particulier dans les systèmes intensifs. Cette fréquence s'explique par la succession des risques sanitaires tout au long du cycle cultural, depuis le débourrement jusqu'à la récolte. (Chastaing et al., 2024; Edgington, 2025; INRAE, 2025) Ces « risques sanitaires » sont évalués grâce à un outil d'aide à la décision (ou OAD) nommé RIMpro qui est utilisé en agriculture pour la gestion durable et la prévision des risques de maladies et de ravageurs. Les traitements appliqués dépendent donc des informations apportées par cet outil.

2) Enjeux environnementaux, sociétaux et réglementaires

Cette dépendance aux phytosanitaires soulève aujourd'hui des enjeux environnementaux, sanitaires, sociétaux et réglementaires majeurs. Sur le plan environnemental, les pesticides sont associés aux effets négatifs sur la biodiversité, les sols, l'eau et les organismes non ciblés. L'expertise scientifique collective de l'INRAE sur les pesticides rappelle que les impacts concernent à la fois les milieux, la faune auxiliaire et les équilibres écologiques, avec des effets potentiels directs et indirects. Sur le plan sanitaire et sociétal, les inquiétudes liées à l'exposition des travailleurs, des riverains et des consommateurs ont pris une ampleur croissante. L'INRAE indique explicitement que les préoccupations de la population concernant les conséquences des pesticides sur la santé, l'environnement et la biodiversité se manifestent de façon accrue, ce qui contribue à renforcer la pression en faveur d'une transformation des pratiques. Ces préoccupations émergentes sont également liées aux connaissances scientifiques notamment en matière de santé au travail. (Expertise Scientifique Collective, 2011)

3) Transition agroécologique et projets de réduction des pesticides

Ces préoccupations se traduisent dans les politiques publiques. Au niveau européen, la directive 2009/128/CE établit un cadre d'action visant un usage durable des pesticides, en réduisant les risques et les impacts sur la santé humaine et l'environnement et en promouvant la lutte intégrée ainsi que des approches ou techniques alternatives. (EUROPEAN PARLIAMENT, 2009) En France, cette orientation s'est traduite par les plans Ecophyto successifs, d'une portée limitée car peu restrictifs, puis par la stratégie Ecophyto 2030, qui vise explicitement à réduire l'utilisation et les risques liés aux produits phytopharmaceutiques tout en accompagnant les filières agricoles. (*Stratégie Écophyto 2030*, 2024)

C'est dans ce contexte qu'émerge la transition agroécologique en arboriculture. Il ne s'agit plus seulement de substituer un intrant à un autre, mais de repenser le verger comme un agroécosystème, mobilisant davantage les régulations biologiques, la diversité végétale, les résistances génétiques, les pratiques prophylactiques et la combinaison de leviers complémentaires. La recherche agronomique insiste de plus en plus sur la nécessité de "sortir des pesticides" par la combinaison d'approches plutôt que par une solution unique dans un contexte déjà marqué par les tensions économiques et le changement climatique. (Expertise Scientifique Collective, 2011)

Le projet Cap Zéro Phyto s'inscrit précisément dans cette dynamique, il est rattaché au Programme Prioritaire de Recherche "Cultiver et Protéger Autrement" pour la période 2020-2026. Il est coordonné par deux équipes de recherche de l'INRAE d'Angers et d'Avignon accompagnées par les stations expérimentales locales. Il vise à limiter l'utilisation des produits de synthèse en concevant de nouvelles stratégies de protection des cultures fondées sur l'utilisation combinée de leviers capables de moduler les mécanismes de défense des plantes. Parmi les leviers étudiés figurent la résistance génétique, la résistance induite par les stimulateurs de défense des plantes, les flashs d'UV-C, l'apport d'azote et les plantes de service (ce sont des espèces végétales dans un système de culture qui rendent des fonctions à la culture principale, comme l'attraction des auxiliaires, la perturbation des bioagresseurs, la fourniture de ressources florales ou l'amélioration du sol). Le projet concerne plusieurs cultures, dont le pommier, et s'intéresse en particulier à la durabilité des résistances génétiques et induites face à *Venturia inaequalis* qui est le champignon responsable de la tavelure. L'hypothèse centrale est que le cumul de résistances pourrait limiter les capacités

d'adaptation du pathogène, ce qui constitue un enjeu majeur pour des systèmes arboricoles visant une forte réduction, voire une suppression, des pesticides de synthèse. (Baudin, 2024)

À ce jour, il n'existe pas de rapport final public présentant l'ensemble des résultats définitifs des cinq leviers du projet CAP ZERO PHYTO étant donné que le projet prendra fin en décembre 2027. Les données disponibles correspondent à des résultats intermédiaires, notamment issus de la présentation réalisée lors de la rencontre RCP23 « Sortir des pesticides en arboriculture », consacrée aux leviers et combinaisons de leviers étudiés dans le projet CAP ZERO PHYTO. Cette présentation porte sur cinq leviers principaux : la génétique, les stimulateurs de défense des plantes (SDP), les UV-C, la nutrition azotée et les plantes de service. (Gautier & Brisset, 2024)

Les résultats individuels les plus exploitables concernent d'abord le levier génétique. Sur la tavelure du pommier (*Venturia inaequalis*), une descendance issue du croisement TN10-8 × Fiesta a été étudiée selon différentes classes de résistance. Les résultats montrent une efficacité de protection de 38 % pour la classe portant les QTL F11 + F17, de 80 % pour la classe portant T1, et de 94 % lorsque les trois facteurs de résistance T1 + F11 + F17 sont combinés. Ces données montrent que l'accumulation de caractères de résistance peut fortement améliorer le niveau de protection contre la tavelure. (Gautier & Brisset, 2024)

Les autres leviers individuels sont davantage présentés comme des pistes de travail ou des leviers en cours de criblage. Les SDP et les UV-C sont étudiés pour leur capacité à induire les défenses de la plante, avec notamment des produits comme Bion, Limocide ou Soriale. La présentation indique cependant qu'il existe encore peu de nouvelles matières actives à action SDP, ce qui souligne l'intérêt de les intégrer en combinaison avec d'autres leviers plutôt que de les considérer comme des solutions isolées. Le levier azote repose sur l'idée que l'état nutritionnel de la plante peut modifier l'expression de son immunité, avec un compromis entre croissance, métabolisme et défense. Enfin, les plantes de service sont envisagées selon trois stratégies : repousser le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), fournir des ressources aux auxiliaires, ou attirer ces auxiliaires vers le verger. Les espèces citées comprennent notamment la féverolle, la vesce, le pêcher, la tagète, la menthe poivrée, le lavandin, le basilic et le fenouil. (Gautier & Brisset, 2024)

Les résultats les plus intéressants portent toutefois sur les combinaisons de leviers. Dans le cas de la tavelure, la combinaison entre résistance génétique et SDP renforce la protection, avec des efficacités allant de 51 % à 99 % selon les classes génétiques testées (par rapport à un témoin). La présentation conclut à une additivité entre les leviers génétique et SDP. De même, pour le feu bactérien, la combinaison entre gestion de l'azote et application de SDP montre une efficacité de protection de 30 % en condition d'azote « confort », contre 82 % en condition de « diète » azotée, suggérant une additivité, voire une synergie, entre ces deux leviers. Enfin, la combinaison entre plantes de service et UV-C est illustrée par l'exemple du basilic pistou, où un flash UV-C augmente la production de composés organiques volatils, ce qui pourrait renforcer le rôle des plantes de service dans l'attraction ou la perturbation des insectes. (Gautier & Brisset, 2024)

Pris isolément, certains leviers peuvent apporter une protection partielle, comme la résistance génétique, tandis que d'autres agissent davantage comme des leviers de soutien ou d'amplification des défenses de la plante. L'objectif du projet n'est donc pas de remplacer les pesticides par une seule solution, mais de construire des systèmes de culture combinant plusieurs mécanismes : résistance variétale, induction des défenses, gestion de la nutrition, plantes de service et stimulation par UV-C. Cette logique de combinaison apparaît essentielle

pour atteindre une protection plus robuste et compatible avec une réduction forte, voire une suppression, des traitements phytosanitaires. (Gautier & Brisset, 2024)

Enfin, les deux études menées sur les sites de Bois l'Abbé et la Rétuzière lors des deux années précédentes (suivant plus ou moins le même protocole que cette étude) ont montrés certains résultats. Tout d'abord les suivis montrent que la biodiversité des vergers ne semble pas dépendre uniquement de la conduite culturale. Les résultats suggèrent plutôt un effet combiné du site (conditions pédoclimatiques différentes), de la composition floristique de l'inter-rang et de la dynamique temporelle entre ravageurs et auxiliaires. En particulier, la richesse et le stade de la végétation herbacée apparaissent comme des facteurs importants, tandis que l'arrivée parfois tardive des auxiliaires peut limiter leur rôle dans la régulation des ravageurs.

4) Les autres solutions de gestion des bioagresseurs

Face aux limites des pesticides, notamment vis-à-vis de leurs impacts environnementaux et les contraintes réglementaires croissantes, des solutions alternatives se développent dans le cadre de la protection intégrée et de l'agroécologie. (Chastaing et al., 2024; INRAE, 2025)

La confusion sexuelle est une technique largement utilisée contre le carpocapse. Elle consiste à diffuser des phéromones dans le verger afin de perturber la reproduction des insectes, réduisant ainsi les populations sans recours direct à des insecticides. Une étude menée par Bangels & Beliën en 2012 en verger commercial de pommes en Flandre a montré cet effet sur le carpocapse. Avant la mise en place de la confusion sexuelle, les dégâts de carpocapse atteignaient en moyenne 8,25 ± 5,54 % des fruits à la récolte dans les zones non traitées chimiquement. Après deux ans de confusion sexuelle, avec un appui chimique réduit, les dégâts ont été abaissés à moins de 0,03 % à la récolte. Cette méthode est aujourd'hui un pilier de la protection en verger, notamment en agriculture biologique. (Bangels & Beliëns, 2012; Chastaing et al., 2024; Edgington, 2025)

Le biocontrôle constitue également un levier important. Il inclut l'utilisation d'organismes vivants ou de substances naturelles, comme les virus (CpGV), les bactéries (*Bacillus thuringiensis*) ou encore les auxiliaires naturels (coccinelles, syrphes, parasitoïdes). La préservation et la promotion de ces auxiliaires passent notamment par la gestion de la végétation (bandes fleuries, haies) et la réduction des traitements non sélectifs. (Chastaing et al., 2024; Herz, Cahenzli, Penvern, et al., 2019; INRAE, 2025)

Des méthodes culturales et prophylactiques sont également mobilisées. Le choix de variétés résistantes ou tolérantes à certaines maladies, notamment la tavelure, constitue un levier majeur pour réduire la pression phytosanitaire. De même, la gestion de la densité du verger, de l'aération et de la lumière permet de limiter les conditions favorables au développement des maladies. (Chastaing et al., 2024; INRAE, 2025)

Enfin, la surveillance des populations de ravageurs et l'utilisation de seuils d'intervention permettent d'adapter les traitements aux niveaux de risque réels grâce à l'outil d'aide à la décision RIMpro. Cette approche vise à limiter les interventions inutiles et à raisonner les pratiques phytosanitaires. (Chastaing et al., 2024; Edgington, 2025)

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

Nous avons resitué l'étude dans son contexte actuel, nous permettant de comprendre le sujet de manière transversale ainsi que les aspects économiques, politiques, commerciaux, agricoles et environnementaux. La mission de stage que j'ai réalisée de Mars à Août 2026 visait à comprendre l'influence de différentes variables (conduite technique, structures agroécologiques, météo, richesse et diversité de la bande enherbée) sur la richesse/ diversité de la faune et la flore des vergers. Afin de voir l'influence de ces différents leviers nous avons mené une étude en verger expérimental afin de tester plusieurs paramètres et mesurer l'impact sur les populations d'insectes et de végétaux.

Dans cette optique, plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la biodiversité ont été étudiés. Une attention particulière a été portée aux itinéraires techniques, notamment à l'intensité des traitements phytosanitaires mesurée par l'indice de fréquence de traitement (IFT), ainsi que d'autres facteurs spécifiques qui sont testés (SDP, génétique). Par ailleurs, le rôle du contexte paysager a été pris en compte à travers la présence d'infrastructures agroécologiques, comme les haies ou les bandes fleuries, susceptibles de fournir des habitats et des ressources aux auxiliaires.

La diversité végétale a également été considérée comme un facteur structurant des communautés biologiques. En effet, elle conditionne la disponibilité en ressources trophiques (nectar, pollen, proies), influençant ainsi la présence et la dynamique des populations d'invertébrés (Fried et al., 2019).

Nous avons ensuite pu formuler une problématique de recherche pour cette étude et à partir du contexte posé précédemment :

Quelle est l'influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers expérimentaux ?

À partir de ces éléments, plusieurs hypothèses de travail ont été formulées :

- H1 : Les pratiques culturales ont un impact sur la présence d'insecte.
- H2 : La présence des ravageurs et des auxiliaires spécialistes est corrélée.
- H3 : Les infrastructures agroécologiques ont un effet sur la richesse et la diversité des arthropodes des vergers.
- H4 : La diversité végétale de la bande enherbée influence la richesse et la diversité des arthropodes des vergers.
- H5 : L'effet d'attraction des arthropodes dépend du stade phénologique des espèces végétales de la bande enherbée.
- H6 : Les conditions climatiques ont un effet sur la richesse et la diversité des arthropodes des vergers.
- H7 : Il existe des différences de fréquentation des arthropodes entre la campagne 2025 et 2026.

- H8 **:** Les parcelles ne se différencient pas selon un seul facteur isolé, mais selon une combinaison de variables liées à la végétation, aux pratiques culturales, au contexte paysager et aux groupes fonctionnels d'arthropodes.

C'est dans cette perspective que la méthodologie suivante a été élaborée, afin d'analyser la biodiversité dans différents contextes agricoles et paysagers et d'identifier les mécanismes sous-jacents aux variations observées.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

L'étude a été réalisée au sein de l'unité expérimentale horticole (UEH) de l'INRAE d'Angers-Nantes, dans le cadre du projet Cap Zero Phyto, précédemment mentionné, qui vise à réduire les pesticides de synthèse. Elle s'inscrit dans un ensemble de travaux visant à mieux comprendre les interactions entre pratiques culturales, organisation du paysage et biodiversité fonctionnelle dans les vergers de pommiers.

L'objectif principal est d'évaluer dans quelle mesure les modes de conduite des vergers et leur environnement paysager influencent la présence et la diversité des organismes, en particulier les arthropodes, qui jouent un rôle clé dans le fonctionnement écologique des agroécosystèmes (lutte biologique contre les bioagresseurs).

2.2 SITES D'ETUDE ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

2.2.1 Sites d'expérimentation

Les observations ont été conduites sur deux sites expérimentaux de l'INRAE situés dans le Maine-et-Loire : le site de Bois l'Abbé à Beaucouzé (49070) avec des parcelles identifiées par la lettre P et celui de la Rétuzière à Champigné (49330) avec des parcelles identifiées par la lettre R. Ces deux sites, distants d'environ 25 kilomètres, présentent des conditions pédoclimatiques légèrement distinctes, en effet la température moyenne est de 11,6°C à Champigné contre 12,1 °C à Beaucouzé. Le sol est lui limoneux argileux et d'une profondeur variant généralement entre 40 cm et 60 cm à Champigné et un sol limoneux sableux avec une profondeur bien inférieure d'environ 15 cm à 20 cm à Beaucouzé, il est donc moins profond et possède une moins bonne capacité de rétention d'eau.



FIGURE 23 : CARTE REPRESENTANT LES DEUX SITES DE L'ETUDE A BEAUCOUZE ET CHAMPIGNE (GOOGLE MAPS)

Au sein de ces sites, plusieurs vergers de pommiers (ou poiriers) ont été sélectionnés afin de couvrir une diversité de situations agronomiques. Les parcelles étudiées se distinguent notamment par leur mode de conduite (production biologique, conventionnelle ou en production fruitière intégrée), leur organisation spatiale et leur insertion dans le paysage. Cette diversité permet d'analyser conjointement les effets des pratiques agricoles et du contexte environnemental sur la biodiversité observée.

Parmi ces 8 parcelles, 4 se trouve sur le site de Beaucouzé et 4 autres sur celui de Champigné.

2.2.2 Echantillonnage à la parcelle

Cinq points d'échantillonnage ont été disposés sur la diagonale de chaque parcelle afin d'avoir une bonne représentativité du profil et de la biodiversité de la parcelle. Les 5 points ont été nommés avec le numéro de la parcelle (exemple P2 ou R12), et le numéro du point d'échantillonnage (allant de 1 à 5).

TABLEAU 4 : TABLEAU MONTRANT LES DIFFERENTES PARCELLES SELECTIONNEES ET LEURS CARACTERISTIQUES D'APRES NICOLAS MARCOU, 2025

Suivi effectué	8 parcelles							
Groupe / Mode de conduite	PFI +		PFI				BIO	
Parcelle	R17	PK	P5	P16	R14	P2	R12	R23
Commune	Champigné	Angers			Champigné	Angers	Champigné	
Espèce	Pommier				Poirier	Pommier		
Variété	Multiples pour sélection variétale		Gala	Multiple	William Angelys	Golden	Chantecler	Arianne Reine des Reinettes
Traitement SDP	Aucun	PFI	PFI al Soriale Limocide		Aucun	PFI al Soriale Axpera	Aucun	
Présence de haie	Absence de haie	En bordure	Absence de haie			En bordure et intrapacellaire	Absence de haie	En bordure et intrapacellaire + ecopâturage

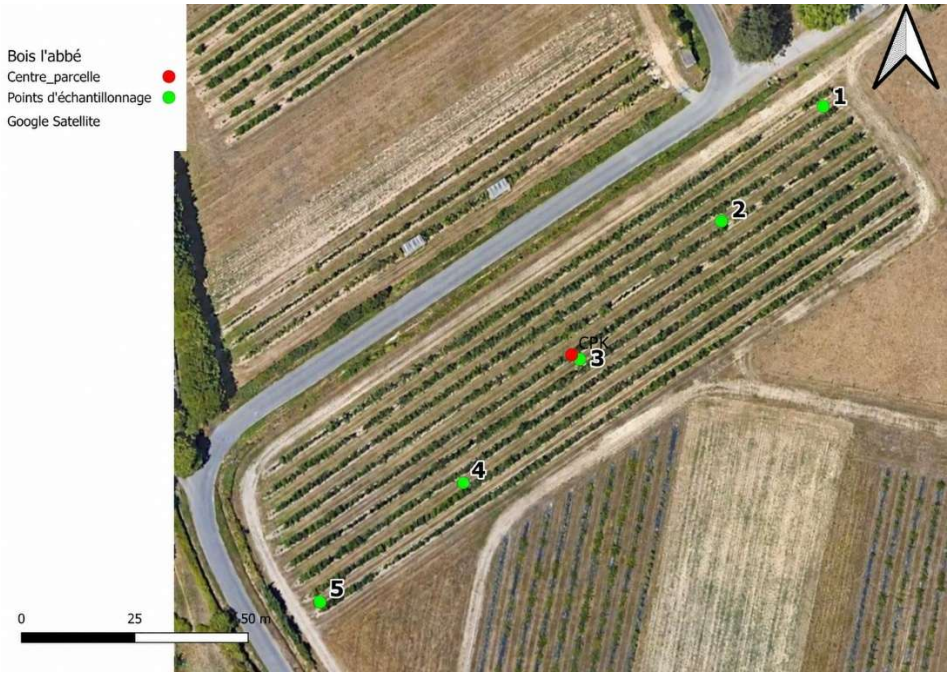


FIGURE 24 : CARTE DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE DE LA PARCELLE PK DE BOIS L'ABBE

2.2.3 Echantillonnage dans le rang

L'évaluation de la biodiversité repose principalement sur l'étude des communautés d'arthropodes et végétales présentes dans l'inter-rang des vergers. Afin de faciliter cette évaluation de la biodiversité nous avons décidé de classer la faune et la flore selon différentes catégories. La faune est étudiée selon leur ordre ou selon les groupes fonctionnels suivant : ravageurs (tous les pucerons, punaise phytophage, anthonome, tordeuse, papillon de nuit, psylle), protecteurs de puceron (comprend uniquement les fourmis), auxiliaires spécialistes (coccinelle ; syrphe ; chrysope, les trois sous formes larvaires ou adultes, hyménoptère parasitoïde), auxiliaires généralistes (carabe, araignée, opilion, punaise prédatrice, forficule, staphylin, cantharide), pollinisateurs (abeille, guêpe, bourdon, syrphe adulte, papillon de jour/ nuit). La flore est étudiée selon la famille, en sélectionnant souvent un nombre réduit de famille dominante en proportion (afin de faciliter les analyses statistiques étant donné le nombre important de familles peu représentées).

Ces indicateurs ont été retenus en raison de leur sensibilité aux pratiques agricoles et de leur rôle fonctionnel dans les agroécosystèmes, notamment en termes de pollinisation et de régulation biologique.

Afin de prendre en compte l'espace en trois dimensions du verger, le système a été compartimenté en trois strates : le milieu épigé, correspondant au ras du sol dans l'inter-rang ; le milieu herbacé, correspondant à l'inter-rang et au rang (faune/ flore présente) ; et le milieu arboré, correspondant aux pommiers. Cette approche permet de couvrir une large gamme d'organismes aux écologies et fonctions différentes.

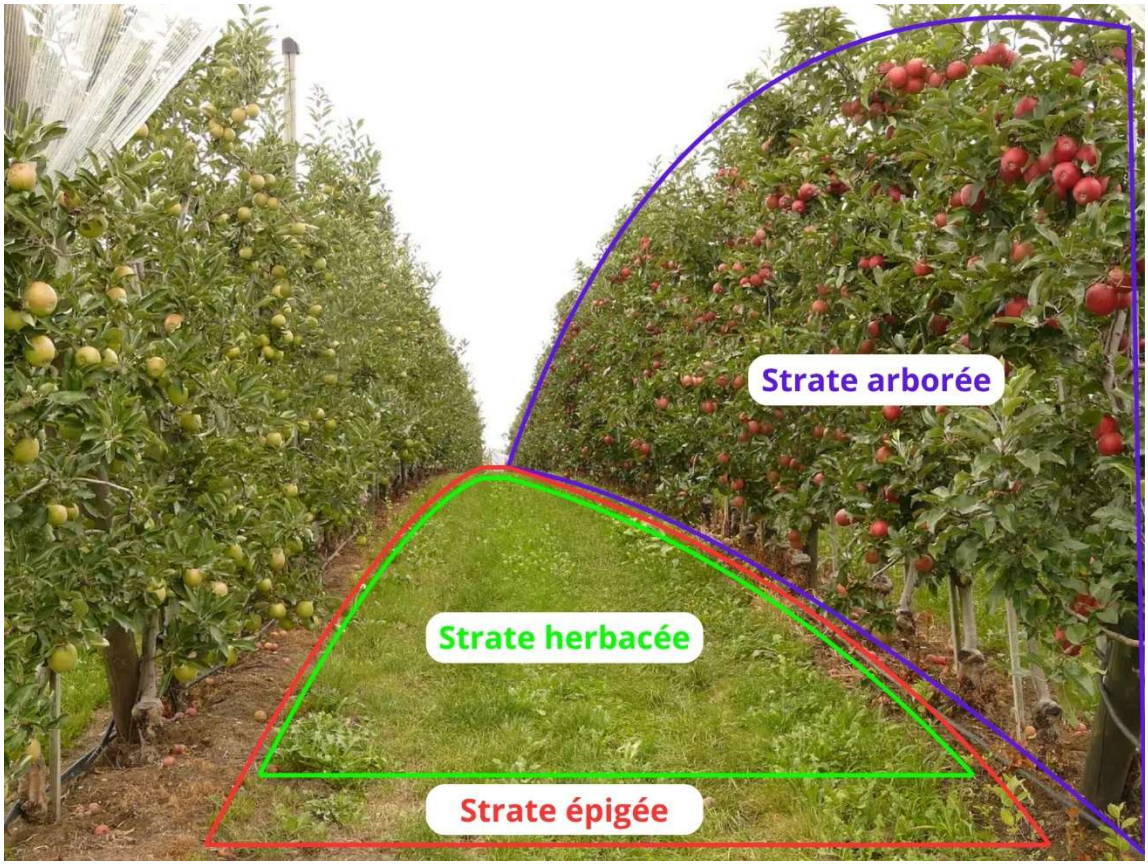


FIGURE 25 : SCHEMA DES ESPACES CONSIDERES DANS UN VERGER

2.2.4 Protocoles de collecte des invertébrés

Plusieurs méthodes d'échantillonnage complémentaires ont été mises en œuvre afin de caractériser et quantifier les communautés d'invertébrés présentes dans les différents compartiments du verger.



FIGURE 26 : RELEVE D'UN BARBER ENTERRE PRECEDEMMENT DANS LA STRATE EPIGEE (PHOTO PERSONNELLE)

STRATE EPIGEE : Pièges Barbers (méthode destructive) : Les espèces dans la strate épigé ont été collectés à l'aide de pièges Barber. Ces pièges sont destinés à capturer les insectes rampants. Ce sont des récipients d'environ 10 à 15 cm de diamètre enterrés au ras du sol et partiellement remplis d'eau et de quelques gouttes de liquide vaisselle (afin que les insectes coulent directement au fond). Ces pièges positionnés de mi-mars à mi-juillet sont relevés une fois par semaine. Les organismes vivants capturés sont ensuite identifiés en laboratoire à l'aide d'une loupe binoculaire et d'une clef de détermination éditée par « pro natura » jusqu'à la famille si possible (niveau de précision le plus élevé). (Ecuyer & Varone, 2021)



FIGURE 27 : RELEVE FAUNISTIQUE AVEC UN FILET FAUCHOIR, DANS LA STRATE HERBACEE (PHOTO PERSONNELLE)

STRATE HERBACEE : **Filet fauchoir** (méthode non destructive) **:** Ce dispositif, appelé également filet à papillon, constitué d'un cercle de 60 cm de diamètre relié à un manche permet de prélever les espèces présentes dans la strate herbacée en réalisant des huit dans la végétation de l'inter-rang et du rang. Les arthropodes sont identifiés si possible jusqu'à la famille et comptabilisés sur le terrain. Les relevés sont réalisés chaque semaine, de mi-mars à mi-juillet.



FIGURE 28 : RELEVE FAUNISTIQUE DANS LA STRATE ARBOREE AVEC UN PARAPLUIE JAPONAIS (PHOTO PERSONNELLE)

STRATE ARBOREE : Parapluie japonais (méthode non destructive) : La méthode du parapluie japonais consiste à battre les branches des arbres à l'aide d'un bâton afin de faire tomber les organismes sur une toile de 70 cm x 70 cm blanche. Nous allons identifier et quantifier, sur le terrain, les taxons présents si possible jusqu'à leur famille. Ces observations se font dans les 5 arbres situés de chaque côté de l'inter-rang et de part et d'autre du point d'échantillonnage. Les relevés sont réalisés chaque semaine, de mi-mars à mi-juillet.

2.2.5 Relevés floristiques



FIGURE 29 : RELEVE FLORISTIQUE DANS LA STRATE HERBACEE DE L'INTER-RANG, PAR QUADRAT D'1M² (PHOTO PERSONNELLE)

En complément des relevés entomologiques, des inventaires de la végétation ont été réalisés dans l'inter-rang des vergers. Ces relevés ont été effectués à l'aide d'un quadrat d'1 m² posé au sol, permettant de noter la présence, d'identifier les espèces végétales ainsi que leur stade phénologique : stade végétatif noté 1, stade floral noté 2 et stade fruit noté 3. Ces relevés ont été réalisés tous les 15 jours, sur les 5 points d'échantillonnage des 8 parcelles décrites au début de l'étude, de mi-mars à mi-juillet.

2.3 CARACTERISATION DES PRATIQUES CULTURALES

Les pratiques agricoles mises en œuvre dans les vergers ont été caractérisées à partir des itinéraires techniques culturaux. Plusieurs variables ont été prises en compte, notamment l'indice de fréquence de traitement phytosanitaire (IFT) et les pratiques de travail du sol (fauchage/ labour). Les détails de l'ensemble des traitements effectués lors de l'étude ont eux aussi été référencés selon la date de traitement, le type de produit et la durée de l'effet. L'IFT a été calculé grâce à la base de données interne à l'unité expérimentale HORTI, référençant l'ensemble des actions menées dans les parcelles pour chaque date. Les traitements phytosanitaires y sont notamment décrits en indiquant à chaque fois la date, la parcelle traitée, les volumes, le type de produit (conventionnel ou biocontrôle) … L'IFT a été calculé selon la méthodologie nationale définie par le ministère de l'Agriculture. Pour chaque traitement, l'IFT correspond au rapport entre la dose appliquée et la dose de référence du produit, corrigé par la proportion de surface traitée. Les doses de référence utilisées sont celles définies dans le référentiel national, préférentiellement à la cible lorsque cette information est disponible. (Xicluna, 2023)

2.4 CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS PAYSAGERS

La présence, densité et proximité de milieux semi-naturels (haies, bandes fleuries) est aussi une variable prise en compte dans l'évaluation de l'influence du contexte paysager sur la biodiversité. Le contexte paysager des vergers a donc été analysé à l'aide du logiciel QGIS version 3.44. Pour chaque parcelle, une zone tampon d'un rayon de 150 mètres à partir du centre de la parcelle a été définie afin de caractériser l'environnement immédiat (route, MSN, habitation, champ, verger…).

Les différents éléments du paysage, tels que les haies, les bosquets, les prairies ou les cultures, ont été cartographiés et quantifiés. Les arbres ont été considérés comme ayant un rayon de 3 mètres et les haies d'une largeur de 1 mètre. Cette analyse a permis de calculer la proportion d'éléments semi-naturels autour de chaque verger, variable clé pour l'étude des relations entre paysage et biodiversité.

TABLEAU 5 : TABLEAU DES ELEMENTS PAYSAGERS REFERENCES SUR LES MODELES CARTOGRAPHIQUES

Eléments semi-naturels	Légende
Haie	Polygone bleu
Arbre	Polygone marron
Bosquet	Polygone vert foncé
Zone herbeuse	Polygone vert clair
Prairie	Polygone jaune



FIGURE 30 : EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS SEMI-NATURELS DE LA PARCELLE P02 (QGIS)

2.5 BASE DE DONNEES BRUTE ET TRANSFORMEE

Les données collectées sur le terrain ont d'abord été saisies sous forme de bases de données brutes, puis transformées afin de permettre les analyses statistiques et graphiques. Les bases brutes correspondent aux observations réalisées directement lors des relevés : date, site, parcelle, point d'échantillonnage, méthode de collecte, taxon observé et nombre d'individus pour la faune ; date, site, parcelle, point d'échantillonnage, espèce végétale observée, famille botanique et stade phénologique pour la flore (pas de comptage du nombre d'individu contrairement à la faune).

Pour la faune, les données brutes issues des trois méthodes d'échantillonnage ont été organisées dans trois feuilles de calcul Excel dont les noms de colonnes ont été harmonisés. Chaque ligne de la base correspond à l'observation d'une date, une parcelle, un point d'échantillonnage et une méthode de relevé. Les taxons ont ensuite été regroupés selon deux approches complémentaires : une approche taxonomique, fondée principalement sur l'ordre ou la famille, et une approche fonctionnelle, fondée sur le rôle écologique des organismes dans le verger.

Les groupes fonctionnels retenus sont les suivants : ravageurs, protecteurs de pucerons, auxiliaires spécialistes, auxiliaires généralistes et pollinisateurs. Le groupe des ravageurs comprend notamment les pucerons, punaises phytophages, psylles, anthonomes, tordeuses et autres lépidoptères phytophages. Le groupe des protecteurs de pucerons comprend uniquement les fourmis, en raison de leur rôle dans la protection des colonies de pucerons. Les auxiliaires spécialistes regroupent les coccinelles, syrphes, chrysopes et hyménoptères parasitoïdes. Les auxiliaires généralistes comprennent les carabes, araignées, opilions, punaises prédatrices, forficules, staphylins et cantharides. Enfin, les pollinisateurs regroupent les abeilles, bourdons, guêpes, syrphes adultes et papillons.

Pour la flore, les données brutes correspondent aux espèces végétales identifiées dans les quadrats de 1 m². Chaque observation a été associée à une famille botanique et à un stade phénologique. Les trois stades retenus sont : stade végétatif, stade fleuri et stade fruit/graine, ils sont tous les trois notés respectivement 1 ; 2 ; 3 dans la base de données. Les données floristiques ont ensuite été transformées afin de calculer plusieurs variables : richesse végétale totale par quadrat, nombre d'espèces en fleurs, composition par famille botanique et occurrence des familles végétales par parcelle. Lorsque certaines familles étaient très faiblement représentées, elles ont été regroupées dans une catégorie “Autres” afin de faciliter la lecture graphique et l'interprétation statistique.

Ces transformations ont permis d'obtenir des bases de données adaptées aux analyses : une base faunistique organisée par taxons et groupes fonctionnels, une base floristique organisée par espèces, familles et stades phénologiques, et une organisation permettant le suivi au cours du temps de la biodiversité observée.

2.6 CALCUL DES INDICATEURS DE BIODIVERSITE

Plusieurs indicateurs ont été calculés afin de caractériser la biodiversité observée dans les vergers. Ces indicateurs permettent de résumer les données brutes et de comparer les parcelles, les dates ou les modalités étudiées.

La **richesse spécifique** correspond au nombre de taxons différents observés dans une unité d'échantillonnage. Pour la flore, elle correspond au nombre d'espèces végétales différentes observées dans un quadrat. Pour la faune, elle correspond au nombre de taxons d'arthropodes différents observés pour une date, une parcelle ou un point d'échantillonnage selon l'analyse réalisée.

Richesse spécifique = nombre de taxons différents observés

L'**abondance totale** correspond au nombre total d'individus observés. Elle a été utilisée pour caractériser l'intensité de présence des arthropodes, notamment par parcelle, par date ou par groupe fonctionnel.

Abondance totale = somme des individus observés

La **présence/absence** a également été utilisée, dans ce cas, un taxon ou un groupe fonctionnel est noté présent lorsqu'au moins un individu est observé à une date et sur un point d'échantillonnage donné, et absent lorsqu'aucun individu n'est observé.

Présence = 1 si abondance > 0

Absence = 0 si abondance = 0

La **fréquence** correspond au pourcentage de relevés dans lesquels un taxon ou un groupe fonctionnel est présent. Elle permet d'évaluer la régularité de présence d'un groupe, indépendamment du nombre exact d'individus observés.

Fréquence (%) = nombre de relevés où le groupe est présent / nombre total de relevés × 100

Cette même méthode est aussi utilisée pour décrire la fréquence d'un groupe fonctionnel/ taxon à une date précise, la valeur est donc rapportée sur 5 pour avoir la fréquence à une date précise et la possibilité de faire un suivi au cours du temps

Fréquence (%) = nombre de relevés où le groupe est présent à une date précise / 5

Pour la flore, le **nombre d'espèces végétales aux différents stades** a été calculé par date et par parcelle afin de visualiser l'évolution et l'influence du nombre d'espèces aux trois stades phénologique.

L'**indice de Shannon** a été utilisé pour caractériser la diversité globale des communautés. Il prend en compte à la fois la richesse en taxons et la répartition des abondances entre ces taxons. Un indice de Shannon élevé traduit une communauté plus diversifiée et plus équilibrée, tandis qu'un indice faible peut traduire une communauté dominée par quelques taxons très abondants.

$H' = - \Sigma\ pi \times \ln(pi)$

où **pi** correspond à la proportion du taxon *i* dans l'abondance totale de l'échantillon.

Lorsque cela était pertinent, l'**équitabilité de Pielou** a également pu être calculée afin d'évaluer si les individus sont répartis de manière équilibrée entre les taxons observés.

$J = H' / \ln(S)$

où **H'** est l'indice de Shannon et **S** la richesse spécifique.

Enfin, pour caractériser le contexte paysager, le **pourcentage d'éléments semi-naturels** a été calculé comme décrit précédemment.

2.7 TESTS STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel RStudio. Les tests ont été choisis en fonction de la nature des variables étudiées, du nombre de groupes comparés et de la structure des données. Les résultats ont été considérés comme significatifs lorsque la p-value était inférieure au seuil de 5 %.

Lorsque l'objectif était d'étudier la relation entre deux variables numériques ou ordinales, un test de corrélation de Spearman a été utilisé. Ce test permet d'évaluer l'existence d'une relation monotone entre deux variables sans supposer une distribution normale des données. Il a notamment été utilisé pour tester les relations entre l'IFT, le pourcentage d'ESN, la richesse végétale, l'abondance totale ou la présence de certains groupes fonctionnels.

Le coefficient de Spearman, noté **rho**, indique le sens et l'intensité de la relation. Une valeur positive indique que les deux variables tendent à augmenter ensemble, tandis qu'une valeur négative indique qu'une variable tend à diminuer lorsque l'autre augmente. La valeur absolue de rho définit l'intensité de corrélation, qu'elle soit positive ou négative, entre les deux variables. La p-value permet de déterminer si cette relation est statistiquement significative.

Lorsque l'objectif était de comparer une variable quantitative entre plusieurs groupes indépendants, un test de Kruskal-Wallis a été utilisé. Ce test non paramétrique permet de comparer plusieurs groupes sans supposer la normalité des données. Il a notamment été utilisé pour comparer la richesse végétale ou certains indicateurs de biodiversité entre parcelles, sites ou modalités. Si le test était significatif, des comparaisons deux à deux pouvaient être réalisées afin d'identifier les groupes responsables de la différence observée.

Lorsque deux séries de données étaient appariées, par exemple pour comparer deux parcelles suivies aux mêmes dates, un test de Wilcoxon apparié a été utilisé. Ce test permet de comparer deux séries dépendantes lorsque les conditions d'application d'un test paramétrique ne sont pas garanties.

Des analyses multivariées, notamment l'analyse en composantes principales, ont également été utilisées comme outils exploratoires. L'ACP permet de représenter simultanément plusieurs variables et d'identifier des gradients de variation entre les parcelles ou les points d'échantillonnage. Elle n'a pas été utilisée comme test de significativité, mais comme méthode descriptive permettant de visualiser les relations entre pratiques culturales, contexte paysager, flore et communautés d'arthropodes.

2.8 UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Des outils d'intelligence artificielle générative ont été utilisés ponctuellement au cours de la rédaction et de l'analyse, comme appui méthodologique et rédactionnel. ChatGPT a principalement été utilisé pour générer les scripts RStudio, faire de la recherche bibliographique et reformuler/ corriger la formulation et les fautes d'orthographe du rapport.

L'utilisation de ces outils n'a pas remplacé le travail d'analyse ni l'interprétation scientifique des résultats. Les choix méthodologiques, les traitements statistiques, la sélection des résultats présentés et leur interprétation finale ont été réalisés par l'auteur du rapport, à partir des données collectées sur le terrain et des échanges avec les encadrantes du stage. Les contenus générés ou reformulés avec l'aide de l'IA ont été relus, vérifiés et adaptés avant intégration au rapport.

3. RESULTATS DE L'EXPERIMENTATION

3.1 PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats sont présentés de manière progressive, les 3 premiers graphiques ayant une fonction descriptive : ils permettent de visualiser l'évolution temporelle de la floraison des familles végétales, des principaux ordres d'arthropodes et des groupes fonctionnels. Les analyses suivantes porteront successivement sur l'effet de la diversité végétale, du stade phénologique de la végétation, des pratiques culturales, des infrastructures agroécologiques, des conditions climatiques sur les communautés d'arthropodes et de la comparaison de certains résultats avec ceux de 2025.

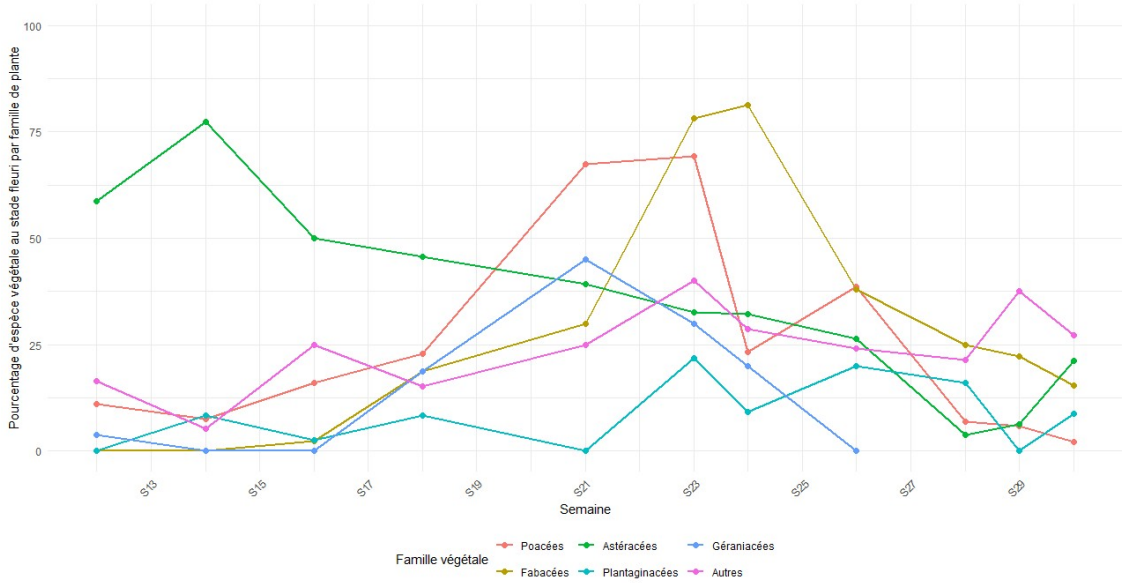


FIGURE 31 : EVOLUTION DU POURCENTAGE D'ESPECES VEGETALES AU STADE FLEURI PAR FAMILLE DE PLANTE AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026

La figure 31 présente l'évolution du pourcentage d'espèces végétales au stade fleuri selon les principales familles botaniques observées au cours de la campagne 2026. Elle montre des écarts temporels dans la floraison en fonction des familles végétales. Les Astéracées semblent notamment bien représentées en début de campagne, tandis que d'autres familles, comme les Fabacées ou les Poacées, présentent des pics plus tardifs. Ce graphique montre donc que la disponibilité en ressources florales varie au cours du temps, ce qui peut influencer l'attractivité de la bande enherbée pour certains groupes d'arthropodes.

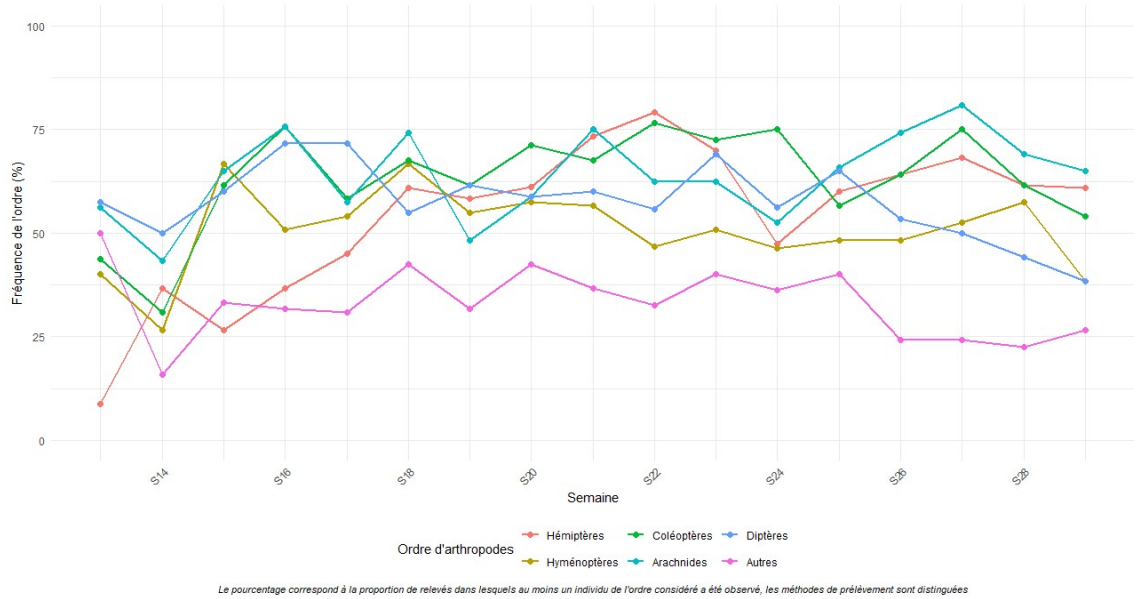


FIGURE 32 : EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES ORDRES D'ARTHROPODES AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026

La figure 32 montre l'évolution de la fréquence des principaux ordres d'arthropodes observés au cours de la campagne 2026. Plusieurs ordres, notamment les Diptères, les Coléoptères, les Hémiptères et les Arachnides, sont présents de manière régulière, mais avec des variations hebdomadaires importantes. Cette dynamique traduit une composition faunistique changeante au cours de la saison, et permet donc de montrer que la communauté d'arthropodes n'est pas stable dans le temps.

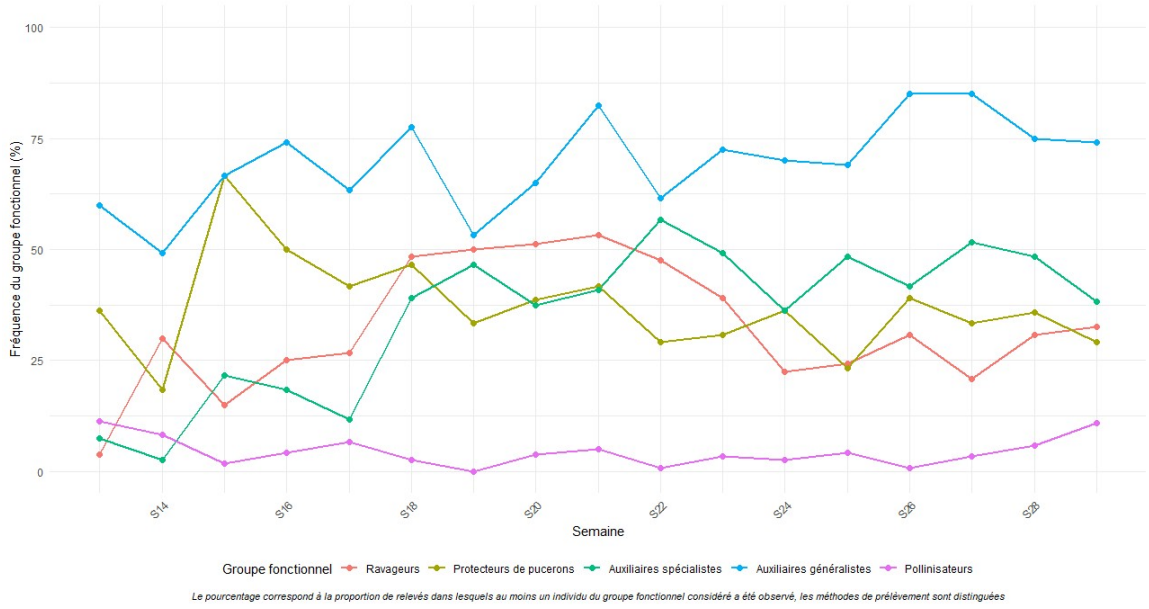


FIGURE 33 : EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES GROUPES FONCTIONNELS D'ARTHROPODES AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026

La figure 33 présente l'évolution temporelle des groupes fonctionnels d'arthropodes. Les auxiliaires généralistes apparaissent comme le groupe le plus régulièrement présent, avec des fréquences élevées pendant une grande partie de la campagne. Les ravageurs et les auxiliaires spécialistes présentent des variations plus hétérogènes selon les semaines (fréquence plus importante à partir de début mai notamment) ce qui suggère une dynamique temporelle plus dépendante des périodes de développement des populations ou de la disponibilité des ressources ou de conditions environnementales. Les protecteurs de pucerons et les pollinisateurs restent plus variables ou moins représentés. Ce graphique permet donc d'introduire l'intérêt d'analyser les groupes fonctionnels séparément, plutôt que de considérer uniquement l'abondance totale des arthropodes.

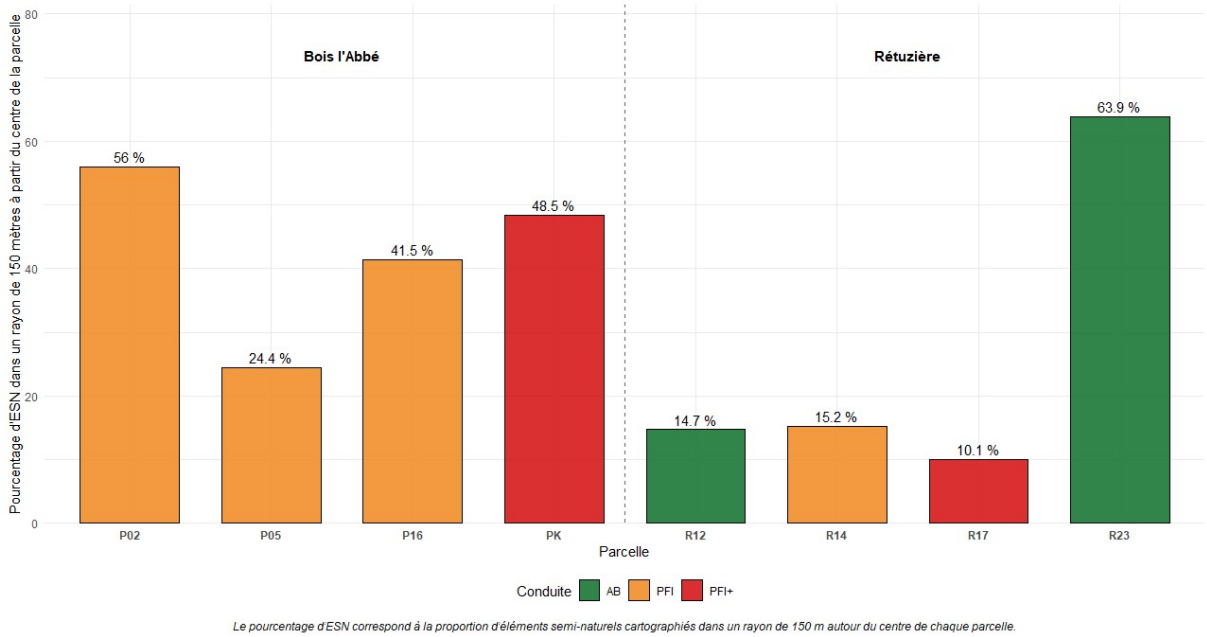


FIGURE 34 : POURCENTAGE D'ESN PAR PARCELLE DANS UN RAYON DE 150 M AUTOUR DU CENTRE DE LA PARCELLE

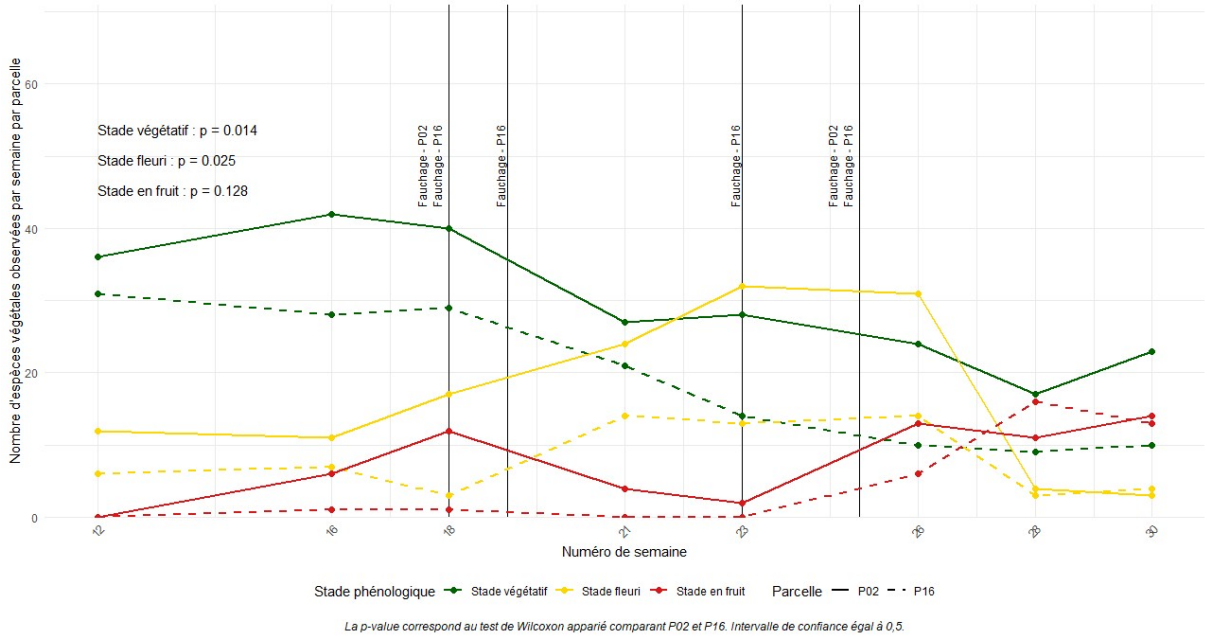
La figure 34 présentant le pourcentage d'ESN par parcelle met en évidence une forte hétérogénéité du contexte paysager. La parcelle R23 présente la valeur la plus élevée, avec 63,9 % d'ESN dans un rayon de 150 m, suivie de P02 avec 56,0 %, PK avec 48,5 % et P16 avec 41,5 %. À l'inverse, R17, R12 et R14 présentent les plus faibles proportions d'ESN, avec respectivement 10,1 %, 14,7 % et 15,2 %. P05 occupe une position intermédiaire avec 24,4 %.

On constate que le niveau d'ESN ne dépend pas uniquement du site ou de la conduite technique. La Rétuzière regroupe par exemple à la fois la parcelle la plus riche en ESN, R23 (voir annexe 5), et plusieurs parcelles faiblement entourées d'éléments semi-naturels, R14 (voir annexe 6). Ce graphique constitue donc une étape descriptive importante avant l'étude des relations entre ESN et abondance ou fréquentation des groupes fonctionnels.

3.1.1 Hypothèse 1 : Les pratiques culturales ont un impact sur la présence d'insecte

Cette hypothèse vise à évaluer l'effet des pratiques culturales sur les communautés d'invertébrés. L'analyse débute par une description de l'abondance totale des groupes fonctionnels dans chaque parcelle, afin d'identifier les parcelles dominées par les ravageurs, les auxiliaires ou les protecteurs de pucerons. Elle se poursuit ensuite avec l'étude des traitements SDP à Bois l'Abbé, en comparant la fréquence de présence des groupes fonctionnels selon les modalités de traitement. Enfin, l'IFT total est mis en relation avec l'abondance totale d'invertébrés afin de vérifier si une pression phytosanitaire plus élevée est associée à une variation de l'abondance globale

3.1.1.1 Existe-t-il une différence de proportion de stade phénologique entre deux parcelles aux conduites différentes P02 et P16 (figure 35) ?

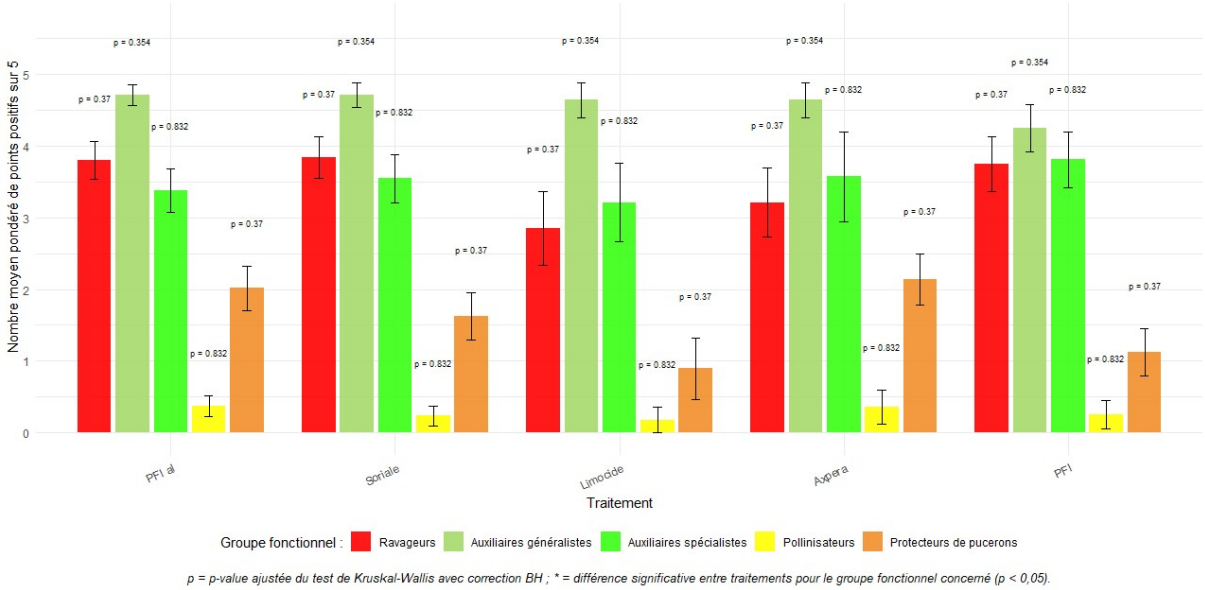


La p-value correspond au test de Wilcoxon apparié comparant P02 et P16. Intervalle de confiance égal à 0,5.

FIGURE 35 : ÉVOLUTION DES STADES PHENOLOGIQUES DE LA BANDE ENHERBEE DANS LES PARCELLES P02 ET P16 PRISES COMME EXEMPLES, AU COURS DU TEMPS

La figure 35 apporte un autre angle, avec l'évolution des stades phénologiques de la bande enherbée entre P02 et P16. Les tests de Wilcoxon appariés comparant P02 et P16 semaine par semaine montrent une différence significative pour le nombre d'espèces au stade végétatif (p = 0,014) et au stade fleuri (p = 0,025). En revanche, aucune différence significative n'est observée pour le stade en fruit/graine (p = 0,128). Ces résultats sont intéressants et permettent de montrer la différence de potentiel nectarifère entre deux parcelles éloignées en termes de conduite, la P16 étant beaucoup plus fauchée que la P02, possède moins d'ESN aux alentours, et les pommiers étant beaucoup plus jeunes qu'en P02. Sans significativité statistique on peut voir visuellement que le nombre d'individu au stade végétatif et fleuri diminuent logiquement avec les différents fauchages, 4 fois plus récurrents dans la P16 que la P02.

3.1.1.2 Les stimulateurs de défense influencent-t-ils les populations d'arthropodes (figure 36) ?



*p = p-value ajustée du test de Kruskal-Wallis avec correction BH ; * = différence significative entre traitements pour le groupe fonctionnel concerné (p < 0,05).*

FIGURE 36 : PRESENCE MOYENNE DES GROUPES FONCTIONNELS SELON L'APPLICATION DE STIMULATEURS DE DEFENSE OU NON, SUR LE SITE DE BOIS L'ABBE

Le test statistique de la figure 36 qui a permis d'obtenir les p-value est celui de Kruskal-Wallis afin de comparer la présence moyenne des groupes fonctionnels selon les modalités de traitement SDP. La présence moyenne des groupes fonctionnels selon l'application de stimulateurs de défense à Bois l'Abbé, montre que les auxiliaires généralistes restent globalement les plus présents, quel que soit le traitement, les valeurs de fréquentation des points d'échantillonnage variant de 4 à 5 sur 5. Les ravageurs et les auxiliaires spécialistes sont également bien représentés, tandis que les pollinisateurs présentent les niveaux les plus faibles (moins de 0,5/5). Cependant, les p-values affichées ne sont pas significatives pour les groupes fonctionnels. Les stimulateurs de défense comparés ne semblent donc pas entraîner de différence nette dans la fréquence de présence des groupes fonctionnels.

Le point à mettre en avant pour H3 est que les résultats obtenus ici ne permettent pas de mettre en évidence une différence statistiquement nette entre les traitements SDP et la présence moyenne des groupes fonctionnels.

3.1.1.3 L'IFT a-t-il un impact sur l'abondance des arthropodes (figure 37) ?

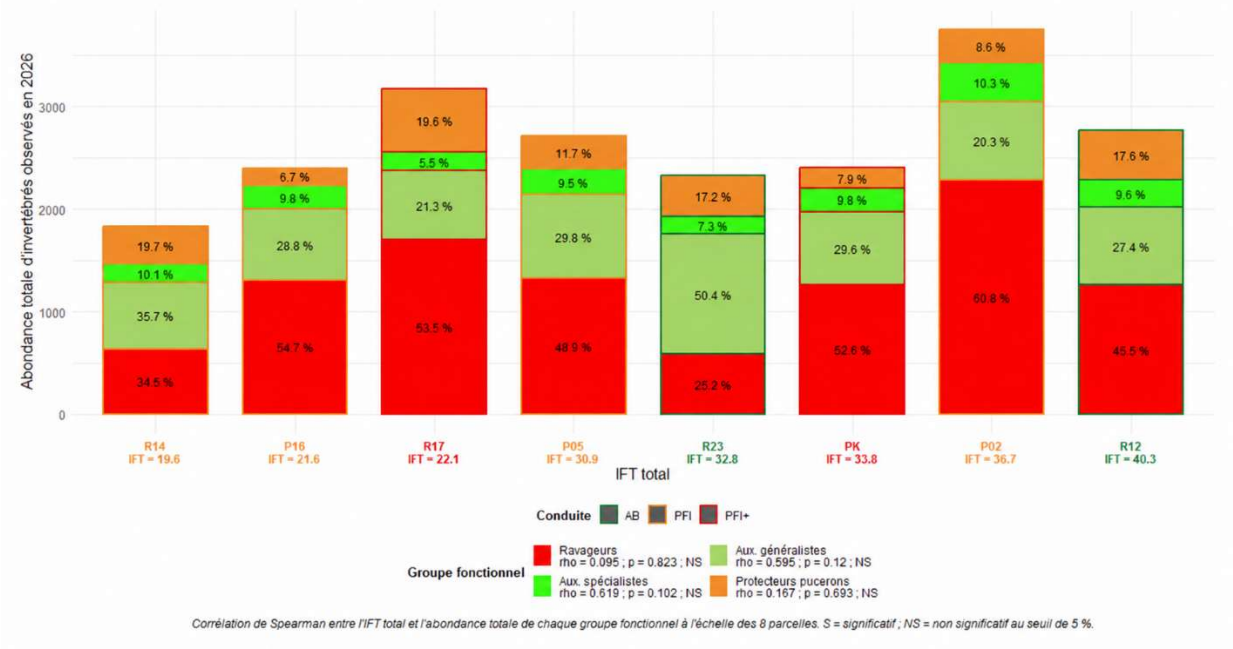


FIGURE 37 : ABONDANCE TOTALE DES INVERTEBRES PAR PARCELLE EN FONCTION DE L'IFT TOTAL DES PARCELLES SUR L'ANNEE 2026

La figure 37 présente l'abondance totale des principaux groupes fonctionnels d'invertébrés dans chaque parcelle, en relation avec l'IFT total. Visuellement, les ravageurs constituent une part importante de l'abondance dans plusieurs parcelles, notamment P16, R17, P05, PK, P02 et R12, alors qu'ils sont proportionnellement moins représentés dans R23. À l'inverse, les auxiliaires généralistes occupent une part importante dans R23, où ils représentent environ la moitié des invertébrés observés, ainsi que dans R14. Les auxiliaires spécialistes restent présents dans l'ensemble des parcelles, mais avec des proportions plus faibles et relativement proches entre parcelles. Les protecteurs de pucerons montrent quant à eux une contribution variable, plus marquée dans certaines parcelles comme R14, R17 ou R12.

Les tests de corrélation de Spearman réalisés entre l'IFT total et l'abondance de chaque groupe fonctionnel ne mettent pas en évidence de relation significative. Les ravageurs ne présentent pas de corrélation significative avec l'IFT total (rho = 0,095 ; p = 0,823), malgré une forte hétérogénéité visuelle entre parcelles. Les auxiliaires généralistes montrent une relation positive modérée mais non significative (rho = 0,595 ; p = 0,120), tout comme les auxiliaires spécialistes (rho = 0,619 ; p = 0,102). Les protecteurs de pucerons ne présentent pas non plus de relation significative avec l'IFT total (rho = 0,167 ; p = 0,693). Ainsi, à l'échelle des huit parcelles étudiées, l'IFT total ne permet pas d'expliquer statistiquement les variations d'abondance des groupes fonctionnels présentés sur ce graphique.

3.1.2 Hypothèse 2 : Les présences des ravageurs et des auxiliaires sont corrélées

Cette hypothèse vise à étudier les relations entre les ravageurs et les auxiliaires, en particulier les auxiliaires spécialistes. L'objectif est de déterminer si la présence d'auxiliaires est associée à une diminution ultérieure des ravageurs. Pour cela, les fréquences des ravageurs et des auxiliaires sont suivies au cours du temps, puis comparées avec différents décalages temporels. Les décalages positifs permettent notamment d'évaluer si la présence d'auxiliaires à une semaine donnée est suivie d'une diminution ou d'une modification de la présence des ravageurs les semaines suivantes.

3.1.2.1 Les populations de ravageurs et d'auxiliaires se suivent-elles dans le temps (figure 38) ?

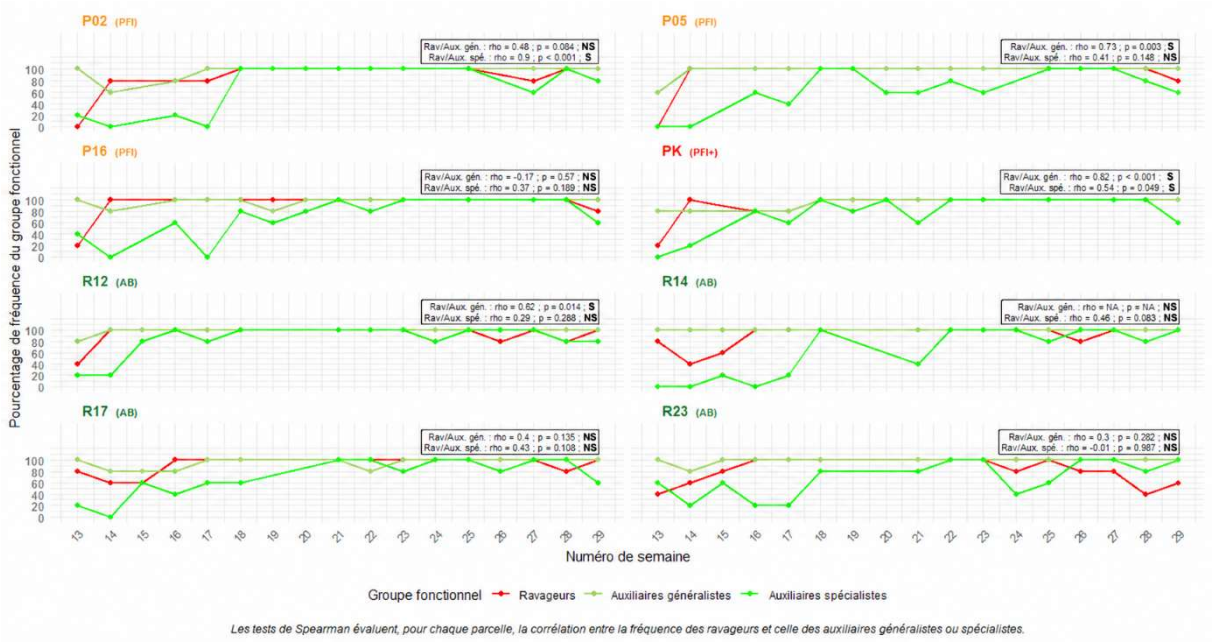


FIGURE 38 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DES AUXILIAIRES ET RAVAGEURS PAR SEMAINE SUR LA CAMPAGNE 2026

La figure 38 présente l'évolution de la fréquentation des ravageurs, des auxiliaires généralistes et des auxiliaires spécialistes au cours de la campagne 2026. Les auxiliaires généralistes apparaissent comme le groupe le plus régulièrement présent au cours du suivi. Leur fréquence reste élevée sur une grande partie de la campagne, ce qui traduit une présence relativement stable dans les parcelles.

Les ravageurs présentent une dynamique plus variable selon les semaines, avec des périodes de hausse et de diminution au cours de la campagne. Les auxiliaires spécialistes suivent une évolution plus proche de celle des ravageurs que de celle des auxiliaires généralistes. Visuellement, leurs augmentations semblent souvent se produire aux mêmes périodes que celles des ravageurs, ou légèrement après. Cette tendance suggère que les auxiliaires sont davantage associés aux périodes où les ravageurs sont présents.

Les tests de Spearman évaluent, pour chaque parcelle, la corrélation entre la fréquence des ravageurs et celle des auxiliaires généralistes ou spécialistes. Cette évolution suggère

que les auxiliaires spécialistes sont davantage présents lorsque les ravageurs sont également fréquents dans les parcelles. Certains tests indiqués sur la figure sont significatifs (p-value < 0,05), ce qui confirme qu'il existe, pour certaines situations, une relation statistique entre la fréquentation des ravageurs et celle des auxiliaires. Toutefois, cette relation ne traduit pas nécessairement une régulation directe des ravageurs par les auxiliaires. La figure montre surtout une co-présence temporelle : les auxiliaires et les ravageurs fréquentent les parcelles aux mêmes périodes, sans que l'on observe clairement une diminution des ravageurs après l'augmentation des auxiliaires.

3.1.2.2 Observe-t-on un effet de diminution ou augmentation des auxiliaires à différents décalages temporels par rapport aux ravageurs (figure 39) ?

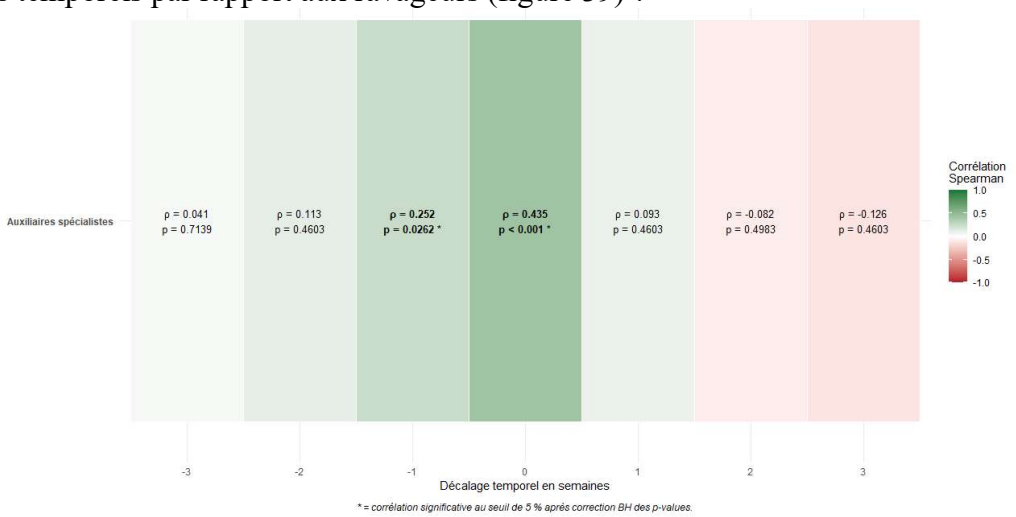


FIGURE 39 : CORRELATIONS ENTRE AUXILIAIRES SPECIALISTES ET RAVAGEURS SELON LE DECALAGE TEMPOREL

La figure 39 montre les corrélations avec décalage temporel comparent la fréquence des auxiliaires spécialistes à une semaine donnée avec la fréquence de présence des ravageurs observée avant, pendant ou après cette même semaine. Un décalage positif (+1) indique que la présence de ravageurs est mise en relation avec la présence des auxiliaires spécialistes de la semaine suivante. A l'inverse un décalage négatif (-1) indique que les ravageurs sont mis en relation avec la présence des auxiliaires spécialistes de la semaine précédente. Un décalage de 0 correspond à une comparaison la même semaine.

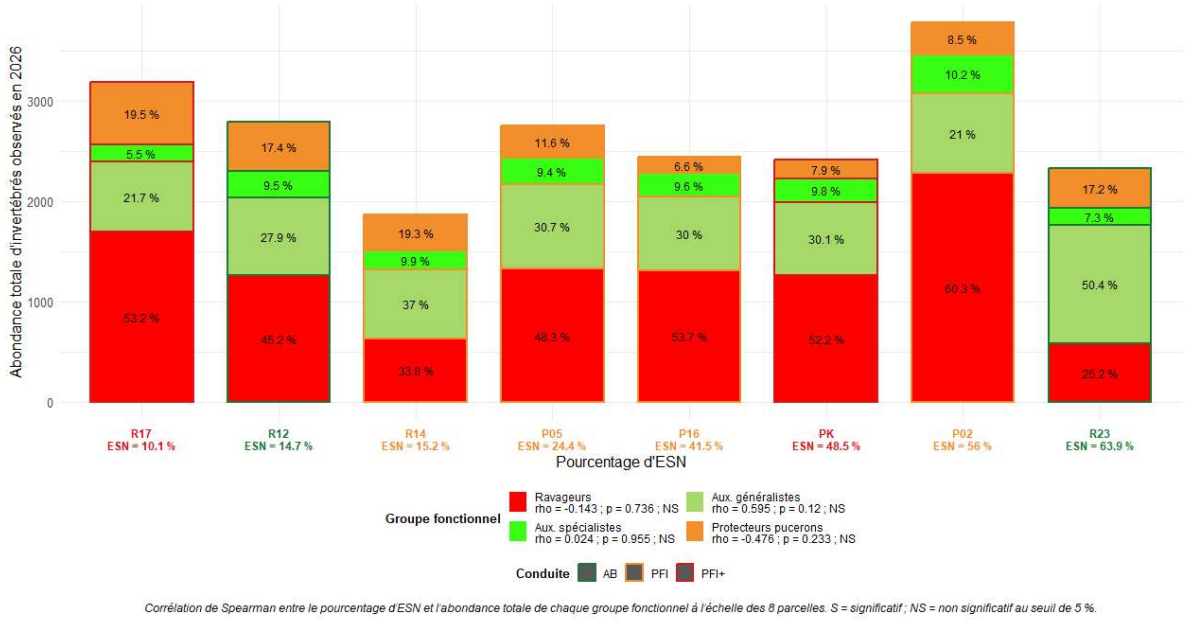
La corrélation entre présence d'auxiliaires spécialistes et présence de ravageurs a été calculée grâce à un test de Spearman. Cette corrélation est significative la même semaine, avec ρ = 0,435 et p < 0,001. Elle est également significative avec un décalage de -1 semaine, avec ρ = 0,252 et p = 0,0262. En revanche, les décalages positifs, c'est-à-dire les situations où les ravageurs sont observés après les auxiliaires, ne sont pas significatifs.

Ce résultat ne va pas dans le sens d'une diminution des ravageurs après la présence d'auxiliaires spécialistes. Il montre plutôt une association positive, c'est-à-dire que les auxiliaires spécialistes et les ravageurs ont tendance à être présents dans les mêmes périodes. Les données ne mettent donc pas en évidence une baisse des ravageurs après la présence d'auxiliaires spécialistes. En revanche on peut supposer que la présence des ravageurs à une semaine donnée peut attirer certains auxiliaires spécialistes la semaine suivante.

3.1.3 Hypothèse 3 : Les infrastructures agroécologiques ont un effet sur l'abondance des arthropodes des vergers.

Cette hypothèse s'intéresse à l'influence du contexte paysager sur les communautés d'invertébrés. Le contexte paysager est étudié à partir du pourcentage d'éléments semi-naturels présents dans un rayon de 150 m autour du centre de chaque parcelle. Ces éléments comprennent notamment les haies, prairies, bosquets, arbres isolés et zones herbacées. Le rapport indique bien que les ESN ont été cartographiés sous QGIS dans un rayon de 150 m autour des parcelles.

3.1.3.1 La proportion d'ESN autour des parcelles a-t-elle un effet sur l'abondance des arthropodes (figure 40) ?



Corrélation de Spearman entre le pourcentage d'ESN et l'abondance totale de chaque groupe fonctionnel à l'échelle des 8 parcelles. S = significatif ; NS = non significatif au seuil de 5 %.

FIGURE 40 : ABONDANCE TOTALE DES GROUPES FONCTIONNELS PAR PARCELLE EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ESN DANS UN RAYON DE 150 M AUTOUR DE LA PARCELLE DE LA CAMPAGNE 2026

La figure 40 représente l'abondance totale d'invertébrés en fonction du pourcentage d'ESN autour de chaque parcelle. Le test de Spearman réalisé à l'échelle des huit parcelles ne met pas en évidence de corrélation significative entre ces deux variables. Le coefficient rho est positif mais faible, et la p-value est supérieure au seuil de 5 %. L'abondance totale d'invertébrés ne semble donc pas augmenter de manière significative avec le pourcentage d'ESN dans le rayon étudié.

Ce résultat montre que la proportion d'ESN seule ne suffit pas à expliquer l'abondance globale observée dans les parcelles. Certaines parcelles combinent un fort pourcentage d'ESN et une forte abondance, comme P02, tandis que d'autres présentent un fort pourcentage d'ESN mais une abondance plus modérée, comme R23 ou PK. À l'inverse, certaines parcelles à faible proportion d'ESN présentent une abondance élevée. L'effet des ESN semble donc plus complexe qu'une simple relation directe entre surface semi-naturelle et abondance totale.

3.1.4 Hypothèse 4 : La diversité végétale de la bande enherbée influence les populations d'arthropodes des vergers.

Cette hypothèse vise à déterminer si la diversité végétale présente dans les bandes enherbées peut influencer la composition des communautés d'invertébrés.

3.1.4.1 Existe-t-il une différence de composition floristique selon la parcelle étudiée (figure 41) ?

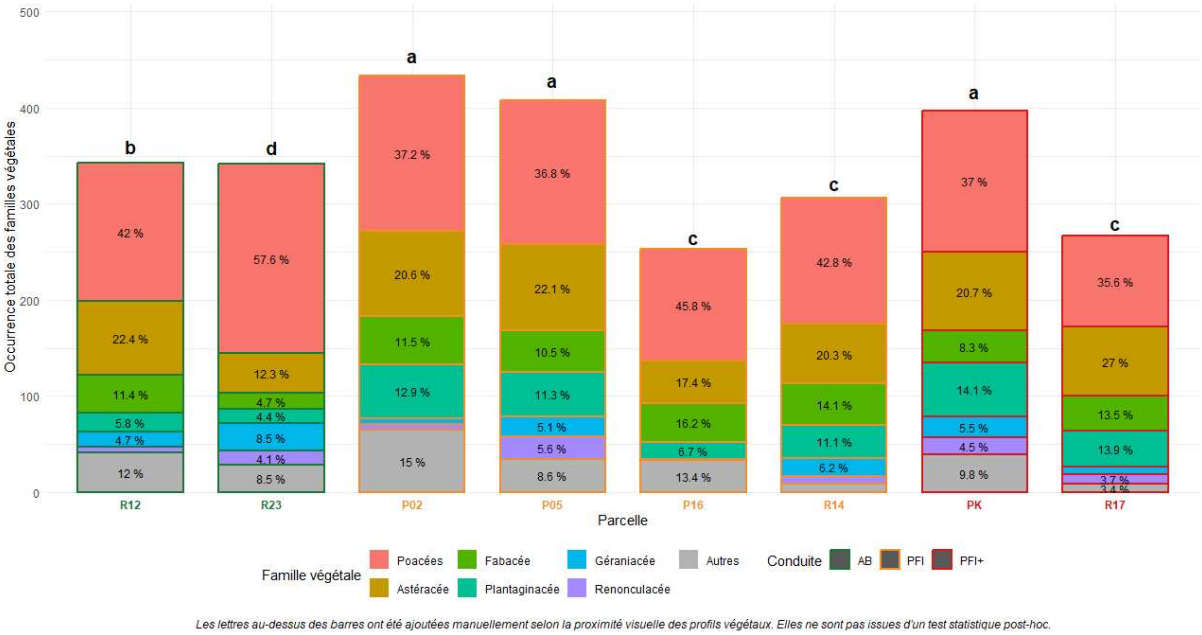


FIGURE 41 : OCCURRENCE TOTALE DES FAMILLES VEGETALES PAR PARCELLE IDENTIFIEES PENDANT LA CAMPAGNE 2026

La figure 41 présente la répartition des principales familles végétales observées dans chaque parcelle. Les lettres au-dessus des graphiques ont été ajoutées manuellement pour montrer la proximité entre certaines parcelles, elles ne proviennent pas d'un post-hoc et son donc descriptives. Les Poacées apparaissent comme une famille fortement représentée, avec une proportion variant de 35% à 57% dans l'ensemble des parcelles. Certaines parcelles présentent une composition plus équilibrée entre plusieurs familles, tandis que d'autres sont davantage dominées par une, deux ou trois familles végétales. On peut prendre comme exemple la parcelle R23 qui comprend 57,6% de Poacées parmi les familles végétales observées, les autres familles sont en très faibles proportions (inférieures à 12% pour chacune). A l'inverse, la répartition des familles végétales dans la parcelle P02 est plus homogène, malgré une majorité de Poacées (37,2%) les autres familles sont bien représentées avec quatre familles supérieures à 10% plus la catégorie « autre » à 15% comprenant un grand nombre de famille.

TABLEAU 5 : RESULTATS DU TEST DE CHI-2 ENTRE LES FAMILLES VEGETALES ET LES PARCELLES

	famille	test	chi2	p_value_arrondie	interpretation
1	Apiacée	Chi-2 classique	98.702541	< 0,001	Différence très hautement significative
2	Astéracée	Chi-2 avec p-value simulée	56.666667	< 0,001	Différence très hautement significative
3	Fabacée	Chi-2 classique	75.794655	< 0,001	Différence très hautement significative
4	Géraniacée	Chi-2 classique	55.145503	< 0,001	Différence très hautement significative
5	Plantaginacée	Chi-2 classique	93.634704	< 0,001	Différence très hautement significative
6	Poacée	Chi-2 avec p-value simulée	9.677987	0.344	Non significatif
7	Polygonacée	Chi-2 avec p-value simulée	93.209877	< 0,001	Différence très hautement significative
8	Renonculacée	Chi-2 classique	43.993719	< 0,001	Différence très hautement significative

Le tableau 5 présente, pour chaque famille végétale principale, le résultat d'un test du Chi-2 comparant son occurrence selon les parcelles étudiées. Pour chaque famille, le test compare le nombre de relevés où la famille est présente et absente entre les parcelles.
Les résultats montrent que l'occurrence des familles végétales varie très fortement selon les parcelles pour la majorité des familles étudiées. Les Apiacées, Astéracées, Fabacées, Géraniacées, Plantaginacées, Polygonacées et Renonculacées présentent toutes une différence très hautement significative entre parcelles ($p < 0,001$). Cela indique que ces familles ne sont pas réparties de manière homogène dans le dispositif et que certaines parcelles possèdent une composition floristique marquée par la présence plus fréquente de certaines familles. En revanche, les Poacées ne présentent pas de différence significative entre parcelles ($p = 0,344$), ce qui suggère une occurrence relativement homogène de cette famille dans l'ensemble des parcelles étudiées.

3.1.4.2 Existe-t-il une différence de composition faunistique selon la parcelle étudiée (figure 42) ?

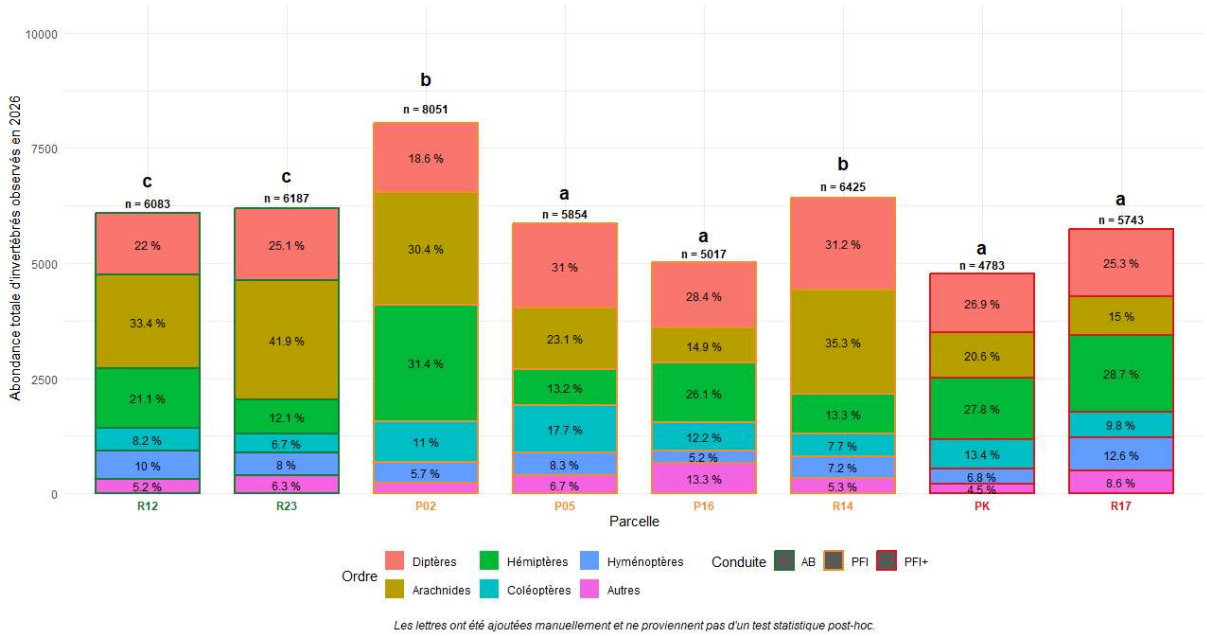


FIGURE 42 : OCCURRENCE TOTALE DES ORDRES D'ARTHROPODES PAR PARCELLE IDENTIFIEES PENDANT LA CAMPAGNE 2026

La figure 42 présente l'abondance totale des principaux ordres d'arthropodes observés dans chaque parcelle au cours de la campagne 2026. Ce graphique complète le précédent, qui décrivait la composition floristique des parcelles. Il permet ici d'observer si les parcelles présentant des profils végétaux différents présentent également des profils faunistiques contrastés.

Les Diptères, Hémiptères et Arachnides constituent une part importante des abondances observées dans plusieurs parcelles, mais leur répartition varie selon les situations. Certaines parcelles présentent une abondance totale plus élevée, tandis que d'autres se distinguent davantage par la proportion relative de certains ordres. Cette représentation montre donc que les communautés d'arthropodes ne sont pas homogènes entre les parcelles, aussi bien en termes d'abondance totale que de composition taxonomique.

Comme pour les familles végétales vues précédemment, certaines parcelles présentent une composition plus équilibrée. Par exemple, 42% des arthropodes relevés en R23 sont des arachnides, les autres ordres sont peu représentés en comparaison. En parallèle la parcelle R17 est beaucoup plus équilibré avec des pourcentages d'abondance compris entre 8,6% et 28,7%.

Après cette comparaison descriptive des profils végétaux et faunistiques par parcelle, l'analyse a été poursuivie en testant plus directement l'effet de la richesse végétale. Pour cela, les observations floristiques ont été regroupées en classes de richesse végétale, puis mises en relation avec la fréquentation des principaux groupes fonctionnels d'arthropodes.

TABLEAU 6 : RESULTATS DU TEST DE CHI-2 ENTRE LES FAMILLES VEGETALES ET LA CONDUITE TECHNIQUE

	famille	facteur	test	chi2	p_value_arrondie	interpretation
1	Apiacée	conduite	Chi-2 classique	21.789526	< 0,001	Différence très hautement significative
2	Astéracée	conduite	Chi-2 classique	11.589094	0.003	Différence hautement significative
3	Fabacée	conduite	Chi-2 classique	28.874369	< 0,001	Différence très hautement significative
4	Géraniacée	conduite	Chi-2 classique	4.340039	0.1142	Non significatif
5	Plantaginacée	conduite	Chi-2 classique	62.028575	< 0,001	Différence très hautement significative
6	Poacée	conduite	Chi-2 avec p-value simulée	1.015696	0.8156	Non significatif
7	Polygonacée	conduite	Chi-2 classique	13.638344	0.0011	Différence hautement significative

Le tableau 6 présente le même type d'analyse, mais en regroupant les parcelles selon leur mode de conduite : AB, PFI ou PFI+. Pour chaque famille végétale principale, le test du Chi-2 compare l'occurrence de la famille entre les trois conduites. Cette analyse doit toutefois être interprétée avec prudence, car les conduites ne sont pas représentées par le même nombre de parcelles et d'autres facteurs peuvent aussi intervenir, comme le site, l'âge du verger, la gestion de l'inter-rang ou le contexte paysager.

Les résultats montrent que l'occurrence de plusieurs familles végétales varie significativement selon le mode de conduite. Les Apiacées, Fabacées et Plantaginacées présentent une différence très hautement significative entre conduites ($p < 0,001$), tandis que les Astéracées ($p = 0,003$) et les Polygonacées ($p = 0,0011$) présentent une différence hautement significative. Ces résultats suggèrent que certaines familles végétales sont associées plus fréquemment à certains modes de conduite. En revanche, les Géraniacées ($p = 0,1142$) et les Poacées ($p = 0,8156$) ne présentent pas de différence significative selon la conduite, ce qui indique que leur occurrence ne semble pas dépendre clairement du mode AB, PFI ou PFI+.

3.1.4.3 Existe-t-il une différence de composition faunistique selon 3 classes de richesse floristique (figure 43) ?

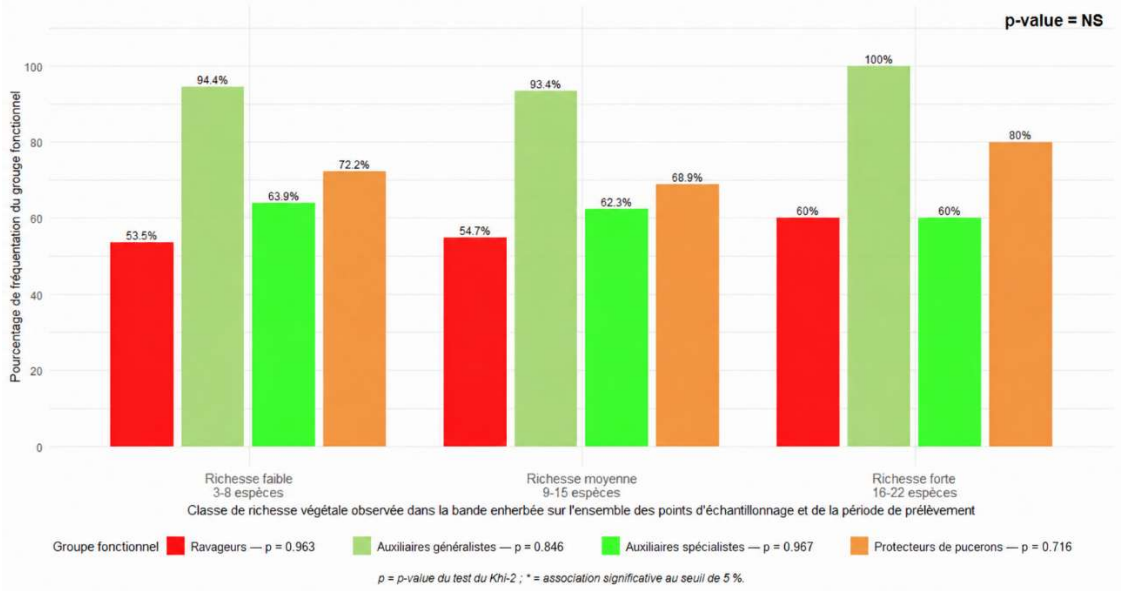


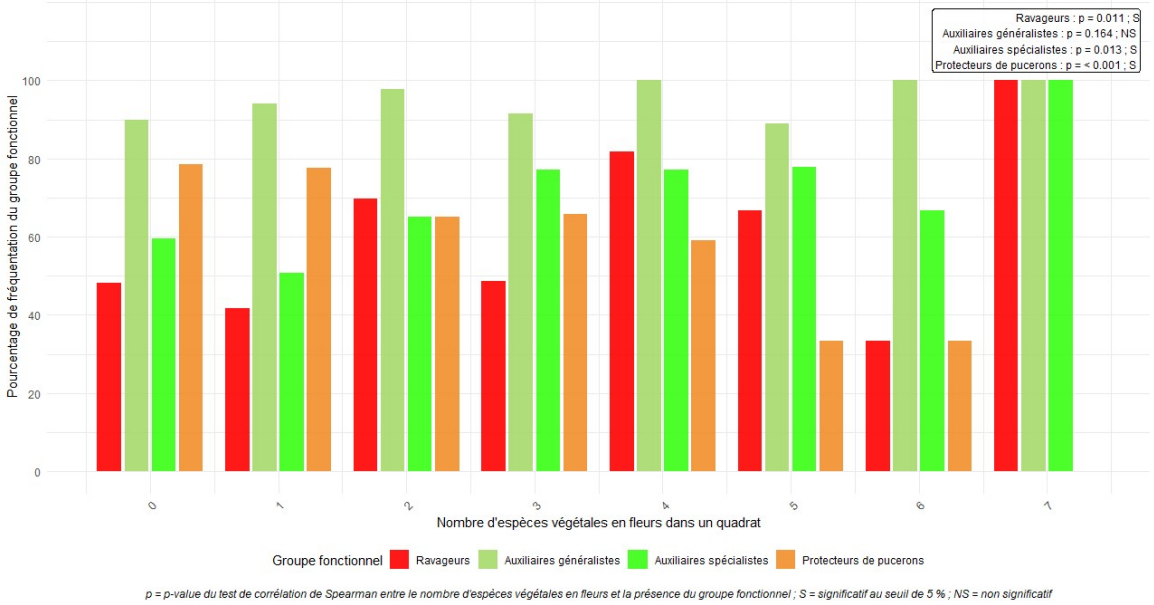
FIGURE 43 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODE SUR LA CAMPAGNE 2026 EN FONCTION DES CLASSES DE RICHESSE VEGETALE OBSERVEE DANS LE QUADRAT

La figure 43 montre que les classes de richesse végétale ne se traduisent pas par une différence significative de fréquentation des groupes fonctionnels. Un test de Kruskal-Wallis a été utilisé afin de comparer la fréquentation des groupes fonctionnels selon les classes de richesse végétale. Les p-values sont non significatives pour les ravageurs, les auxiliaires généralistes, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons. Autrement dit, lorsque la richesse végétale est classée en trois niveaux, elle ne permet pas de distinguer clairement la présence des groupes fonctionnels.

3.1.5 Hypothèse 5 : L'effet d'attraction des arthropodes dépend du stade phénologique des espèces végétales de la bande enherbée

Cette hypothèse s'intéresse plus précisément au stade phénologique de la végétation dans les bandes enherbées. Les relevés floristiques distinguent trois stades : le stade végétatif, le stade fleuri et le stade en fruit. L'objectif est de savoir si la végétation agit différemment sur les invertébrés selon son stade phénologique. Une attention particulière est portée au nombre d'espèces végétales en fleurs, car la floraison peut fournir des ressources alimentaires ou des habitats favorables à certains groupes d'insectes. Le nombre d'espèces en fleurs est donc comparé au pourcentage de fréquentation des groupes fonctionnels.

3.1.5.1 Existe-t-il une différence de fréquentation des arthropodes selon le nombre d'espèces végétales en fleurs dans un quadrat (figure 44) ?



p = p-value du test de corrélation de Spearman entre le nombre d'espèces végétales en fleurs et la présence du groupe fonctionnel ; S = significatif au seuil de 5 % ; NS = non significatif

FIGURE 44 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL EN FONCTION DU NOMBRE D'ESPECES VEGETALES EN FLEURS PAR QUADRAT, TOUTES PARCELLES CONFONDUES

La figure 44 montre que la fréquentation des groupes fonctionnels varie selon le nombre d'espèces végétales en fleurs observées dans les quadrats. Les auxiliaires généralistes apparaissent comme le groupe le plus régulièrement présent : leur pourcentage de fréquentation reste élevé dans la plupart des situations, même lorsque le nombre d'espèces en fleurs est faible. À l'inverse, les ravageurs et les auxiliaires spécialistes présentent des variations plus marquées selon les classes de floraison, avec une fréquentation qui semble globalement augmenter lorsque plusieurs espèces végétales sont en fleurs. Les protecteurs de pucerons montrent une dynamique plus irrégulière : ils sont bien représentés pour certains niveaux de floraison, mais leur fréquentation diminue dans d'autres classes. Le groupe fonctionnel des pollinisateurs a été volontairement écarté car sous-représenté sur le graphique, ne permettant pas d'interpréter les résultats.

La figure 44 montre une relation plus nette que la simple richesse végétale. Une corrélation de Spearman a été réalisée entre le nombre d'espèces végétales en fleurs et la fréquentation de chaque groupe fonctionnel. Le nombre d'espèces végétales en fleurs est significativement lié à plusieurs groupes fonctionnels : les ravageurs ($p = 0,011$), les auxiliaires spécialistes ($p = 0,013$) et les protecteurs de pucerons ($p < 0,001$). En revanche, les auxiliaires généralistes ne présentent pas de relation significative ($p = 0,164$). Ces derniers sont donc présents quel que soit le stade de développement de la végétation.

Ce résultat est intéressant à mettre en avant dans la partie résultats, car il montre que le stade fleuri de la végétation semble plus informatif que la richesse végétale totale. La richesse végétale seule ne ressortait pas clairement dans les graphiques de l'hypothèse H1, alors que le nombre d'espèces en fleurs ressort pour plusieurs groupes fonctionnels.

3.1.6 Hypothèse 6 : Les conditions climatiques ont un effet sur la diversité des groupes fonctionnels d'arthropodes des vergers.

3.1.6.1 Les conditions climatiques ont-elles un impact sur la fréquentation des arthropodes des parcelles AB et PFI+ (figure 45) ?

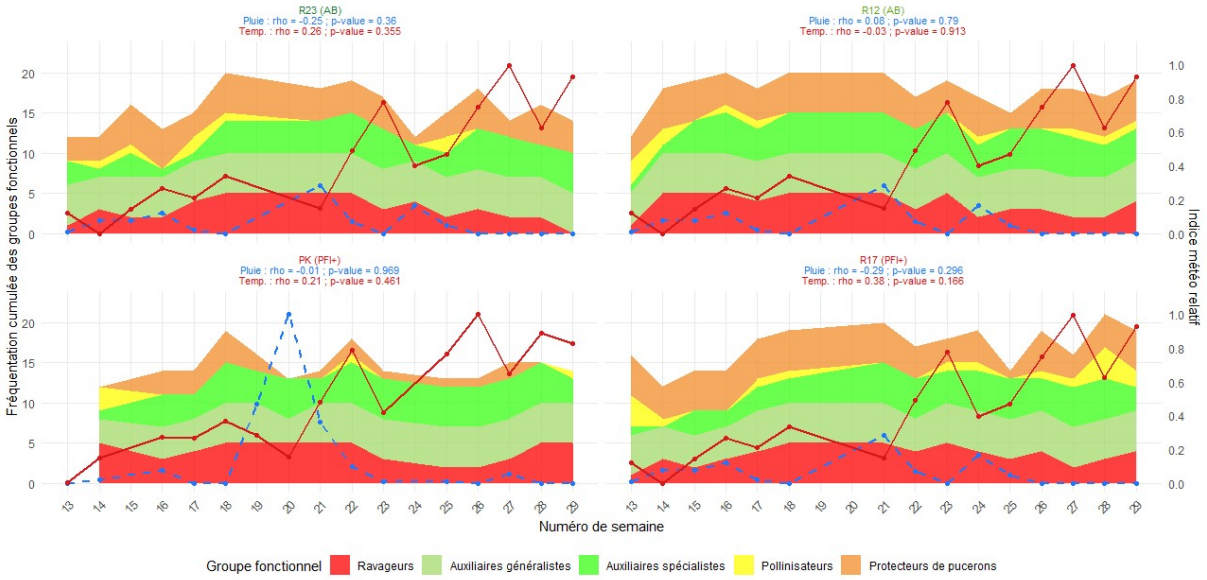


FIGURE 45 : FREQUENTATION CUMULEE DES GROUPES FONCTIONNELS D'ARTHROPODES EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LES PARCELLES PFI+ ET AB POUR LA CAMPAGNE 2026

3.1.6.2 Les conditions climatiques ont-elles un impact sur la fréquentation des arthropodes des parcelles PFI (figure 46) ?

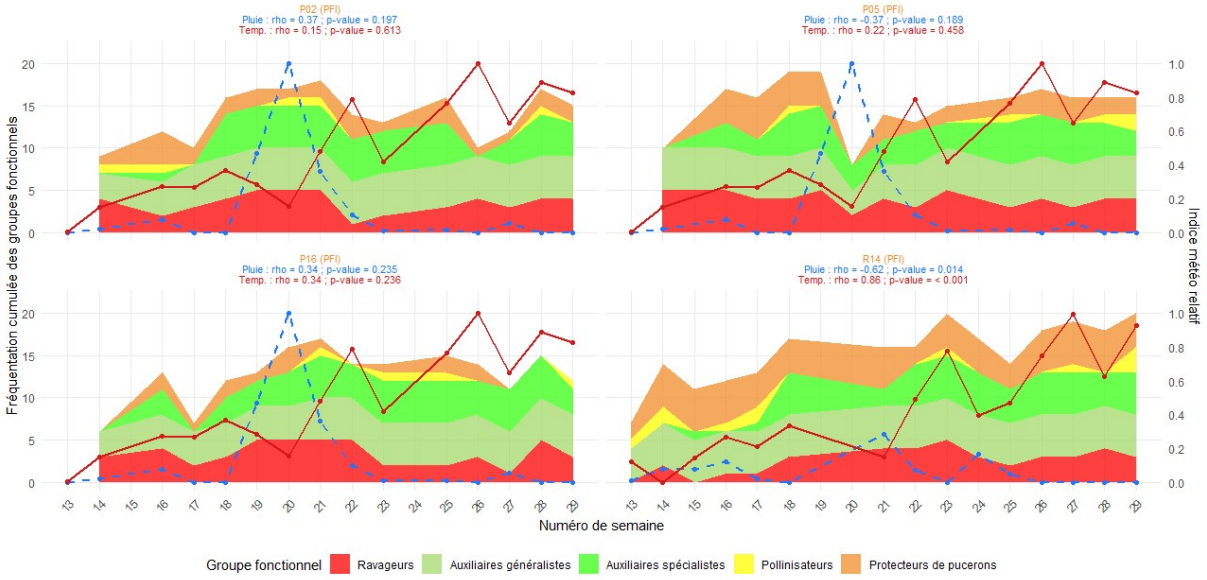


FIGURE 46 : FREQUENTATION CUMULEE DES GROUPES FONCTIONNELS EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LES PARCELLES PFI POUR LA CAMPAGNE 2026

Les figures 45 et 46 présentent l'évolution temporelle de la fréquentation cumulée des groupes fonctionnels en parallèle de la pluviométrie et de la température. Des corrélations de Spearman ont été réalisées, parcelle par parcelle, afin d'évaluer si la fréquentation des arthropodes variait en lien avec ces deux variables climatiques. Dans la majorité des parcelles, les p-values sont supérieures à 0,05, ce qui ne permet pas de conclure à une relation significative entre météo et fréquentation des groupes fonctionnels.

La parcelle R14 se distingue cependant des autres parcelles. Elle présente une corrélation négative significative avec la pluviométrie (rho = -0,618 ; p = 0,0141), indiquant que la fréquentation tend à diminuer lorsque les précipitations augmentent. À l'inverse, la température est positivement corrélée à la fréquentation sur cette même parcelle (rho = 0,859 ; p < 0,001), ce qui suggère une augmentation de l'activité ou de la présence des arthropodes lorsque les températures sont plus élevées. Ces résultats montrent donc un effet climatique possible, mais localisé, qui ne peut pas être généralisé à l'ensemble des parcelles.

3.1.6.3 La pluviométrie a-t-elle un impact sur la fréquence des groupes fonctionnels d'arthropodes (figure 47) ?

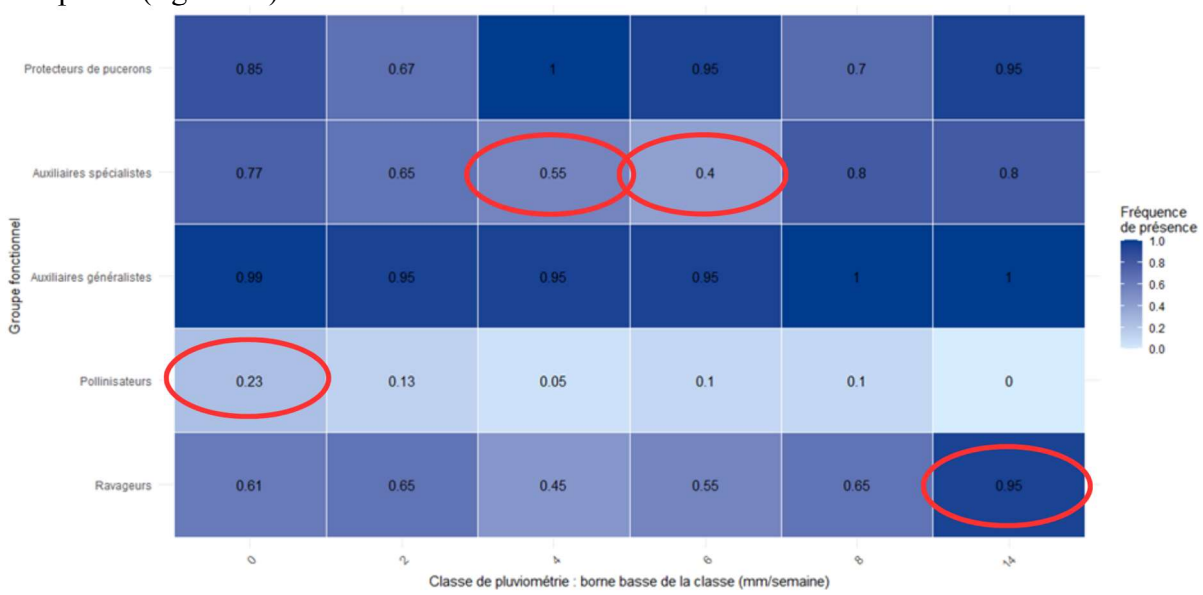


FIGURE 47 : LIEN ENTRE LA FREQUENCE DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODES ET LE GRADIENT DE PLUVIOMETRIE POUR LA CAMPAGNE 2026

3.1.6.4 La température a-t-elle un impact sur la fréquence des groupes fonctionnels d'arthropodes (figure 48) ?

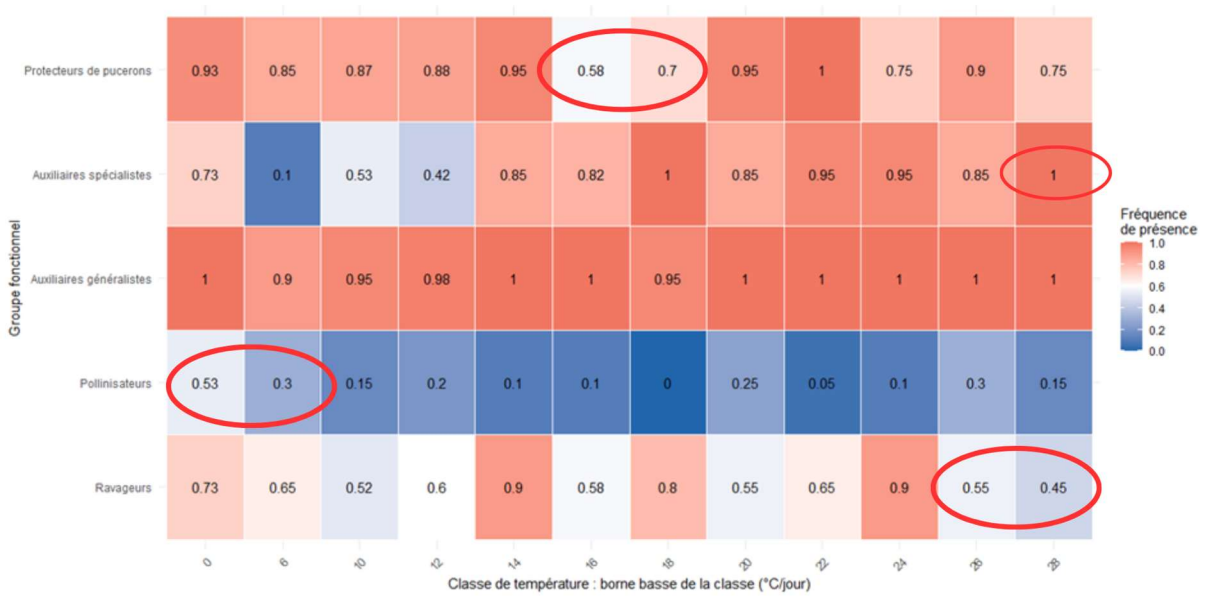


FIGURE 48 : LIEN ENTRE LA FREQUENCE DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODES ET LE GRADIENT DE TEMPERATURE POUR LA CAMPAGNE 2026

Les figures 47 et 48 montrent que la pluviométrie et la température peuvent accompagner certaines variations temporelles de fréquentation des groupes fonctionnels, mais sans produire une tendance homogène pour l'ensemble des parcelles. Les auxiliaires généralistes restent globalement très présents quelles que soient les conditions météorologiques. Les auxiliaires spécialistes présentent davantage de variations, des fréquences parfois élevés lorsque les températures augmentent ou lorsque les conditions de pluviométrie ont été faibles ou fortes. Les ravageurs présentent quant à eux une dynamique plus irrégulière, ce qui rend l'identification d'une tendance générale plus difficile.

Les tests de corrélation réalisés précédemment montrent surtout le cas particulier de R14, où la fréquentation cumulée des groupes fonctionnels est négativement corrélée à la pluviométrie et positivement corrélée à la température. Pour les autres parcelles, les relations sont plus faibles ou non significatives. Ces résultats suggèrent donc que les conditions climatiques peuvent intervenir dans certaines situations, mais qu'elles ne suffisent pas à expliquer seules la dynamique des groupes fonctionnels.

3.1.7 Hypothèse 7 : Il existe des différences de fréquentation des arthropodes entre la campagne 2025 et 2026

3.1.7.1 Quelles sont les valeurs de l'indice de Shannon pour la campagne 2025 (figure 49) ?

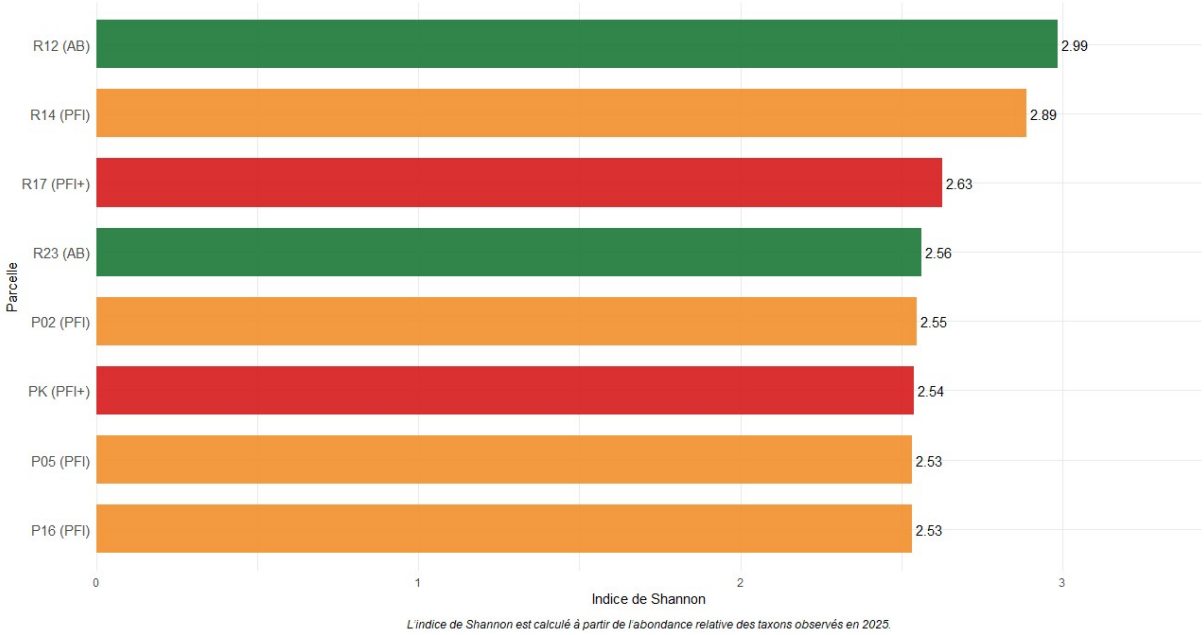


FIGURE 49 : INDICE DE SHANNON DES PARCELLES DE BOIS L'ABBE ET LA RETUZIERE SUR LA CAMPAGNE 2025

3.1.7.2 Quelles sont les valeurs de l'indice de Shannon pour la campagne 2026 (figure 50) ?

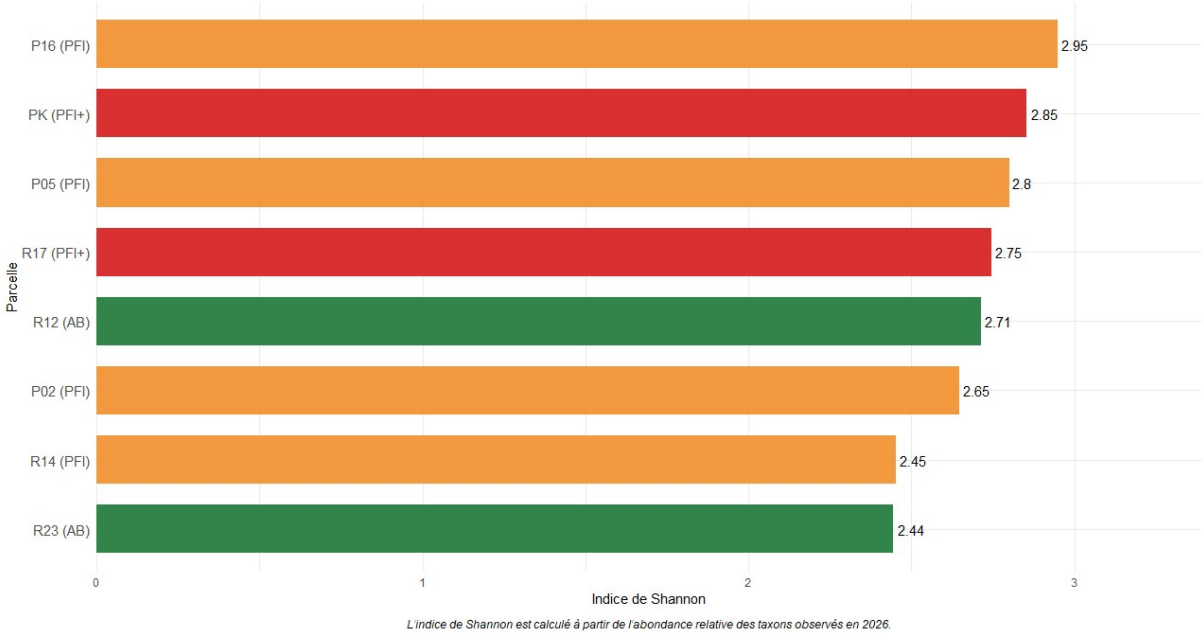
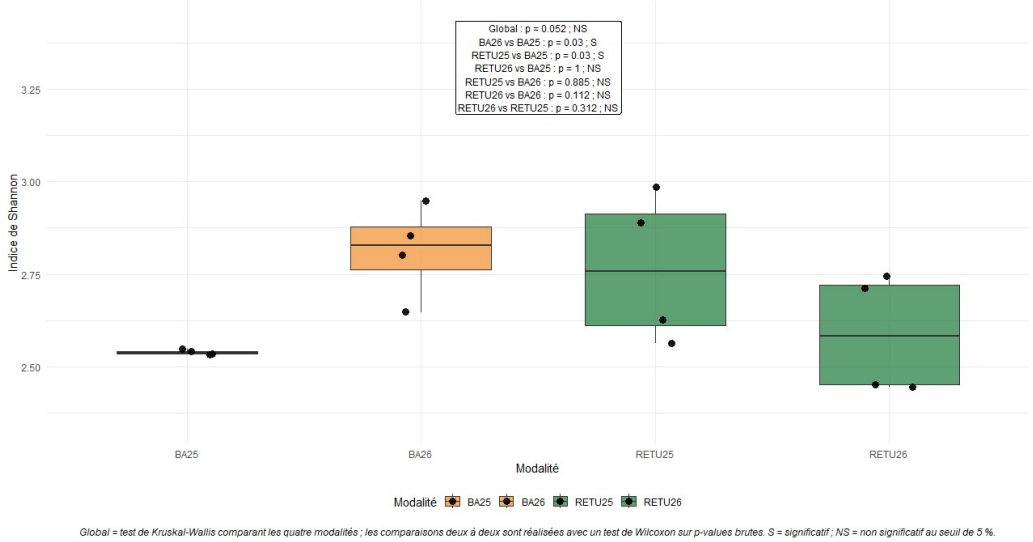


FIGURE 50 : INDICE DE SHANNON DES PARCELLES DE BOIS L'ABBE ET LA RETUZIERE SUR LA CAMPAGNE 2026

L'indice de Shannon est un indice de biodiversité qui permet d'évaluer l'abondance et la richesse taxonomique. Les résultats montrent une variation importante entre les parcelles et les années. En 2025, les parcelles de la Rétuzière présentent les valeurs les plus élevées, notamment R12 (2,98) et R14 (2,89). Les parcelles de Bois l'Abbé sont très homogènes, avec des valeurs autour de 2,53–2,55. Cela montre qu'en 2025, la diversité mesurée par Shannon est plus élevée à la Rétuzière qu'à Bois l'Abbé.

En 2026, la situation change, les plus fortes valeurs sont observées à Bois l'Abbé, notamment P16 (2,95), PK (2,85) et P05 (2,80). À la Rétuzière, R17 et R12 restent relativement élevées, mais R14 et R23 présentent les valeurs les plus faibles (2,45 et 2,44). Ce basculement entre 2025 et 2026 est un résultat important.

3.1.7.1 Les comparaisons des indices de Shannon des années 2025/ 2026 et des deux sites BA/ RETU sont-ils significativement différents (figure 51) ?



Global = test de Kruskal-Wallis comparant les quatre modalités ; les comparaisons deux à deux sont réalisées avec un test de Wilcoxon sur p-values brutes. S = significatif ; NS = non significatif au seuil de 5 %.

FIGURE 51 : COMPARAISON DE 4 INDICES DE SHANNON SELON LES MODALITES SITES (BA/ RETU) ET ANNEE (2025/ 2026)

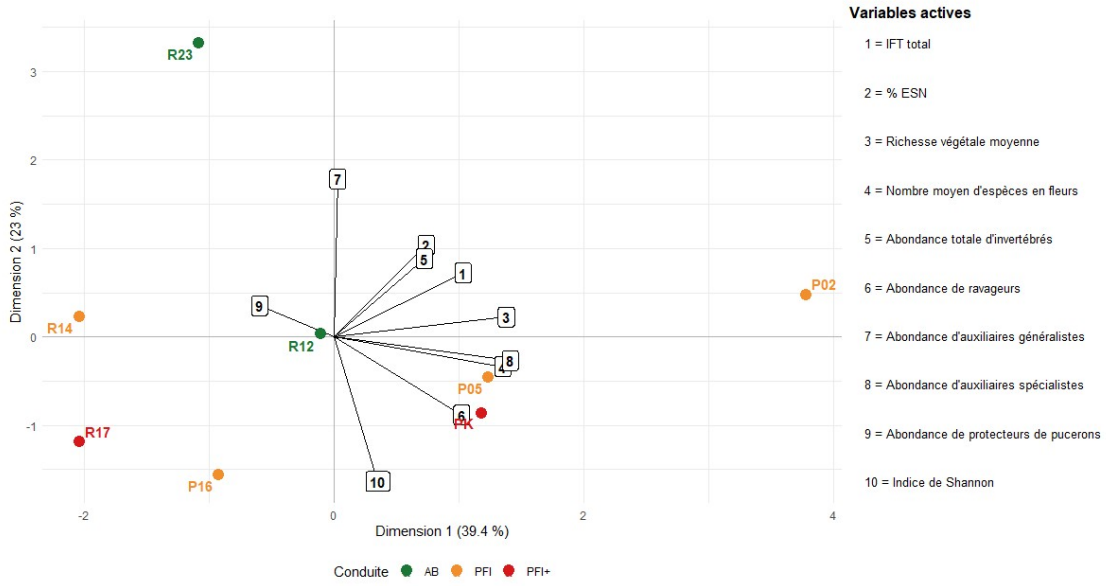
Les années 2025 et 2026 sont comparées ainsi que les sites de Bois l'Abbé (BA) et la Rétuzière (RETU). Le test de comparaison de moyennes (réalisé par un test de Kruskal-Wallis) de l'Indice de Shannon selon l'année et le site ne montre pas de différence significative (p-value de 0,05164). Cette valeur est très proche du seuil de 5 %, mais ne permet pas de conclure à une différence significative globale entre les modalités si l'on applique strictement le seuil de 0,05. Les comparaisons deux à deux réalisées avec un test de Wilcoxon montrent toutefois des différences non significatives entre le site de Bois l'Abbé entre 2025 et 2026, ainsi qu'entre Bois l'Abbé en 2025 et la Rétuzière en 2025. Ces comparaisons montrent une différence dans l'indice de Shannon en fonction du site et de l'année. Cependant elles doivent rester prudentes, car elles sont réalisées sur un nombre limité de parcelles et avec des p-values brutes.

Le tableau des modalités en annexe 4 confirme cette dynamique. La moyenne de Shannon est faible pour Bois l'Abbé en 2025 (2,54), plus élevée pour Bois l'Abbé en 2026 (2,81), élevée pour la Rétuzière en 2025 (2,77) et plus faible pour la Rétuzière en 2026 (2,59). Le test global de Kruskal-Wallis donne p = 0,05164, donc il est très proche du seuil de 5 %, mais reste non significatif au seuil p < 0,05.

3.1.8 Hypothèse 8 : Les parcelles ne se différencient pas selon un seul facteur isolé, mais selon une combinaison de variables liées à la végétation, aux pratiques culturales, au contexte paysager et aux groupes fonctionnels d'arthropodes.

Afin de synthétiser l'ensemble des variables étudiées, une ACP a été réalisée à l'échelle des parcelles. Cette analyse vise à comprendre l'influence de l'ensemble des variables traitées précédemment sur la différenciation des parcelles étudiées.

3.1.8.1 L'ACP montre-elle que certains profils de parcelles sont proches les uns des autres (figure 52) ?



ACP réalisée sur des variables centrées-réduites. Les flèches représentent les variables actives numérotées de 1 à 10.

FIGURE 52 : ACP des profils agroécologiques des parcelles de vergers

Afin de synthétiser les différents résultats obtenus au cours de l'étude, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'échelle des parcelles. Elle ne constitue pas un test de significativité, mais un outil exploratoire permettant de mettre en relation les pratiques culturales, le contexte paysager, la végétation et les communautés d'invertébrés.

Chaque point du graphique correspond donc à une parcelle et non à un point d'échantillonnage individuel. Les cinq points d'échantillonnage de chaque parcelle ont été utilisés pour calculer des indicateurs agrégés par parcelle, comme la richesse végétale moyenne, l'abondance totale d'invertébrés, l'abondance des groupes fonctionnels ou encore l'indice de Shannon. Ils ne sont donc pas représentés séparément sur l'ACP. Cette analyse a été conçue comme une synthèse des profils de parcelles et non comme une analyse de la variabilité intra-parcellaire. Les variables ont été centrées-réduites avant l'analyse afin de pouvoir être comparées malgré leurs unités différentes.

La représentation principale a été réalisée sur les dimensions 1 et 2, qui expliquent respectivement 39,4 % et 23,0 % de la variance totale, soit 62,4 % de l'information cumulée. Ce plan factoriel a donc été retenu pour représenter les principaux gradients structurant les profils de parcelles. L'analyse des contributions des variables aux quatre premières dimensions, présentée en annexe, permet de préciser l'interprétation des axes. La dimension 1 est principalement portée par des variables liées à la végétation et à l'abondance faunistique tandis que la dimension 2 est davantage associée à l'abondance des auxiliaires généralistes

et à l'indice de Shannon, ainsi qu'au pourcentage d'ESN. Les dimensions 3 et 4 expliquent une part plus faible de la variance et ont donc été utilisées uniquement comme aide à l'interprétation, sans être représentées dans le corps principal des résultats.

Visuellement, l'ACP met en évidence des profils de parcelles contrastés. La parcelle P02 se distingue nettement sur la partie positive de la dimension 1, en lien avec plusieurs variables actives orientées dans cette direction, notamment l'IFT total, la richesse végétale, l'abondance totale d'invertébrés et certains groupes fonctionnels. Les parcelles P05 et PK apparaissent relativement proches, ce qui suggère des profils globaux assez comparables selon les indicateurs retenus. À l'inverse, R14, R17 et P16 se positionnent davantage du côté négatif de la dimension 1, traduisant des profils plus éloignés de celui de P02. La parcelle R23 se distingue surtout sur la dimension 2, en lien avec l'abondance des auxiliaires généralistes et l'indice de Shannon. Enfin, R12 est située près du centre du graphique, ce qui indique un profil plus intermédiaire au regard des deux premières dimensions.

TABLEAU 7 : LISTE RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

Question	Hypothèse	Test S ou NS	Ce que ça signifie
Les familles végétales principales sont-elles réparties de la même manière entre les parcelles ?	L'occurrence des familles végétales dépend de la parcelle.	S pour toutes les familles végétales mis à part les Poacées	Une famille significative est plus associée à certaines parcelles qu'à d'autres. Cela confirme que les parcelles présentent des compositions floristiques différentes.
Les familles végétales principales sont-elles réparties de la même manière selon la conduite ?	L'occurrence des familles végétales dépend de la conduite AB, PFI ou PFI+.	S pour toutes les familles végétales mis à part les Poacées et les Géraniacées	Une famille significative est associée à un mode de conduite particulier, mais l'interprétation doit rester prudente car les conduites sont confondues avec d'autres facteurs.
La richesse végétale totale influence-t-elle la fréquentation des groupes fonctionnels ?	Une richesse végétale plus élevée favorise une plus forte fréquentation des groupes fonctionnels.	NS.	La richesse végétale totale ne suffit pas à expliquer la présence des groupes fonctionnels. C'est un indicateur trop global.
Le nombre d'espèces végétales en fleurs influence-t-il la fréquentation des groupes fonctionnels ?	La floraison augmente l'attractivité de la bande enherbée pour certains groupes d'arthropodes.	S pour les ravageurs, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons ; NS pour les auxiliaires généralistes.	Le stade fleuri est plus informatif que la richesse végétale totale. Les auxiliaires généralistes restent présents quel que soit le niveau de floraison.
Les parcelles P02 et P16 présentent-elles des dynamiques phénologiques différentes ?	Les pratiques de gestion de l'inter-rang entraînent des différences de disponibilité florale.	S pour le stade végétatif et fleuri ; NS pour le stade fruit/graine.	P02 et P16 présentent des différences de végétation et de floraison, probablement en lien avec la gestion de l'inter-rang, notamment le fauchage.
Les traitements SDP modifient-ils la présence des groupes fonctionnels ?	Les SDP entraînent une différence de présence des groupes fonctionnels.	NS.	Les résultats ne montrent pas de différence nette entre les modalités SDP. Cela ne permet pas de conclure à un effet des SDP sur les groupes fonctionnels observés.
L'IFT total explique-t-il l'abondance des groupes fonctionnels ?	Une pression phytosanitaire plus élevée modifie l'abondance des groupes fonctionnels.	NS pour tous les groupes.	L'IFT total ne suffit pas à expliquer les variations d'abondance. Il faudrait distinguer les types de produits, les dates, les cibles et la rémanence.
Les ravageurs et les auxiliaires spécialistes sont-ils liés dans le temps ?	Les auxiliaires spécialistes sont associés à la	S la même semaine ; S lorsque les ravageurs précèdent les auxiliaires ; NS lorsque les	Les résultats montrent une cooccurrence temporelle, mais pas une diminution claire des

	présence des ravageurs.	auxiliaires précèdent les ravageurs.	ravageurs après l'apparition des auxiliaires.
Le pourcentage d'ESN explique-t-il l'abondance totale des arthropodes ?	Une proportion plus élevée d'ESN favorise l'abondance des arthropodes.	NS.	Le pourcentage d'ESN seul ne suffit pas à expliquer l'abondance observée. La qualité, la composition et la gestion des ESN sont probablement importantes.
Les conditions climatiques influencent-elles la fréquentation des groupes fonctionnels ?	La température et la pluviométrie influencent la fréquentation des arthropodes.	Partiellement S : effet significatif surtout pour R14 ; majoritairement NS ailleurs.	La météo peut intervenir localement, mais elle ne permet pas d'expliquer seule les dynamiques observées à l'échelle de toutes les parcelles.
La diversité mesurée par Shannon varie-t-elle selon l'année et le site ?	Il existe une différence entre les campagnes 2025 et 2026 et entre les sites.	NS au seuil de 5 %, mais proche du seuil.	Le résultat suggère une tendance, mais ne permet pas de conclure statistiquement à une différence globale. Le suivi pluriannuel reste pertinent.
Les parcelles se différencient-elles par leur profil global ?	Les parcelles présentent des profils contrastés liés à une combinaison de variables.	Pas de test S/NS : ACP exploratoire.	L'ACP montre des profils de parcelles différents : P02, R23, R12 ou encore P05/PK se positionnent différemment selon les variables prises en compte.

Le tableau 7 synthétise les principaux résultats statistiques obtenus avant leur mise en discussion.

3.2 ANALYSE ET DISCUSSION

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que la biodiversité observée dans les vergers de pommiers ne peut pas être expliquée par un seul facteur. Les communautés d'arthropodes apparaissent structurées par une combinaison d'éléments : composition floristique de l'inter-rang, stade phénologique de la végétation, pratiques culturales, contexte paysager, conditions climatiques et dynamique temporelle propre aux groupes fonctionnels. Cette observation rejoint le cadre présenté dans l'état de l'art, selon lequel les communautés d'invertébrés en verger sont influencées à la fois par l'intensité des pratiques agricoles, la disponibilité en ressources végétales et la présence d'habitats semi-naturels dans l'environnement proche (Bianchi et al., 2006 ; Herz et al., 2019 ; Bishop et al., 2023).

L'hypothèse H1, selon laquelle les pratiques culturales ont un impact sur la présence d'insectes, est plus difficile à confirmer. Les résultats ne montrent pas de relation significative entre l'IFT total et l'abondance des groupes fonctionnels. Les ravageurs, les auxiliaires généralistes, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons présentent des abondances variables entre parcelles, mais ces variations ne sont pas statistiquement expliquées par l'IFT total à l'échelle des huit parcelles étudiées. Les pollinisateurs sont présents en très faible proportion quelles que soient les pratiques culturales, cette observation vis-à-vis des pollinisateurs est à prendre avec prudence car les types de piégeage n'étaient pas dédiés à la capture des pollinisateurs. Ce résultat peut sembler contre-intuitif, car les produits phytosanitaires sont connus pour influencer la structure des communautés d'arthropodes. Des travaux menés en vergers de pommiers ont notamment montré que les communautés de coléoptères peuvent réagir aux régimes de traitement selon les guildes écologiques considérées (Markó et al., 2017). Cependant, l'absence de relation significative dans cette étude peut s'expliquer par plusieurs éléments. D'une part, l'IFT total agrège des traitements de nature différente, qui n'ont pas tous les mêmes cibles ni les mêmes effets sur les invertébrés. D'autre part, l'effet d'un traitement dépend de sa date d'application, de sa rémanence, de sa sélectivité et du groupe biologique considéré. Enfin, le faible nombre de parcelles limite fortement la puissance statistique des tests. L'hypothèse H1 n'est donc pas soutenue sous sa forme générale par les résultats statistiques, même si certaines pratiques, comme le fauchage, semblent avoir un effet indirect sur la disponibilité florale et donc potentiellement sur l'attractivité des parcelles.

Les résultats ne montrent pas de différence nette de présence des groupes fonctionnels selon les modalités SDP. Cependant, les SDP ne sont pas principalement des leviers d'attraction des insectes, mais des leviers d'induction des défenses de la plante. Les variables mesurées dans cette étude ne permettent donc pas d'évaluer directement leur efficacité principale. Dans l'état de l'art, les leviers étudiés dans le cadre de Cap Zéro Phyto sont présentés comme des solutions dont l'intérêt apparaît surtout lorsqu'ils sont combinés à d'autres leviers, notamment la résistance génétique, les UV-C, la nutrition azotée ou les plantes de service (Baudin, 2024). Une analyse de la résistance aux maladies/ ravageurs, des pommiers qui profitent de ces traitements SDP serait intéressante, ainsi que des résultats de la combinaison des autres leviers sur la fréquence des groupes fonctionnels et la résistance générale des pommiers.

L'hypothèse H2, selon laquelle la présence des ravageurs et des auxiliaires spécialistes est corrélée, est soutenue par les résultats, mais pas dans le sens d'une régulation directe des ravageurs. Les corrélations positives observées la même semaine, et parfois lorsque les ravageurs précèdent les auxiliaires, indiquent que les auxiliaires spécialistes sont davantage

associés aux périodes où les ravageurs sont présents, plutôt qu'à une baisse ultérieure clairement observable de ces derniers. Ce résultat est cohérent avec le fonctionnement écologique attendu des auxiliaires spécialistes : leur présence dépend souvent de la disponibilité en proies ou en hôtes. Ainsi, une augmentation des ravageurs peut précéder ou accompagner l'arrivée des auxiliaires. Cependant, le dispositif ne permet pas de démontrer une régulation effective des ravageurs, car la présence simultanée des deux groupes ne renseigne pas directement sur les taux de prédation, de parasitisme ou de mortalité des ravageurs. L'hypothèse H2 est donc soutenue si elle est comprise comme une relation de cooccurrence entre ravageurs et auxiliaires spécialistes, mais elle n'est pas soutenue si elle est interprétée comme une diminution des ravageurs après la présence des auxiliaires.

Concernant l'hypothèse H3, selon laquelle la diversité végétale de la bande enherbée influence la richesse et la diversité des arthropodes des vergers, les résultats ne permettent pas de conclure à un effet net de la richesse végétale totale. Les parcelles présentent bien des profils floristiques différents, avec certaines parcelles dominées par quelques familles végétales et d'autres présentant une composition plus équilibrée. Toutefois, lorsque la richesse végétale est analysée directement, les relations avec la fréquentation des groupes fonctionnels restent faibles ou non significatives. Ce résultat suggère que le simple nombre d'espèces végétales présentes dans l'inter-rang ne suffit pas à expliquer la présence des invertébrés. Cette observation est cohérente avec les travaux sur les ressources florales en vergers, qui montrent que ce n'est pas seulement la richesse végétale totale qui compte, mais aussi la nature des espèces présentes, leur période de floraison et les ressources réellement disponibles pour les auxiliaires, notamment le nectar, le pollen ou les habitats refuges (Herz et al., 2019). L'hypothèse H3 n'est donc pas soutenue sous cette forme par les résultats de l'étude. Toutefois, les résultats n'excluent pas un rôle de la végétation, mais suggèrent que la richesse végétale totale est un indicateur trop global pour expliquer seule la fréquentation des arthropodes.

L'hypothèse H4, selon laquelle l'effet d'attraction des arthropodes dépend du stade phénologique des espèces végétales de la bande enherbée, est davantage soutenue par les résultats. Contrairement à la richesse végétale totale, le nombre d'espèces végétales en fleurs est significativement associé à plusieurs groupes fonctionnels, notamment les ravageurs, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons. Cette tendance indique que la floraison pourrait être un facteur plus déterminant que la richesse végétale globale pour expliquer la fréquentation des arthropodes. Ce résultat rejoint les conclusions de Herz et al. (2019), qui soulignent l'importance des ressources florales pour soutenir les auxiliaires, notamment ceux dont les adultes dépendent du nectar ou du pollen pour compléter leur cycle de vie. Il est également cohérent avec les résultats de Tougéron et al. (2022), qui montrent qu'en verger de pommier biologique, la présence de bandes fleuries peut contribuer à réduire les populations de puceron cendré lorsqu'elle est combinée à des lâchers précoces de parasitoïdes. Dans cette étude, les résultats ne permettent pas de démontrer un effet direct de régulation des ravageurs par la floraison, mais ils montrent que le stade fleuri constitue une variable importante pour comprendre l'attractivité de la bande enherbée. L'hypothèse H2 est donc soutenue par les résultats, même si l'effet observé correspond davantage à une association entre floraison et fréquentation qu'à une preuve de régulation biologique.

L'exemple des parcelles P02 et P16 permet d'illustrer que les parcelles peuvent présenter des dynamiques phénologiques différentes au cours de la saison. Les tests de Wilcoxon montrent une différence significative entre ces deux parcelles pour le nombre d'espèces au

stade végétatif et au stade fleuri, ce qui suggère une disponibilité florale différente selon les parcelles. Ces différences peuvent être mises en relation avec les pratiques de gestion de l'inter-rang, notamment le fauchage, mais les résultats présentés ici ne permettent pas de démontrer directement que ces différences phénologiques entraînent une variation de la fréquentation des auxiliaires entre P02 et P16. En revanche, à l'échelle de l'ensemble des parcelles, les analyses montrent que le nombre d'espèces en fleurs est associé à la fréquentation de plusieurs groupes fonctionnels. Les parcelles P02 et P16 illustrent donc surtout une différence de disponibilité florale potentielle, tandis que le lien entre floraison et arthropodes est discuté à l'échelle globale de l'étude.

L'hypothèse H5, selon laquelle les infrastructures agroécologiques ont un effet sur la richesse et la diversité des arthropodes des vergers, est partiellement soutenue. Les résultats montrent une forte hétérogénéité du contexte paysager entre parcelles, avec des proportions d'ESN très variables dans un rayon de 150 m. Pourtant, les corrélations entre le pourcentage d'ESN et l'abondance des groupes fonctionnels ne sont pas significatives. Ce résultat ne remet pas en cause l'intérêt écologique des infrastructures agroécologiques, mais il montre que leur seule proportion dans le paysage ne suffit pas à expliquer la biodiversité observée dans les parcelles. Les travaux de Bianchi et al. (2006) montrent que les paysages complexes peuvent favoriser les ennemis naturels dans de nombreux cas, mais que les effets varient selon les groupes, les échelles spatiales et les contextes. De même, Bishop et al. (2023) montrent que les haies peuvent favoriser les ennemis naturels en bordure de verger, mais que leur influence dépend de leur composition, de leur gestion et de leur capacité à diffuser leurs effets vers l'intérieur de la parcelle. Dans la présente étude, le pourcentage d'ESN constitue donc un indicateur utile, mais insuffisant pour rendre compte de la qualité écologique réelle des habitats semi-naturels. L'hypothèse H5 est donc partiellement soutenue : les ESN semblent participer à la différenciation des profils de parcelles, mais leur effet n'est pas démontré statistiquement par une relation simple avec l'abondance des groupes fonctionnels.

L'hypothèse H6, selon laquelle les conditions climatiques ont un effet sur la richesse et la diversité des arthropodes des vergers, est également partiellement soutenue. Les résultats montrent que certaines relations entre fréquentation des groupes fonctionnels et variables météorologiques sont significatives localement, notamment sur la parcelle R14, avec une corrélation négative avec la pluviométrie et positive avec la température où la fréquentation des groupes fonctionnels tend à diminuer lors des périodes plus pluvieuses, tandis qu'elle tend à augmenter lorsque les températures sont plus élevées. Cependant, ces relations ne sont pas généralisables à toutes les parcelles. Ce résultat est cohérent avec la forte dépendance des insectes aux conditions climatiques, mais il montre aussi que la météo interagit probablement avec d'autres facteurs : site, structure de la végétation, présence de proies, période de l'année ou pratiques de gestion. Dans ce contexte, les conditions climatiques doivent être considérées comme un facteur explicatif complémentaire, mais non suffisant à lui seul pour comprendre les dynamiques observées. L'hypothèse H6 est donc partiellement soutenue : un effet climatique est observé dans certains cas, mais il n'apparaît pas comme un facteur homogène et généralisable à l'ensemble des parcelles.

La comparaison entre 2025 et 2026 à partir de l'indice de Shannon montre également que les profils de diversité peuvent varier fortement d'une année à l'autre. En 2025, la Rétuzière présentait les valeurs les plus élevées, tandis qu'en 2026, les valeurs les plus fortes sont observées à Bois l'Abbé. Toutefois, le test global reste proche du seuil de significativité sans le franchir strictement. Cette tendance suggère un effet potentiel de l'année ou des conditions

propres à chaque campagne, mais elle doit être interprétée avec prudence. Les variations interannuelles peuvent être liées aux conditions climatiques, aux pratiques appliquées, à la dynamique des populations d'arthropodes ou à l'état de la végétation. Cette variabilité renforce l'intérêt d'un suivi pluriannuel pour distinguer les effets stables des effets propres à une campagne donnée.

Enfin, l'ACP de synthèse permet de replacer l'ensemble des résultats dans une lecture globale des profils de parcelles. Elle montre que certaines parcelles se distinguent par des combinaisons de variables plutôt que par un seul facteur. P02 apparaît associée à plusieurs indicateurs élevés, notamment l'IFT total, la richesse végétale, l'abondance totale d'invertébrés et certains groupes fonctionnels. R23 se distingue davantage par l'abondance d'auxiliaires généralistes et l'indice de Shannon, tandis que R12 présente un profil plus intermédiaire. Cette analyse confirme que les différences entre parcelles ne peuvent pas être interprétées uniquement à partir de la conduite technique, du pourcentage d'ESN ou de la richesse végétale. Elles résultent plutôt d'une combinaison de facteurs agronomiques, paysagers, floristiques, faunistiques et temporels.

Ainsi, les résultats de cette étude soutiennent partiellement les hypothèses formulées. La richesse végétale totale seule ne permet pas d'expliquer clairement la diversité ou la fréquentation des arthropodes, mais le stade phénologique, en particulier la floraison, apparaît comme un facteur plus informatif. Les pratiques culturales et l'IFT total ne montrent pas de relation significative directe avec l'abondance des groupes fonctionnels, probablement en raison de la complexité des effets des traitements et du faible nombre de parcelles. Les auxiliaires spécialistes sont bien associés aux ravageurs, mais cette relation traduit davantage une cooccurrence temporelle qu'une diminution ultérieure des populations de ravageurs. Les ESN et les conditions climatiques semblent jouer un rôle potentiel, mais leurs effets ne sont pas systématiques à l'échelle du dispositif étudié. L'ensemble de ces résultats montre que la biodiversité des vergers de pommiers expérimentaux dépend d'interactions complexes entre les pratiques, la végétation, le paysage et la dynamique temporelle des communautés.

En mettant en parallèle les résultats de cette année avec ceux des deux précédentes on remarque que contrairement à 2024, les analyses montrent ici que la végétation diffère bien selon les parcelles et selon la conduite : l'occurrence des principales familles végétales varie significativement entre parcelles, sauf pour les Poacées, et selon la conduite pour plusieurs familles, sauf les Poacées et les Géraniacées. Cependant, cette différence de composition floristique ne se traduit pas par une relation simple entre richesse végétale totale et fréquentation des arthropodes. Les résultats montrent plutôt que le nombre d'espèces végétales en fleurs est plus informatif que la richesse totale, avec des relations significatives pour plusieurs groupes fonctionnels. Concernant le paysage, les résultats rejoignent ceux de 2024 : le pourcentage d'ESN seul ne suffit pas à expliquer l'abondance des arthropodes, ce qui suggère que la qualité, la composition et la continuité des habitats sont probablement plus importantes que leur simple surface. (Artu--Chaplain, 2024)

La comparaison avec les résultats de 2025 permet également de nuancer les résultats. En 2025, certaines parcelles comme R12 et R23 présentaient des classes de biodiversité observée élevées ou très élevées, tandis que PK et P16 étaient classées comme plus faibles. Le modèle BioSyScan prévoyait correctement certaines situations, notamment R23, mais sous-estimait ou surestimait d'autres parcelles. En 2026, l'ACP montre encore que R23 se distingue, notamment par l'abondance d'auxiliaires généralistes et l'indice de Shannon, tandis que d'autres parcelles comme P02 présentent un profil différent, associé à plusieurs variables

élevées. Cette comparaison montre donc que certaines parcelles conservent un profil écologique particulier, mais que les classements peuvent varier selon l'année, les conditions climatiques, les pratiques appliquées et les indicateurs retenus.

Les résultats de 2026 confirment aussi une tendance déjà évoquée en 2025 : la végétation de l'inter-rang semble jouer un rôle, mais pas uniquement par sa richesse totale. Le rapport de 2025 indiquait que la diversité botanique influençait la diversité entomologique et que la proportion de plantes au stade floraison était liée positivement à certains prédateurs spécialistes et généralistes. En 2026, les résultats affinent cette observation : la richesse végétale totale ne montre pas de relation claire avec la fréquentation des groupes fonctionnels, alors que le nombre d'espèces végétales en fleurs est associé significativement à plusieurs groupes. Cela suggère que la disponibilité florale constitue un indicateur plus pertinent que le simple nombre d'espèces végétales présentes dans le quadrat. (Marcou, 2025)

3.3 CRITIQUE DE L'EXPERIMENTATION

Cette étude présente plusieurs limites qu'il est nécessaire de prendre en compte dans l'interprétation des résultats. La première concerne le nombre de parcelles étudiées, même si l'échantillon de base est le point d'échantillonnage, le dispositif repose sur huit parcelles réparties sur deux sites expérimentaux, ce qui permet de comparer des situations contrastées, mais reste limité pour établir des relations statistiques robustes. Certaines tendances visuelles peuvent donc apparaître intéressantes sans être significatives, tandis que l'absence de significativité ne signifie pas nécessairement une absence d'effet biologique.

Une autre limite importante est liée à la difficulté d'isoler l'effet propre de chaque facteur. Les parcelles diffèrent simultanément par leur site, leur conduite culturale, leur âge, leur environnement paysager, leur composition floristique, leur gestion de l'inter-rang et leurs traitements phytosanitaires. Il est donc difficile d'attribuer les différences observées à un seul facteur. Par exemple, l'effet de l'IFT et du pourcentage d'ESN sur les populations d'arthropodes était considéré parcelle par parcelle. Dans ce cas-là il est difficile d'attribuer une population d'arthropodes à une parcelle à l'une ou l'autre des variables (chaque parcelle ayant son propre % d'ESN et son propre IFT). Les résultats doivent donc être interprétés comme des tendances écologiques, plutôt que comme des relations causales démontrées.

Les méthodes d'échantillonnage influencent aussi les résultats. Les pièges Barber, le filet fauchoir et le parapluie japonais permettent de couvrir plusieurs strates du verger, mais chaque méthode possède ses propres biais. Certains groupes, comme les pollinisateurs, sont probablement sous-représentés, car les protocoles utilisés n'étaient pas spécifiquement conçus pour les observer. Les résultats concernant ces groupes doivent donc être interprétés avec prudence.

Un autre point important et difficile à améliorer sont les conditions de prélèvements des arthropodes. En effet leur activité n'est pas la même en fonction de l'heure, l'humidité, saison… et donc les résultats peuvent différer en fonction notamment de l'heure et de la présence de rosée ou non.

Enfin, certains indicateurs utilisés simplifient la réalité écologique. L'IFT total synthétise la pression phytosanitaire, mais ne distingue pas toujours la nature des produits, leur date d'application, leur cible, leur sélectivité ou leur rémanence. De même, le pourcentage d'éléments semi-naturels dans un rayon de 150 m informe sur le % en surface d'habitats naturels, mais pas sur leur qualité écologique. Deux parcelles pourraient ainsi présenter une proportion similaire d'ESN, mais des compositions végétales et de ressources disponibles différentes.

L'ACP réalisée en fin d'analyse doit également être considérée comme exploratoire. Elle permet de visualiser les profils globaux des parcelles, mais le nombre d'individus reste faible par rapport au nombre de variables étudiées. Elle ne démontre donc pas statistiquement les relations observées. Dans l'ensemble, cette étude apporte des éléments intéressants pour comprendre les dynamiques de biodiversité en vergers expérimentaux, mais ces résultats doivent à l'inverse être considérés comme des pistes d'interprétation à confirmer par des dispositifs plus larges ou plus ciblés.

3.4 PERSPECTIVES

Plusieurs perspectives peuvent être proposées afin d'améliorer la compréhension des relations entre pratiques culturales, végétation, paysage et communautés d'arthropodes dans les vergers de pommiers. La première serait de poursuivre les suivis sur plusieurs années. La comparaison entre 2025 et 2026 montre que les indices de diversité peuvent varier fortement d'une campagne à l'autre. Un suivi pluriannuel permettrait donc de continuer de distinguer les tendances stables des variations propres à une année donnée, liées par exemple aux conditions climatiques, aux dynamiques de populations ou aux pratiques appliquées ponctuellement.

Une deuxième perspective serait d'augmenter le nombre de parcelles suivies. Un effectif plus important permettrait de mieux séparer les effets du site, de la conduite culturale, du contexte paysager et de la composition floristique. Cela renforcerait également la puissance statistique des analyses et permettrait de confirmer ou non certaines tendances observées dans cette étude. Choisir de nouvelles parcelles aux profils différents peut aussi être intéressant, avec des profils géographiques, types de conduite variés. Elargir l'étude par exemple en prenant en compte l'effet du mélange de plusieurs cultures fruitières sur les populations d'arthropodes comme l'a fait Sylviane Simon et l'unité UERI de l'INRAE(Simon, 2026).

Il serait également pertinent d'améliorer la caractérisation de la végétation de l'inter-rang. Les résultats montrent que la richesse végétale totale seule n'explique pas clairement la fréquentation des arthropodes, tandis que le nombre d'espèces en fleurs semble plus informatif. Les futurs suivis pourraient donc intégrer des indicateurs plus précis, comme la durée de floraison, la surface réellement fleurie (combien de fleurs, sur combien de m²), la hauteur de végétation. Ces variables permettraient de mieux comprendre quelles caractéristiques de la bande enherbée favorisent réellement certains groupes fonctionnels.

La gestion de l'inter-rang constitue aussi un levier à approfondir. Les différences de gestion observées entre certaines parcelles suggèrent que le fauchage peut modifier la disponibilité des ressources florales au cours de la saison. Il serait donc intéressant de comparer différents modes de gestion : fauche fréquente, fauche tardive, fauche alternée (un rang sur deux), bandes non fauchées ou gestion différenciée entre rangs. Ces modalités permettraient d'évaluer plus directement l'effet de la disponibilité florale sur les auxiliaires et les ravageurs.

Concernant les pratiques phytosanitaires, il serait utile d'aller au-delà de l'IFT total. Les futures analyses pourraient distinguer les IFT par catégorie de produits, notamment fongicides, insecticides, herbicides et produits de biocontrôle. Il serait aussi pertinent d'intégrer la date d'application, la cible du traitement, la matière active, la rémanence et la sélectivité vis-à-vis de la faune auxiliaire. Cette approche permettrait de mieux évaluer les effets potentiels des traitements sur les différents groupes d'arthropodes.

Enfin, les relations entre ravageurs et auxiliaires mériteraient d'être étudiées plus précisément. Les résultats actuels montrent surtout une cooccurrence entre ravageurs et auxiliaires spécialistes, mais ne permettent pas de démontrer une régulation effective. Des suivis ciblés sur les foyers de pucerons, les taux de parasitisme, les observations de prédation ou l'évolution des colonies au cours du temps permettraient de mieux comprendre si les auxiliaires présents contribuent réellement à limiter les populations de ravageurs ou s'ils apparaissent trop tardivement pour exercer un contrôle efficace.

Ces perspectives montrent que l'étude constitue une première étape dans la compréhension des dynamiques de biodiversité en vergers expérimentaux. Pour aller plus loin, il serait nécessaire de renforcer les suivis dans le temps, d'affiner les indicateurs utilisés et de mettre en place des analyses plus ciblées sur les mécanismes écologiques impliqués.

À partir des résultats obtenus, il est possible de faire des préconisations auprès des arboriculteurs. Tout d'abord l'étude ne met pas en évidence un levier unique permettant d'expliquer la biodiversité observée dans les vergers. Les résultats suggèrent plutôt qu'il faut agir sur plusieurs composantes en même temps. La gestion de l'inter-rang apparaît comme un levier important : la richesse végétale totale ne suffit pas à expliquer la fréquentation des arthropodes, mais la présence d'espèces végétales en fleurs est associée à plusieurs groupes fonctionnels, notamment les ravageurs, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons. Il semble donc pertinent de maintenir une disponibilité florale régulière au cours de la saison, par exemple en limitant les fauches trop fréquentes, en pratiquant une fauche alternée (un rang sur deux) ou en conservant des zones refuges non fauchées temporairement. Les résultats invitent également à ne pas raisonner uniquement en surface d'éléments semi-naturels, mais aussi en qualité, continuité et gestion des habitats : haies, bandes enherbées, prairies, arbres isolés ou zones herbacées peuvent être intéressants s'ils fournissent réellement des ressources et des refuges aux auxiliaires. Enfin, les pratiques phytosanitaires devraient être évitées à certaines périodes notamment de floraison de certaines espèces particulièrement attractives ou de pollinisation. Pour ça il faut être capable de faire un suivi des ravageurs dans le temps pour déterminer les moments critiques ou traiter et réduire les traitements trop peu efficaces. Ces éléments vont dans le sens d'une gestion combinée du verger, associant disponibilité florale, habitats semi-naturels de qualité, suivi des ravageurs et choix raisonné des interventions, plutôt qu'une action isolée sur un seul facteur.

CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence des pratiques culturales et des structures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers expérimentaux. Les suivis réalisés au cours de la campagne 2026 ont permis de caractériser à la fois la flore de l'inter-rang et les communautés d'arthropodes présentes dans différents compartiments du verger. L'approche mise en place a permis de comparer huit parcelles présentant des contextes culturaux, paysagers et floristiques contrastés.

Les résultats montrent tout d'abord que la richesse végétale totale de la bande enherbée ne suffit pas, à elle seule, à expliquer clairement la fréquentation des groupes fonctionnels d'arthropodes. Les parcelles présentent bien des profils floristiques et faunistiques différents, mais les relations directes entre richesse végétale et présence des groupes fonctionnels restent faibles ou non significatives. En revanche, le stade phénologique de la végétation apparaît plus informatif, en particulier le nombre d'espèces végétales en fleurs. Ce facteur est associé à la fréquentation de plusieurs groupes fonctionnels, notamment les ravageurs, les auxiliaires spécialistes et les protecteurs de pucerons. Cela suggère que la disponibilité florale constitue un indicateur plus pertinent que la richesse végétale globale pour comprendre certaines dynamiques d'arthropodes.

Concernant les pratiques culturales, les résultats ne mettent pas en évidence d'effet statistiquement net des traitements SDP sur la présence moyenne des groupes fonctionnels. De même, l'IFT total ne présente pas de corrélation significative avec l'abondance des principaux groupes étudiés. Ces résultats ne signifient pas nécessairement que les pratiques phytosanitaires n'ont aucun effet, mais ils montrent que les indicateurs utilisés ici restent trop globaux pour expliquer seuls les variations observées. Une analyse plus fine, distinguant les types de produits, les dates d'application, les cibles, les matières actives et leur rémanence, serait nécessaire pour mieux comprendre leur influence potentielle.

L'étude des relations entre ravageurs et auxiliaires spécialistes montre principalement une cooccurrence temporelle. Les auxiliaires spécialistes et les ravageurs tendent à être présents aux mêmes périodes, mais les résultats ne permettent pas de démontrer une diminution des ravageurs après l'apparition des auxiliaires. La présence d'auxiliaires semble donc liée à celle des ravageurs, sans que l'on puisse conclure à une régulation effective dans le cadre de ce dispositif.

L'analyse du contexte paysager montre également que le pourcentage d'éléments semi-naturels dans un rayon de 150 m ne permet pas, seul, d'expliquer l'abondance totale d'arthropodes. Certaines parcelles riches en ESN présentent une forte abondance, tandis que d'autres ne suivent pas cette tendance. L'effet du paysage apparaît donc plus complexe qu'une simple relation entre surface semi-naturelle et abondance globale. Il dépend probablement de la nature, de la qualité, de la continuité et de la gestion de ces éléments. Les conditions climatiques semblent également intervenir dans certaines situations, notamment sur la parcelle R14, où la fréquentation cumulée des groupes fonctionnels est négativement corrélée à la pluviométrie et positivement corrélée à la température. Cependant, cet effet reste localisé et ne peut pas être généralisé à l'ensemble des parcelles.

Enfin, l'analyse en composantes principales a permis de synthétiser les profils globaux des parcelles en croisant les variables liées aux pratiques culturales, au paysage, à la végétation et aux arthropodes. Elle met en évidence des parcelles aux profils contrastés, mais reste un outil exploratoire et non un test de significativité. Dans l'ensemble, cette étude montre que la biodiversité en verger de pommiers résulte d'une combinaison de facteurs, parmi lesquels la

végétation de l'inter-rang, les pratiques culturales, le contexte paysager, la dynamique temporelle des ravageurs et auxiliaires, ainsi que les conditions climatiques. Les résultats obtenus constituent donc une première base d'interprétation, mais ils devront être confirmés par des suivis pluriannuels et par des analyses plus ciblées sur les mécanismes écologiques impliqués.

BIBLIOGRAPHIE :

Artu--Chaplain, T. (2024). Evaluation de l'impact des pratiques culturales et du contexte paysager sur la biodiversité des vergers expérimentaux de pommiers en Pays de la Loire.

Balouria, A. (2020). Impact of climate change on apples production : World scenario Arundhati and RM Bhagat.

Bangels, E., & Beliëns, T. (2012). Déclin constant des populations de carpocapse des pommes suite à deux années de confusion sexuelle sur pommier : Une étude de cas flamande. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23885433/

Baudin, M. (2024). Cap Zéro Phyto—IRHS. https://irhs.angers-nantes.hub.inrae.fr/recherche/ecologie-evolutive-chez-les-champignons/projets_ecofun/cap-zero-phyto

Bellemain, V., Boquet, K., & Galichet, T. (2017). L'après seconde guerre mondiale. Conseil national de l'alimentation. https://www.cna-alimentation.fr/FriseCNA_30ans/P08.xhtml

Bellerive, G. (2004). ÉCLAIRCISSAGE DES POMMES; UN INCONTOURNABLE.

Bianchi, A., Booij, H., & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes : A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1634792/

Bishop, G. A., Thijs, F., & Brooke, D. (2023). Hedgerows have contrasting effects on pollinators and natural enemies and limited spillover effects on apple production. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880923000233

Blommers, L. H. M., Helsen, H. H. M., & Vaal, F. W. N. M. (2004). Life history data of the rosy apple aphid Dysaphis plantaginea (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and

as migrant to apple. https://research.wur.nl/en/publications/life-history-data-of-the-rosy-apple-aphid-dysaphis-plantaginea-pa/

Bourlès, J. (2008). Les porte-greffes du pommier.

Butault, J.-P., Dedryver, C.-A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.-M., Nicot, P. C., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I., & Volay, T. (2010). Écophyto R&D : Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport de l'étude (p. 90 p.) [Report, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer]. https://doi.org/10.15454/r7ae-b824

Cahenzli, F., Sigsgaard, L., & Claudia, D. (2019). Perennial flower strips for pest control in organic apple orchards—A pan-European study. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880919300696

cdn Paris. (2024). CHOISIR SES FORMES FRUITIERES.

Chastaing, S., Muller, R., Casanova, A., & Crombez, J. (2024). Conduite du pommier en agriculture biologique dans le Sud-Ouest. Chambre d'agriculture Nouvelle-Aquitaine.

Chayre, A., & Pointereau, P. (2023). Évaluation de l'usage territorialisé des pesticides en France métropolitaine. Solagro.

Commission européenne. (2022). Learning Guide to Traditional Orchards.

Cornille, A., Giraud, T., Smulders, M. J. M., Roldán-Ruiz, I., & Gladieux, P. (2014). The domestication and evolutionary ecology of apples. Trends in Genetics, 30(2), 57-65. https://doi.org/10.1016/j.tig.2013.10.002

Cornille, A., Gladieux, P., Smulders, M. J. M., Roldán-Ruiz, I., Laurens, F., Le Cam, B., Nersesyan, A., Clavel, J., Olonova, M., Feugey, L., Gabrielyan, I., Zhang, X.-G., Tenaillon, M. I., & Giraud, T. (2012). New Insight into the History of Domesticated Apple : Secondary Contribution of the European Wild Apple to the Genome of

Cultivated Varieties. PLoS Genetics, 8(5), e1002703. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1002703

CTIFL. (2022). Mémento fruits & légumes. https://memento.ctifl.fr/fiche/fruits/pomme

Ecuyer, M., & Varone, P.-A. (2021). Insectes Clé de détermination découvrir • observer • déterminer. pro nature. https://www.pronatura.ch/sites/pronatura.ch/files/CdD_Insectes.pdf

Edgington, S. (2025). Ravageurs et maladies du pommier : Identification et gestion. CABI BioProtection Portal. https://bioprotectionportal.com/fr/resources/apple-pests-and-diseases-identification-and-management/

EUROPEAN PARLIAMENT. (2009). Directive 2009/128/EC.

Expertise Scientifique Collective, I. C. (2011). Pesticides, agriculture et environnement. Editions Quæ. https://doi.org/10.3917/quae.exper.2011.01

FAO. (2026). Crops and livestock products. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Feu bactérien. (2025). DRAAF. https://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/feu-bacterien-a2550.html

Fried, G., Andrade, C., & Villers. (2019). Premiers résultats du réseau Biovigilance 500 ENI sur le suivi des effets non-intentionnels des pratiques agricoles sur la biodiversité. https://hal.inrae.fr/ARINRAE-INNOVAGRO/hal-02392219

Gautier, H., & Brisset, M.-N. (2024). Adaptation du concept d'immunité écologique à la protection des cultures : Rosaceae and Solanaceae, deux cas d'études. INRAE.

Grolleau, J.-C. (2023). Les porte-greffes d'hier et d'aujourd'hui pour le pommier.

Herz, A., Cahenzli, F., Penvern, S., Pfiffner, L., Tasin, M., & Sigsgaard, L. (2019). Managing Floral Resources in Apple Orchards for Pest Control : Ideas, Experiences and Future Directions. Insects, 10(8). https://doi.org/10.3390/insects10080247

Herz, A., Cahenzli, F., Servan, P., & Lukas, P. (2019). Managing Floral Resources in Apple Orchards for Pest Control : Ideas, Experiences and Future Directions. https://www.mdpi.com/2075-4450/10/8/247

Hounkpe-Daho, C. I. (2024). Conduite du verger et maîtrise de la charge du pommier.

IIF. (2023). Conditions d'entreposage frigorifique des fruits et légumes. https://iifiir.org/fr/encyclopedie-du-froid/conditions-d-entreposage-frigorifique-des-fruits-et-legumes

INRAE. (2018). Listes des cas de résistances aux produits de protection des plantes détectés en France. INRAE. https://www.r4p-inra.fr/wp-content/uploads/2020/07/Liste-I_Insectes_FR_Jul20.pdf

INRAE. (2025). Pomme—Maladies et ravageurs au verger. https://ephytia.inrae.fr/fr/C/21518/Pomme-Maladies-et-ravageurs-au-verger

INRAE. (2026). Fiches maladies et ravageurs. INRAE. https://ephytia.inrae.fr/fr/C/20842/Pomme-Insectes

Larrieu, J.-F. (2019). FERTILISATION RAISONNÉE EN ARBORICULTURE FRUITIÈRE. https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=146923

Lubello, P. (2020). Les évolutions récentes du marché mondial de la pomme : L'effet régionalisant des contraintes phytosanitaires.

Marcou, N. (2025). Evaluation de l'impact de la conduite culturale et des infrastructures agroécologiques sur la biodiversité des vergers de pommiers.

Markó, V., Zoltán Elek, & Anikó, K.-H. (2017). Landscapes, orchards, pesticides–Abundance of beetles (Coleoptera) in apple orchards along pesticide toxicity and landscape

complexity gradients. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880917302815

Middleton, S. G. (2008). Developing systems for organic and low input apple production. Horticulture Australia.

Nicolas, J., Gutton, M., & Riaux, N. (2025). Le marché de la pomme en 2024-2025. RNM.

Psylle du pommier. (2022). La clinique des plantes. https://www.cliniquedesplantes.fr/fiches/le-psylle-du-pommier#:~:text=Elles%20se%20nourrissent%20de%20la,feuilles%20sur%20les%20jeunes%20rameaux.

Sédillot, B., & Poullette, B. (2015). Pratiques phytosanitaires en arboriculture.

Simon, S. (2026). Repenser le verger pour produire des fruits sans pesticides. https://www.jardinsdefrance.org/repenser-le-verger-pour-produire-des-fruits-sans-pesticides/

Stratégie Écophyto 2030. (2024). Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire. https://agriculture.gouv.fr/strategie-ecophyto-2030

Tougéron, K., Ferrais, L., Gardin, P., Lateur, M., & Hance, T. (2022). Flower strips increase the control of rosy apple aphids after parasitoid releases in an apple orchard. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/aab.12816

Xicluna, P. (2023). Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFT). Ministère de l'agriculture de l'agro-alimentaire et de la souveraineté alimentaire. https://agriculture.gouv.fr/indicateur-de-frequence-de-traitements-phytosanitaires-ift

Yelle, P. E. (2015). E.3-Gestion du sol et du sous-sol – Réseau-pommier. https://reseaupommier.irda.qc.ca/. https://reseaupommier.irda.qc.ca/fiche-pfi/fiche-35/

Table des figures :

FIGURE 1 : CARTOGRAPHIE DE L'ORIGINE ET L'EXPANSION DU POMMIER AU COURS DES AGES (Cornille et al., 2014) 10
FIGURE 2 : PRODUCTION MONDIALE DE POMMES PAR PAYS EN MILLIONS DE TONNES (FAO STATS, 2021) 12
FIGURE 3 : EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE POMME EN EUROPE EN MILLIERS DE TONNES (Nicolas et al., 2025) 13
FIGURE 4 : PHOTOS DE QUELQUES VARIETES PARMI LES PLUS PRODUITES EN FRANCE (MENTTA, 2022) 13
FIGURE 5 : POURCENTAGE D'EXPORTATION DE POMME DE LA FRANCE DANS LE MONDE EN 2023 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGRO-ALIMENTAIRE ET DE LA SOUVERAINETE ALIMENTAIRE, 2023) 14
FIGURE 6 : REPARTITION DES PRODUCTIONS DE FRUITS EN FRANCE EN 2023 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGRO-ALIMENTAIRE ET DE LA SOUVERAINETE ALIMENTAIRE, 2023) 14
FIGURE 7 : REPARTITION DE LA PRODUCTION DE POMME PAR REGION FRANÇAISE (PLANETOSCOPE, 2012) 15
FIGURE 8 : PRODUCTION DE POMME EN FRANCE EN MILLIER DE TONNES (FAO, 2026) 15
FIGURE 9 : COMPARAISON D'UN POMMIER EN HAUTE TIGE A GAUCHE ET EN PALISSADE A DROIT (BIOACTUALITES.CH, 2026 ; MA PASSION DU VERGER, S. D.) 16
FIGURE 10 : SCHEMA DES BOURGEONS A BOIS ET A FLEUR (ÉLISE MALECOT-BOURDELLE, 2026) . 17
FIGURE 11 : PHOTO D'UNE FEUILLE DE POMMIER (EPHYTIA, S. D.) 17
FIGURE 12 : PHOTO D'UN RANG DE POMMIER SUR PORTE-GREFFE EN PALISSADE (CTIFL, 2014) .. 18
FIGURE 13 : PHOTO D'UNE FLEUR DE POMMIER (SORBONNE UNIVERSITE, 2015) 18
FIGURE 14 : STADES PHENOLOGIQUES DU POMMIER D'APRES FLECKINGER. (PLANCHE REALISEE PAR PHILIPPE DESTRES, 1986) 20
FIGURE 15 : SCHEMA DES DIFFERENTES FORMES DE POMMIERS (GERBEAUD, 2023) 21
FIGURE 16 : PHOTO D'UN POMMIER EN BIAXE (CTIFL, 2013) 22
FIGURE 17 : PHOTO D'UNE PARCELLE DE POMMIER EN AXE SIMPLE (PHOTO PERSONNELLE) 23
FIGURE 18 : RECOLTE DES PRINCIPALES VARIETES DE POMMES EN FRANCE EN 2013 (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, 2015) 26
FIGURE 19 : SCHEMA DES DIFFERENTES TAILLES DE POMMIERS EXISTANTES EN FONCTION DU PORTE-GREFFE UTILISE (PEPINIERE DES FRUITIERS, 2025) 28
FIGURE 20 : FRISE CHRONOLOGIQUE DES PRINCIPALES INTERVENTIONS TECHNIQUES EN VERGER DE POMMIER GENEREE AVEC GPT-5.6 LUNA (HOUNKPE-DAHO, 2024 ; CHASTAING ET AL., 2024 ; YELLE, 2015) 28
FIGURE 21 : SCHEMA DES TECHNIQUES DE TAILLE D'UN POMMIER (PEPINIERE DES FRUITIER, 2025) 29
FIGURE 22 : HISTOGRAMME DES IFT MOYEN DE DIFFERENTES CULTURES DONT LE POMMIER (SEDILLOT & POULLETTE, 2015 ; CHAYRE & POINTEREAU, 2023) 34
FIGURE 23 : CARTE REPRESENTANT LES DEUX SITES DE L'ETUDE A BEAUCOUZE ET CHAMPIGNE (GOOGLE MAPS) 43
FIGURE 24 : CARTE DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE DE LA PARCELLE PK DE BOIS L'ABBE 44
FIGURE 25 : SCHEMA DES ESPACES CONSIDERES DANS UN VERGER 45
FIGURE 26 : RELEVE D'UN BARBER ENTERRE PRECEDEMMENT DANS LA STRATE EPIGEE (PHOTO PERSONNELLE) 46
FIGURE 27 : RELEVE FAUNISTIQUE AVEC UN FILET FAUCHOIR, DANS LA STRATE HERBACEE (PHOTO PERSONNELLE) 47
FIGURE 28 : RELEVE FAUNISTIQUE DANS LA STRATE ARBOREE AVEC UN PARAPLUIE JAPONAIS (PHOTO PERSONNELLE) 48
FIGURE 29 : RELEVE FLORISTIQUE DANS LA STRATE HERBACEE DE L'INTER-RANG, PAR QUADRAT D'1M² (PHOTO PERSONNELLE) 49
FIGURE 30 : EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS SEMI-NATURELS DE LA PARCELLE P02 (QGIS) 50
FIGURE 31 : EVOLUTION DU POURCENTAGE D'ESPECES VEGETALES AU STADE FLEURI PAR FAMILLE DE PLANTE AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026 54
FIGURE 32 : EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES ORDRES D'ARTHROPODES AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026 55

FIGURE 33 : EVOLUTION DE LA FREQUENCE DES GROUPES FONCTIONNELS D'ARTHROPODES AU COURS DE LA CAMPAGNE 2026..... 55
FIGURE 34 : POURCENTAGE D'ESN PAR PARCELLE DANS UN RAYON DE 150 M AUTOUR DU CENTRE DE LA PARCELLE 56
FIGURE 35 : ÉVOLUTION DES STADES PHENOLOGIQUES DE LA BANDE ENHERBEE DANS LES PARCELLES P02 ET P16 PRISES COMME EXEMPLES, AU COURS DU TEMPS..... 57
FIGURE 36 : PRESENCE MOYENNE DES GROUPES FONCTIONNELS SELON L'APPLICATION DE STIMULATEURS DE DEFENSE OU NON, SUR LE SITE DE BOIS L'ABBE..... 58
FIGURE 37 : ABONDANCE TOTALE DES INVERTEBRES PAR PARCELLE EN FONCTION DE L'IFT TOTAL DES PARCELLES SUR L'ANNEE 2026..... 59
FIGURE 38 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DES AUXILIAIRES ET RAVAGEURS PAR SEMAINE SUR LA CAMPAGNE 2026 60
FIGURE 39 : CORRELATIONS ENTRE AUXILIAIRES SPECIALISTES ET RAVAGEURS SELON LE DECALAGE TEMPOREL..... 61
FIGURE 40 : ABONDANCE TOTALE DES GROUPES FONCTIONNELS PAR PARCELLE EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ESN DANS UN RAYON DE 150 M AUTOUR DE LA PARCELLE DE LA CAMPAGNE 2026 62
FIGURE 41 : OCCURRENCE TOTALE DES FAMILLES VEGETALES PAR PARCELLE IDENTIFIEES PENDANT LA CAMPAGNE 2026..... 63
FIGURE 42 : OCCURRENCE TOTALE DES ORDRES D'ARTHROPODES PAR PARCELLE IDENTIFIEES PENDANT LA CAMPAGNE 2026..... 65
FIGURE 43 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODE SUR LA CAMPAGNE 2026 EN FONCTION DES CLASSES DE RICHESSE VEGETALE OBSERVEE DANS LE QUADRAT 67
FIGURE 44 : POURCENTAGE DE FREQUENTATION DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL EN FONCTION DU NOMBRE D'ESPECES VEGETALES EN FLEURS PAR QUADRAT, TOUTES PARCELLES CONFONDUES..... 68
FIGURE 45 : FREQUENTATION CUMULEE DES GROUPES FONCTIONNELS D'ARTHROPODES EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LES PARCELLES PFI+ ET AB POUR LA CAMPAGNE 2026..... 69
FIGURE 46 : FREQUENTATION CUMULEE DES GROUPES FONCTIONNELS EN FONCTION DU TEMPS ET DES CONDITIONS CLIMATIQUES DANS LES PARCELLES PFI POUR LA CAMPAGNE 2026..... 69
FIGURE 47 : LIEN ENTRE LA FREQUENCE DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODES ET LE GRADIENT DE PLUVIOMETRIE POUR LA CAMPAGNE 2026..... 70
FIGURE 48 : LIEN ENTRE LA FREQUENCE DE CHAQUE GROUPE FONCTIONNEL D'ARTHROPODES ET LE GRADIENT DE TEMPERATURE POUR LA CAMPAGNE 2026..... 71
FIGURE 49 : INDICE DE SHANNON DES PARCELLES DE BOIS L'ABBE ET LA RETUZIERE SUR LA CAMPAGNE 2025 72
FIGURE 50 : INDICE DE SHANNON DES PARCELLES DE BOIS L'ABBE ET LA RETUZIERE SUR LA CAMPAGNE 2026 72
FIGURE 51 : COMPARAISON DE 4 INDICES DE SHANNON SELON LES MODALITES SITES (BA/ RETU) ET ANNEE (2025/ 2026)..... 73
FIGURE 52 : ACP des profils agroécologiques des parcelles de vergers..... 74

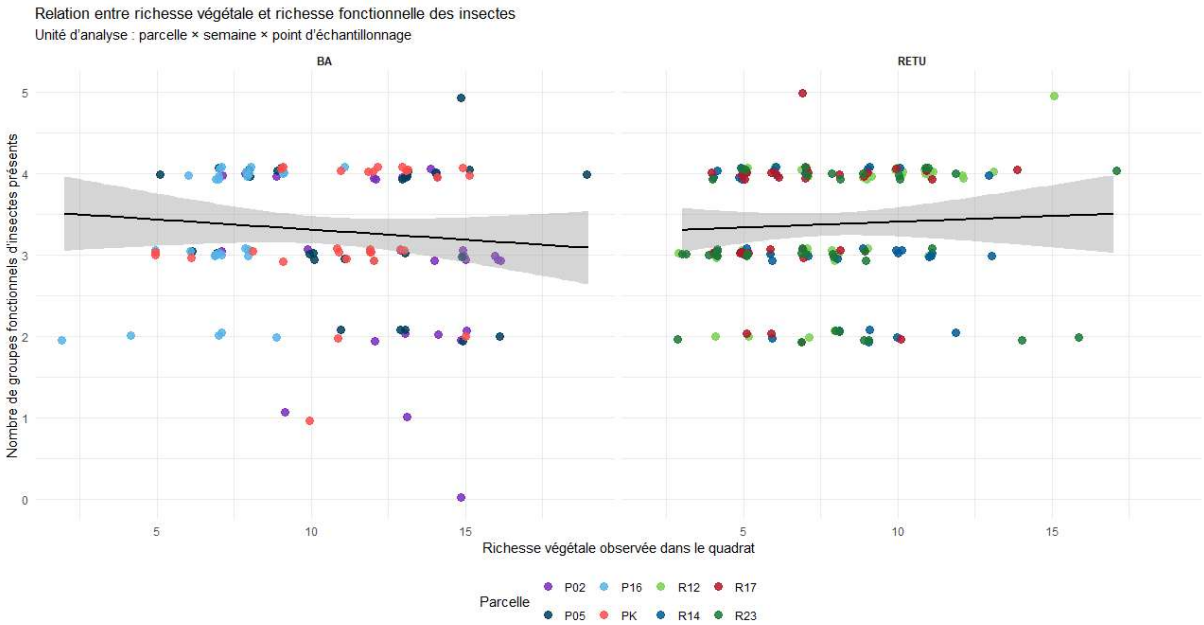
Table des tableaux :

TABLEAU 1 : TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES PRINCIPALES VARIETES DE POMMES PRODUITES EN FRANCE (Chastaing et al., 2024) 24
TABLEAU 2 : RECAPITULATIFS DES BESOINS EN UNITE PAR HA DES ELEMENTS N, P_2O_5, K_2O (LARRIEU, 2019) 30
TABLEAU 3 : TABLEAU PRESENTANT LES CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX RAVAGEURS DU POMMIER (EPHYTIA, 2015-2026) 32
TABLEAU 4 : TABLEAU MONTRANT LES DIFFERENTES PARCELLES SELECTIONNEES ET LEURS CARACTERISTIQUES D'APRES NICOLAS MARCOU, 2025 44
TABLEAU 5 : TABLEAU DES ELEMENTS PAYSAGERS REFERENCES SUR LES MODELES CARTOGRAPHIQUES 50
TABLEAU 6 : RESULTATS DU TEST DE CHI-2 ENTRE LES FAMILLES VEGETALES ET LA CONDUITE TECHNIQUE 66
TABLEAU 7 : LISTE RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS 76

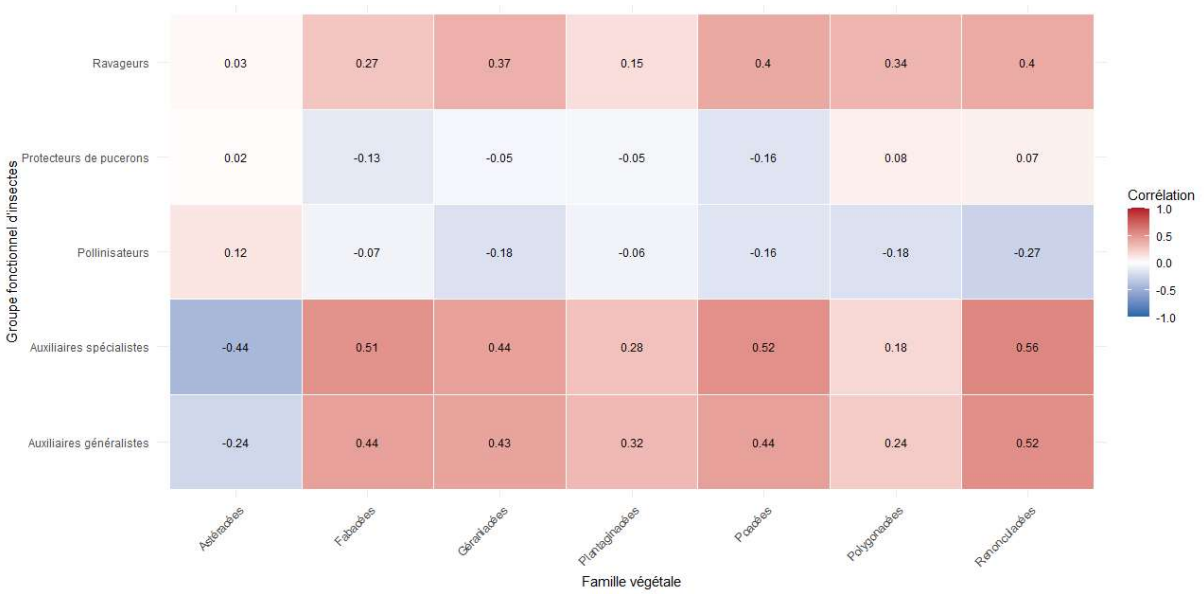
ANNEXES :

Porte-greffe	Gamme de vigueur	Type de sol	Résultats d'essais CIREA / CEFEL BGSO/ Morinière	Commentaires
MM 106	7	Sol frais limoneux argileux, encrage moyen ; sensible à la sécheresse.		Vigoureux, une bonne production mais de calibre moyen. Sensible au phytophtora.
M7 VF	6	Sol profond limoneux argileux, bon ancrage ; peu sensible sécheresse.	Vigueur égale à MM 106 et tendance à une meilleure productivité ; calibre égal à meilleur ; quelques rejets et drageons.	Intéressant en situation peu vigoureuse pour des variétés de faible vigueur.
PI 80 Supporter® 4	5	Tous bons sols	Vigueur donnée supérieure à EMLA lors des suivis en réseau (15 à 30 % en plus). Niveau de coloration, calibres équivalents à EMLA, moins de drageons.	En verger de production : s'installe plus lentement que EMLA. En AB : PI 80 plus sensible à l'alternance, plus sensible à l'éclaircissage et plus appétant par rapport aux campagnols. Beaucoup de chute physio avec Opal / PI80
Pajam® 2	5	Tous bons sols	Vigueur équivalente au M9 EMLA. Peu sensible aux broussins. Quelques rejets.	Gamme de porte-greffe la plus répandue. Le groupe des M9 induit une entrée en production rapide et régulière, avec des fruits de qualité. Attention à la sensibilité aux pucerons lanigères.
M 9 EMLA	5	Tous bons sols Enracinement superficiel	Vigueur équivalente au Pajam® 2. Peu sensible aux broussins et aux rejets.	
M 9 NAKB	4	Tous bons sols Enracinement superficiel	Vigueur équivalente au Pajam® 1. Peu sensible aux broussins et aux rejets.	
Pajam® 1	4	Tous bons sols	Vigueur équivalente au M9 NAKB. Moyennement sensible aux broussins et aux rejets.	
(P 16) Lizzy	3	Tous bons sols	Productivité égale voire supérieure à Pajam® 1 les 1ères années; bon calibre ; quelques rejets ; point de greffe typique en goulot de bouteille.	Peu développé
Gamme CG (G 11, G 41, G 202)	5		En observation sur le réseau : G 11, G 41, G 202, G 935. 1ères conclusions en 7ème feuille : CG 41 : vigueur hétérogène G202> G 11> G 41> Pajam 2> M9 NAKB> PI 80 Intérêt de G11 : peu sensible à la fatigue des sols, productivité plus forte et fruits plus sucrés que sur EMLA.	Tronc génétique différent des M9. Sélections issues de Cornell Geneva (USA). G202 : plus vigoureux que G11 => Intérêt en AB.
Gamme AR M200 (AR 295-6)	6		AR 295-6 : Plus vigoureux que G 11 mais moins que le M106. Index de productivité supérieur de 20 à 25 % par rapport aux M9 (production Fruits/ vigueur). Bon niveau de coloration. Donné tolérant au feu bactérien.	Origine East Malling ; en observation sur le réseau Forte vigueur en 2ème feuille. Attention à l'alternance induite par la vigueur.
M116	6		Vigueur équivalente au M106.	Origines East Malling ; en observation sur le réseau Résistant au phytophtora ; bonne productivité ; Intérêt pour vergers industriels.

Annexe 1 : Tableau comparatif de quelques-uns des porte-greffes les plus connus (Chastaing et al., 2024)



Annexe 2 : Fréquentation des groupes fonctionnels en fonction de la richesse végétale observée dans le quadrat



Annexe : 3 Corrélation entre les groupes fonctionnels et les familles végétales de la bande enherbée

modalite site annee n_parcelles shannon_moyen shannon_sd shannon_median richesse_taxonomique_moyenne

	<fct>	<chr>	<dbl>	<int>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
1	BA25	BA	2025	4	2.54	0.00693	2.54	37.5
2	BA26	BA	2026	4	2.81	0.126	2.83	57.8
3	RETU25	RETU	2025	4	2.77	0.203	2.76	38.2
4	RETU26	RETU	2026	4	2.59	0.163	2.58	58

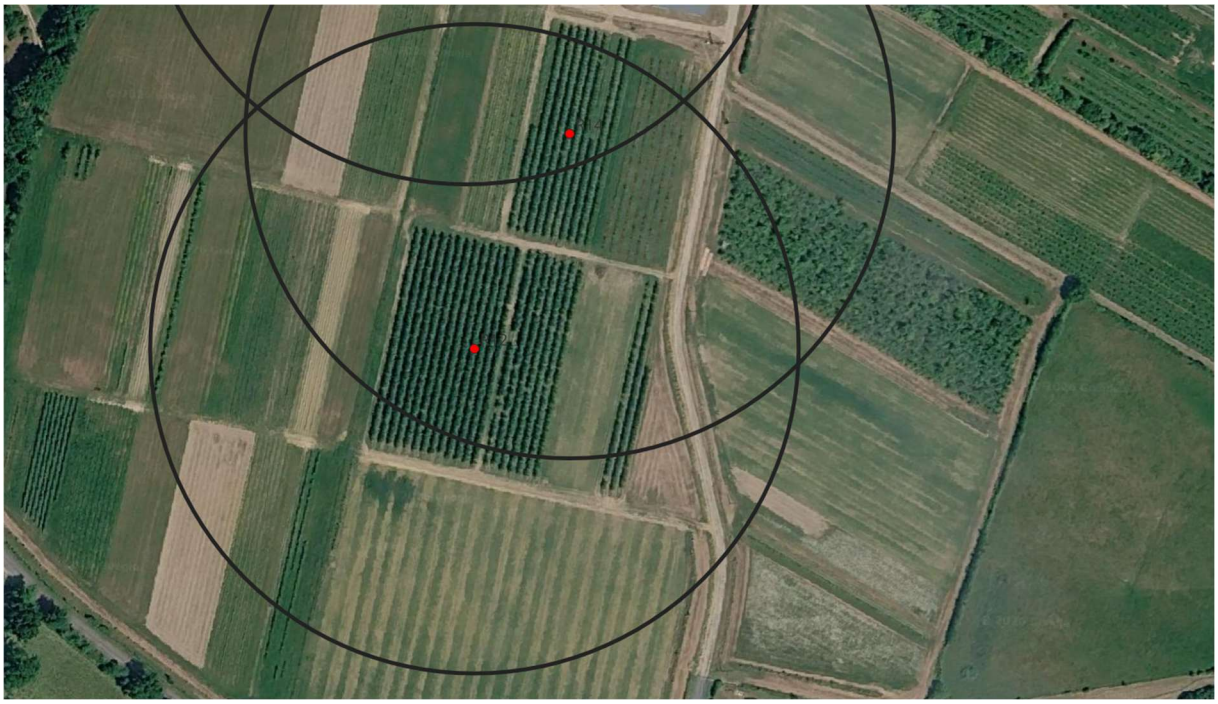
Test global Kruskal-Wallis :

Kruskal-Wallis chi-squared = 7.7426, df = 3, p-value = 0.05164

Annexe 4 : Tableau des modalités Bois l'abbé/ Rétuzière ; 2025/ 2026



Annexe 5 : Photo aérienne de la parcelle R23



Annexe 6 : Photo aérienne de la parcelle R14