

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

Année universitaire : 2023 - 2024
Spécialité : Ingénieur agronome
Spécialisation (et option éventuelle) :
Science et Ingénierie du Végétal (SIV) /
Option Agrosystèmes : Conception et
Evaluation

Mémoire de fin d'études

- d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
- de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
- de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Evaluation de l'impact des pratiques culturales et du contexte paysager sur la biodiversité des vergers expérimentaux de pommiers en Pays de la Loire

Par : Tristan ARTU--CHAPLAIN

Soutenu à Rennes (35)

le

18 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu CAROF

Maître de stage : Frédérique DIDELOT et Catherine BERNARD

Enseignant référent : Edith LE CADRE

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Stéphanie AVIRON (Rapporteur)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du **maître de stage** ⁽²⁾ : 20/08/2024

(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **Tristan ARTU--CHAPLAIN**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'**auteur** : 23/08/2024

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'**enseignant** :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à adresser mes remerciements à Arnaud, Frédérique et toute l'équipe de l'Unité Expérimentale Horticole pour l'accueil chaleureux que vous m'avez offert. Je salue votre impressionnant travail de tous les jours dans les vergers avec la profonde ambition de concilier au mieux écologie et agriculture. En vous souhaitant une bonne continuation et au plaisir de se revoir.

Je remercie grandement Catherine pour l'encadrement de ce stage, toujours avec le sourire et la bienveillance. Se fut un plaisir d'échanger tout au long de ces 5 mois sur nos passions communes, l'écologie et l'agriculture. Merci pour vos conseils, votre soutien et votre bonne humeur au quotidien (sans oublier le café avec les biscuits pendant les relevés sur le terrain !).

Je remercie Christian Bockstaller et Bastien Dallaporta de m'avoir permis d'utiliser le modèle BioSyScan qui est encore en cours de développement et d'amélioration et pour toutes vos explications. En espérant que ce projet de modélisation continue et que mes résultats puissent vous aider à améliorer cet outil.

Je remercie mes parents pour leur soutien indéfectible dans ma passion pour l'agronomie. Vous m'avez toujours permis d'exprimer pleinement cette passion au travers de mes études et de mes activités personnelles. Je vous ne pourrais jamais assez vous dire merci. Ce rapport est l'aboutissement de mes études et je vous le dois énormément. Votre regard de fierté sur mes travaux et mes études a été une source de motivation sans faille, dans les moments de doute comme de joie.

Enfin, je veux remercier ma grand-mère, Chantal. C'est grâce à toi que j'en suis là. C'est grâce à toi que je me suis passionné pour les plantes, pour la nature et l'agriculture depuis le plus jeune âge. Nos balades en forêt, nos discussions au coin du jardin ou dans le verger sont des souvenirs qui sont gravés à jamais dans ma mémoire. Que nos projets et nos aventures perdurent le plus longtemps possible.

TABLE DES MATIERES

A - INTRODUCTION

1. **Le constat du rôle de l'agriculture moderne sur l'état de la biodiversité**
2. **Le projet CAP0PHYTO pour une immunité agroécologique**
 - 2.1. Présentation du projet
 - 2.2. WP2 – Leviers Plantes de service

B - ETAT DE L'ART

1. **La filière de production de la pomme en France**
2. **La modernisation de la pomiculture**
 - 2.1. Une intensification de la pomiculture
 - 2.2. Description d'un verger de production moderne et de sa conduite
 - 2.3. Une production basée sur des variétés sensibles
 - 2.4. Une utilisation importante des produits phytosanitaires
 - 2.5. La Production Fruitière Intégrée, un compromis entre conventionnel et BIO
3. **La biodiversité en vergers de pommiers**
 - 3.1. Définition et place de la biodiversité dans un agrosystème
 - 3.2. La biodiversité en verger de pommiers
 - 3.3. Les invertébrés ravageurs du pommier
 - 3.4. Les invertébrés auxiliaires en vergers
4. **L'impact de l'arboriculture sur la biodiversité**
 - 4.1. L'impact de l'intensification en arboriculture sur la biodiversité
 - 4.1.1. Les effets des insecticides en arboriculture sur les invertébrés
 - 4.1.2. Les effets des fongicides en arboriculture sur les invertébrés
 - 4.1.3. Les effets de la gestion parcellaire en arboriculture sur la biodiversité
 - 4.2. **Les impacts de la simplification du paysage agricole sur la biodiversité**
 - 4.2.1. La place des éléments semi-naturels dans les agroécosystèmes
 - 4.2.2. Les effets du contexte paysager sur la biodiversité
 - 4.2.3. Les effets du contexte paysager des vergers sur la biodiversité
 - 4.3. **Des effets des pratiques culturales et du contexte paysager différents en fonction des modes de vie des organismes**

C – PROBLEMATIQUE

D – HYPOTHESES DE TRAVAIL

E - MATERIELS ET METHODES

1. **Contexte générale**
 - 1.1. Description des sites de l'INRAE – Angers (49)
 - 1.1.1. Description du site de Bois l'Abbé
 - 1.1.2. Description du site de la Rétuzière
 - 1.2. Présentation des vergers étudiés
 - 1.2.1. Choix de la sélection des vergers étudiés
 - 1.2.2. Contexte pédoclimatique des sites Bois l'Abbé et la Rétuzière
2. **Relevés de biodiversité**
 - 2.1. Choix des indicateurs
 - 2.2. Protocoles des relevés de biodiversité
 - 2.2.1. Milieu herbacé : Protocole du piège Baber

- 2.2.2. Milieu aérien : Protocole de l'assiette jaune
- 2.2.3. Milieu arboré : Protocole du parapluie japonais
- 2.2.4. Relevé floristique des plantes vasculaires
- 2.3. Protocole d'identification des invertébrés
 - 2.3.1. Systèmes de classification
 - 2.3.1.1. Classification basée sur la classification phylogénétique
 - 2.3.1.2. Classification fonctionnelle
 - 2.3.2. Méthode d'identification morpho-espèce
- 3. Modélisation du contexte paysager**
 - 3.1. Utilisation du logiciel de Système d'Information Géographique QGIS
 - 3.2. Protocole de modélisation
 - 3.3. Choix de la classification des éléments paysagers
- 4. Les Itinéraires Techniques Cultureux des vergers étudiés**
 - 4.1. Les informations recueillies des ITK
 - 4.2. Les années choisies pour l'analyse de l'ITK
- 5. Analyse des résultats**
 - 5.1. Logiciel d'analyse statistique
 - 5.2. Modélisation de l'impact des pratiques culturelles et du contexte paysager sur la biodiversité
 - 5.2.1. Choix des variables explicatives
 - 5.2.2. Modèles simples par GLMM
 - 5.2.3. Modèle complexe : BioSyScan

F – RESULTATS

1. Description statistique

- 1.1. Description de la biodiversité des invertébrés piégés
 - 1.1.1. L'abondance totale
 - 1.1.2. La richesse spécifique
 - 1.1.3. La biodiversité est-elle statistiquement différente entre les parcelles ? les conduites ? les sites ?
- 1.2. Description des relevés floristiques
 - 1.2.1. La biodiversité floristique dans l'inter-rang est-elle statistiquement différente entre les parcelles ? les conduites ? les sites ?
- 1.3. Description des variables explicatives potentielles
 - 1.3.1. Les IFT moyen entre 2021 et 2023
 - 1.3.2. Les variables de l'ITK sont-elles liées entre elles ?
 - 1.3.3. Les variables du contexte paysager dans un rayon de 150 m sont-elles liées entre elles ?

2. Les résultats des modélisations

- 2.1. Les résultats du modèle complexe : BioSyScan
 - 2.1.1. Le modèle BioSyScan explique-t-il les variables de biodiversité observées sur le terrain ?
 - 2.1.2. Le modèle BioSyScan prédit-il des tendances de biodiversité cohérentes ?
- 2.2. Résultats des modèles simples
 - 2.2.1. Biodiversité des Assiettes Jaunes
 - 2.2.2. Biodiversité des Barbers
 - 2.2.3. Biodiversité des Parapluies Japonais
- 2.3. L'abondance des taxons associés à des fonctions écosystémiques intéressantes s'explique-t-elle par les variables des pratiques culturelles et du contexte paysager ?

G - DISCUSSION

H – CONCLUSION & PERSPECTIVES

I - BIBLIOGRAPHIE

J - ANNEXES

LISTE DES ABBREVIATIONS

IFT : “**Indice de Fréquence Traitement** est un indicateur de suivi de l’utilisation des produits phytopharmaceutiques (pesticides) à l’échelle de l’exploitation agricole ou d’un groupe d’exploitations” (Agriculture.gouv.fr 2023)

ITK : “**L’Itinéraire Technique Culturelle** est un enchaînement logique et ordonné d’intervention techniques culturales permettant de tirer le maximum des potentialités du milieu vis-à-vis d’une production donnée, du semis à la récolte” (Arvalis – Institut du végétal)

SAU : Surface Agricole Utile

ESN : “**Les Eléments Semi-Naturels** sont des unités non cultivées du paysage (haies, bois, bandes enherbées, prairies...) avec un minimum de perturbations humaines pour garantir la stabilité et la pérennité de ces éléments (taille des haies, pâturage des prairies, ...) et bloquer la succession écologique” (Tarjuelo et al. 2020)

PFI : **Production Fruitière Intégrée** est un “Système de production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l’utilisation de produits agrochimiques afin d’améliorer la protection de l’environnement et la santé humaine.” (Supagro.fr, 2013)

BIO : fait référence à la conduite en **Agriculture Biologique**

CONV : fait référence à la conduite en **Agriculture Conventiennelle**

SDP : **Stimulateurs de Défense des Plantes** sont « des substances ou produits, naturels ou non, capables d’induire (ou de préparer à l’induction), chez les plantes traitées, un état de résistance aux bioagresseurs » (Ephytia 2020)

GLMM : **Generalized Linear Mixed Model** sont des Modèles Linéaires Généralisés à effets Mixtes

ANNEXES

Annexe 1 : Numérotation des rangs où ont été faits les relevés par parcelle

Annexe 2 : Tableau des résultats des tests de Kruskal-Wallis et des paires de Dunn (ayant une p-value < 0.05) pour les variables (abondance et richesse spécifique) des relevés de biodiversité (Assiette Jaune, pièges Barber, Parapluie Japonais et Relevé floristique).

FIGURES

Figure 1 : Répartition de la production fruitière française en 2020

Figure 2 : Répartition de la production de pommes de table par régions en 2021

Figure 3 : Exemple d'ITK en pomiculture en lien avec le stade phénologique du pommier et le développement des pommes

Figure 4 : Répartition de la production en France de pomme par variétés entre 2018 et 2022

Figure 5 : Photographie de pucerons cendrés du pommier (*Dysaphis plantaginea*)

Figure 6 : Photographie d'un carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*)

Figure 7 : Photographie d'un anthonome du pommier (*Anthonomus pomorum*)

Figure 8 : Photographie d'un hoplocampe du pommier (*Hoplocampa testudinea*)

Figure 9 : Photographie de plusieurs espèces de coccinelles : en haut *Propylea quatuordecimpunctata*, en bas à gauche *Harmonia axyridis* et en bas à droite *Chilocorus renipustulatus*

Figure 10 : Photographie de plusieurs espèces d'hyménoptères parasitoïdes

Figure 11 : Photographie de plusieurs espèces de carabes

Figure 12 : Carte du site de l'INRAE - Bois l'Abbé (49) et des vergers étudiés en fonction de leur conduite

Figure 13 : Carte du site de l'INRAE - Rétuzière (49) et des vergers étudiés en fonction de leur conduite

Figure 14 : Schéma des différents milieux d'un verger

Figure 15 : Photographie personnelle d'une Assiette Jaune et d'un pot Barber (en bas à droite) dans l'intra-rang.

Figure 16 : Photographie personnelle de l'emplacement "type" d'une Assiette Jaune dans le rang d'un verger

Figure 17 : Cartes de deux types de vergers : en blocs expérimentales (parcelle P02) à gauche et classique à droite (parcelle P16) et de la disposition des relevés (faites avec le logiciel QGIS)

Figure 18 : Exemple de carte modélisant le contexte paysager d'un verger (ici la parcelle Pk) dans un rayon de 150m autour du centre du verger

Figure 19 : Schéma de l'arbre hiérarchique du modèle BioSyScan (à gauche : les variables d'entrées issus de l'ITK d'un verger, à droite : la variable de sortie, une note sur 100 de l'état de la biodiversité)

Figure 20 : Graphique en barres de l'abondance moyenne par relevé pour chaque parcelle regroupée par conduite avec en barres d'erreurs l'écart-type

Figure 21 : Graphique en barres empilées de la richesse spécifique moyenne par relevé pour chaque parcelle regroupée par conduite

Figure 22 : Graphique en barres empilées de la richesse floristique des espèces nectarifères et des espèces non nectarifères pour chaque parcelle, regroupées par conduite

Figure 23 : Graphique en barres empilées des IFT moyens de chaque type de traitement par verger regroupés par conduite et en ligne de référence l'IFT total moyen entre 2012 et 2018

Figure 24 : Matrice de corrélation de Kendall entre les variables du contexte paysager dans un rayon de 150 mètres autour des vergers

Figure 25 : Matrice de corrélation de Kendall entre les variables de l'ITK moyen entre 2021 et 2023

Figure 26 : Graphique en barre des notes de l'état prédictif de la biodiversité issues du modèle BioSyScan par parcelle, regroupées par conduite

Figure 27 : Graphique des fonctions prédictives des abondances totales issues de la modélisation de BioSyScan par relevé

TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution de l'IFT moyen des principales cultures fruitières en France entre 2012 et 2018

Tableau 2 : Principales caractéristiques des vergers étudiés

Tableau 3 : Tableau de classifications phylogénétique et fonctionnelle simplifiées des invertébrés présents dans un verger

Tableau 4 : Tableau de classification des Eléments Paysagers

Tableau 5 : tableau présentant les variables explicatives choisies pour les modèles simples, issues de l'ITK moyen entre 2021 et 2023 et de l'analyse paysagère dans un rayon de 150 m autour des vergers

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des meilleurs modèles explicatifs des variables "abondance" et "richesse spécifique" par méthode de relevé et leurs variables explicatives, leur coefficient et leur p-value

A - INTRODUCTION

1. Le constat du rôle de l'agriculture moderne sur l'état de la biodiversité

En France, la modernisation de l'agriculture, à partir des années 50, s'est traduite par deux phénomènes : l'**intensification** des pratiques et la **simplification** des agrosystèmes.

L'**intensification** des pratiques a permis une importante augmentation des rendements grâce à l'apport massif d'intrants de synthèse (fertilisants, produits phytosanitaires, énergies, ...) et le travail de machines (travail du sol, récolte, entretien des cultures, ...) (actu-environnement 2012). Aujourd'hui, la communauté scientifique s'accorde à dire que l'usage de produits phytosanitaires participe au déclin de la biodiversité, entraînant une baisse des services écosystémiques rendus à la production agricole (INRA 2008). L'utilisation des produits phytosanitaires arrive à ses limites avec, par exemple, l'apparition de populations de ravageurs devenus résistants aux molécules actives (Hatt et Döring 2023).

Parallèlement, une politique de **simplification** des systèmes agricoles s'est mise en place avec l'agrandissement parcellaire et la spécialisation de grandes régions de productions (INRA 2008). Cette **simplification** s'est ainsi traduite par la destruction à grande échelle de haies, la culture d'un nombre limité d'espèces sur de grandes surfaces et une diversité variétale cultivée faible et sensible aux ravageurs et pathogènes.

Cette **modernisation** a provoqué une perte importante de biodiversité dans les agrosystèmes, déstabilisant les équilibres écologiques (vie-publique.fr 2024). Le changement d'utilisation des terres et l'exploitation directe expliquent plus de 50% de l'impact mondial sur les écosystèmes terrestres, l'agriculture étant l'un des principaux moteurs du changement d'utilisation des terres (IPBES, 2019). Or pour la FAO, la biodiversité est considérée comme une partie intégrante de l'agriculture (FAO, 2019). En Europe de l'Ouest, on considère que **l'agriculture est le premier facteur anthropique contrôlant l'état de la biodiversité, positif comme négatif** (INRAE 2008). Pour protéger la biodiversité et favoriser ses services écosystémiques, la production agricole se doit d'être plus vertueuse et moins dépendante des intrants. Une solution pourrait être la mise en place de systèmes agroécologiques, intégrant les mécanismes écologiques au service de l'agriculture.

2. Le projet CAP0PHYTO pour une immunité agroécologique

2.1. Présentation du projet

Les impasses environnementales et sociétales de l'usage de produits phytosanitaires à amener l'INRAE en 2021 à créer un projet, **CapZeroPhyto** qui a pour but de développer le concept d'immunité agroécologique (cultiver-protéger-autrement 2023).

Ce projet se base sur l'expérimentation et l'association de 5 leviers d'action pour améliorer l'immunité végétale de 2 plantes modèles : le pommier (modèle de la rosacée pérenne) et la tomate (modèle de la solanacée annuelle). Ces modèles permettront d'élargir par la suite à d'autres cultures : la pêche, la fraise et le poivron.

L'immunité agroécologique est tournée vers 3 bioagresseurs du pommier, les plus préjudiciables aux vergers : la tavelure (*Venturia inaequalis*), le feu bactérien (*Erwinia amylovora*) et le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*). Les leviers d'action étudiés sont la résistance génétique, les Stimulateurs de Défense des Plantes (ou SDP), l'utilisation d'UV-C, la gestion de la nutrition azotée et l'installation de plantes de services dans le verger. Ces leviers sont étudiés individuellement et en combinaison dans des essais en conditions contrôlées sous serre et en vergers plein champ. En 2025, un verger système sera mis en place à Angers alliant ces 5 leviers d'action.

2.2. WP2 – Leviers Plantes de service

Dans le levier Plantes de service, une **évaluation de la biodiversité sauvage et cultivée** a été demandée avec **un suivi de parcelles voisines conduites différemment avec ou sans dispositifs agroécologiques**. Le but est de relier le contexte paysager et l'itinéraire technique des parcelles avec la biodiversité présente dans chaque verger. Ce suivi a lieu sur 2 sites, Bois l'Abbé, station expérimentale de l'INRAE – Angers (49) et à la Rétuzière, station expérimentale de l'INRAE à Champigné (49).

Les vergers choisis pour cette évaluation ont des **conduites et des contextes paysagers différents**. L'intérêt de cette mission est de comprendre dans quelles mesures ces différences peuvent impacter la biodiversité locale dans ces vergers expérimentaux.

C'est dans le cadre de cette mission que ce rapport de stage s'inscrit.

B - ETAT DE L'ART

1. La filière de production de la pomme en France

Originaire d'Asie centrale, le pommier (*Malus domestica*) est cultivé pour ses fruits en Europe depuis l'époque de l'Empire romain (Cornille et al. 2019).

Aujourd'hui, la pomme est le fruit le plus consommé par les Français (CTIFL, 2023) et la culture du pommier est la première production fruitière en France avec 1,3 millions de tonnes de pommes par an, soit 57% de la production fruitière nationale (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, 2023) comme le montre la Figure 1. Cette culture représente une surface totale de 39 300 ha de vergers en 2023 (Agreste, 2023) soit 1% de la SAU totale française (J-M. Cordon et al, 2003).

En France, 3 grands bassins de production se partagent 90% de la production de pomme de table : le Val de Loire (Centre-Val de Loire et Pays de la Loire), le Sud-Ouest (Nouvelle-Aquitaine et Occitanie) et le Sud-Est (Auvergne-Rhône-Alpes et Provence Alpes Côtes d'Azur) (Agreste, 2022). La répartition de la production de pommes par région en 2021 est synthétisée dans la Figure 2.

La France se hisse à la troisième place des pays européens producteurs de pommes derrière la Pologne et l'Italie (France Agrimer, 2022) en produisant environ 13% des pommes européennes (lapomme.org, 2023) et présente un solde commercial excédentaire dans la vente de pommes (chambre-agriculture.fr, 2022). Le marché national de la pomme atteint 700 millions d'euros (lapomme.org, 2022).

*NB : le terme "**pomme de table ou à couteau**" définit la pomme consommée brute à l'inverse de "**pomme de transformation**" qui subit un processus agroalimentaire avant sa consommation (compote, jus de pommes, cidre, ...).*

2. La modernisation de la pomiculture

2.1. Une intensification de la pomiculture

Avant les années 1950, la culture du pommier était orientée vers la production de cidre et était associée à l'élevage sous la forme de pré-verger. Ce type de verger se caractérise par des pommiers hautes-tiges (c'est-à-dire un point de greffe au-dessus de 1,50mètre) où le bétail peut pâturer l'herbe à l'ombre des arbres. À partir des années 1950-1970, la pomiculture a connu une très forte intensification (agromillora.com, 2021).

Répartition de la production fruitière française

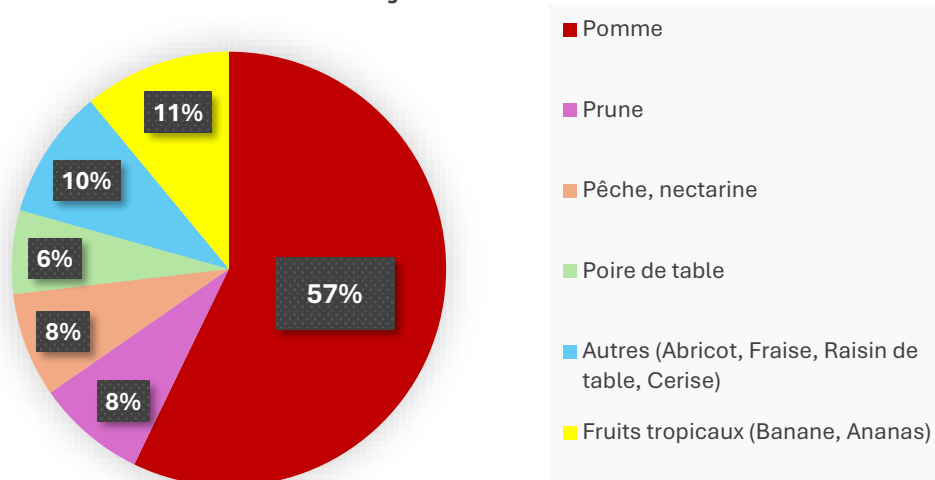


Figure 1 : Répartition de la production fruitière française en 2020

(Source : chiffres issus de agriculture.gouv.fr : "Infographie - Les fruits et légumes : une production arboricole, fruitière et maraîchère très diversifiée")

RÉPARTITION DE LA PRODUCTION DE POMMES PAR RÉGION EN 2021

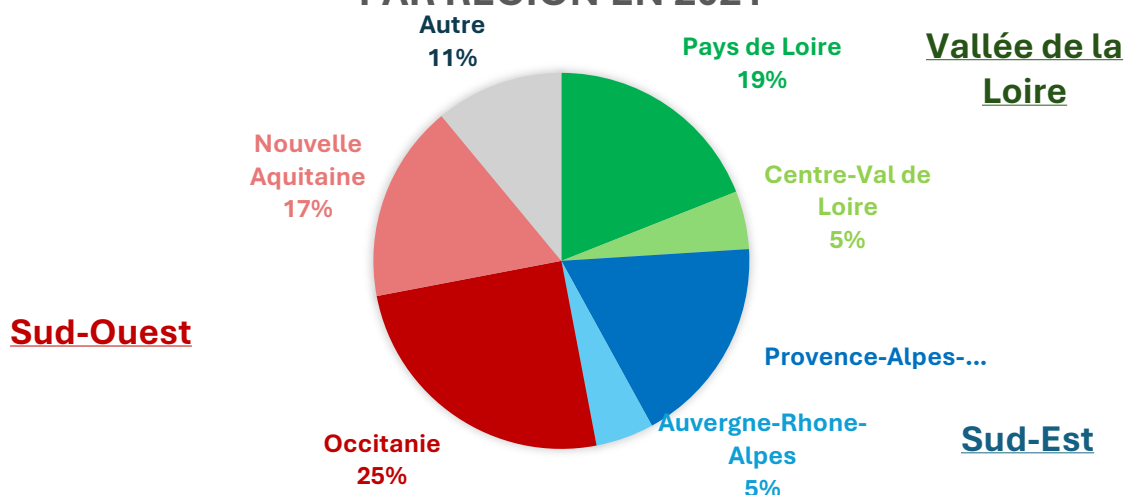


Figure 2 : Répartition de la production de pommes de table par régions en 2021

(Source : chiffres issus de agreste.agriculture.gouv.fr : "En 2022, une production française de pommes au niveau de la moyenne 2017-2021")

Cette intensification peut se définir comme une augmentation importante de l'usage d'intrants, principalement d'origine chimiques (engrais chimiques, produits phytosanitaires, ...) en vue de maximiser la production agricole (actu-environnement.com, 2012). Aujourd'hui, la production de pommes atteint en arboriculture conventionnelle **entre 30 à 60 t/ha de pommes** et **15 à 20 t/ha** en arboriculture biologique (kulker.fr, 2024).

2.2. Description d'un verger de production moderne et de sa conduite

L'intensification de la pomiculture s'est accompagnée de la création de vergers de pommiers dit basse-tige (arbre dont le point de greffe est à 80 cm maximum au-dessus du sol) avec des densités moyennes de 2 000 arbres/ha, nettement supérieures aux pré-vergers traditionnels haute-tige avec 100 arbres/ha (Chambre d'Agriculture des Hauts de France, 2008).

Grâce aux greffes basses-tiges, les premières branches du greffon sont basses, ce qui **facilite la mécanisation de l'entretien** du verger (taille, traitement, récolte, éclaircissage, ...). Accompagné d'une conduite de l'arbre adapté, cela permet une ventilation et un ensoleillement sur toute la hauteur de l'arbre, diminuant les risques sanitaires et augmentant la production de pommes (Chambre d'Agriculture – Occitanie, 2002).

La Figure 3 schématise l'itinéraire Technique Culturelle (ITK) d'un verger moderne de pommier vis-à-vis du stade phénologique de l'arbre et du développement du fruit.

Les techniques d'entretiens des arbres ont pour but de stabiliser la production de fruits chaque année en évitant le phénomène d'alternance (fluctuation cyclique de la production de fruits où une année à forte production est suivie d'une année à faible production). Pour se faire, il existe **2 grands types d'entretien** : la **taille** qui permet, par la coupe de rameaux, d'obtenir des arbres au port équilibré en restreignant des croissances trop vigoureuses et **l'éclaircissage** qui consiste dans l'élimination sélective des fleurs ou des jeunes fruits dans les corymbes pour obtenir de gros fruits homogènes sans surproduction.

2.3. Une production basée sur des variétés sensibles

Aujourd'hui, il existe plusieurs milliers de variétés de pommes mais la production en France est représentée à plus de **65% par 4 variétés** : **Golden, Gala, Pink Lady et Granny Smith** (lapomme.org, 2023). La part de chaque variété dans la production de pomme en France entre 2018-2022 est représentée dans la Figure 4. Ces variétés présentent des sensibilités importantes aux ravageurs et pathogènes du pommier. L'enjeu de l'arboriculture est d'assurer une production importante de fruits commercialisables (aspect visuel "zéro défaut") en limitant l'utilisation de produits phytosanitaires (S.Simon et al, 2019).

2.4. Une utilisation importante des produits phytosanitaires

L'intensification de la pomiculture s'est faite aussi grâce à **une utilisation importante d'intrants** (Morand et Lajaunie 2018; Herz et al. 2019; Codron et al. 2003).

A l'heure actuelle, la pomiculture **est la culture arboricole la plus traitée** avec, en moyenne, **35,9 traitements par an** pour un IFT (Indice de Fréquence Traitement) moyen de 29.5 dont **65% de fongicides et 25% d'insecticides** (productions BIO et non BIO confondues). Comme le montre le Tableau 1, entre 2012 à 2018, l'IFT moyen en pommier a diminué de 2,4 points mais le nombre de traitements, lui, reste stable à 35,9 (Agreste, 2021).

	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novem
Stade phénologique	Dormance				Feuillaison				Sénescence			
Développement fruit					Floraison	Fructification			Maturation			
Entretien	Taille d'hiver			Eclaircissage chimique		Taille/Eclaircissage manuel						
					Désherbage mécanique ou chimique							
Traitements					Fongicides							
					Insecticides							

Figure 3 : Exemple d'ITK en pomiculture en lien avec le stade phénologique du pommier et le développement des pommes

(Source : Informations issues de paca.chambres-agriculture.fr : "L'arboriculture Fruitière en agriculture biologique Région Sud Provence Alpes Côte d'Azur")

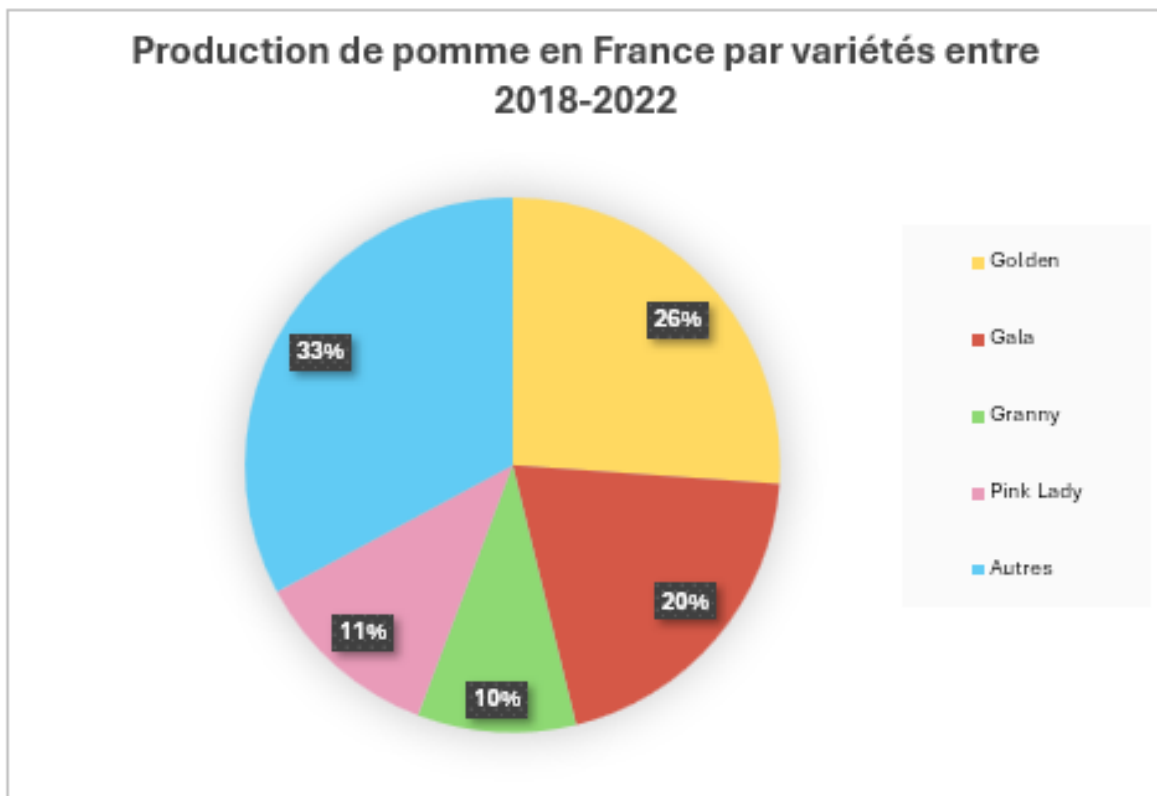


Figure 4 : Répartition de la production en France de pomme par variétés entre 2018 et 2022

(Source : chiffres issus de www.lapomme.org : "Production en France par variétés")

En 2018 en France, sur les 34 principales cultures du territoire, les deux premières cultures avec les IFT moyen les plus élevés étaient la pomme de table conventionnelle et biologique (Chayre et Pointereau, 2023).

Un verger est une **plantation pérenne de 10 à 15 ans** en moyenne, ne permettant pas une rotation culturale annuelle, ce qui favorise l'installation de populations de ravageurs et d'inoculum de pathogènes (Simon, Marliac, et Capowiez 2015). De plus, le pommier est **sensible à un large spectre de ravageurs et maladies** affectant les feuilles, le tronc, les fleurs ou encore les fruits (aspect et conservation). Ces ravageurs et pathogènes diminuent le rendement de l'arbre et peuvent réduire le nombre de fruits commercialisables en dégradant l'aspect visuel des fruits (Chambre d'Agriculture – Deux-Sèvres, 2017).

2.5. La Production Fruitière Intégrée, un compromis entre Conventionnel et BIO

Dans les années 70, l'Organisation Internationale de Lutte Biologique a développé le concept de **Production Fruitière Intégrée ou PFI**, comme une troisième voie de production fruitière entre agriculture conventionnelle et biologique par la combinaison de leviers (techniques, chimiques, génétiques, ...) (generations-futures.fr, 2018).

La **PFI** se définit comme un "Système de production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation de produits agrochimiques afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine." (Supagro.fr, 2013). Un cahier des charges précise l'ensemble des directives à mener pour valider la charte PFI et permet de vendre les fruits sous la certification GLOBALGAP (agriculture-biodiversité-oi.org, 2011). Ce cahier des charges demande par exemple des analyses de sol tous les 5 ans, la limitation des traitements et des intrants au strict nécessaire et un désherbage (chimique ou mécanique) uniquement sous le rang et de garder un inter-rang enherbé (IFPC, 2004). La diffusion de la PFI a permis de former un socle au raisonnement de la protection intégrée avec de méthodes de luttes alternatives (préservation de la biodiversité, confusion sexuelle, produits microbiologiques, ...) (S. Simon et al. 2018).

3. La biodiversité en vergers de pommiers

3.1. Définition et place de la biodiversité dans un agrosystème

La biodiversité peut se définir comme "l'ensemble des êtres vivants ainsi que les écosystèmes dans lesquels ils vivent et les interactions des espèces entre elles et avec leurs milieux" (ofb.gouv.fr, 2019). Elle est une partie intégrante des agroécosystèmes, systèmes écologiques modifiés pour produire des biens spécifiques ayant une valeur pour l'Homme (nourriture, fibre, énergie, ...) (Conway 1987) où elle peut trouver nourriture et habitat et rendre des services aux cultures (pollinisation, cycle des nutriments, ...) ou des dis-services (dégâts sur les cultures, ...) (Altieri 1999). La dégradation de la biodiversité par les activités humaines est un enjeu majeur du XXIème siècle car elle déstabilise la multifonctionnalité de l'écosystème et ne garantit plus les services rendus par la biodiversité (Hooper et al. 2005).

La biodiversité dans un agroécosystème peut être catégorisée avec la **biodiversité planifiée** (celle gérée par l'agriculteur avec les espèces animales élevées et les espèces végétales cultivées) et la **biodiversité associée** qui est soit **para-agricole** (c'est-à-dire ayant sur les cultures, une influence négative (ravageurs) ou positive (auxiliaires)), soit **extra-agricole** (c'est-à-dire exerçant une influence nulle ou très faible sur les cultures) (Dallaporte, Bonnot et Bockstaller, 2022).

Évolutions de l'IFT moyen par fruit entre 2012, 2015 et 2018, à champ géographique commun

Indicateur	Années			Évolution		
	2012	2015	2018	2012-2015	2015-2018	2012-2018
Pomme	31,9	31,7	29,5	ε	↘	↘
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,7	0,4	0,4			
Pêche	18,5	19,8	18,4	↗	ε	ε
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,6	0,6	1,0			
Prune	9,1	9,4	8,3	ε	↘	↘
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,2	0,3	0,2			
Abricot	10,2	10,4	9,3	ε	↘	↘
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,4	0,5	0,3			
Cerise	7,2	8,0	8,2	↗	ε	↗
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,1	0,2	0,3			
Banane	6,7	8,0	7,0	↗	↘	ε
<i>Demi-intervalle de confiance</i>	0,5	0,3	0,1			

Note de lecture : l'IFT total de la pomme en 2012 est estimé à 31,9 avec une marge d'erreur de 0,7 c'est à dire qu'il y a 95 % de chances de se situer entre 31,2 et 32,6. Entre 2012 et 2015, l'évolution de l'IFT de la pomme n'est pas significative.

Champ : champ commun pour les enquêtes 2012, 2015 et 2018.

Source : SSP - Agreste - Enquête Pratiques culturales en arboriculture

Tableau 1 : Evolution de l'IFT moyen des principales cultures fruitières en France entre 2012 et 2018

(Source : tableau issu agreste.agriculture.gouv.fr : "Enquête Pratiques culturales en arboriculture, 2021")

3.2. La biodiversité en verger de pommiers

Un verger offre un habitat pérenne multi-stratifié (strates arborée, aérienne et herbacée) favorable à la mise en place de chaînes trophiques (S. S. Simon, Marliac, et Capowiez 2015). De nombreux taxons fréquentent les vergers : oiseaux, chiroptères, mammifères terrestres, reptiles et invertébrés où ils trouvent des ressources alimentaires et des habitats (CTIFL 2012 "Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière").

Les **invertébrés** présentent une grande diversité de niches écologiques dans les vergers et jouent un rôle clé dans le fonctionnement des agroécosystèmes (Laffon et al. 2024; Fuller et al. 1995) Ils occupent toutes les strates du verger (arborée, aérienne, herbacée et au sol). On y retrouve des ravageurs importants du pommier ainsi que des auxiliaires, prédateurs et parasitoïdes de ces ravageurs.

3.3. Les invertébrés ravageurs du pommier

Certaines espèces d'invertébrés sont considérées comme des ravageurs en provoquant des dégâts sur le rendement et/ou l'aspect visuel des pommes. Les principaux invertébrés ravageurs en pomiculture sont :

- Le puceron cendré (*Aphididae* : *Dysaphis plantaginea*) : c'est le ravageur le plus problématique en vergers de pommier, capable de faire jusqu'à 80% de perte de rendement en cas de pullulation sans traitements phytosanitaires (Figure 5).
- Le carpocapse (*Tortricidae* : *Cydia pomonella*) et d'autres tordeuses sont des papillons de nuit qui s'attaquent aux pommes (au stade larvaire) impactant le rendement commercialisable (Figure 6).
- L'anthonome (*Curculionidae* : *Anthonomus pomorum*) est un charançon s'attaquant aux fleurs du pommier (ephytia.inra.fr, 2020) (Figure 7).
- L'hoplocampe (*Tenthredinidae* : *Hoplocampa testudinae*) est un hyménoptère qui se développe au stade larvaire dans les fruits (grab.fr, 2016) (Figure 8).

Sans décrire en détail les cycles biologiques de chacun de ces ravageurs, il est à noter que la principale période d'activité de ces ravageurs est au printemps et en été, correspondant à la floraison, la feuillaison et la fructification du pommier.

3.4. Les invertébrés auxiliaires en vergers

Les vergers attirent également des auxiliaires, aux régimes alimentaires spécifiques (se nourrissant d'une ou quelques espèces) ou généralistes (se nourrissant d'un large spectre de proies) (Roince 2012).

Les auxiliaires "spécialistes"

- Syrphidés : ce sont les prédateurs des pucerons les plus importants (uniquement au stade larvaire) (Rodríguez-Gasol et al. 2020) Les adultes sont nectarivores.
- Coccinellidés : les adultes et les larves consomment des pucerons (Figure 9)
- Chrysopes : les adultes se nourrissent de pollen et les larves s'alimentent de pucerons, larves de lépidoptères, ...
- Hyménoptères parasitoïdes : il existe de nombreuses espèces de parasitoïdes, plus ou moins spécialisés à une ou plusieurs espèces hôtes (Figure 10)

Les auxiliaires "généralistes"

- Araignée : dans la strate arborée, herbacée ou au sol, elles consomment un large spectre d'insectes dont les ravageurs
- Carabes : ils peuvent chasser les ravageurs dans le milieu herbacé (Figure 11)



Figure 5 : Photographie de pucerons cendrés du pommier (*Dysaphis plantaginea*)

(Source : Koppert.fr : "Puceron cendré du pommier")



Figure 6 : Photographie d'un carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*)

(Source : agroline.ch : "Carpocapse des pommes")



Figure 7 : Photographie d'un anthonome du pommier (*Anthonomus pomorum*)



Figure 8 : Photographie d'un hoplocampe du pommier (*Hoplocampa testudinea*)

(Source : Photographie personnelle à la loupe binoculaire (grossissement x 40))

4. L'impact de l'arboriculture sur la biodiversité

4.1. L'impact de l'intensification en arboriculture sur la biodiversité

4.1.1. Les effets des insecticides en arboriculture sur les invertébrés

Les insecticides représentent 25% des IFT en pomiculture, derrière les fongicides (65%) (Agreste 2021). Les insectes et plus généralement les invertébrés sont donc parmi les premiers êtres vivants touchés par l'application de ces produits.

De nombreuses études se sont intéressées à l'effet de la conduite de vergers sur les communautés d'invertébrés. Les 3 grands types de conduites de vergers (Bio, PFI et conventionnel) sont étudiés avec l'hypothèse que le Bio est la conduite la moins impactante pour la biodiversité, suivis de la PFI et du conventionnel.

Des mesures de biodiversité dans des vergers ont montré que la conduite biologique impacte moins les lombriciens, les oiseaux et l'abondance globale des arthropodes (Sauphanor et al. 2020). En Nouvelle-Zélande, la comparaison des communautés d'invertébrés dans les arbres et sur le sol entre des vergers en PFI et en Bio a montré que la richesse taxonomique ne variait pas contrairement à l'abondance qui était plus importante dans les vergers Bio (Malone et al. 2017).

Les auxiliaires des vergers comme les araignées, les forficules, les hyménoptères parasitoïdes ainsi que les pollinisateurs sont touchés par les traitements phytosanitaires, particulièrement quand les produits ont des spectres d'organismes cibles larges.

Des espèces non-cibles comme le forficule (*Forficula auricularia*) sont moins abondantes dans les vergers **PFI** qu'en **BIO** (Malagnoux et al. 2015). La même observation a été faite sur les araignées où leurs abondances diminuaient dans l'ordre suivant : verger sans pesticide, avec pesticides sélectifs, avec pesticides à large spectre (Markó et al. 2009) et sur les hyménoptères parasitoïdes (Mates, Perfecto, et Badgley 2012) où le taux de parasitisme des larves du carpocapse (*Cydia pomonella*) est significativement plus élevé dans les vergers **BIO** que les vergers **conventionnels** (Maalouly et al. 2013).

Pour les pollinisateurs (abeilles et syrphes), une évaluation de 3 ans n'a observé aucune différence de l'abondance et de richesses spécifiques des pollinisateurs entre des **vergers conduits en PFI** ("reduced-risk pesticide program") et en **conventionnelle**, malgré une réduction de 89.8% de l'impact environnementale des pesticides en production intégrée, calculée avec l'EIQ (Environmental Impact Quotient) (Joshi et al. 2020).

4.1.2. Les effets des fongicides en arboriculture sur les invertébrés

Certains fongicides d'origine minérale utilisés en arboriculture contiennent du cuivre. Or l'accumulation de cuivre issu de fongicides cuivrés dans les sols des vergers impacte négativement les Vers de Terre qui sont moins nombreux et qui évitent les vergers pollués au cuivre à partir de 4-34 mg/kg de sol (Van Zwieten et al. 2004)). Cette observation complète celle de (Paoletti et al. 1998) qui notent que l'abondance et la biomasse des vers de terre sont impactée par l'apport de cuivre et le travail du sol dans les vergers. L'**utilisation de fongicides minéraux** en arboriculture biologique impactent aussi les hyménoptères parasitoïdes qui semblent moins abondants que dans les vergers en conventionnel (Sauphanor et al. 2020).

4.1.3. Les effets de la gestion parcellaire en arboriculture sur la biodiversité

En arboriculture, le nombre de passages d'engins agricoles dans les parcelles peut être très élevé avec les traitements (35.9 traitements par an en moyenne), les tailles, la gestion de l'enherbement et la récolte (Agreste 2021). La fréquence de la gestion mécanique de l'enherbement impacte négativement les carabes carnivores dans les vergers (Wang et al. 2022).



Figure 9 : Photographie de plusieurs espèces de coccinelles : en haut *Propylea quatuordecimpunctata*, en bas à gauche *Harmonia axyridis* et en bas à droite *Chilocorus renipustulatus*

(Source : Photographie personnelle à la loupe binoculaire (grossissement x60))



Figure 10 : Photographie de plusieurs espèces d'hyménoptères parasitoïdes

(Source : Photographie personnelle à la loupe binoculaire (grossissement x80))



Figure 11 : Photographie de plusieurs espèces de carabes

(Source : Photographie personnelle à la loupe binoculaire (grossissement x40))

4.2. Les impacts de la simplification du paysage agricole sur la biodiversité

L'intensification de l'agriculture a amené à une simplification et une standardisation à de nombreux niveaux de l'agriculture dont l'échelle paysagère et parcellaire. Or, la structure d'un paysage agricole est un facteur majeur de l'état de la biodiversité. Ainsi, des structures semi-naturels comme les bosquets, haies, bandes enherbées sont autant d'habitats favorables à une biodiversité riche (INRAE 2019).

4.2.1. La place des éléments semi-naturels dans les agroécosystèmes

Les éléments semi-naturels (ou ESN) sont des unités non cultivées du paysage (haies, bois, bandes enherbées, prairies...) avec un minimum de perturbations humaines pour garantir la stabilité et la pérennité de ces éléments (taille des haies, pâturage des prairies, ...) et bloquer la succession écologique (Tarjuelo et al. 2020) ; Bota-Phytoso-flo 2015).

Ces éléments offrent un habitat pérenne et des ressources alimentaires variées à la biodiversité. L'absence ou le faible nombre de traitements chimiques dans ces espaces favorisent l'installation durable d'organismes vivants qui y trouvent refuge (Maalouly et al. 2013). Ainsi, il est admis que la présence et l'augmentation de la part d'éléments semi-naturels favorise la biodiversité dans un paysage (Barrier 2016 ; (Wang et al. 2022).

4.2.2. Les effets du contexte paysager sur la biodiversité

La complexité d'un paysage peut se définir succinctement comme le pourcentage d'ESN dans un paysage (Wang et al. 2022). Mais pour certains chercheurs, le terme est caractérisé non seulement par la proportion de surfaces agricoles et non agricoles mais aussi par leur agencement spatial, leur connectivité et leur composition (Barrier 2016). Ainsi, au-delà de la présence d'ESN dans le paysage, c'est leur connectivité et leur lien avec les autres types d'éléments paysagers qui influent sur la présence d'une biodiversité importante. Ce manque de connectivité entre les ESN fragmente l'habitat des organismes et isole des populations menaçant les espèces (Bailey et al. 2010).

De nombreuses hypothèses de l'effet des paysages (composition et organisation principalement) sur la biodiversité ont été faites ; le paysage pourrait modérer les schémas de biodiversité, les dynamiques de populations, la sélection de caractères fonctionnels et la conservation de la biodiversité (Tscharntke et al. 2012).

4.2.3. Les effets du contexte paysager des vergers sur la biodiversité

Les ESN ont été largement étudiés et semblent favoriser la présence d'auxiliaires dans les vergers (Debras et al. 2008), pour les araignées dans la strate arborée (Roince 2014), pour les araignées de la strate herbacée (Wang et al. 2022) et pour les pollinisateurs (Martínez-Sastre, Miñarro, et García 2020). Ils sont donc un pilier important pour conserver des populations d'auxiliaires et contrôler les pullulations de ravageurs ; c'est ce qu'on appelle le biocontrôle par conservation, concevoir un agrosystème favorable à l'installation et la conservation d'auxiliaires proches des cultures.

Par exemple, une étude sur le parasitisme des larves du carpocapse du pommier (*Cydia pomonella*) dans les vergers a montré que la composition de la communauté des parasitoïdes dépendait principalement de la présence locale de haies (Maalouly et al. 2013). La richesse spécifique des hyménoptères parasitoïdes semble être davantage influencée par la proximité d'ESN que par la toxicité des pesticides qui impacte leur abondance (Mates, Perfecto, et Badgley 2012). Parallèlement, il a été observé une influence constante du voisinage des haies sur la distribution spatiale des larves de carpocapse dans les vergers de pommiers ; les pommiers les plus proches des haies ont moins de larves de carpocapse (Ricci et al. 2011).

La diversité végétale extra et intra-verger semble déterminer l'abondance en insectes dans le verger (Szentkirályi et Kozár 1991). Les espèces prédatrices, souvent auxiliaires des cultures, comme les carabes montrent une plus grande dépendance aux structures paysagères (bandes enherbées) que les espèces phytophages (Woodcock et al. 2010).

L'effet des bandes fleuries sur la présence des auxiliaires a été étudié à de nombreuses reprises et dans sa méta-analyse, Judt et al. 2023 conclue que les bandes fleuries favorisent significativement la présence des auxiliaires. Néanmoins, le lien entre une augmentation des auxiliaires et une augmentation du biocontrôle des ravageurs du pommier n'est pas systématique et certaines études ne montrent pas une amélioration du biocontrôle malgré des bandes fleuries favorisant les auxiliaires (Campbell et al. 2017) (Laffon et al. 2024) tandis que d'autres observent une diminution des dégâts causés par le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea*) sur la récolte de pomme (Jacobsen, Sørensen, et Sigsgaard 2022; Cahenzli et al. 2019). La lutte biologique des ravageurs par ces auxiliaires reste donc variable et semble dépendre d'autres facteurs comme la compétition entre les ressources dans la bande fleurie et dans le verger (Campbell et al. 2017) et la prédation entre auxiliaires (Hindayana et al. 2001) limitant le transfert des auxiliaires vers les ravageurs du pommier (S. S. Simon, Marliac, et Capowiez 2015).

Le verger a lui aussi une attractivité dans le paysage : les environs d'un verger présentent une richesse spécifique plus importantes pour divers taxons (oiseaux, coléoptères, lépidoptères, hyménoptères, gastéropodes) (Horak et al. 2013). Les vergers et les ESN comme les bois et haies jouent un rôle complémentaire dans l'offre de ressources pour les pollinisateurs sauvages (abeilles sauvages et syrphes) (Eeraerts et al. 2021).

Dans des vergers de cerise en conventionnel, ((Eeraerts 2023)) a étudié l'effet de la part d'ESN dans un rayon de 250m et 1km autour des vergers sur la pollinisation et la présence de pollinisateurs sauvages (abeilles solitaires et bourdons) ; la conclusion est qu'un seuil de 15% d'ESN minimum dans un rayon de 250m autour des vergers permet une pollinisation adéquate des cerisiers par les pollinisateurs sauvages. D'après ((Zhang et al. 2024)), maintenir entre 30-40% de surfaces non cultivées favoriserait la stabilité des chaînes alimentaires, d'après l'analyse du contexte paysager et des communautés d'arthropodes épigées dans une vallée chinoise.

Ainsi, le contexte paysager avec les ESN semble impacter positivement la richesse spécifique et l'abondance de taxons divers dans les vergers, à des échelles différentes en fonction des organismes. Parmi eux, on retrouve des auxiliaires (oiseaux, parasitoïdes, syrphes, carabes, ...) et des pollinisateurs, eux aussi favorisés par les ESN. Néanmoins, le lien entre la présence d'ESN et un biocontrôle des ravageurs du pommier par les auxiliaires n'est pas constant et difficile à interpréter (INRAE 2018).

4.3. Des effets des pratiques culturelles et du contexte paysager différents en fonction des modes de vie des organismes

Nous avons vu que l'intensification et la simplification agricoles ont des impacts négatifs sur la biodiversité. Néanmoins, les parts de leurs impacts sur la biodiversité diffèrent selon les organismes. En effet, chaque espèce ne réagit pas à la même échelle au contexte paysager autour des vergers : les oiseaux sont sensibles à l'effet du paysage à une plus grande échelle (de l'ordre du kilomètre) tandis que les invertébrés répondent à des échelles plus petites (de l'ordre de la centaine de mètre (Horak et al. 2013; Bailey et al. 2010).

Une distinction simple peut être faite entre les espèces dites mobiles (capacité de déplacement à grande échelle, exemple : oiseaux, invertébrés volants) et les espèces dites peu mobiles ou sessiles (capacité réduite de déplacement, exemple : plantes, gastéropodes, invertébrés inféodés au sol) (INRAE 2008).

Les espèces **peu mobiles** sont davantage sensibles aux conditions du milieu et des pratiques agricoles de la parcelle ; l'intensification des cultures (apports importants d'engrais, produits phytosanitaires et une mécanisation fréquente) aura une part plus importante que la simplification dans l'état de cette biodiversité. A l'inverse, la simplification du paysage aura une part plus importante sur les espèces **mobiles**. En effet, leur mobilité permet une compensation des effets négatifs de certaines pratiques agricoles par recolonisation de la parcelle à partir du pool de l'espèce à l'échelle paysagère (INRA 2008).

Les études sur les effets de l'agriculture (gestion du paysage, applications de pesticides et de fertilisants, ...) sont très nombreuses mais les conclusions sont rarement génériques ce qui limite l'efficacité des actions publiques et la création d'un plan opérationnelle (INRA 2008).

C – PROBLEMATIQUE

Jusqu'ici, nous avons appris que les pratiques culturales et le contexte paysager pouvaient influencer la biodiversité dans les vergers de pommiers, avec des différences entre les espèces mobiles et immobiles. La conclusion étant que des pratiques culturales moins intensives dans un paysage complexe sont un contexte favorisant la biodiversité.

Cependant l'influence de ces facteurs sur la biodiversité est difficile à généraliser. Aussi, au-delà des comparaisons extrêmes "BIO vs conventionnel", qu'en est-il par exemple de l'impact de la PFI sur la biodiversité ? Et comment le contexte paysager modère les effets négatifs des conduites sur la biodiversité ? Ainsi, nous pouvons nous demander :

Quels sont les effets des pratiques culturales et du contexte paysager sur la biodiversité des vergers expérimentaux de l'INRAE – Angers ?

Pour répondre à cette problématique, nous devons donc évaluer la biodiversité dans les vergers, les pratiques culturales de chaque verger, le contexte paysager et analyser ces données pour observer si les pratiques et le contexte environnant ont un impact sur la biodiversité dans les vergers étudiés.

D – HYPOTHESES DE TRAVAIL

D'après l'état de l'art sur l'impact des pratiques culturales arboricoles et du contexte paysager, nous pouvons formuler des **hypothèses de résultats**.

L'intensité d'utilisation de produits phytosanitaires impactera négativement l'abondance générale des invertébrés. Les parcelles les moins traitées présenteront la plus grande abondance d'invertébrés. La présence plus importante d'ESN dans le paysage autour du verger favorisera une richesse spécifique plus importante.

Avec une approche fonctionnelle, les prédateurs généralistes comme les carabes et les araignées de la strate herbacée et arborée et les prédateurs spécialistes comme les hyménoptères parasitoïdes seront impactés négativement par une intensification du verger. La présence importante d'ESN dans un périmètre de l'ordre de la centaine de mètres autour des vergers et la diversité floristique intra-parcelle favorisera la richesse spécifique des prédateurs dans les strates arborées et herbacées et les pollinisateurs.

Une réserve est cependant faite vis-à-vis de la proximité entre les vergers expérimentaux étudiés, peu représentatifs en surface et en disposition avec des vergers de productions. Ceci pourrait se traduire par une homogénéité de la biodiversité inter-vergers avec des différences de richesse et d'abondance taxonomiques peu ou pas significatives.

E – MATERIELS & METHODES

1. Contexte générale

1.1. Description des sites de l'INRAE – Angers (49)

1.1.1. Description du site de Bois l'Abbé

Le site de Bois l'Abbé est situé dans la commune de Beaucouzé, à l'ouest de la ville d'Angers. Le site comprend 48 ha de Surface Agricole Utile (SAU) sur laquelle est menée la culture de pommiers et de rosiers principalement. Les rotations culturales des vergers incluent des années d'homogénéisation avec des grandes cultures (blé et maïs) et des prairies temporaires gérées par un agriculteur. En Figure 12, une carte du site de Bois l'Abbé avec les parcelles étudiées, leur nom et leur conduite.

1.1.2. Description du site de la Rétuzière

Le site de la Rétuzière est situé dans la commune de Champigné, à environ 26 km du site de Bois l'Abbé. Le site comprend 41ha de SAU où est menée la culture de différentes espèces de fruitiers (pommiers, poiriers, cerisier, abricotier, pêcher). Des cultures céréalières et des prairies temporaires sont incluses dans les rotations culturales des vergers et sont gérées par un agriculteur. En Figure 13, une carte du site de la Rétuzière avec les parcelles étudiées, leur nom et leur conduite.

1.2. Présentation des vergers étudiés

1.2.1. Choix de la sélection des vergers étudiés

Dans le cadre du WP 2 – Levier Plantes de service, 4 vergers expérimentaux de chaque site ont été sélectionnés pour y suivre et évaluer la biodiversité. Les vergers présentent des conduites et des contextes paysagers différents. Les conduites sont classées en 3 catégories : conventionnelle, PFI et biologique. Les parcelles en conventionnel sont des parcelles d'inscription variétale. Les parcelles en biologique ont la certification Arboriculture Biologique et respectent les normes de ce label. Les conduites des parcelles en PFI varient d'une année à l'autre en fonction des expérimentations qui y sont faites. Les parcelles P02 et R23 sont organisées en blocs expérimentaux séparés par des haies. Les principales caractéristiques de chaque verger sont résumées dans le Tableau 2.

1.2.2. Contexte pédoclimatique des sites Bois l'Abbé et la Rétuzière

Les 2 sites sont situés dans le département du Maine-et-Loire qui profite d'un climat océanique caractérisé par les températures douces l'hiver sans excès l'été et des pluies régulières venues de l'Atlantique. (« Le climat en France métropolitaine | Météo-France », s. d.). Sur le site de Bois l'Abbé, le sol est limono-sableux issu de schiste gréseux et peu acide et sur le site de la Rétuzière, le sol est principalement limono-sableux issu de schiste altéré (geoportail.fr).

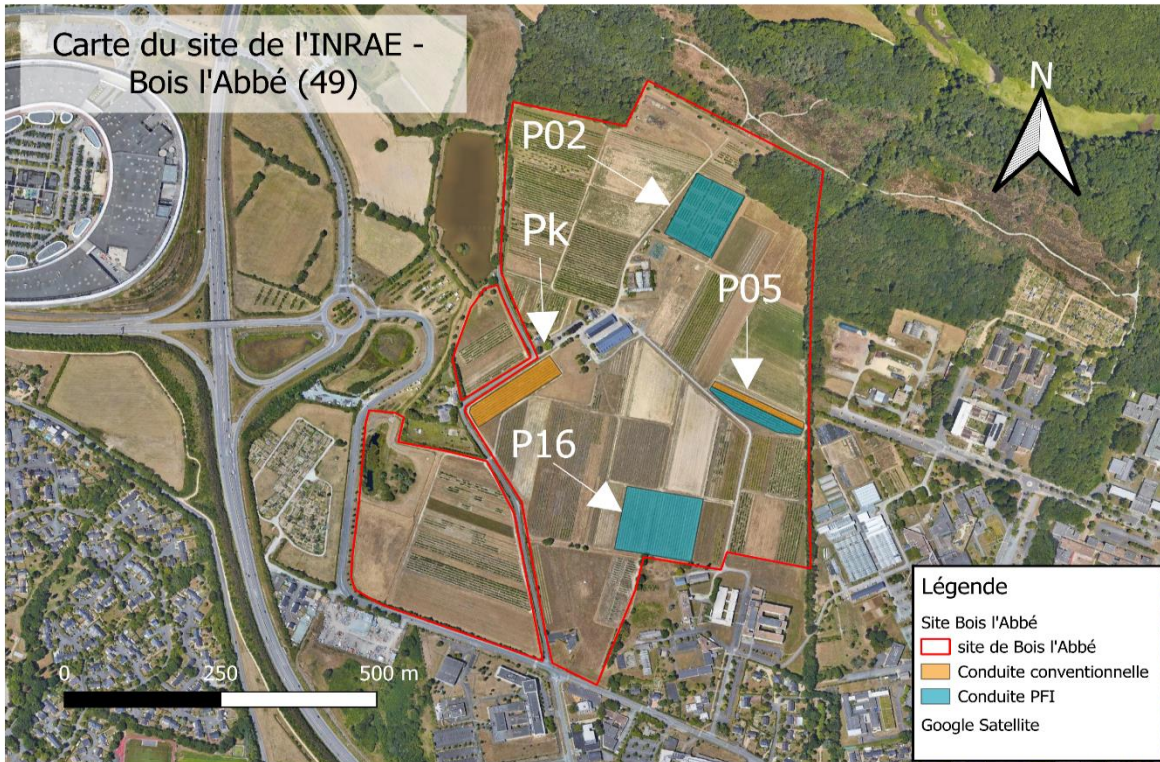


Figure 12 : Carte du site de l'INRAE - Bois l'Abbé (49) et des vergers étudiés en fonction de leur conduite (fait sur le logiciel QGIS)

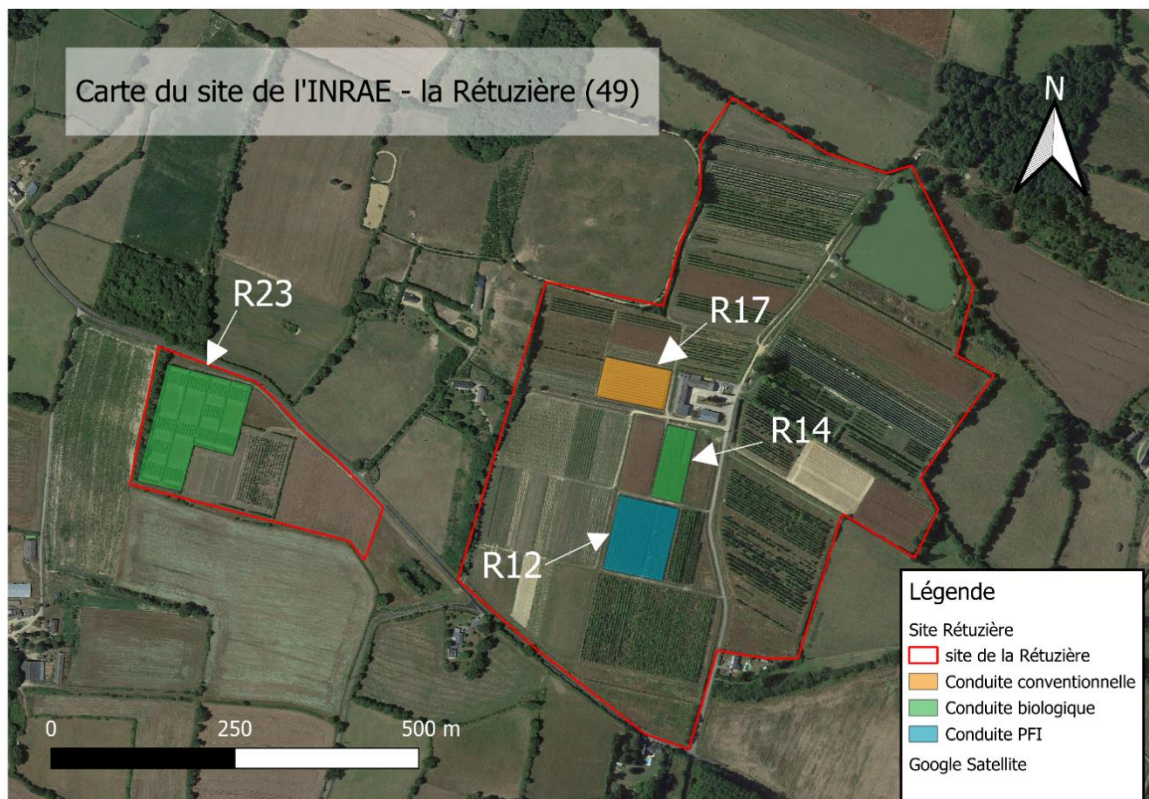


Figure 13 : Carte du site de l'INRAE - Rétuzière (49) et des vergers étudiés en fonction de leur conduite (fait sur le logiciel QGIS)

2. Relevés de biodiversité

2.1. Choix des indicateurs

Une évaluation de la biodiversité ne peut être exhaustive techniquement. Malgré les contraintes techniques, l'objectif de cette mission de faire une évaluation la plus globale possible de la biodiversité associée.

Le choix s'est porté sur l'étude de la diversité des invertébrés des vergers. Ce taxon figure parmi les plus impactés par l'intensification et la simplification des agrosystèmes. La majorité des ravageurs des vergers étant des invertébrés, ce taxon subit donc des traitements phytosanitaires spécifiques. Leurs zones de déplacements sont de l'ordre de la centaine de mètres pour beaucoup d'espèces (Eeraerts 2023). Ainsi, une population d'invertébrés est davantage inféodée à une parcelle que d'autres taxons comme les oiseaux qui peuvent se déplacer à des échelles inter-parcellaires fréquemment. Enfin, il existe de nombreuses méthodes pour relever la diversité des arthropodes, souvent facile à réaliser sans un besoin d'équipements coûteux.

Un deuxième choix de taxon à étudier est celui des plantes vasculaires. En effet, la diversité des plantes vasculaires d'une parcelle dépend, entre autres, des pratiques culturales et du contexte paysager (Fried et al. 2019). Certaines espèces végétales ont des ressources alimentaires pour les invertébrés et impactent ainsi la diversité des invertébrés dans un verger (Fried et al. 2019).

2.2. Protocoles des relevés de biodiversité

Le verger est un agrosystème complexe que nous pouvons modéliser par un milieu herbacé (la surface du sol et l'enherbement inter- et intra-rang), le milieu arboré (les branches et la végétation des pommiers) et le milieu aérien représenté par les espaces entre les rangées d'arbres (Figure 14). Dans chaque milieu, vont se développer des invertébrés différents, ce qui demande une méthode de relevé adaptée à chaque cas. Tous les relevés ont été faits sur les mêmes rangs. Le détail des rangs choisis pour les relevés est renseigné dans l'Annexe 1.

2.2.1. Milieu herbacé : Protocole du piège Baber

Pour le milieu herbacé, un protocole du piège Barber a été effectué (Auclerc, Blanchart, et Vincent 2019). 3 pots en plastique de 10cm de largeur, remplis à moitié d'eau ont été enterrés et placés sur le rang des pommiers pour chaque parcelle étudiée (Figure 15 et Figure 17). Les pièges ont été laissés 1 semaine avant d'être récupérés et les invertébrés piégés ont été stockés dans des flacons d'alcool à 70° pour des analyses ultérieures. A Bois l'Abbé, les pots ont été mis le 25/04/2024 et récupérés le 02/05/2024. A la Rétuzière, les pots ont été mis le 23/05/2024 et récupérés le 30/05/2024. Ces dates correspondent à la fin de la floraison des pommiers. Le contenu d'un piège Barber représente un échantillon.

2.2.2. Milieu aérien : Protocole de l'assiette jaune

Pour le milieu arboré, un protocole de l'assiette jaune consiste à être effectué (« La cuvette jaune, le piège incontournable pour détecter l'arrivée des ravageurs du colza » 2019). 3 assiettes jaunes, bols de 30 cm de diamètre en plastique jaune remplis à moitié d'eau, par vergers ont été placés dans le rang de pommiers à 1 mètre de haut, aux mêmes endroits que les pièges Barber pendant une durée de 1 semaine (Figure 15, Figure 16 et Figure 17). Les invertébrés piégés sont récupérés et stockés dans des flacons d'alcool à 70°. A Bois l'Abbé, les pots ont été mis le 25/04/2024 et récupérés le 02/05/2024. A la Rétuzière, les pots ont été mis le 16/05/2024 et récupérés le 23/05/2024. Ces dates correspondent la fin de la floraison des pommiers. Le contenu d'une assiette jaune représente un échantillon.

Site	Parcelles	Conduite	Présence haie	Surface (ha)
Bois l'Abbé	P02	PFI	Oui	0.452
Bois l'Abbé	P05	PFI + conventionnel	Non	0.526
Bois l'Abbé	P16	PFI	Non	1.294
Bois l'Abbé	Pk	Conventionnel	Non	0.584
La Rétuzière	R12	PFI	Non	0.836
La Rétuzière	R14	Biologique	Non	0.397
La Rétuzière	R17	Conventionnel	Non	0.504
La Rétuzière	R23	Biologique	Oui	0.459

Tableau 2 : Principales caractéristiques des vergers étudiés

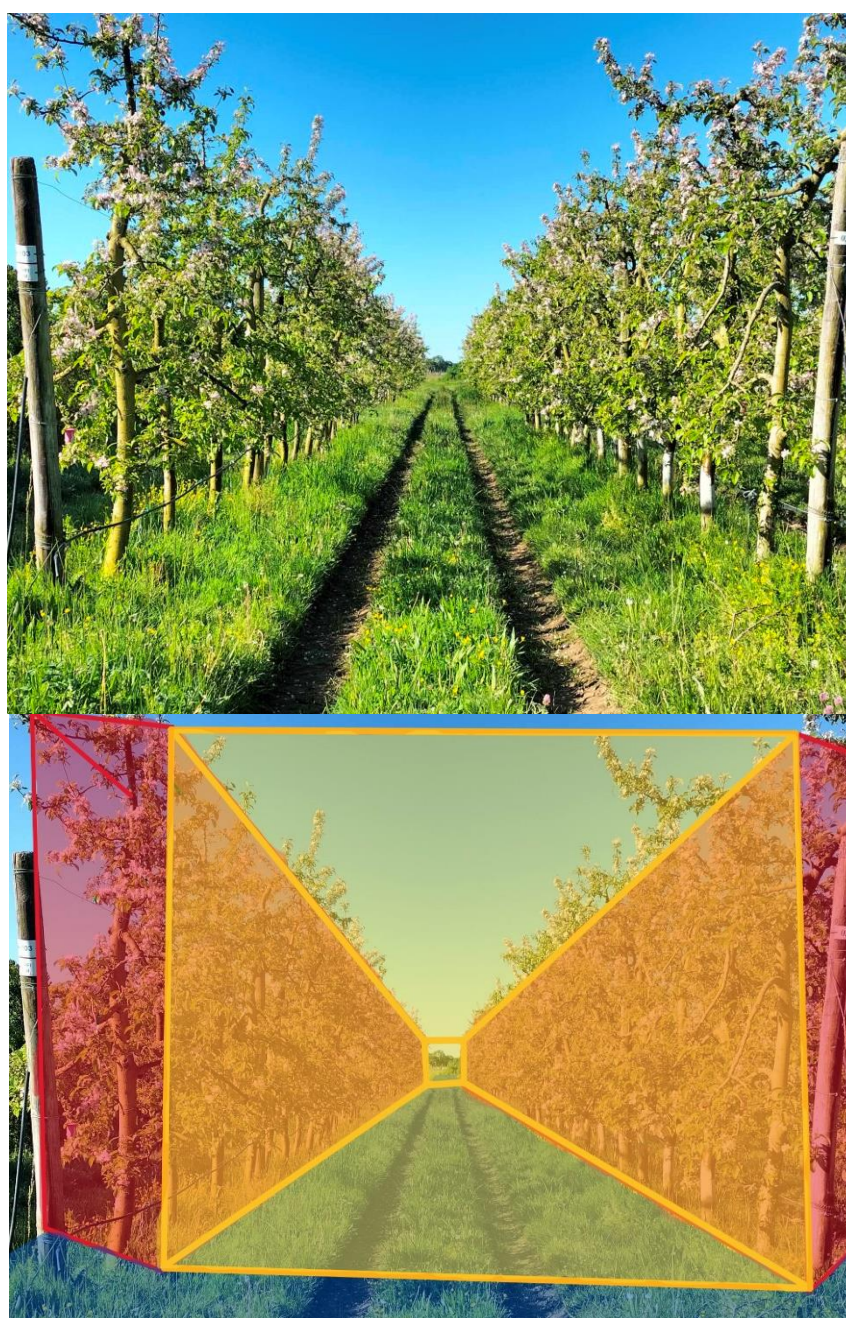


Figure 14 : Schéma des différents milieux d'un verger

(Légende : milieu herbacée (en bleu), milieu arborée (en rouge) et milieu aérien (en jaune))

2.2.3. Milieu arboré : Protocole du parapluie japonais

Pour le milieu arboré, un protocole des parapluies japonais a été effectué. Il consiste dans un drap blanc tendu, disposé sous les branches des arbres (« Parapluie japonais (nappe de battage) », s. d.). A l'aide d'un bâton, on bâte le feuillage et les branches des arbres pour y faire tomber les invertébrés sur le drap. Les invertébrés tombés sur le drap sont récupérés avec un aspirateur à bouche et stockés dans des flacons d'alcool à 70°. Un battage correspond au battage des branches de 7 arbres de chaque côté du rang. 3 battages ont été réalisés par parcelle en suivant le schéma de relevé de la Figure 17. A Bois l'Abbé, ce protocole a été fait le 05/07/2024 de 14h à 17h. A la Rétuzière, ce protocole a été fait le 24/07/2024 de 13h à 16h. Un échantillon représente l'ensemble des invertébrés récupérés sur les 7 arbres d'un rang.

2.2.4. Relevé floristique des plantes vasculaires

Le relevé floristique a consisté dans la notation de la présence des espèces floristiques dans l'inter-rang des vergers avec un quadrat de 1m² à 3 endroits (Figure 17). Le relevé a été fait le 26/06/2024. L'identification s'est appuyée sur des flores (CHEVALIER « Clé de détermination des fabacées », CHEVALIER « Clé de détermination des poacées (graminées) prairiales et adventices des cultures » ; Delachaux et Niestlé 1986 « Guide des fleurs sauvages ») et l'expertise botanique de Catherine BERNARD. La richesse spécifique par quadrat a été calculée. Les espèces sont classées par famille et par leurs capacités à proposer du nectar aux invertébrés.

2.3. **Protocole d'identification des invertébrés**

Les échantillons d'invertébrés ont été analysés avec une loupe binoculaire. Pour chaque échantillon, les variables recueillies sont l'abondance et la richesse spécifique des invertébrés.

2.3.1. Systèmes de classification

2.3.1.1. Classification basée sur la classification phylogénétique

La classification phylogénétique s'est basée sur une version simplifiée de la phylogénie des invertébrés avec comme taxon le plus précis la super-famille ou le sous-ordre et s'inspire des classifications d'ouvrages entomologiques (AgriProduction 2022 « Guide pratique des insectes et autres invertébrés des champs » ; CTIFL 2012 « Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière »). Le Tableau 3 représente le tableau de classification utilisé.

2.3.1.2. Classification fonctionnelle

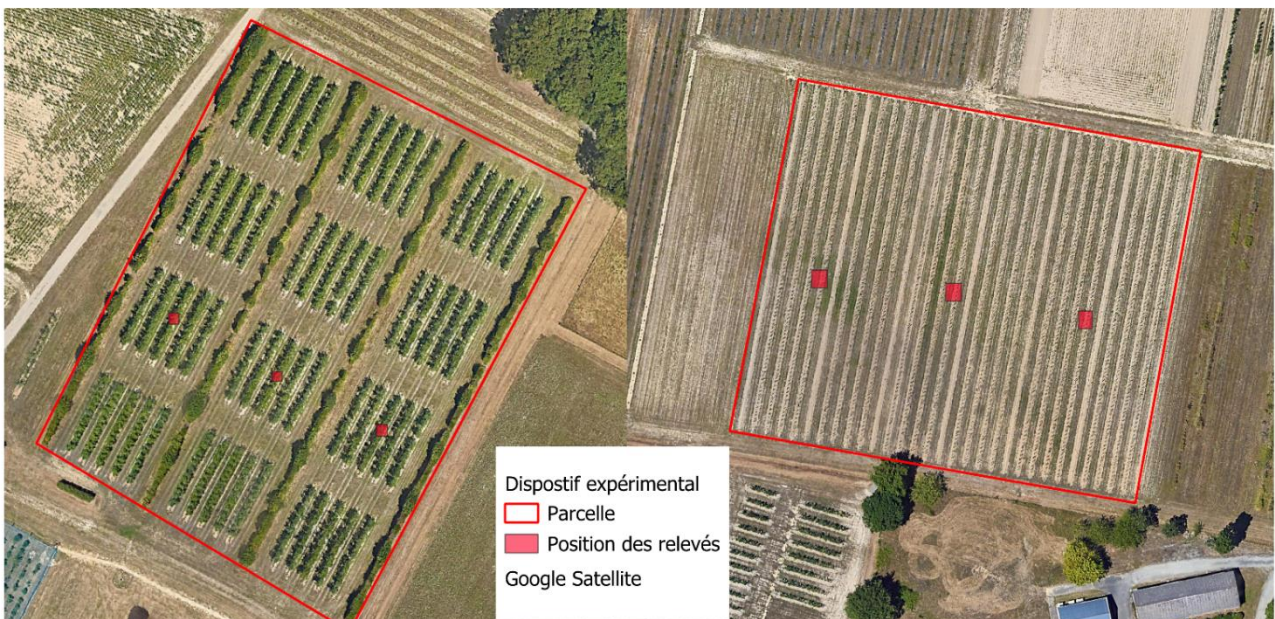
La classification fonctionnelle s'est basée sur une approche fonctionnelle des ordres phylogénétiques à partir d'ouvrages entomologique (AgriProduction 2022 « Guide pratique des insectes et autres invertébrés des champs » ; CTIFL 2012 « Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière »). Les fonctions sont les suivantes : Neutre, Phytophage, Prédateur spécialiste, Prédateur généraliste et Pollinisateur. Ces fonctions ne se rattachent pas spécifiquement à la culture du pommier mais se veulent plus généralistes. L'attribution des fonctions des taxons est représentée sur le Tableau 3.



Figure 15 : photographie personnelle d'une Assiette Jaune et d'un pot Barber (en bas à droite) dans l'intra-rang.



Figure 16 : photographie personnelle de l'emplacement "type" d'une Assiette Jaune dans le rang d'un verger



Exemples de la position des relevés de biodiversité dans les vergers (piège Barber, Assiette jaune, Parapluie japonais, quadrat pour les relevés floristiques) : à gauche, P02 comme exemple de verger en blocs expérimentaux et à droite, P16 comme exemple de verger classique

Figure 17 : Cartes de deux types de vergers : en blocs expérimentales (parcelle P02) à gauche et classique à droite (parcelle P16) et de la disposition des relevés (faites avec le logiciel QGIS)

2.3.2. Méthode d'identification morpho-espèce

La méthode d'identification morpho-espèce consiste dans la comparaison d'individus d'un même ordre entre eux. Si la différence morphologique semble suffisante, on postule qu'il s'agit d'espèces différentes. Cette méthode ne permet pas d'obtenir les noms des espèces mais uniquement leur nombre et l'abondance d'individus de chaque espèce. Les comparaisons se sont appuyées sur des clés de détermination et sur des principes de reconnaissance entomologique (la description des nervures allaires, la forme, la taille ou la couleur de certaines parties anatomiques) (Francois, s. d.). Cette méthode permet d'obtenir l'abondance et la richesse spécifique des échantillons.

3. Modélisation du contexte paysager

3.1. Utilisation du logiciel de Système d'Information Géographique QGIS

La modélisation du contexte paysager a été réalisé grâce au logiciel QGIS 3.34. La carte utilisée est issue de GoogleMaps en projection EPSG :2154 / Lambert-93.

3.2. Protocole de modélisation

Le contexte paysager de chaque verger a été modélisé dans une zone circulaire de 150 mètres de rayon autour d'un point central au milieu de la parcelle. Ce rayon a été choisi car il semble représenter la surface moyenne d'exploration des insectes (Horak et al. 2013; Bailey et al. 2010).

3.3. Choix de la classification des éléments paysagers

Chaque élément paysager a été délimité et classé dans une catégorie (en Figure 18, un exemple de verger modélisé et de la liste des catégories choisis). La classification s'est basée sur la littérature scientifique (Zhang et al. 2024; Eeraerts et al. 2021) et sur l'observation in-situ des éléments paysagers autour de chaque verger. Les catégories et leur description sont résumées dans le Tableau 4. Les surfaces ont été calculées (en hectare) pour chaque catégorie. Un pourcentage d'ESN a pu être calculé (la somme des surfaces des catégories d'éléments paysagers considérés comme ESN) d'après le Tableau 4.

4. Les Itinéraires Techniques Culturels des vergers étudiés

Les ITK des vergers des sites expérimentaux de l'INRAE d'Angers sont répertoriés sur le serveur de l'Unité Expérimentale Horticole et en libre accès par le personnel.

4.1. Les informations recueillies des ITK

Plusieurs indicateurs agronomiques impactant la biodiversité ont été collectés :

- L'indice de Fréquence Traitement décliné en 5 classes : IFT totale, IFT insecticide, IFT fongicide, IFT SDP et IFT autre
- La fertilisation : le dosage (kgN/ha), le nature (chimique ou organique)
- La fréquence de passage des outils mécaniques de travail du sol par an.

4.2. Les années choisies pour l'analyse de l'ITK

Le stage prenant fin avant la fin de l'année culturale 2024, l'ITK 2024 est incomplet. Le choix a donc été de calculer sur les 3 dernières années (2023/2022/2021), la moyenne de chaque indicateur pour obtenir un ITK moyen sur 3 ans pour chaque verger.

TAXON					
Ordre	Super-Famille/Sous ordre	Nom vernaculaire	Code	Stade	Fonction
Coléoptère	Cantharidae	Cantharide	Cthrd		PredGe
	Carabidae	Carabe	Crb		PredGe
	Curculionidae	Charançon	Chrc		Phytophage
	Coccinellidae	Coccinelle	Coccl	larve	PredSpe
			Cocca	adulte	PredSpe
	Staphylinidae	Staphyllin	StphL	larve	PredGe
			StphA	adulte	PredGe
	Scarabaeidae	Scarabée, Cétoine, etc	Scab		Neutre
Autres	Autres coléoptères	ClptAt		Neutre	
Hyménoptère	Formicidae	Fourmi	Frm		Neutre
	Apoidea	Abeille	Ab		Pollini
	Vespidae	Guêpe sociale	Gp		PredGe
	Térébrants (Ichneumonoidea/Chalcidoidea)	Hyménoptères parasitoïdes	HyPara		PredSpe
	Symphyta	Symphytes	Spht		Phytophage
Diptère	Syrphidae	Syrphe	Syrp		Pollini
	Cecidomyiidae	Cécidomyies	Cec		Neutre
	Brachycera	Mouche	Mch		Neutre
	Autres	Tipules, taon, ...	DipAt		Neutre
Lépidoptère	Rhopalocera	Papillon du jour	PapJ		Phytophage
	Heterocera	Papillon de nuit	PapN		Phytophage
	Chenille		Chn	larve	Phytophage
Hémiptère	Hétéroptère	Punaise	Pns		Phytophage
	Auchenorrhyncha	Cicadelle	Ccd		Phytophage
	Aphidoidea	Pucerons	Puc		Phytophage
	Psylloidea	Psylle	Psy		Phytophage
Thysanoptera		Thrips	Thr		Phytophage
Orthoptère		Sauterelle, criquet, grillons	Orth		Phytophage
Dermaptère	Forficulidae	Perce-oreille	Forf		PredGe
Aranea		Araignée	Argn		PredGe
Opilion			Opl		PredGe
Cloportes			Clpt		Neutre
Gastéropode					Phytophage

Tableau 3 : Tableau de classifications phylogénétique et fonctionnelle simplifiées des invertébrés présents dans un verger (PredGe : Prédateurs Généralistes, PredSpe : Prédateurs Spécialistes, Pollini : Pollinisateur)

5. Analyse des résultats

5.1. Logiciel d'analyse statistique

Les analyses statistiques des données et les modélisations ont été faites avec le logiciel de codage RStudio version 4.2.2. avec les packages : ggplot2, tidyverse, dplyr, MASS, lme4 et corrplot.

5.2. Modélisation de l'impact des pratiques culturales et du contexte paysager sur la biodiversité

5.2.1. Choix des variables explicatives

Les variables explicatives testées sont résumées sur le Tableau 5.

5.2.2. Modèles simples par GLMM

La modélisation s'est basée sur la méthode des modèles linéaires généralisés à effets mixtes ou GLMM avec 3 niveaux de hiérarchisation des données : 1 – les relevés de biodiversité (3 par parcelle), 2 - les parcelles (4 par sites) et 3 - les sites (2) considérés comme indépendant car distants de plusieurs kilomètres. Ces modèles incluent des effets aléatoires pour les parcelles et pour les sites. Les modèles ont une distribution binomiale négative, adaptée au comptage de petits échantillons avec une sur-dispersion (variance très supérieure à la moyenne).

Toutes les combinaisons des variables explicatives choisies ont été modélisées pour expliquer les variables de biodiversité (abondance ou richesse spécifique) pour chaque méthode de relevé et certaines fonctions écosystémiques. Les modèles ont ensuite été classés par le Critère d'Information d'Akaike corrigé ou AICc, adapté aux petits échantillons. Le meilleur modèle expliquant obtient l'AICc le plus faible.

5.2.3. Modèle complexe : BioSyScan

Une collaboration avec Christian Bockstaller et Bastien Dallaporta a permis l'utilisation de BioSyScan v.2.0, un modèle complexe prédictif des impacts des systèmes agricoles sur la biodiversité associée (planet-score-admin 2023). L'enjeu est de tester les prédictions du modèle BioSyScan version 3 en cours de publication avec les relevés sur le terrain.

Ce modèle reçoit en entrée 9 paramètres issus de l'ITK et du contexte paysager d'une parcelle : le taux de fertilisation (kgN/ha), le type de fertilisation, l'IFT, la fréquence de travail du sol, la profondeur maximale de travail du sol (en cm), la durée du couvert dans l'inter-rang (en mois), la part de la surface couverte de l'inter-rang, la diversité floristique de la couverture de l'inter-rang et le pourcentage d'Eléments Semi-Naturels dans la parcelle. Sur la base d'une large bibliographie, les impacts de chaque paramètre sont calculés à l'aide de fonctions d'appartenances et de pondérations associant la logique floue. En sortie, le modèle renvoie une note entre 0 et 100 de l'état de la biodiversité dans un agrosystème donné. En Figure 19, le modèle BioSyScan est représenté sous forme d'arbre hiérarchique. A partir des données des ITK moyen de 2021-2023 de chaque verger, le modèle BioSyScan a renvoyé une note entre 0 et 100 de l'état prédictif de la biodiversité dans ces vergers. Les résultats du modèle ont été testés, seules, par GLMM selon le même protocole que pour les modèles simples.

Elément paysager	Description	Code	ESN ?
Verger	Verger étudié	1	Non
Autre verger	Autre verger à côté du verger étudié	2	Non
Grandes cultures	Surface exploitée en grandes cultures (ici blé/maïs)	3	Non
Bâtiments	Construction humaine, abandonnée ou non	4	Non
Haie basse	Haies < 1m50 de hauteur	5	Oui
Haie moyenne	Haies comprises entre 1m50 et 3m de hauteur	6	Oui
Haie haute	Haies > 3m de hauteur	7	Oui
Bosquet	Bosquet	8	Oui
Arbre isolé	Arbres ou petits groupes d'arbres < 5 ne présentant pas de connectivité avec d'autres groupes d'arbres	9	Oui
Zone herbeuse	Surfaces enherbées non exploitées (ex : bords de routes, bords de parcelles, ...)	10	Oui
Prairie	Surfaces enherbées utilisées pour le foin / le pâturage	11	Oui
Culture horticole	Surface dédiée à la culture horticole des rosiers	12	Non
Culture myrtille	Surface dédiée à la culture des myrtilles	13	Non
Route/Chemin	Passage bitumé ou en terre pour les véhicules	14	Non
Bande fleurie	Surface semée de féverole	15	Oui

Tableau 4 : Tableau de classification des Eléments Paysagers

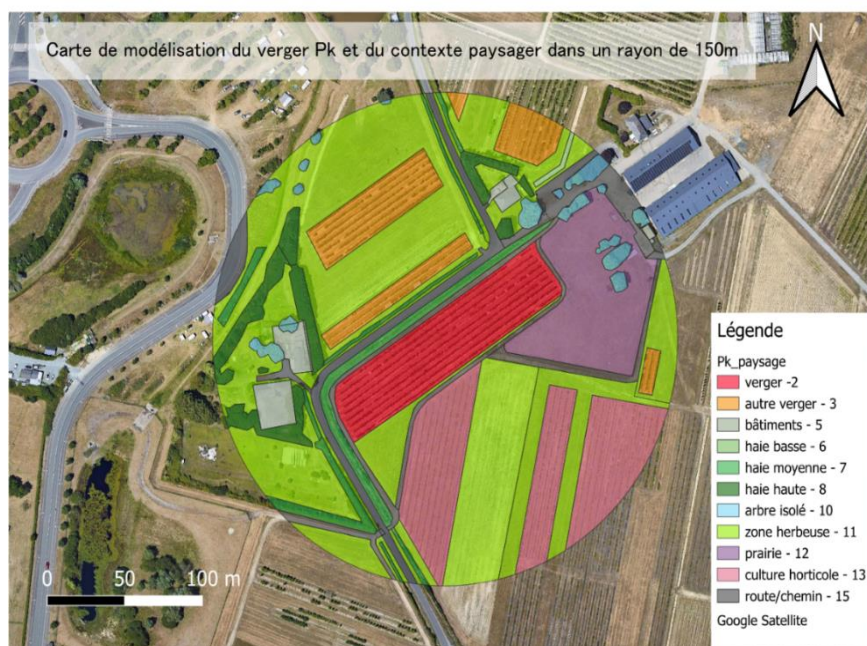


Figure 18 : exemple de carte modélisant le contexte paysager d'un verger (ici la parcelle Pk) dans un rayon de 150m autour du centre du verger (faite avec le logiciel QGIS)

Catégorie	Sous-catégorie	Variable explicative	Code	Unité
Pratiques culturales	Intensité de l'ITK	IFT totale	IFT_tot	/
		IFT insecticide	IFT_insect	/
		IFT fongicide	IFT_fongi	/
		Fertilisation azotée	Ferti_qtN	kgN/ha
		Fertilisation azotée d'origine organique	Ferti_org	%
		Fréquence de désherbage mécanique	Deshmeca_fre q	Nombre de désherbage mécanique/an
Paysage	Contexte paysager	Pourcentage d'ESN	X.ESN	%
		Surface herbacée (surface de prairie et de zones herbeuses)	Herbe	ha
		Surface de haie (surface de haies basses, haies moyennes, haies hautes)	Haie	ha
	Biodiversité floristique	Richesse spécifique des plantes dans l'inter-rang	Nfleur	/
		Nombre d'espèces nectarifères dans l'inter-rang	Mellif	/

Tableau 5 : tableau présentant les variables explicatives choisies pour les modèles simples, issues de l'ITK moyen entre 2021 et 2023 et de l'analyse paysagère dans un rayon de 150 m autour des vergers

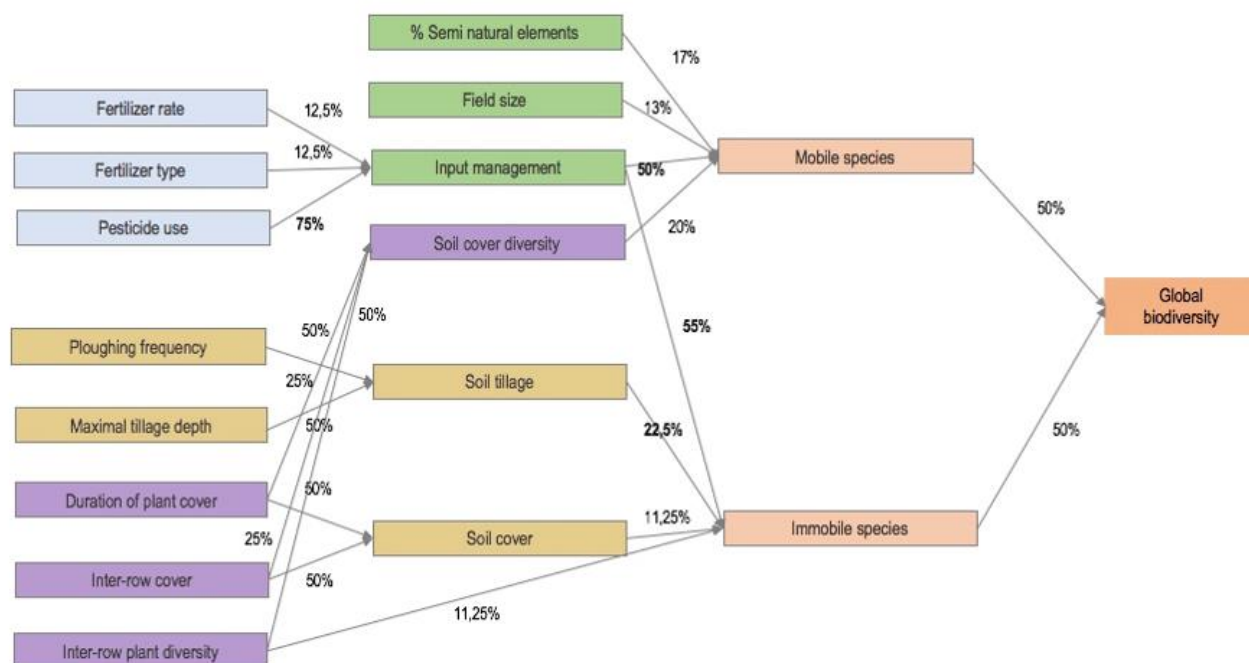


Figure 19 : schéma de l'arbre hiérarchique du modèle BioSyScan (à gauche : les variables d'entrées issues de l'ITK d'un verger, à droite : la variable de sortie, une note sur 100 de l'état de la biodiversité)

(Source : issu d'un document en cours de publication transmis par Christian Bockstaller et Bastien Dallaporta qui ont autorisé sa représentation dans ce rapport)

F - RESULTATS

1. Description statistique

1.1. Description de la biodiversité des invertébrés piégés

1.1.1. L'abondance totale

Au total, 4814 invertébrés ont été piégés, toutes méthodes de relevés confondues (dans les Assiettes Jaunes : 3051 invertébrés, dans les pièges Barber : 764 invertébrés et dans les Parapluies Japonais : 999 invertébrés). Sur la Figure 20, les abondances totales par méthode de relevé sont représentées pour chaque parcelle, regroupées par conduite.

1.1.2. La richesse spécifique

La richesse spécifique moyenne est de 37 espèces par échantillon dans les Assiettes Jaunes, 12 espèces par échantillon dans les pièges Barber et 20 espèces par échantillon avec les Parapluies Japonais. La Figure 21 représente les résultats des richesses spécifiques par méthode de relevés pour chaque parcelle, regroupées par conduite.

1.1.3. La biodiversité est-elle statistiquement différente entre les parcelles ? les conduites ? les sites ?

Pour chaque méthode de relevé, l'abondance totale et la richesse spécifique ont été testées par site, par conduite et par parcelle avec un test de Kruskal-Wallis (en Annexe 2, les résultats des tests). Un test post-Hoc avec une comparaison par paires de Dunn est réalisé si un test présente une p-value inférieure au seuil de 0.05.

Le facteur "conduite" : Le facteur "conduite" n'explique pas l'abondance totale et la richesse spécifique pour toutes les méthodes de relevés. Il n'y a pas de différences significatives d'abondance totale et de richesse spécifique entre les conduites.

Le facteur "site" : L'abondance totale pour chaque méthode de relevé est significativement différente entre les 2 sites. Il y a donc une différence significative d'abondance des invertébrés des milieux aériens, arborés et herbacés entre les 2 sites.

Le facteur "parcelle" : On observe des différences d'abondance et de richesse spécifique entre certaines parcelles. Les couples de parcelles significativement différentes sont précisés dans l'Annexe 2. Les couples de parcelles concernées ne sont pas sur les mêmes sites Il est donc difficile d'établir des conclusions sur ces différences.

1.2. Description des relevés floristiques

En moyenne, 11 ± 2 espèces de plantes sont présentes dans les quadrats. La Figure 22 représente la richesse spécifique moyenne des espèces nectarifères et non nectarifères par parcelle, regroupées par conduite.

1.2.1. La biodiversité floristique dans l'inter-rang est-elle statistiquement différente entre les parcelles ? les conduites ? les sites ?

Les richesses floristiques totales, des espèces nectarifères et non nectarifères ont été testées par parcelle, par site et par conduite avec un test de Kruskal-Wallis. Aucun test n'a été significatif. Il n'y a donc pas de différence significative de la richesse floristique totale, des espèces nectarifères et non nectarifères entre les parcelles, les conduites et les sites.

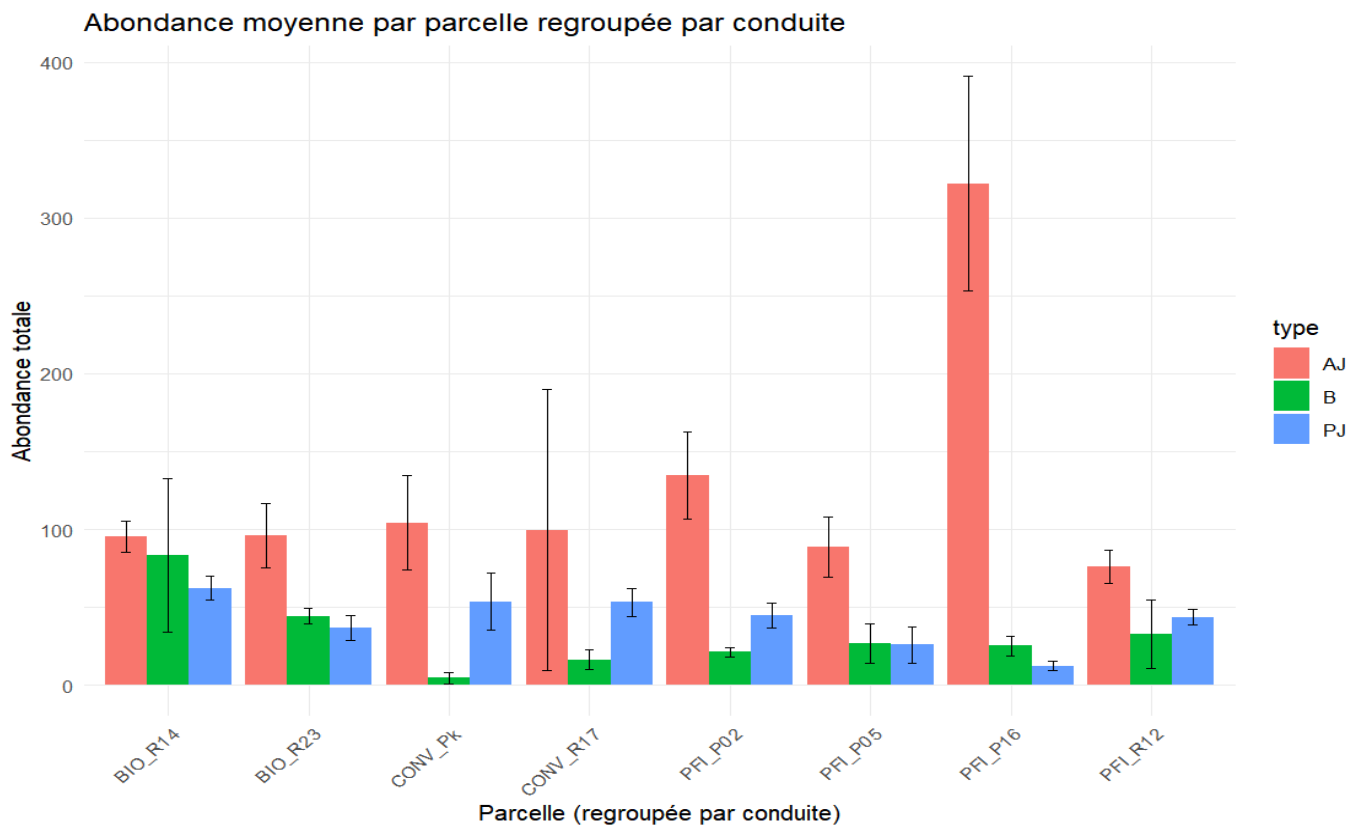


Figure 20 : Graphique en barres de l'abondance moyenne par relevé (rouge : Assiette Jaune, vert : piège Barber et bleu : Parapluie Japonais) pour chaque parcelle regroupée par conduite (de gauche à droite : BIO, CONV, PFI) avec en barres d'erreurs l'écart-type

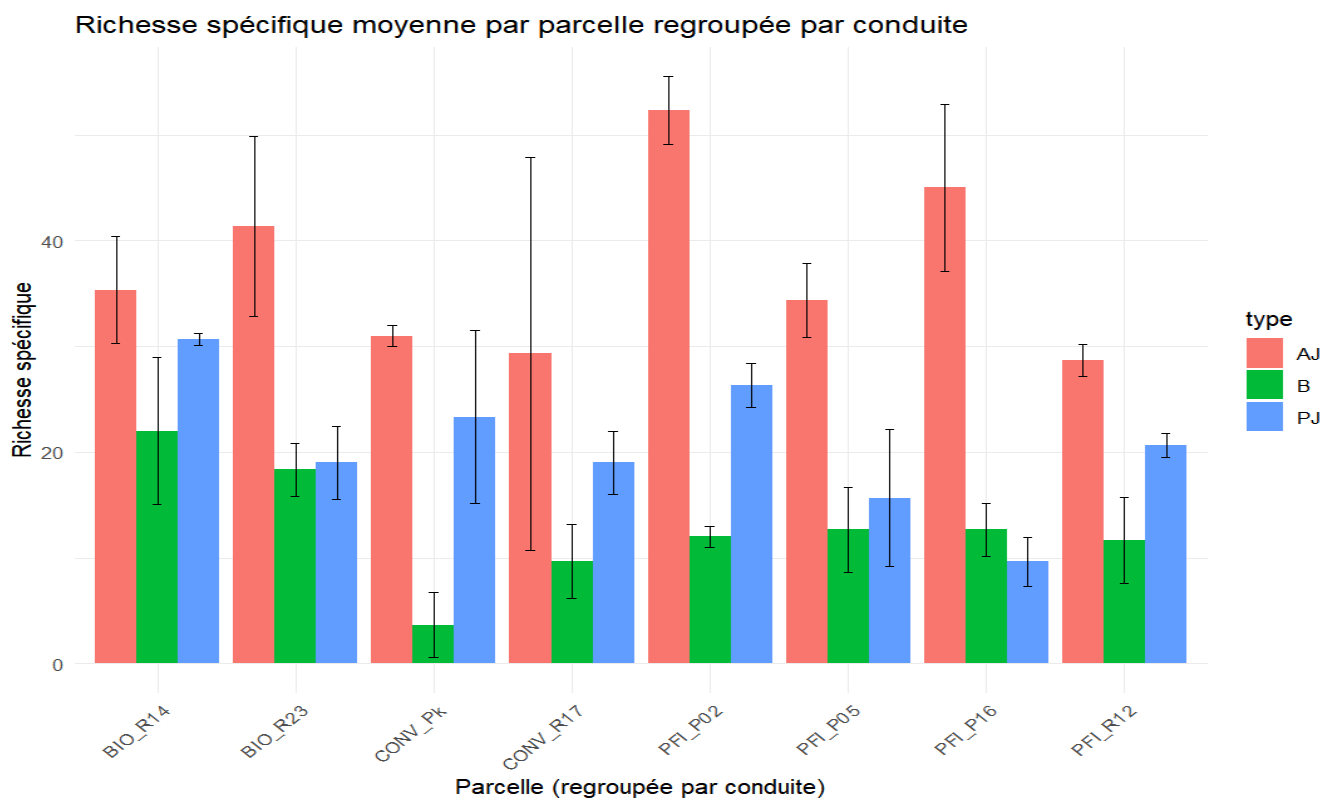


Figure 21 : Graphique en barres empilées de la richesse spécifique moyenne par relevé (rouge : Assiette Jaune, vert : piège Barber et bleu : Parapluie Japonais) pour chaque parcelle regroupée par conduite (de gauche à droite : BIO, CONV, PFI)

1.3. Description des variables explicatives potentielles

1.3.1. Les IFT moyen entre 2021 et 2023

Les IFT insecticide, fongicide, SDP et autres moyens entre 2021 et 2023 ont été représentés par parcelles regroupés par conduite avec la moyenne nationale d'IFT totale entre 2012 et 2018 comme référence sur la Figure 23. L'IFT totale moyen de l'ensemble des parcelles est égal à 30 ; à Bois l'Abbé, la moyenne de l'IFT totale est égale à 31 et à la Rétuzière, est égal à 29.

1.3.2. Les variables de l'ITK sont-elles liées entre elles ?

Les variables de l'ITK choisies ont été reliées dans une matrice de corrélation de Kendall (Figure 24) et montre que les IFT fongicides et les IFT insecticides sont corrélés positivement à l'IFT totale. La part de fertilisation organique est fortement corrélé à la quantité de fertilisant azoté. Plus remarquable, l'IFT insecticide est corrélé positivement à la quantité de fertilisant azoté.

1.3.3. Les variables du contexte paysager dans un rayon de 150 m sont-elles liées entre elles ?

Les variables paysagères choisies ont été reliées dans une matrice de corrélation de Kendall (Figure 25) et montre des corrélations positives significatives entre le pourcentage d'ESN, la surface herbacée et la surface de haie d'un côté et entre la richesse spécifique végétale et le nombre d'espèces de plantes nectarifères de l'autre. Il ne semble pas y avoir de corrélation entre les variables paysagères du contexte paysager et de la biodiversité floristique.

2. **Les résultats des modélisations**

2.1. Les résultats du modèle complexe : BioSyScan

Pour chaque verger, le modèle BioSyScan a renvoyé une note de l'état prédictif de la biodiversité. La Figure 26 représente les notes de chaque verger, regroupés par conduite. Les notes sont distribuées entre 59.71 (parcelle P05) et 81.14 (parcelle R23) avec une note moyenne de 66 ± 7 .

2.1.1. Le modèle BioSyScan explique-t-il les variables de biodiversité observées sur le terrain ?

Les modélisations par GLMM des abondances et des richesses spécifiques pour chaque méthode de relevé en fonction des notes de l'état prédictif de la biodiversité ont été réalisées. Dans tous les cas testés, le modèle nul a été considéré comme le plus explicatif pour les variables de biodiversité (par comparaison de l'AICc).

2.1.2. Le modèle BioSyScan prédit-il des tendances de biodiversité cohérentes ?

Malgré les résultats précédents non significatifs, les fonctions reliant les variables de biodiversité observées et les notes de biodiversité prédites par BioSyScan ont été tracées à partir des coefficients calculés par les GLMM pour observer les tendances prédictives du modèle BioSyScan. En Figure 26, les tendances prédictives des abondances totales issues des Assiettes Jaunes et des Barbers sont croissantes, soutenant l'hypothèse qu'un verger avec une note élevée aura une abondance importante. La tendance prédictive de l'abondance issue des Parapluies Japonais est inverse, contre disant l'hypothèse précédente.

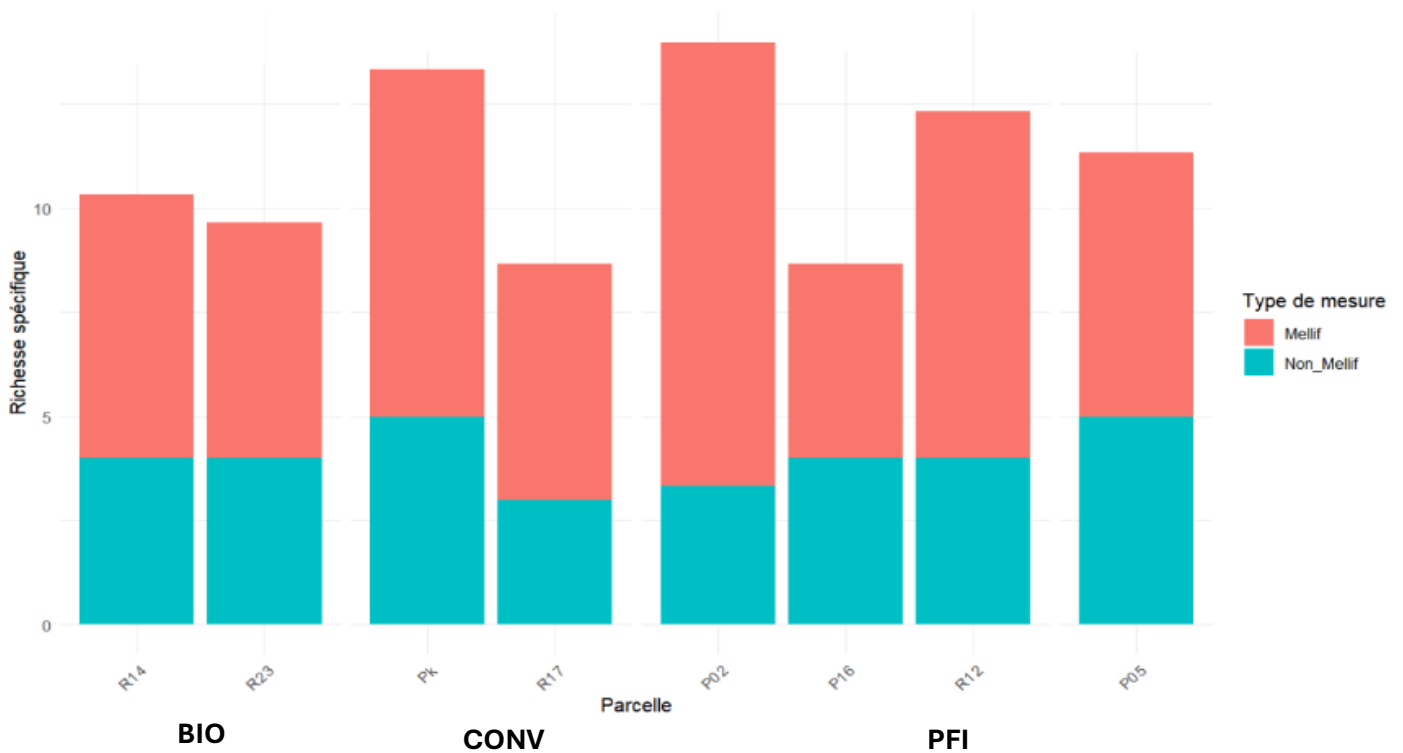


Figure 22 : Graphique en barres empilées de la richesse floristique des espèces nectarifères (en rouge) et des espèces non nectarifères (en bleu) pour chaque parcelle, regroupées par conduite (BIO, CONV, PFI)

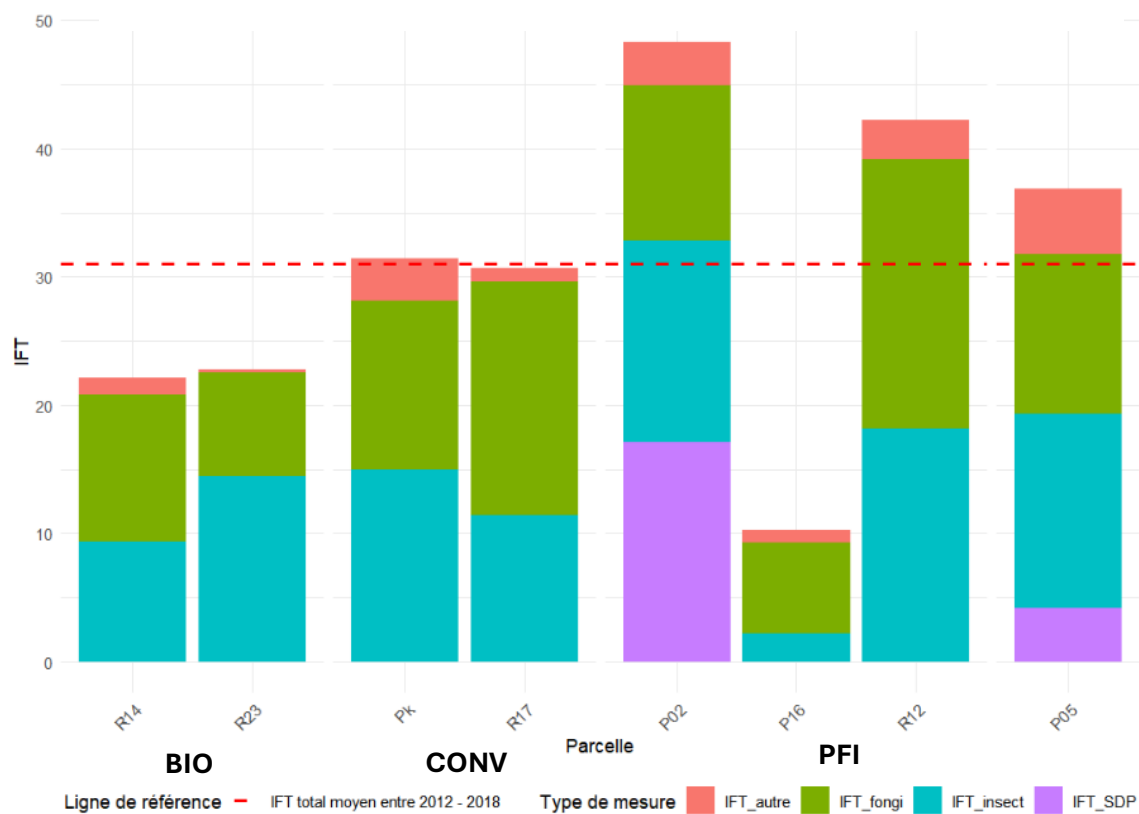


Figure 23 : Graphique en barres empilées des IFT moyens de chaque type de traitement par verger regroupés par conduite (BIO, CONV et PFI) et en ligne de référence l'IFT total moyen en pomiculture entre 2012 et 2018 (données : Agreste.fr)

Les fonctions des notes de BioSyScan en fonction de la richesse spécifique de présentent des tendances prédictives des richesses spécifiques similaires aux tendances prédictives des abondances.

2.2. Résultats des modèles simples

L'analyse de la variance par rapport à la moyenne de l'abondance et la richesse spécifique a montré, pour chaque méthode de relevé, une sur-dispersion (variance très supérieure à la moyenne). Cette conclusion privilégie une distribution binomiale négative plutôt qu'une distribution de Poisson. Le Tableau 6 résume les meilleurs modèles expliquant les variables de biodiversité par méthode de relevé (avec les variables explicatives, leur coefficient et leur p-value). Pour toutes les variables des meilleurs modèles, leur p-value est inférieure à 0,05.

2.2.1. Biodiversité des Assiettes Jaunes

L'abondance totale issue des Assiettes Jaunes est expliquée par l'IFT insecticide (coefficient = - 0.09138) et la richesse floristique totale (coefficient = 0.05229). Ainsi, l'abondance des invertébrés piégés dans les Assiettes Jaunes est impactée négativement par l'IFT insecticide et favorisée par la richesse floristique, d'après les coefficients de chaque variable. La richesse spécifique des invertébrés des Assiettes Jaunes est expliquée par le modèle nul.

2.2.2. Biodiversité des Barbers

L'abondance des invertébrés, issus des Barbers, est impactée par 3 variables d'ITK (la part de fertilisation organique, la quantité de fertilisant azoté et l'IFT totale) et 2 variables du contexte paysager (la surface de haie et la richesse floristique). D'après le signe des coefficients de certaines variables, l'abondance est positivement impactée par l'IFT totale (coefficient = 0.11228) et négativement impactée par la richesse floristique (coefficient = - 0.14227). La richesse spécifique des invertébrés des Barbers est expliquée négativement par la richesse floristique dans l'inter-rang (coefficient = -0.08273).

2.2.3. Biodiversité des Parapluies Japonais

L'abondance et la richesse spécifique des invertébrés du milieu arboré capturés avec les Parapluies Japonais sont expliqués par la richesse floristique des espèces nectarifères dans l'inter-rang. Les coefficients positifs nous indiquent que la richesse floristique des espèces nectarifères favorise positivement l'abondance (coefficient = 0.05914) et la richesse spécifique des invertébrés (coefficient = 0.06813) dans le milieu arboré.

2.3. L'abondance des taxons associés à des fonctions écosystémiques intéressantes s'explique-t-elle par les variables des pratiques culturelles et du contexte paysager ?

Les modélisations GLMM des abondances des Pollinisateurs issus des Assiettes Jaunes, des Prédateurs Généralistes et des Prédateurs Spécialistes issus des Parapluies Japonais en fonction des variables explicatives ont sélectionné le modèle nul comme le modèle le plus explicatif. Ces fonctions ne semblent donc pas être expliquées par les variables explicatives choisies.

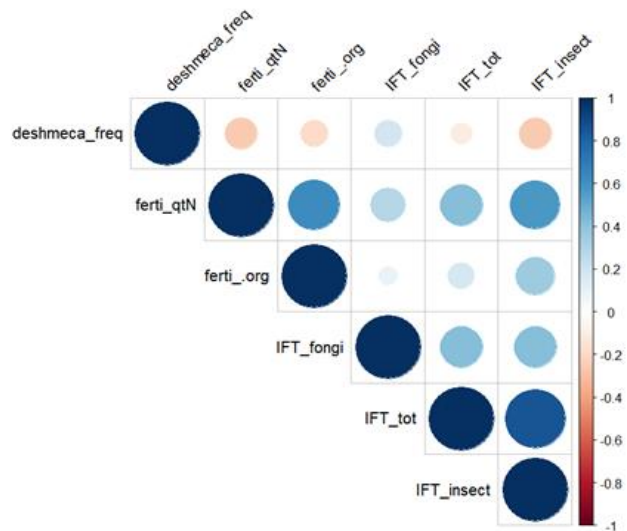
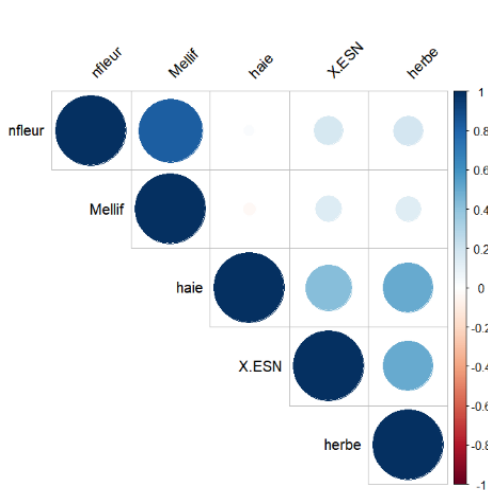


Figure 24 : Matrice de corrélation de Kendall entre les variables du contexte paysager dans un rayon de 150 mètres autour des vergers (nffleur : richesse floristique, Mellif : richesse floristique des familles nectarifères, haie : surface des haies, X.ESN : pourcentage d'ESN, herbe : surface des zones herbacées)

Figure 25 : Matrice de corrélation de Kendall entre les variables de l'ITK moyen entre 2021 et 2023 (deshmecca_freq : fréquence de désherbage mécanique, ferti_qtN : quantité d'N kg/ha, ferti_org : part de fertilisation organique, IFT_fongi : IFT fongicide, IFT_tot : IFT totale, IFT_insect : IFT insecticide)

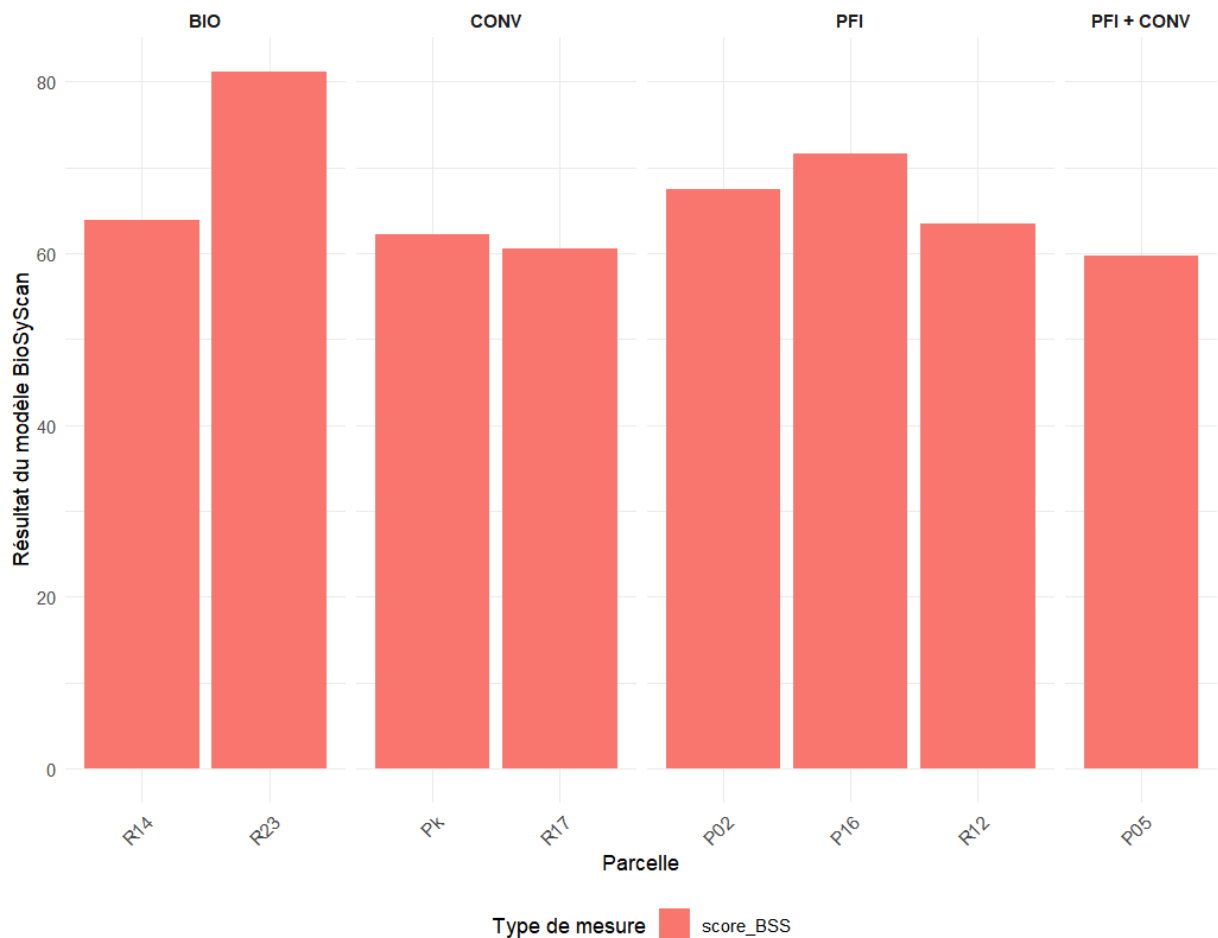


Figure 26 : Graphique en barres des notes de l'état prédictif de la biodiversité issues du modèle BioSyScan par parcelle, regroupées par conduite

L'abondance des Prédateurs spécialistes issus des Assiettes Jaunes est expliquée par les variables de surface de haie (coefficient = - 0.90508) et de la richesse floristique (coefficient = - 0.08751). Ces coefficients négatives indiquent que l'abondance des Prédateurs spécialistes est impactée négativement par la surface de haie et par la richesse floristique dans les inter-rangs.

L'abondance des Prédateurs Généralistes issus des pièges Barber est expliquée par 3 variables des ITK (fréquence de désherbage mécanique (coefficient = 2.683834), la part de fertilisation organique (coefficient = 0.020877) et l'IFT fongicide (coefficient = - 0.104907) et une variable du contexte paysager (la surface de haie (coefficient = - 2.907509). Les coefficients de certaines variables indiquent que l'abondance des Prédateurs Généralistes dans le milieu herbacé est impactée positivement par la fréquence de désherbage mécanique et négativement par la surface de haie.

G - DISCUSSION

D'après les tests de comparaison de moyenne, toutes les variables de biodiversité ne sont pas significativement différentes en fonction des conduites, contrairement aux sites qui présentent des différences significatives d'abondance totale d'invertébrés pour les trois méthodes de relevés. Ces résultats confortent l'hypothèse selon laquelle la biodiversité pourrait être homogène à l'échelle d'un site, due à la proximité entre les vergers expérimentaux étudiés. Cependant, il est à noter que le nombre de parcelles par conduite n'est pas équilibré ce qui influence les tests de comparaison.

Les notes issues du modèle BioSyScan n'ont pas pu expliquer significativement les variables de biodiversité. Néanmoins, les fonctions issues des résultats des GLMM ont montré des tendances prédictives cohérentes pour la biodiversité des Assiettes Jaunes et des Barbers, selon l'hypothèse qu'une augmentation des notes est reliée à une augmentation des variables de biodiversité. La biodiversité des Parapluies Japonais présente une tendance contraire, contredisant l'hypothèse précédente. Il est important de remettre ces résultats dans un contexte d'effectif d'échantillon faible (24 échantillons par méthode de relevé). Les écart-types d'abondance et de richesse spécifique sont parfois très grands, ce qui influencent l'estimation des coefficients par le modèle. L'effort d'échantillonnage de 3 relevés par parcelle était un compromis entre la charge de travail de poses des relevés et d'identification ainsi que la disponibilité en matériels et un nombre d'échantillon suffisant pour comparer les vergers entre eux. Or, les modèles complexes comme BioSyScan sont souvent moins adaptés à expliquer précisément les petits échantillons.

De plus, de nombreuses pratiques culturales sont communes à tous les vergers (comme la gestion de l'enherbement dans l'inter-rang toute l'année et un travail du sol à la même profondeur dans tous les vergers). Ces points communs limitent l'écart des notes entre des vergers ayant des conduites différentes, ne permettant pas d'expliquer au mieux les variables de biodiversité.

Graphique des fonctions prédictives des abondances totales issues de la modélisation de BioSyScan par relevé

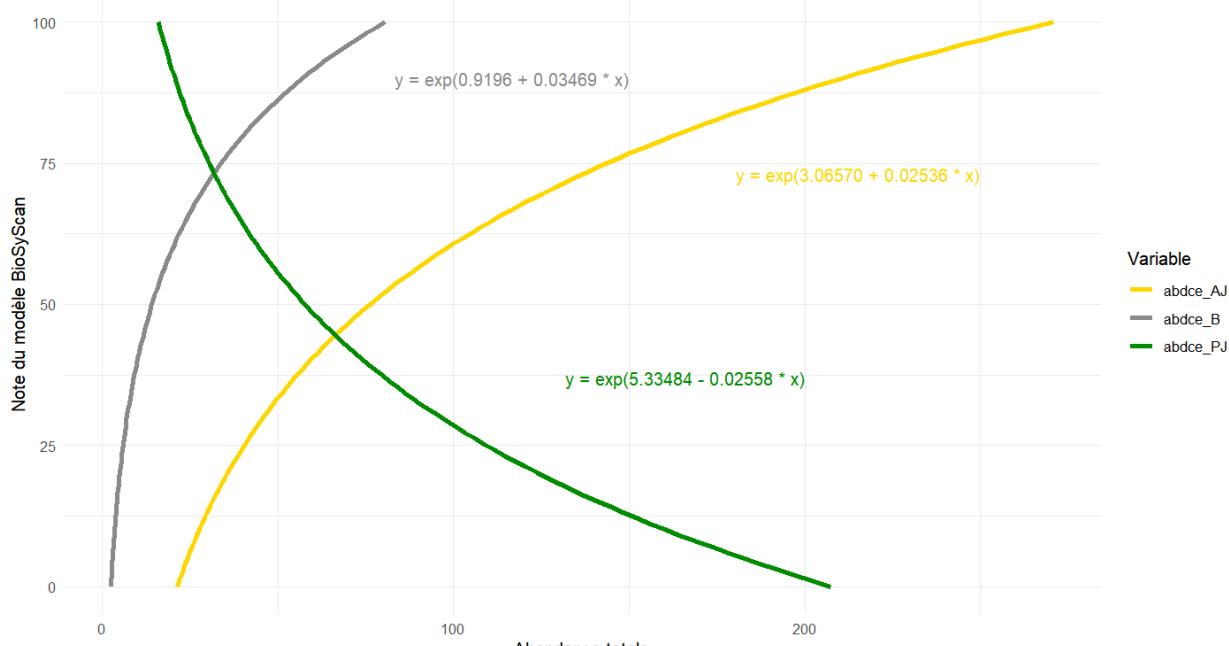


Figure 27 : Graphique des fonctions prédictives des abondances totales issues de la modélisation de BioSyScan par relevé (en jaune : la fonction associée à l'abondance totale issue des Assiettes Jaunes, en gris : la fonction associée à l'abondance totale issue des Assiettes Jaunes)

Méthode de relevé	Variable à expliquer	Fonction	Variables	Coefficient	S.E	P-value	AICc
Assiette Jaune	abondance	totale	intercept	5.35425	0.27724	< 2e-16	239
			IFTinsect	-0.09138	0.01679	5.23E-08	
			nfleur	0.05229	0.02396	0.0291	
	richesse spécifique	totale	intercept	2.799922	0.302862	<2e-16	163.4
Barber	abondance	Pollinisateur	intercept	2.7977	0.2777	<2e-16	171.3
		Prédateur spécialiste	Intercept	3.38951	0.39935	< 2e-16	133.9
	abondance	Prédateur spécialiste	haie	-0.90508	0.31811	0.00444	
			nfleur	-0.08751	0.0354	0.01344	
Parapluie Japonais	abondance	totale	intercept	15.76461	1.46697	< 2e-16	204.6
			ferti_.org	0.0858	0.01017	< 2e-16	
			ferti_qtn	-0.34441	0.04409	5.63E-15	
			haie	1.42389	0.40834	0.000488	
			IFT_tot	0.11228	0.01736	9.50E-12	
	nfleur	-0.14227	0.03929	0.000293			
richesse spécifique	totale	intercept	3.378	0.38795	<2e-16	153.1	
abondance	Prédateur Généraliste	intercept	2.408598	0.33619	7.81E-13	149.8	
		deshmeca_fr	2.683834	0.487202	3.62E-08		
		ferti_.org	0.020877	0.002917	8.32E-13		
		haie	-2.907509	0.428272	1.13E-11		
			IFT_fongi	-0.104907	0.020008	1.58E-07	
Parapluie Japonais	abondance	totale	intercept	3.22197	0.23857	< 2e-16	204.9
			Mellif	0.05914	0.02095	0.00476	
	richesse spécifique	totale	intercept	2.50302	0.19363	< 2e-16	159.4
			Mellif	0.06813	0.02405	0.00461	
abondance	Prédateur Généraliste	intercept	2.7972	0.2978	<2e-16	163.9	
	Prédateur spécialiste	intercept	1.5023	0.2071	4.02E-13	110.8	

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des meilleurs modèles explicatifs des variables "abondance" et "richesse spécifique" par méthode de relevé et leurs variables explicatives, leur coefficient et leur p-value

Les modèles simples les plus explicatifs ont révélé que la biodiversité dans les milieux aérien (issus des Assiettes Jaunes) et herbacé (issus des pièges Barbers) sont impactés par le contexte paysager et les pratiques culturales, ce qui valide les hypothèses de départ issues des conclusions de l'état de l'art. La biodiversité des Parapluies Japonais est expliquée uniquement par une variable paysagère, la richesse floristique dans l'inter-rang. Ce résultat peut surprendre car les invertébrés du milieu arboré (issus des Parapluies Japonais) sont touchés directement par l'application des traitements phytosanitaires sur le feuillage des arbres.

Pour les fonctions écosystémiques, les modèles les plus explicatifs sont soit des modèles nuls pour les Pollinisateurs issus des Assiettes Jaunes, des Prédateurs Généralistes et des Prédateurs Spécialistes issus des Parapluies Japonais, soit avec des variables ayant des coefficients contredisant les conclusions d'études similaires comme pour les Prédateurs spécialistes issus des Assiettes Jaunes et les Prédateurs Généralistes issus des Barber (Martinez 1992; Roince 2012; Wang et al. 2022). L'interprétation des résultats de ces modèles est donc délicate.

L'objectif initial était d'évaluer la biodiversité entomologique pendant la période de floraison du pommier au mois d'avril et pendant la période de fructification à partir des mois de juin-juillet pour chaque méthode de relevé. Malheureusement, l'année 2024 a été particulièrement pluvieuse (« BSV Arboriculture archives 2024 : consultez les derniers bulletins - Chambre d'agriculture Pays de la Loire », s. d.) en Maine-et-Loire au printemps. Accompagnée de températures douces, cette météo a retardé la mise en activité de la biodiversité entomologique. L'excès de pluie a provoqué une pression sanitaire très forte lors du début de feuillaison des pommiers, période critique dans la sensibilité des arbres à la tavelure (*Ventura inaequalis*) obligeant l'UEH a effectué des traitements fongicides régulièrement. Ces traitements ayant un délai de retour dans la parcelle de 48h, l'accès dans les vergers étaient restreints. Ce contexte météo défavorable n'a donc pas permis d'installer les pièges dès le début de la floraison des pommiers mais seulement les Assiettes Jaunes et les pièges Barber à la fin de la floraison, à partir de la mi-mai, décalant les relevés et par la même occasion l'identification des échantillons. Ce décalage a contraint d'abandonner l'idée d'une deuxième phase de relevés pendant la période de fructification pour les Assiettes Jaunes et les Barber.

H - CONCLUSION & PERSPECTIVES

L'étude de la biodiversité dans 3 milieux distincts (arboré, herbacé et aérien) a mis en évidence des différences significatives d'abondance d'invertébrés entre les sites de Bois l'Abbé et de la Rétuzière. Aucune différence significative de biodiversité n'a été trouvée entre les différentes conduites des vergers d'un même site, supposant une biodiversité homogène à l'échelle d'un site.

Le modèle prédictif BioSyScan ne s'est pas révélé être le modèle le plus explicatif de l'état de la biodiversité dans les vergers. Malgré ce constat, les tendances prédictives de la biodiversité par le modèle dans les milieux herbacés et aériens sont cohérentes avec les hypothèses de départ. Une réserve est faite sur la tendance prédictive décroissante de la biodiversité des milieux arborés par le modèle.

Les modèles plus simples ont su mieux expliquer la biodiversité dans les 3 milieux avec les variables des pratiques culturales et du contexte paysager.

La biodiversité de certaines fonctions écosystémiques intéressantes comme la Pollinisation ou la Prédation est expliquée par des variables ayant des coefficients ambigus, contraire aux conclusions de nombreuses recherches similaires.

La conclusion de ces résultats doit rester prudente au regard de la faible taille des échantillons. La répétition de ce travail sur plusieurs années permettra d'affiner les résultats de modélisation et conclure sur les variables et modèles expliquant le mieux l'abondance et la richesse spécifique de la biodiversité entomologique dans les différents milieux étudiés. Ainsi, il pourrait être bénéfique d'augmenter l'effort d'échantillonnage avec un nombre d'échantillons par parcelle plus élevé en compensant par un nombre de parcelles étudiées plus faibles par exemple.

En perspective, la variable richesse floristique et ses déclinaisons avec la richesse floristique des espèces nectarifères sont des variables explicatives dans de nombreux modèles présentés précédemment. On peut suspecter une influence de la composition des communautés floristiques dans l'inter-rang des vergers sur la présence des invertébrés. Des analyses supplémentaires autour de cette variable pourraient permettre de mieux comprendre les liens avec la biodiversité entomologique et floristique.

De plus, une modélisation paysagère à plusieurs échelles pourrait être intéressante à analyser pour comprendre à quelle échelle la biodiversité entomologique évolue autour des vergers.

Enfin, l'ambition de cette mission est d'être réalisée chaque année pour avoir un suivi des dynamiques de biodiversité dans les vergers de l'INRAE – Angers. L'UEH a entrepris de nombreux projets en lien avec la biodiversité avec la mise en place d'hôtels à insectes, la plantation de 1,2km de haie en 2022 et 2023 et la mise en place d'un système d'éco-pâturage avec un berger local. En parallèle, un travail de réflexion est effectué pour diminuer l'impact de la culture des pommiers sur la biodiversité en limitant, dans la mesure du possible, les traitements phytosanitaires ou en allégeant la gestion de l'enherbement dans l'inter-rang par exemple. Par le suivi régulier de la biodiversité dans les vergers de l'UEH, ces initiatives sont mises en lumière auprès des autres unités de l'INRAE – Angers.

I - BIBLIOGRAPHIE

Altieri, Miguel A. 1999. « The ecological role of biodiversity in agroecosystems ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74 (1): 19-31. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00028-6).

Auclerc, Apolline, Anne Blanchart, et Quentin Vincent. 2019. « Jardibiodiv, a citizen science tool on urban soil biodiversity Jardibiodiv, un outil de sciences participatives sur la biodiversité des sols urbains », décembre.

Bailey, Debra, Martin H. Schmidt-Entling, Peter Eberhart, John D. Herrmann, Gabriela Hofer, Urs Kormann, et Felix Herzog. 2010. « Effects of Habitat Amount and Isolation on Biodiversity in Fragmented Traditional Orchards ». *Journal of Applied Ecology* 47 (5): 1003-13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01858.x>.

« BSV Arboriculture archives 2024 : consultez les derniers bulletins - Chambre d'agriculture Pays de la Loire ». s. d. Consulté le 23 août 2024. <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/sinformer/etre-agriculteur-lessentiel-a-savoir/bulletins-techniques-et-de-preconisation/bulletins-vegetal/bulletin-de-sante-du-vegetal/bsv-arboriculture-archives-2024>.

Cahenzli, Fabian, Lene Sigsgaard, Claudia Daniel, Annette Herz, Laurent Jamar, Markus Kelderer, Stine Kramer Jacobsen, et al. 2019. « Perennial flower strips for pest control in organic apple orchards - A pan-European study ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 278 (juin):43-53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.03.011>.

Campbell, Alistair John, Andrew Wilby, Peter Sutton, et Felix Wäckers. 2017. « Getting More Power from Your Flowers: Multi-Functional Flower Strips Enhance Pollinators and Pest Control Agents in Apple Orchards ». *Insects* 8 (3): 101. <https://doi.org/10.3390/insects8030101>.

Codron, Jean-Marie, Robert HABIB, Florence Jacquet, et Benoît Sauphanor. 2003. « Bilan et perspectives environnementales de la filière arboriculture fruitière ». *Agriculture, Territoire, Environnement dans les Politiques Européennes*, janvier, 31-67.

Conway, Gordon R. 1987. « The properties of agroecosystems ». *Agricultural Systems* 24 (2): 95-117. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(87\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0308-521X(87)90056-4).

Cornille, Amandine, Ferran Antolín, Elena Garcia, Cristiano Vernesi, Alice Fietta, Otto Brinkkemper, Wiebke Kirleis, Angela Schlumbaum, et Isabel Roldán-Ruiz. 2019. « A Multifaceted Overview of Apple Tree Domestication ». *Trends in Plant Science* 24 (8): 770-82. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.05.007>.

Eeraerts, Maxime. 2023. « A minimum of 15% semi-natural habitat facilitates adequate wild pollinator visitation to a pollinator-dependent crop ». *Biological Conservation* 278 (février):109887. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109887>.

Eeraerts, Maxime, Sanne Van Den Berge, Willem Proesmans, Kris Verheyen, Guy Smagghe, et Ivan Meeus. 2021. « Fruit Orchards and Woody Semi-Natural Habitat Provide Complementary Resources for Pollinators in Agricultural Landscapes ». *Landscape Ecology* 36 (5): 1377-90. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01220-y>.

Francois. s. d. « Liste des fiches ». *Quel est cet animal ?* (blog). Consulté le 23 août 2024. <https://www.quelestcetanimal.com/licence-des-contenus/>.

Fried, Guillaume, Camilla Andrade, Alexandre Villers, Emmanuelle Porcher, Daniel Cyllly, Daniel Cluzeau, S. Guillocheau, et al. 2019. « Premiers résultats du réseau Biovigilance 500 ENI sur le suivi des effets non-intentionnels des pratiques agricoles sur la biodiversité. » *Innovations Agronomiques* 75:87-98. <https://doi.org/10.15454/tmdo06>.

Fuller, R.j., R.d. Gregory, D.w. Gibbons, J.h. Marchant, J.d. Wilson, S.r. Baillie, et N. Carter. 1995. « Population Declines and Range Contractions among Lowland Farmland Birds in Britain ». *Conservation Biology* 9 (6): 1425-41. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09061425.x>.

Hatt, Séverin, et Thomas F. Döring. 2023. « Designing pest suppressive agroecosystems: Principles for an integrative diversification science ». *Journal of Cleaner Production* 432 (décembre):139701. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139701>.

Herz, Annette, Fabian Cahenzli, Servane Penvern, Lukas Pfiffner, Marco Tasin, et Lene Sigsgaard. 2019. « Managing Floral Resources in Apple Orchards for Pest Control: Ideas, Experiences and Future Directions ». *Insects* 10 (8): 247. <https://doi.org/10.3390/insects10080247>.

Hindayana, Dadan, Rainer Meyhöfer, Dagmar Scholz, et Hans-Michael Poehling. 2001. « Intraguild Predation among the Hoverfly *Episyrphus balteatus* de Geer (Diptera: Syrphidae) and Other Aphidophagous Predators ». *Biological Control* 20 (3): 236-46. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0895>.

Hooper, David, F Stuart Chapin III, J.J. Ewel, Andy Hector, Pablo Inchausti, Sandra Lavorel, J.H. Lawton, et al. 2005. « Effects Of Biodiversity On Ecosystem Functioning: A Consensus Of Current Knowledge ». *Ecological Monographs* 75 (février):3-35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>.

Horak, Jakub, Alena Peltanova, Andrea Podavkova, Lenka Safarova, Petr Bogusch, Dusan Romportl, et Petr Zasadil. 2013. « Biodiversity responses to land use in traditional fruit orchards of a rural agricultural landscape ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 178 (septembre):71-77. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.020>.

« Infographie - Les fruits et légumes : une production arboricole, fruitière et maraîchère très diversifiée ». s. d. Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Consulté le 26 mars 2024. <https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-fruits-et-legumes-une-production-arboricole-fruitiere-et-maraichere-tres>.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES. 2019. « Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services ». Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3553579>.

Jacobsen, Stine K., Helle Sørensen, et Lene Sigsgaard. 2022. « Perennial flower strips in apple orchards promote natural enemies in their proximity ». *Crop Protection* 156 (juin):105962. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105962>.

Joshi, Neelendra K., Timothy Leslie, Edwin G. Rajotte, et David J. Biddinger. 2020. « Environmental impacts of reduced-risk and conventional pesticide programs differ in commercial apple orchards, but similarly influence pollinator community ». *Chemosphere* 240 (février):124926. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124926>.

« La cuvette jaune, le piège incontournable pour détecter l'arrivée des ravageurs du colza ». 2019. Terres Inovia. 22 août 2019. <https://www.terresinovia.fr/-/la-cuvette-jaune-le-piege-incontournable-pour-detecter-l-arrivee-des-ravageurs-du-colza>.

- Laffon, Ludivine, Armin Bischoff, Romane Blaya, Françoise Lescourret, et Pierre Franck. 2024. « Spontaneous flowering vegetation favours hoverflies and parasitoid wasps in apple orchards but has low cascading effects on biological pest control ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 359 (janvier):108766. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108766>.
- « Le climat en France métropolitaine | Météo-France ». s. d. Consulté le 23 août 2024. <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine>.
- Maalouly, Mariline, Pierre Franck, Jean-Charles Bouvier, Jean-François Toubon, et Claire Lavigne. 2013. « Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 169 (avril):33-42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.008>.
- Malagnoux, Laure, Gaëlle Marliac, Sylvaine Simon, Magali Rault, et Yvan Capowiez. 2015. « Management strategies in apple orchards influence earwig community ». *Chemosphere* 124 (avril):156-62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.024>.
- Malone, Louise A., Elisabeth P. J. Burgess, Emma I. Barraclough, Joanne Poulton, et Jacqui H. Todd. 2017. « Comparison of invertebrate biodiversity in New Zealand apple orchards using integrated pest management, with or without codling moth mating disruption, or organic pest management ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247 (septembre):379-88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.046>.
- Markó, Viktor, Balázs Keresztes, Michelle T. Fountain, et Jerry V. Cross. 2009. « Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities ». *Biological Control* 48 (2): 115-24. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.10.002>.
- Martinez, Neo. 1992. « Constant Connectance in Community Food Webs ». *American Naturalist* 139 (juin):1208-18. <https://doi.org/10.1086/285382>.
- Mates, Stacy G., Ivette Perfecto, et Catherine Badgley. 2012. « Parasitoid wasp diversity in apple orchards along a pest-management gradient ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 156 (août):82-88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.016>.
- Morand, Serge, et Claire Lajaunie. 2018. « 5 - Anthropogenic Stress ». In *Biodiversity and Health*, édité par Serge Morand et Claire Lajaunie, 63-81. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-115-4.50005-6>.
- Paoletti, M. G, D Sommaggio, M. R Favretto, G Petruzzelli, B Pezzarossa, et M Barbaferi. 1998. « Earthworms as useful bioindicators of agroecosystem sustainability in orchards and vineyards with different inputs ». *Applied Soil Ecology* 10 (1): 137-50. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(98\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00036-5).
- « Parapluie japonais (nappe de battage) ». s. d. Mauna Kea. Consulté le 23 août 2024. <https://www.maunakea.be/entomologie-insectes/capture/parapluie-japonais-nappe-de-battage.html?srsltid=AfmBOoqXVlY2vvPC6oG8EOAq4xTkzmxYXNE2uGfGH8gbWKLYYbODDGQh>.
- planet-score-admin. 2023. « Biodiversité : Indicateur BioSyScan v 1.0 ». *Planet-Score* (blog). 31 août 2023. <https://www.planet-score.org/en/biodiversite-indicateur-biosyscan-v-1-0/>.

Rodríguez-Gasol, Neus, Georgina Alins, Emiliano R. Veronesi, et Steve Wratten. 2020. « The ecology of predatory hoverflies as ecosystem-service providers in agricultural systems ». *Biological Control* 151 (décembre):104405. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104405>.

Roincé, Catherine Boreau de. 2012. « Biodiversité et aménagements fonctionnels en verger de pommiers : Implication des prédateurs généralistes vertébrés et invertébrés dans le contrôle des ravageurs. » Phdthesis, AgroParisTech. <https://pastel.hal.science/pastel-00952799>.

Simon, Sylvaine, Aude Alaphilippe, Solène Borne, Amandine Fleury, Laurent Galet, Thierry Girard, Olivier Guibert, et al. 2018. « BioREco, Méthodologie et expérimentation système pour la réduction de l'utilisation des pesticides en vergers de pommier ». *Innovations Agronomiques* 70 (70): 73-86. <https://doi.org/10.15454/uuzphn>.

Simon, Sylvaine S., Gaëlle Marliac, et Yvan Capowiez. 2015. « Quelles pratiques agroécologiques pour contrôler les bioagresseurs dans un système pérenne, le verger de pommiers? » *Innovations Agronomiques* 43:29.

Tarjuelo, R., A. Benítez-López, F. Casas, C. A. Martín, J. T. García, J. Viñuela, et F. Mougeot. 2020. « Living in seasonally dynamic farmland: The role of natural and semi-natural habitats in the movements and habitat selection of a declining bird ». *Biological Conservation* 251 (novembre):108794. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108794>.

Van Zwieten, Lukas, Josh Rust, Tim Kingston, Graham Merrington, et Steven Morris. 2004. « Influence of copper fungicide residues on occurrence of earthworms in avocado orchard soils ». *Science of The Total Environment* 329 (1): 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.014>.

Wang, Meina, Zhenrong Yu, Yunhui Liu, Panlong Wu, et Jan Christoph Axmacher. 2022. « Taxon- and functional group-specific responses of ground beetles and spiders to landscape complexity and management intensity in apple orchards of the North China Plain ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 323 (janvier):107700. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107700>.

Zhang, Yufei, Zhenxing Bian, Shuai Wang, Xiaoyu Guo, et Wei Zhou. 2024. « Effect of agricultural landscape pattern on the qualitative food web of epigeic arthropods in low hilly areas of northern China ». *Ecological Modelling* 488 (février):110574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110574>.

S. d.-a. Consulté le 23 août 2024. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/synthese-expertise-agricultureetbiodiversite-rev.pdf>.

S. d.-b. Consulté le 16 mai 2024. <https://hal.inrae.fr/hal-02824552/document>.

LIVRES :

AgriProduction 2022 « Guide pratique des insectes et autres invertébrés des champs »

CTIFL 2012 « Biodiversité et régulation des ravageurs en arboriculture fruitière »

CHEVALIER « Clé de détermination des fabacées »

CHEVALIER « Clé de détermination des poacées (graminées) prairiales et adventices des cultures »

Delachaux et Niestlé 1986 « Guide des fleurs sauvages »

I – ANNEXES

Parcelle	Rang rep 1	Rang rep 2	Rang rep 3
P02	3 – P10	3 – P06	3 – P02
P05	7	5	3
P16	5	15	25
Pk	7	5	3
R12	19	13	6
R14	11	9	6
R17	3	6	9
R23	4 – X5	4 – R2	4 – X1

Annexe 1 : Numérotation des rangs où ont été faits les relevés par parcelle

Test de Kruskal-Wallis					
Méthode	Variable testée	Variable de comparaison	Chi ²	p-value	paires de Dunn (p-value < 0.05)
Assiette jaune	Abondance	Conduite	1.2216	0.7478	
		Site	4.2063	0.04027	
		Parcelle	13.054	0.07081	
	Richesse spécifique	Conduite	0.19289	0.9787	
		Site	2.349	0.1254	
		Parcelle	15.955	0.02553	P02-R12
Barber	Abondance	Conduite	3.2612	0.3531	
		Site	5.0788	0.02422	
		Parcelle	16.956	0.01768	Pk - R14
	Richesse spécifique	Conduite	2.0722	0.5576	
		Site	3.8735	0.04905	
		Parcelle	16.922	0.01791	Pk - R14/ Pk - R23
Parapluie Japonais	Abondance	Conduite	1.6148	0.656	
		Site	3.9779	0.0461	
		Parcelle	16.764	0.01898	P16-R14
	Richesse spécifique	Conduite	1.4965	0.6831	
		Site	1.0253	0.3113	
		Parcelle	16.639	0.01988	P16 - R14
Relevé floristique	Richesse spécifique	Conduite	3.0061	0.3907	
		Site	1.9089	0.1671	
		Parcelle	13.584	0.05909	
	Richesse spécifique des plantes mellifères	Conduite	2.4808	0.4788	
		Site	0.53123	0.4661	
		Parcelle	12.875	0.07521	
	Richesse spécifique des plantes non mellifère	Conduite	1.599	0.6596	
		Site	0.42032	0.5168	
		Parcelle	9.1	0.2456	

Annexe 2 : Tableau des résultats des tests de Kruskal-Wallis et des paires de Dunn (ayant une p-value < 0.05) pour les variables (abondance et richesse spécifique) des relevés de biodiversité (Assiette Jaune, pièges Barber, Parapluie Japonais et Relevé floristique).



Diplôme : l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)
Spécialité : ex Ingénieur Agronome
Spécialisation / option : Sciences et Ingénierie du Végétal / ex Agrosystèmes : conception et évaluation
Enseignant référent : Edith Le Cadre

Auteur(s) : Tristan ARTU--CHAPLAIN		Organisme d'accueil : INRAE
Date de naissance* : 11 juillet 2001		Adresse :42 rue Georges Morel, 49007 Beaucouzé
Nb pages : 24	Annexe(s) : 2	Maître de stage : Frédérique DIDELOT et Catherine BERNARD
Année de soutenance : 2024		

Titre français :
Evaluation de l'impact des pratiques culturales et du contexte paysager sur la biodiversité des vergers expérimentaux de pommiers en Pays de la Loire

Titre anglais :
Evaluation of the Impact of Agricultural Practices and Landscape Context on the Biodiversity of Experimental Apple Orchards in Pays de la Loire

Résumé (1600 caractères maximum) :

Le pommier est la culture la plus traitée en France. Le projet CapZeroPhyto vise à développer des alternatives à ces traitements. L'un de ces leviers est la favorisation de la biodiversité et l'amélioration de la lutte biologique. Or, la biodiversité est impactée par les pratiques culturales et le contexte paysager. Pour tenter de comprendre cet impact, une évaluation de la biodiversité entomologique dans huit vergers expérimentaux de l'INRAE – Angers a été réalisée. Trois méthodes complémentaires de relevés entomologiques ont été faites dans les milieux arboré, herbacé et aérien des vergers. L'objectif est d'identifier les indicateurs agronomiques et paysagers qui expliquent le mieux l'état de la biodiversité dans chacun des trois milieux. Différents modèles, basés sur les données des itinéraires techniques culturaux et des contextes paysagers de chaque verger, ont été analysés par GLMM. L'un de ces modèles est un modèle prédictif, nommé BioSyScan, qui calcule une note prédictive de l'état de la biodiversité dans un verger donné. Les résultats ont mis en évidence que les indicateurs explicatifs de l'état de la biodiversité entomologique différaient entre les 3 milieux étudiés. Malgré, des résultats non significatifs, le modèle BioSyScan semble prédire des tendances cohérentes de l'état de la biodiversité. La répétition de cette évaluation sur plusieurs années permettra d'affiner les résultats et d'identifier les indicateurs agronomiques et paysagers explicatifs de la biodiversité entomologique pour chacun des milieux étudiés.

Abstract (1600 caractères maximum) :

The apple tree is the most treated crop in France. The CapZeroPhyto project aims to develop alternatives to these treatments. One of these approaches is to promote biodiversity and improve biological control. However, biodiversity is impacted by agricultural practices and the landscape context. To understand this impact, an evaluation of entomological biodiversity was conducted in eight experimental orchards of INRAE – Angers. Three complementary methods of entomological surveys were carried out in the tree, herbaceous, and aerial environments of the orchards. The goal is to identify the agronomic and landscape indicators that best explain the state of biodiversity in each of the three environments. Various models, based on data from the cultural technical itineraries and the landscape contexts of each orchard, were analyzed using GLMM. One of these models is a predictive model, named BioSyScan, which calculates a predictive score of the state of biodiversity in a given orchard. The results highlighted that the explanatory indicators of the state of entomological biodiversity differed between the three environments studied. Despite non-significant results, the BioSyScan model appears to predict consistent trends in the state of biodiversity. Repeating this evaluation over several years will help refine the results and identify the agronomic and landscape indicators that explain entomological biodiversity for each of the environments studied.

Mots-clés : biodiversité, insecte, verger, arboriculture, pommier, paysage, pratiques culturales
Key Words: biodiversity, insect, orchard, tree cultivation, apple tree, landscape, agricultural practices

