

## **Mémoire**

présenté par

**Valentine KUHN**

Master Agrosciences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt

Parcours « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

## **LE POMMIER EN AGROFORESTERIE**

### **Une évaluation agronomique par les composantes du rendement**

Pour l'obtention du diplôme de

Master Agrosciences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt

Enseignant responsable du stage : Marie-Odile BANCAL

Maître de stage : Pierre-Eric LAURI

Avec la participation financière de :



Soutenu le 29/08/2022

# Engagement de non plagiat

## 1. Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

## 2. Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

**3. Sanction :** En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

## 4. Engagement :

Je soussignée Valentine Kuhn

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Montpellier, le 11/08/2022

Signature :



## Résumé

Dans la majorité des vergers de pommiers, les applications de produits phytosanitaires sont nombreuses et répétées. Il est devenu urgent de trouver des moyens de cultiver des pommes plus durablement. On s'intéresse ici au pommier, à ses performances agronomiques et aux régulations biologiques en contexte agroforestier avec des noyers en strate haute. Le dispositif de recherche étudié est situé dans le domaine départemental de Restinclières, dans le sud de la France. Cette parcelle est conduite en agriculture biologique très bas intrants. Il y a trois modalités de traitement agroforestier dans cette expérimentation : les pommiers témoins (AC), en inter-rang (AFIR) ou en intra-rang (AFR). L'environnement lumineux de chaque pommier est caractérisé par le gap fraction. Celui-ci est obtenu par la prise de photographies hémisphériques, c'est le rapport de la lumière reçue à la canopée des pommiers par rapport à celle à la canopée des noyers. La modalité agroforestière est choisie en tant que variable explicative pour **expliquer les variations des composantes du rendement, relevant de l'architecture et de la phénologie, du pommier dans un contexte agroforestier**. Ces composantes sont identifiées au cours du stage. De nombreux résultats sont obtenus qui viennent compléter des travaux effectués auparavant. Plus particulièrement, on s'intéresse à 45 pommiers (15 de chaque modalité) sélectionnés dans le cadre d'études précédentes sur cette parcelle. La modalité n'a pas d'impact sur la hauteur des arbres mais sur la surface de section des troncs. La charge florale est différente entre les pommiers témoins et ceux en agroforesterie intra-rang. Les séquences de fonctionnement pluriannuel des branches de pommiers, c'est-à-dire la longueur du rameau et la nature des bourgeons d'une année à l'autre (floral ou végétatif) sont également étudiées : La longueur de rameau de l'année N détermine la fréquence de floraison des bourgeons pour l'année N+1. Pour le suivi de la croissance des fruits, il n'y a pas de différence significative pour les diamètres à toutes les dates mais l'écart se creuse avec l'avancée de l'étude. Sur les fruits marqués, on suit également les chutes de fruits et le nombre de fruits touchés par le carpocapse. Tous ces résultats sont interprétés avec un regard critique et en prenant en compte les limites des modèles statistiques utilisés et de celles du dispositif notamment.

**Mots-clés : pommier, agroforesterie, ombre, agroécologie, verger, gap fraction, composantes du rendement**

## Abstract

Applications of phytosanitary products are more numerous and repeated in most of apple orchards. It became urgent to find sustainable ways to produce apples. The case of apple tree is tackled, his agronomic performances, biological control in an agroforestry system with walnut trees in high stratum. The research device studied is in the departemental area of Restinclières, south of France. These apple trees are grown in an organic way with very low inputs. There are three modalities for the agroforestry treatment in this experimentation : Agricultural Control (AC), AgroForestry InterRow (AFIR), AgroForestry Row (AFR). The light environment of each apple tree is characterized by the gap fraction. It is the ratio between light received at the canopy of apple trees and the one at the canopy of walnut trees and is obtained thanks to hemispherical photographs. The modality is the explanatory variable to **explain the variations of yield components related to the architecture and phenology of apple trees in the agroforestry context**. These components are identified during the internship. Many results complete previous studies. More specifically, the focus is on 45 apple trees (15 of each modality) selected in previous works on this parcel. The modality has no impact on height but on trunk section. Floral load is different between Agroforestry Control trees and Agroforestry Row trees. Multi-year operating sequences of branches, i.e the length shoot and the buds' nature from one year to another (floral or vegetative) are also studied : The analysis shows that the N-year shoot length determines the N+1-year floral buds frequency. For the growth fruit monitoring, there is no significant difference between modality at each date but the gap widens as the study progresses. On marked fruits for tracking, fruits drops and number of fruits affected by codling moths are monitored. All these results are interpreted with a critical glance taking the limits of statistical models and of the device into account.

**Key words : apple trees, agroforestry, shade, agroecology, orchard, gap fraction, yield components**

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage Pierre-Eric LAURI, également directeur adjoint de l'UMR pour son encadrement, sa disponibilité et son positivisme. Merci pour toutes ces discussions et ces rencontres qui m'ont motivée tout au long du stage.

Merci à Marie-Odile BANCAL de m'avoir rassurée et pour ces échanges enrichissants qui m'ont permis d'avancer.

Je remercie le GIS Fruits pour le financement de mon stage de 6 mois me permettant d'acquérir une belle expérience et de clôturer mon master de la meilleure des manières.

Merci au département de l'Hérault, partenaire du projet PIRAT, qui finance le programme en faveur du développement agricole.

Ensuite, je remercie tous les membres du programme ALTO qui contribue financièrement et scientifiquement aux travaux sur la parcelle GAFAM et avec qui j'ai pu échanger lors de rassemblements.

Merci à tous les membres de l'UMR ABSys ainsi qu'à tous les stagiaires pour leur accueil et tous les moments de partage.

Enfin, je remercie ma famille qui m'a encouragée et soutenue tout au long de mon cursus et de ce stage. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir et arriver jusqu'ici.

## Abréviations

ABSys : Agrosystèmes Biodiversifiés

AC : Agricultural Control

AFR : AgroForestry Row

AFIR : AgroForestry InterRow

ALTO : Systèmes en Arboriculture et Transition agroécologique

ANOVA : Analyse de variance

BRF : Bois Raméal Fragmenté

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

Ciheam-IAMM : Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

GAFAM : Growing AgroForestry systems with Apple in the Mediterranean

IFT : indicateur de fréquence de traitement

$$\text{IFT traitement} = \frac{\text{dose appliquée}}{\text{dose de référence}} \times \frac{\text{surface traitée}}{\text{surface de la parcelle}}$$

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

LER : Land Equivalent Ratio

LiDAR : Light Detection And Ranging

NCI : Neighbourhood Crowding Index

$$[1] \text{ NCI} = \frac{1}{\sum_{i=0}^t GF} \times \sum_{i=1}^n \frac{CSA_i}{\text{distance}_i}$$

(T)CSA : (Trunk) Cross Section Area

PIRAT : Projet Interdisciplinaire de Recherche et développement en Agroforesterie

SMA : Standardized Major Axis

UMR : Unité Mixte de Recherche

## Table des matières

I. Cadre, contexte et problématique .....	10
I.1. Cadre du stage.....	10
I.2. Contexte pomiculture.....	10
I.2.1. Phénologie du pommier .....	10
I.2.2. Les pratiques observées dans un verger de pommiers .....	11
I.2.3. Les principaux bioagresseurs du pommier .....	11
I.2.4. Les composantes du rendement .....	11
I.3. État de l'art.....	12
I.3.1. La diversification par l'agroforesterie .....	12
I.3.2. Le pommier en agroforesterie .....	13
I.4. Problématique .....	15
II. Matériels & Méthodes .....	16
II.1. Description du dispositif expérimental.....	16
II.1.1. Le milieu.....	16
II.1.2. Le système agroforestier.....	16
II.1.3. Itinéraire technique .....	17
II.2. Choix des variables étudiées et protocoles .....	18
II.3. Analyse statistiques hypothèses testées et validées .....	19
III. Résultats .....	21
III.1. Caractérisation de l'environnement lumineux par le gap fraction .....	21
III.2. L'influence du contexte agroforestier sur les composantes du rendement du pommier .....	22
III.2.1. Hauteur des arbres.....	22
III.2.2. Surface de section des troncs (TCSA) des arbres .....	22
III.2.3. Filiations.....	23
III.2.4. Floraison : nombre de fleurs et charge florale.....	24
III.2.5. Taux de nouaison et charge en fruits.....	24
III.2.6. Dynamique de croissance des fruits .....	25
III.2.7. Nuisibilité liée au carpocapse.....	27
Conclusion.....	33
Références bibliographiques .....	34
Annexes.....	39
Annexe 1 : Calcul de l'apport d'engrais organique.....	39
Annexe 2 : Itinéraire technique appliqué à la parcelle GAFAM depuis 2017 .....	40
Annexe 3 : Protocole de mesure de la hauteur des arbres .....	43
Annexe 4 : Protocole de détermination des filiations .....	44

Annexe 5 : Protocole de comptage du nombre d'inflorescences par arbre .....	45
Annexe 6 : Protocole de comptage fruits .....	46
Annexe 7 : Protocole suivi croissance des fruits .....	47
Annexe 8 : Classification ascendante hiérarchique avec les données de gap fraction .	48
Annexe 9 : Hauteur des pommiers en fonction du gap fraction pour les trois modalités .....	49
Annexe 10 : TCSA en fonction du gap fraction pour les trois modalités .....	49
Annexe 11 : Nombre d'inflorescences par arbre en fonction de la modalité.....	50
Annexe 12 : Comparaison des charges en fruits calculées avec le TCSA d'avril et le TCSA de juillet.....	50

## Table des figures

Figure 1 : Les stades phénologiques du pommier de Fleckinger (Fleckinger, 1964) .....	10
Figure 2 : Dégâts de pucerons cendrés (à gauche) et de carpocapse (à droite) sur pommiers (domaine de Restinclières, le 27/05 et le 07/07/2022) .....	11
Figure 3 : Schéma du fonctionnement général et des composantes du rendement du pommier .....	12
Figure 4 : Nombre d'articles publiés sur les sujets des arbres fruitiers et sur le sujet des arbres fruitiers associés entre 2006 et 2015 (Lauri et al., 2016) .....	13
Figure 5 : Gap fraction pour les trois modalités agroforestières étudiées au mois d'avril et au mois d'août, (Pitchers et al., 2021).....	13
Figure 6 : Schéma représentant les différences architecturales, de croissance végétative et de morphologie du pommier associé au noyer par rapport à la modalité agroforestière (Pitchers et al., 2020).....	14
Figure 7 : Profil architectural d'une agroforêt à damar, Sumatra (Indonésie) (Torquebiau, 1984).....	15
Figure 8 : Suivi des températures et précipitations moyennes journalières de la station météo située sur la parcelle A2 du domaine départemental de Restinclières de mars à juillet 2022..	16
Figure 9 : Localisation de la parcelle A1 du dispositif GAFAM sur le domaine de Restinclières et situation des pommiers sur la parcelle .....	16
Figure 10 : Schéma explicatif des trois modalités agroforestières possibles pour les pommiers étudiés et situation sur la parcelle expérimentale (domaine départemental de Restinclières) .	17
Figure 11 : Mesure de diamètre de pomme pour le suivi de croissance .....	19
Figure 12 : Exemple de « filiation » : bourgeon floral en 2021 (bourse) – mesure de la longueur de rameau 2021 - bourgeon floral en 2022 .....	19
Figure 13 : Photographie hémisphérique (à gauche) du 20/06/2022 au domaine de Restinclières au-dessus du pommier n°109 de la modalité AFIR et photographie seuillée (à droite) avec le logiciel Winscanopy .....	21
Figure 14 : Diagramme barres du gap fraction moyen pour les trois modalités agroforestières .....	21
Figure 15 : Boxplot hauteurs des pommiers en cm en fonction de la modalité agroforestière	22
Figure 16 : Boxplot TCSA des pommiers en cm <sup>2</sup> en fonction de la modalité agroforestière .	22
Figure 17 : Corrélation entre la fréquence des bourgeons floraux en 2022 et la longueur des rameaux 2021 .....	23
Figure 18 : Boxplot charge florale (fleurs/cm <sup>2</sup> de TCSA) des arbres en fonction de la modalité agroforestière.....	24
Figure 19 : Boxplot taux de nouaison (nombre de d'inflorescences avec au moins un fruit/nombre d'inflorescences total) des pommiers en fonction de la modalité agroforestière	24
Figure 20 : Boxplot charge en fruits (fruits/cm <sup>2</sup> de TCSA) des arbres en fonction de la modalité agroforestière.....	25
Figure 21 : Dynamique de croissance des diamètres des fruits (mm) du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières .....	25
Figure 22 : Boxplot diamètres des fruits (mm) aux différentes dates du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières .....	26
Figure 23 : Taux de croissance relatif (RGR) des pommes du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières .....	26
Figure 24 : Nombre de chutes de fruits aux différentes dates entre le 10/06/2022 et 08/08/2022 en fonction de la modalité agroforestière.....	27

Figure 25 : Nombre de fruits attaqués par le carpocapse aux différentes dates entre le 10/06/2022 et 08/08/2022 en fonction de la modalité agroforestière.....	27
Figure 26 : Orchard puzzle (Barritt, 1992).....	29
Figure 27 : Dimension temporelle et spatiale du design d'un verger (Simon et al., 2017).....	32

## Table des tableaux

Tableau 1 : Exemples de facteurs potentiellement modifiés dans un système agroforestier (Dupraz et al, 2008).....	15
Tableau 2 : Variables mesurées au cours du stage, méthode appliquée, population et tests effectués..	19
Tableau 3 : Résultats de la méthode SMA appliquée à la fréquence de bourgeons floraux en 2022 et la longueur des rameaux 2021.....	23

## Introduction

La pomme est le fruit le plus consommé en France et en Europe. La France est le troisième producteur européen avec 1,6 millions de tonnes produites en 2020 (FAOSTAT, 2020). La production de pommes a beaucoup évolué lors des dernières décennies. Tout d'abord, les recherches agronomiques sur la conception et la gestion (taille, traitements, sélection génétique...) des vergers de pommiers ont augmenté considérablement la productivité. La conduite de la plupart des vergers est dite intensive avec peu de diversité variétale et une densité de plants à l'hectare élevée pour atteindre le rendement maximal. En parallèle, la sélection génétique a également permis d'augmenter les rendements et la qualité esthétique des fruits. Ces évolutions sont observées pour la plupart des fruitiers, mais elles ont rendu dans le même temps les producteurs dépendants des produits phytosanitaires.

Pour gérer les pressions biotiques et abiotiques du milieu, les traitements sont abondants et répétés dans les vergers. L'indicateur de fréquence de traitement moyen en 2018 pour les vergers de pommiers conventionnels en France est de 31,5 (Agreste, Enquêtes pratiques phytosanitaires en arboriculture 2018), bien plus élevé que pour la plupart des autres fruitiers. Les conséquences sont dangereuses pour l'environnement mais aussi pour la santé des consommateurs et des agriculteurs, il est urgent de trouver des méthodes alternatives afin de réduire l'usage des intrants. Les recherches montrent que la diversification des cultures, par les services écosystémiques qu'elle rend, permet de tendre vers des agroécosystèmes plus résilients (Steiner et al., 1984 ; Kremen et al., 2012). Une démarche de diversification agricole est l'agroforesterie qui consiste à associer culture(s) pérenne(s) et culture(s) annuelle(s) sur différentes strates dans un même espace. Les services rendus par la culture d'arbres fruitiers en France sont constatés à différents niveaux (Bopp et al., 2019). Les connaissances sur l'agroforesterie à base d'arbres fruitiers en milieu tempéré sont limitées, l'étude de ces associations complexes peut participer à faire avancer la transition agroécologique et mérite donc toute l'attention de la recherche agronomique.

L'UMR ABSys propose ce stage avec pour objectif une meilleure compréhension de la façon dont les environnements agroforestiers vont affecter l'architecture, le fonctionnement des pommiers et la production de pommes. Les connaissances sont remises en cause car, il faut prendre en considération les interactions directes et indirectes avec les plantes voisines (Lauri et al., 2021). L'augmentation de la diversité fonctionnelle végétale offre des ressources et des habitats pour les auxiliaires des cultures. Plus particulièrement, dans le cadre de cette étude, des pommiers, noyers et un cortège d'infrastructures agroécologiques (bandes fleuries, haies) sont associés. Ceci permettrait, notamment en créant des microclimats, de faciliter l'accès à des ressources et aiderait à la régulation biologique en diminuant les dynamiques d'infestation et d'infection (Sarhou et al., 2006). Étant donné la quantité et la complexité des variables de ce système, une approche systémique est nécessaire. On choisit d'observer plus précisément la partie aérienne des pommiers par l'étude de l'environnement lumineux caractérisant en partie le milieu. Cela sans oublier les nombreuses autres interactions induites par le contexte agroforestier. Des variables ont été mesurées relevant de l'architecture du pommier (spatial) : hauteur, surface de section, longueur de rameaux. L'arbre est également suivi dans le temps avec des variables phénologiques : succession des natures de bourgeons entre années consécutives, charge florale, charge en fruits, taux de nouaison, dynamique de croissance des fruits, nuisibilité du carpocapse. On cherche à expliquer ces variables en fonction de la situation agroforestière du pommier caractérisée par la modalité (variable qualitative) ou par une variable quantitative mesurée, le gap fraction.

Dans une première partie, ce rapport présente le cadre du stage, le contexte et les enjeux autour de la pomiculture menant à la problématisation du sujet. La seconde partie décrit les matériels et les méthodes mobilisés pour y répondre. Dans un troisième temps, les résultats obtenus seront présentés suivis d'une dernière partie consacrée à la discussion et aux perspectives que cette étude ouvre. Une conclusion du stage clôture ce rapport.

# I. Cadre, contexte et problématique

## I.1. Cadre du stage

Ce stage se déroule au sein de l'UMR ABSys qui rassemble INRAE (organisme d'accueil du stage), le CIRAD, l'institut Agro-Montpellier et le Ciheam-IAMM. Les travaux de cette unité portent sur l'étude d'agroécosystèmes à base de plantes pérennes, dont l'agroforesterie, avec pour objectif d'accompagner la transition agroécologique dans les environnements méditerranéens et tropicaux. Les membres de l'équipe se trouvent sur différents sites, ce stage se déroule sur le campus de la Gaillarde de l'institut Agro à Montpellier (34).

L'objet d'étude de ce stage est le dispositif GAFAM (Growing AgroForestry with Apple - Mediterranean) qui est soutenu par deux projets. Le projet PIRAT qui apporte un appui financier du département de l'Hérault depuis une quinzaine d'années, et le projet ALTO (DEPHY EXPE, 2018-2023) qui regroupent des expérimentations sur trois sites : le premier au CTIFL de Balandran (30), le second sur le site d'INRAE de Gotheron (26) et enfin le dernier, sur lequel porte ce stage, se situe à 16 km nord de Montpellier au domaine départemental de Restinclières (34). L'objectif est de produire des méthodes de conception, d'expérimenter des systèmes sur les trois sites, mais aussi de créer des connaissances sur les services écosystémiques et les contraintes du contexte agroforestier à base de fruitiers. Ce stage se déroule du 1er mars 2022 au 26 août 2022 ce qui permet de couvrir une grande partie des stades phénologiques du pommier, mais ne permet pas d'accéder à la récolte.

## I.2. Contexte pomiculture

### I.2.1. Phénologie du pommier

Le pommier est un arbre de la famille des Rosacées du genre *Malus*. Les fleurs de pommiers ont 5 sépales, 5 pétales et 20 étamines à filets libres. Les différents stades phénologiques observés sur les pommiers sont présentés ci-dessous (Figure 1).

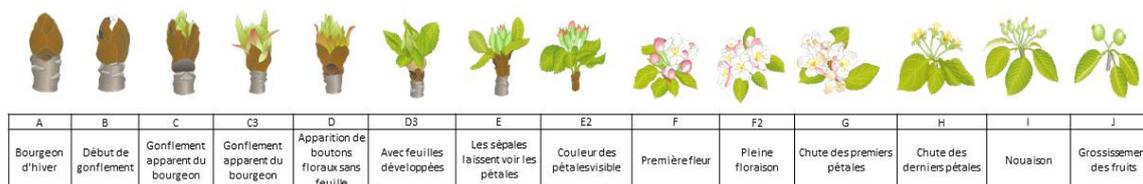


Figure 1 : Les stades phénologiques du pommier de Fleckinger (Fleckinger, 1964)

Depuis les années 1970-1980 il y a eu de nombreuses études sur l'architecture des végétaux (Hallé et al., 1978) pour comprendre les différents processus et stratégies qui se mettent en place lors de leur développement. L'architecture du pommier est complexe (Lauri et al., 2004) et la conduite et la taille des vergers influencent beaucoup la productivité des arbres (Lauri et al., 2014). Le plus fréquemment, on observe des vergers conduits de manière intensive, le plus productif possible avec une seule variété, une taille qui maximise la production et une utilisation d'intrants importante et répétée. Cette stratégie de production, dominante aujourd'hui au niveau mondial comme en France, est présentée comme une réponse aux contraintes biotiques et abiotiques du milieu. En effet, il y a beaucoup de maladies (feu bactérien, tavelure...) et de ravageurs (pucerons, carpocapse...) à gérer sur le pommier mais ces applications de fongicides et pesticides sont coûteuses pour l'agriculteur, pour l'environnement et pour les consommateurs. La production française permet de couvrir la demande nationale entre 2015 et 2017 (Bopp et al., 2019) mais il faut développer des systèmes de production plus durables. Cela passe par le bon choix de pratiques qui permettent de gérer les bioagresseurs tout en répondant aux besoins des pommiers à toutes les phases de développement. Il existe trois voies principales de production alternatives au conventionnel : la production fruitière intégrée, l'agriculture biologique et l'agroécologie (Lauri et al., 2020). Ces méthodes restent peu empruntées avec seulement 2% de la production moyenne de pommes entre 2015 et 2017 est en agriculture biologique par exemple (Bopp et al., 2019).

### *1.2.2. Les pratiques observées dans un verger de pommiers*

Il existe de nombreuses variétés de pommiers à travers le monde (ANPP, <http://www.lapomme.org/varietes/calendrier>) lui permettant de s'adapter à des contextes pédoclimatiques très différents même si un sol limoneux profond bien drainé est préférable. La variété de pomme choisie est greffée sur un porte-greffe obtenu par marcottage ou micropropagation. On peut trouver des plants ainsi greffés en pépinière. Le verger atteint une production maximale à partir de 4 à 5 ans (ANPP). L'arboriculteur doit prendre soin du verger tout au long de l'année. En hiver, il y a la plupart du temps des tailles effectuées selon la forme de conduite : buisson ou palmette par exemple (Lauri, 2019). Le pommier a un besoin de froid pour stimuler la fructification et permettre la levée de dormance (CTIFL, 2002).

Au printemps survient la floraison puis, grâce à la pollinisation, la fructification. La fertilisation et l'irrigation sont les pratiques clés pour le bon développement et une bonne productivité de l'arbre. En particulier, de mai à septembre, pendant la croissance végétative et le grossissement des fruits, les besoins en eau et en nutriments doivent être particulièrement bien gérés.

L'arboriculteur intervient également chaque année pour éclaircir (chimiquement ou manuellement) pour décharger l'arbre en fruits car la charge est généralement trop importante et les pommes n'arriveront pas toutes à maturité ou resteront à un petit calibre l'année N ce qui entraînera une faible production l'année N+1, c'est le phénomène de l'alternance. Cette étape est également essentielle, elle doit être faite au bon moment pour obtenir une production quantitative et qualitative.

Enfin, la récolte des pommes se fait généralement entre le début du mois d'août et la fin du mois de novembre selon les régions et les variétés. Les fruits sont cueillis avec leur pédoncule à maturité de consommation ou à maturité de cueillette (selon la teneur en amidon) (ANPP).

### *1.2.3. Les principaux bioagresseurs du pommier*

Les maladies, comme le feu bactérien ou la tavelure, et les ravageurs sont gérés avant tout par le choix variétal mais aussi par des stratégies de protection des vergers. Les deux principaux bioagresseurs qu'on étudie sur ce dispositif sont le puceron cendré et le carpocapse. Leurs dégâts entravent gravement la production des vergers. En effet, le puceron



Figure 2 : Dégâts de pucerons cendrés (à gauche) et de carpocapse (à droite) sur pommiers (domaine de Restinclières, le 27/05 et le 07/07/2022)

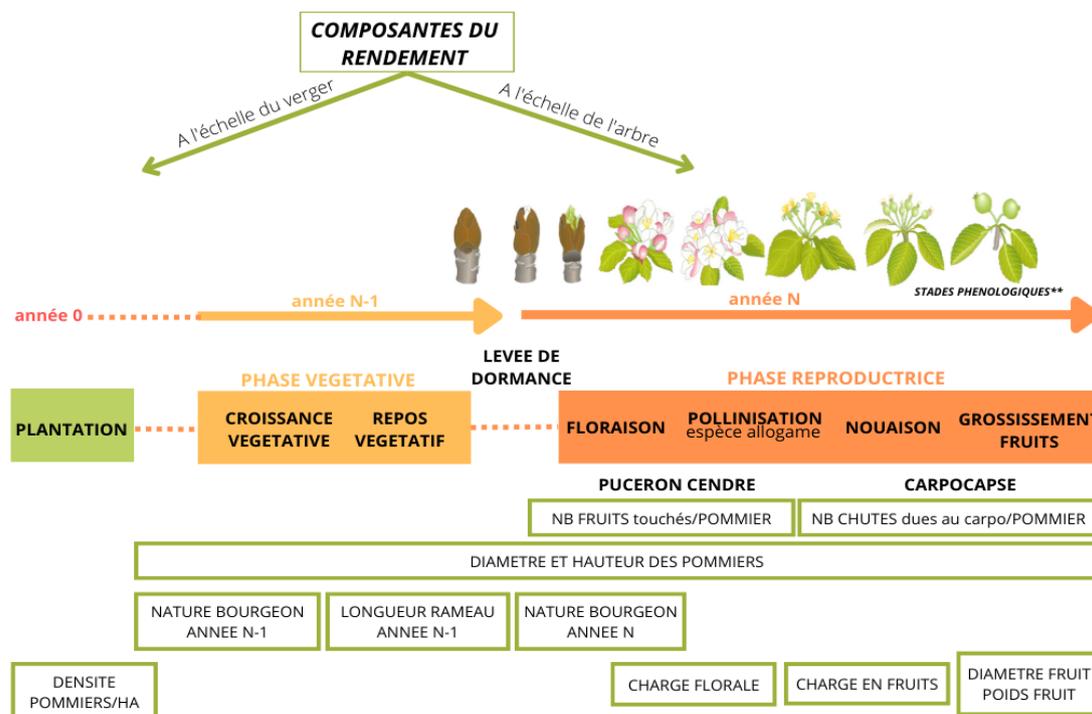
présent entre avril et juin, est un insecte piqueur suceur se nourrissant de sève élaborée. Il cause des déformations des organes sur lesquels il se trouve et introduit des maladies par ses piqûres. Le seuil de nuisibilité du puceron cendré est de 3 bouquets infestés sur 1000 avant la floraison (DRIA AF, 2019). Le carpocapse creuse des galeries en spirale dans les pommes. Ses attaques peuvent faire tomber les fruits précocement. Dans la région, il y a deux ou trois générations, de début mai à fin juin et de début juillet à mi-août et une troisième partielle (Dossier Filière CTIFL, 2021). Le seuil tolérable de dégâts estimé est fixé à 2% de pertes (Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture, 2007). Comme le carpocapse se déplace facilement en volant, la population de carpocapse dans le verger dépend du verger mais aussi de ses alentours (Ricci et al., 2009). Il existe plusieurs stratégies de gestion de ces bioagresseurs par des méthodes curatives et préventives (applications de produits phytosanitaires, de produits de biocontrôles), mais aussi par la gestion de l'architecture des arbres (Simon et al., 2007) ou en favorisant la richesse spécifique et l'abondance d'espèces dans le verger (Simon et al., 2009).

### *1.2.4. Les composantes du rendement*

La taille et la conduite du verger de pommier déterminent l'architecture de celui-ci (Lauri et al., 2004) et sa productivité. L'objectif est de gérer la culture de pommier de manière durable tout en maintenant la productivité. La conception de systèmes agroforestiers avec des pommiers pourrait aider à améliorer cela (Lauri et al., 2019) en profitant des services écosystémiques rendus par ce type de système. Cela

permettrait également de lutter contre des problèmes d'érosion, de compaction du sol et d'accès aux ressources (Lauri et al., 2020) et ainsi d'être plus résilient face au changement climatique incluant notamment des épisodes de fort rayonnement imprévisibles (Altieri, 2015).

Comme le montre la figure 3, les pratiques et les conditions environnementales dans lesquelles s'installe le verger de pommiers vont avoir des conséquences directes et indirectes sur les phases de développement du pommier en matière de croissance végétative et sur la phase de reproduction (Lauri et al., 2007), et donc sur les composantes du rendement du pommier. Ce sont les composantes qui ont été identifiées au cours du stage en parallèle des mesures de terrain qui ont été exécutées.



\*\*Fleckinger, J., 1964. Phénologie et arboriculture fruitière. In P. Grisvard and V. Chaudin [eds.], Le bon jardinier, 362-372. La maison rustique, Paris, France

Figure 3 : Schéma du fonctionnement général et des composantes du rendement du pommier

### 1.3. État de l'art

#### 1.3.1. La diversification par l'agroforesterie

Dans un système agroforestier, il y a au moins deux cultures associées, dont une pérenne, qui interagissent sur une même parcelle. L'agroforesterie s'applique également à d'autres productions agricoles comme l'élevage (dictionnaire agroécologie, et Somarriba et al., 1992). Elle rend des services écosystémiques qui permettent de tendre vers des systèmes plus résilients (Vigan et al., 2022). En effet, l'agroforesterie permet, en diversifiant la production, de séquestrer du carbone, d'augmenter la quantité de matière organique et d'aider à la rétention d'eau en structurant le sol par exemple. De plus, les systèmes de production agroforestiers peuvent être adaptés pour différents types d'écosystèmes et à plusieurs échelles (Nair et al., 1985). Pour cela, il faut prendre en compte toutes les composantes du milieu comme les propriétés des sols mais aussi les pratiques socio-culturelles et concevoir ainsi un système approprié (Simon et al., 2017). La diversification des cultures par l'agroforesterie permet également une gestion des populations des bioagresseurs (Sarhou et al., 2006).

L'étude de systèmes agroforestiers à base de fruitiers en milieu tempéré peut s'inspirer de systèmes traditionnels existants, comme les Streuobst (Herzog, 1998) mais doit faire l'objet de nouvelles études. Cependant, comme l'illustre le graphique ci-dessous, les études sont encore peu nombreuses, le nombre d'articles portant sur les associations à base de fruitiers par rapport aux études des fruitiers seuls est insuffisant compte tenu des enjeux actuels.

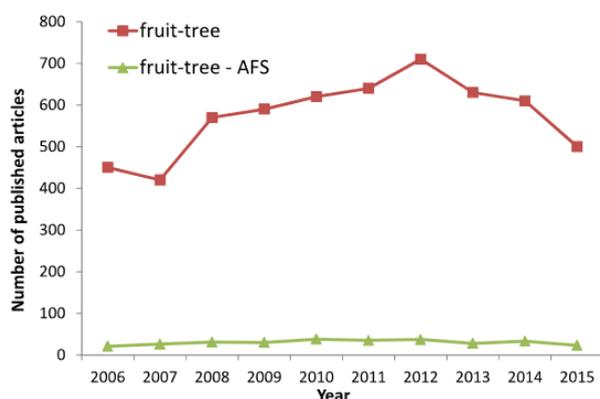


Figure 4 : Nombre d'articles publiés sur les sujets des arbres fruitiers et sur le sujet des arbres fruitiers associés entre 2006 et 2015 (Lauri et al., 2016)

### 1.3.2. Le pommier en agroforesterie

L'environnement lumineux au niveau des pommiers détermine en partie son architecture et son fonctionnement. Il y a des modifications dans la succession des événements dans le temps, la probabilité de floraison terminale est conditionnée par la longueur du rameau. En cas de floraison, cette longueur détermine également la taille de l'inflorescence et son aptitude à la nouaison (Lauri et al., 2007).

Les systèmes agroforestiers à base de fruitiers matures comme celui étudié pour ce stage sont exceptionnels, le dispositif GAFAM a fait l'objet de plusieurs études au sein de l'UMR ABSys et attire l'attention d'autres organismes de recherche. Ces études ont pour but de mettre en avant la situation la plus favorable pour le pommier associé au noyer ici (bonne productivité, santé du pommier...). L'observation de son comportement permettra de concevoir un agroécosystème biodiversifié à base de pommiers. Cette association a été choisie car les cycles biologiques du pommier et du noyer sont suffisamment décalés au printemps pour que l'ombrage induit par le noyer ne soit a priori pas négatif pour le pommier au moment de sa floraison. En effet, la floraison du pommier se fait généralement début avril et le début de feuillaison du noyer se produit généralement début mai, C'est ce qui est montré par la Figure 5 ci-dessous dans les trois situations étudiées (cf figure XX partie II) : c'est en août que la proportion de lumière interceptée par les noyers est la plus importante.

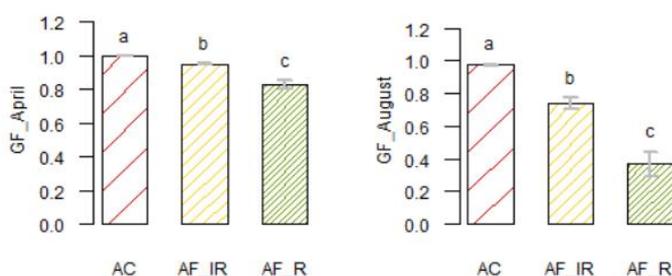


Figure 5 : Gap fraction pour les trois modalités agroforestières étudiées au mois d'avril et au mois d'août, (Pitchers et al., 2021)

Pour caractériser la lumière arrivant au pommier, on mesure le gap fraction à partir de photographies hémisphériques prises au-dessus de la canopée des pommiers qui représente la proportion de lumière reçue par le pommier par rapport à celle reçue par les noyers. La présence des noyers dans le verger modifie le microclimat (lumière, température, ombre, vent) des plantes se développant en-dessous. En effet, on peut observer des températures plus basses la journée et plus chaudes la nuit dans les systèmes agroforestiers que dans les systèmes conventionnels (Ricci et al., 2011). De plus, le contexte peut aussi avoir un effet de brise-vent et impacte le rayonnement reçu par les arbres de la strate basse (Simon et al., 2021). La caractérisation de ce microclimat est la première étape pour ensuite comprendre la réponse du pommier à ce contexte. Au cours de la thèse de Benjamin Pitchers, le paramètre le plus étudié est la lumière car il semble être le plus déterminant. Sa caractérisation a été faite par trois procédés : le NCI

communément utilisé en foresterie (Canham et al., 2004) résultant de la distance par rapport aux noyers à moins de 15 mètres (cf abrégations), par le gap fraction donnant la proportion de lumière reçue par les pommiers et par des données LiDAR ou télédétection par laser. Le NCI s'avère être pertinent pour interpréter les comportements architecturaux des pommiers mais moins pour caractériser l'environnement lumineux. L'acquisition de données avec capteurs LiDAR est plus précise mais le coût est plus important et l'analyse plus longue que pour le gap fraction. C'est donc ce dernier qui semble être le meilleur compromis pour caractériser la lumière reçue par les pommiers (Dul et al., 2020). Les noyers, faisant de l'ombre aux pommiers, le rayonnement lumineux arrivant sur la canopée des pommiers sera diminué. Cette modification de l'environnement lumineux va modifier le comportement architectural des pommiers (Lauri et al., 2007). Les résultats existants portant particulièrement sur l'architecture du pommier sont résumés sur la Figure 6.

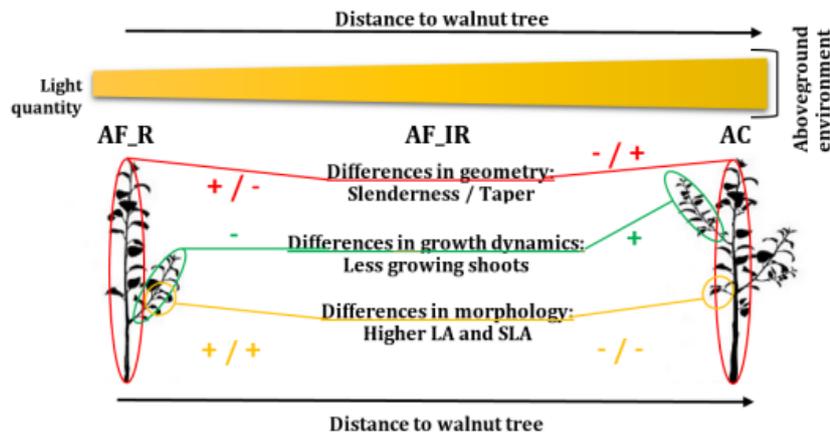


Figure 6 : Schéma représentant les différences architecturales, de croissance végétative et de morphologie du pommier associé au noyer par rapport à la modalité agroforestière (Pitchers et al., 2020)

On suppose que les pommiers vont favoriser la croissance au niveau des méristèmes primaires, c'est-à-dire l'allongement pour aller chercher la lumière (Kami et al., 2010). L'ombre ne semble pas modifier la croissance primaire mais modifie par contre la croissance secondaire étant donné qu'il n'y a pas de différence observée pour la hauteur mais qu'il y en a une pour la surface de section de tronc (TCSA) des pommiers en 2018. Cependant, des changements au niveau de la densité de ramification et de la morphologie des axes sont observés (Pitchers et al., 2020), les arbres qui reçoivent le plus de lumière ont tendance à avoir plus de branches.

La surface foliaire spécifique, c'est-à-dire le rapport entre la surface foliaire et le poids sec, et la surface foliaire sont moins importantes au soleil qu'à l'ombre des noyers (Pitchers et al., 2020). Cette différence pourrait compenser la différence de lumière reçue par les pommiers les plus ombragés par les noyers.

Les comportements diffèrent également au niveau temporel. Pour les deux années 2018 et 2019, une différence significative du nombre d'inflorescences et de la proportion de bourgeons floraux et végétatifs est observée. Ceci suppose que la présence des noyers aurait une influence sur l'équilibre reproductif/végétatif du pommier. En effet, le nombre d'inflorescences d'une année N est corrélé positivement à la surface foliaire spécifique de l'année N-1. Plus on a de surface foliaire une année plus il y aura d'inflorescence l'année suivante. En effet, 50% de la variabilité du nombre d'inflorescences en 2019 est expliquée par la surface foliaire spécifique de l'année 2018 (Pitchers et al., 2021).

Ainsi, la présence des noyers modifie l'environnement aérien des pommiers qui affecte à son tour le comportement dans l'espace et dans le temps des pommiers. Il y a également des conséquences souterraines non négligeables. L'eau, l'azote, les communautés bactériennes sont des paramètres qui peuvent être modifiés (Dupraz et al., 2008).

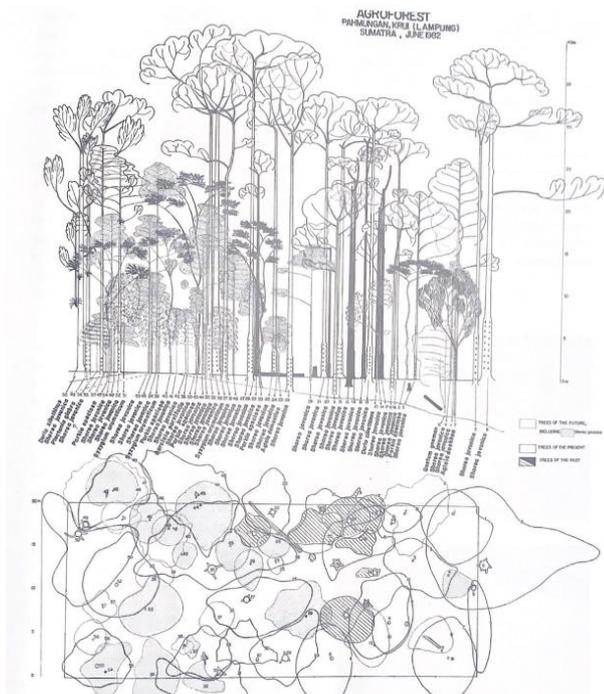


Figure 7 : Profil architectural d'une agroforêt à damar, Sumatra (Indonésie) (Torquebiau, 1984)

Facteurs modifiés au niveau aérien	Facteurs modifiés au niveau souterrain
Lumière	Structure du sol
Température	Bilan hydrique
Biodiversité	Biodiversité
Vent	Disponibilité des nutriments
...	Apport de matière organique
	...

Tableau 1 : Exemples de facteurs potentiellement modifiés dans un système agroforestier (Dupraz et al, 2008)

Les interactions entre les arbres dans un système agroforestier au niveau souterrain sont nombreuses (Figure 7) ce qui induit des changements importants pour le sol et les plantes (Tableau 1). Ces services et disservices rendus ne sont pas approfondis dans mon étude mais ne sont pas ignorés. L'accès aux ressources et la biodiversité sont modifiés. La modification des communautés d'insectes va impacter la dynamique d'infestation et l'incidence des principaux bioagresseurs (puceron cendré et carpocapse) (Sarhou et al., 2006) et aura aussi un rôle au niveau de la pollinisation.

On comprend que cela aura aussi des conséquences sur les composantes du rendement. Cette association innovante est à explorer pour comprendre comment la compétition et la facilitation s'équilibrent (Lauri et al., 2019).

## I.4. Problématique

Les services et disservices écosystémiques rendus par l'agroforesterie sont nombreux du fait du microclimat créé par la présence des noyers : température, lumière, vent. Cette association génère une compétition pour les ressources entre le pommier et les autres plantes du système mais peut aussi faciliter l'accès à l'eau et aux nutriments. L'objectif est d'observer comment s'équilibrent ces relations et comment le pommier s'adapte.

On suppose que le contexte agroforestier va avoir des conséquences sur l'architecture des pommiers, sur leur croissance végétative et reproductive et ainsi sur les composantes du rendement (Pitchers et al., 2021). L'état de l'art confirme l'influence de la modalité agroforestière sur les pommiers au niveau architectural dans l'espace et dans le temps. Ce stage permettra de compléter les résultats déjà acquis sur les aspects architecturaux (hauteur d'arbre, section de tronc, fonctionnement pluri-annuel des branches) mais aussi d'avoir de premiers résultats sur le plan agronomique (taux de floraison, taux de fructification, suivi de croissance des pommes, nuisibilité du carpocapse). On peut supposer que la différence entre les traitements agroforestiers puisse se faire sentir après la nouaison, lorsque la lumière interceptée par la canopée des pommiers sera plus impactée. Le rendement ne pourra pas figurer dans ce rapport étant donné la date de fin de stage qui se trouve être avant la récolte.

**Comment expliquer les différentes valeurs des composantes du rendement, relevant de l'architecture et de la phénologie, du pommier dans un contexte agroforestier avec des noyers ?**

## II. Matériels & Méthodes

### II.1. Description du dispositif expérimental

#### II.1.1. Le milieu

La parcelle étudiée se situe dans le domaine départemental de Restinclières de 240 ha. On y trouve 40 ha de parcelles en agroforesterie, dont cette parcelle GAFAM de 0,137 ha. Les services écosystémiques sont stabilisés, on est proche de l'équilibre écologique (Duru et al., 2015). On y trouve un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers généralement doux et humides.

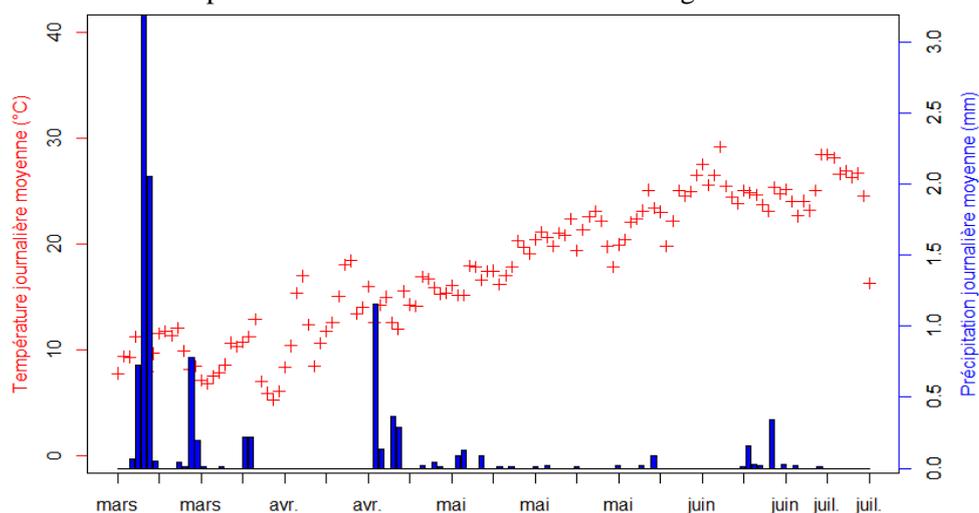


Figure 8 : Suivi des températures et précipitations moyennes journalières de la station météo située sur la parcelle A2 du domaine départemental de Restinclières de mars à juillet 2022

Les précipitations annuelles sont proches de 800mm avec des épisodes extrêmes de pluies et des périodes de sécheresse longues. On y trouve des sols de types fluvisols et calcosols. La texture du sol est argilo-limoneuse et la profondeur moyenne de sol est de 1,5 mètre. La parcelle est à quelques dizaines de mètres du Lez et du Lirou et les rangées de noyers et de pommiers sont orientées est-ouest.

#### II.1.2. Le système agroforestier

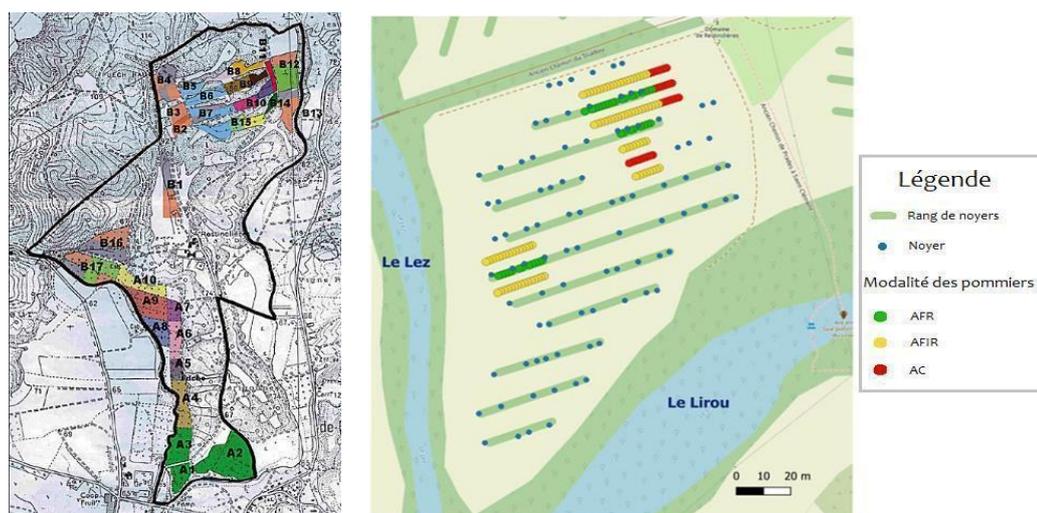


Figure 9 : Localisation de la parcelle A1 du dispositif GAFAM sur le domaine de Restinclières et situation des pommiers sur la parcelle

Le système suivi associe des pommiers et des noyers ainsi qu'un cortège d'infrastructures agroécologiques (bandes fleuries, haies...). La parcelle agroforestière expérimentale est mature avec des

noyers âgés de 27 ans et des pommiers âgés de 6 ans en 2022. Les pommiers sont du cultivar Dalinette qui a été choisie pour sa rusticité et sa résistance à la tavelure et à l'oïdium. Elle est de fait préconisée en agriculture biologique (Sud&Bio, 2013). De plus, cette pomme est appréciée des consommateurs pour ses qualités gustatives (croquante, juteuse, parfumée, acidulée, sucrée).

Ce cultivar est greffé sur un porte-greffe Geneva® G202 moyennement vigoureux, de bonne production et régulière. Il confère à l'arbre une tolérance au puceron lanigère, au feu bactérien et au phytophthora. La compatibilité entre le porte-greffe et la variété est aussi à prendre en compte, la reprise a été un succès ici. Les plants proviennent du pépiniériste DALIVAL (<https://www.dalival.com/>) et sont fournis avec une certification des plants fruitiers (plan sanitaire et authenticité variétale).

Les noyers hybrides plantés en 1995 en strate haute sont destinés à la production de bois d'œuvre. Ils sont plantés en rangs espacés de 13 mètres, d'orientation Est-Sud Est – Ouest-Nord Ouest et les noyers d'un même rang sont espacés de 4 mètres (Figure 9). En 2016, les 141 pommiers Dalinette sont plantés ainsi que 7 pommiers de la variété Story (variété pollinisatrice). Les pommiers plantés à plus de 15 mètres des noyers forment le groupe témoin 'AC'. Les autres pommiers sont plantés dans les rangs de noyers, intra-rangs 'AFR' ou entre les rangées de noyers, inter-rangs 'AFIR'. Au sol se trouve du sainfoin, une légumineuse herbacée, semé en 2019. Les plants de pommiers morts au cours des premières années ont été remplacés. On s'intéresse aux 110 pommiers de la variété Dalinette plantés en 2016. Plus particulièrement, 45 arbres, 15 de chaque modalité, ont été choisis par Benjamin Pitchers lors de sa thèse pour étudier ce système.

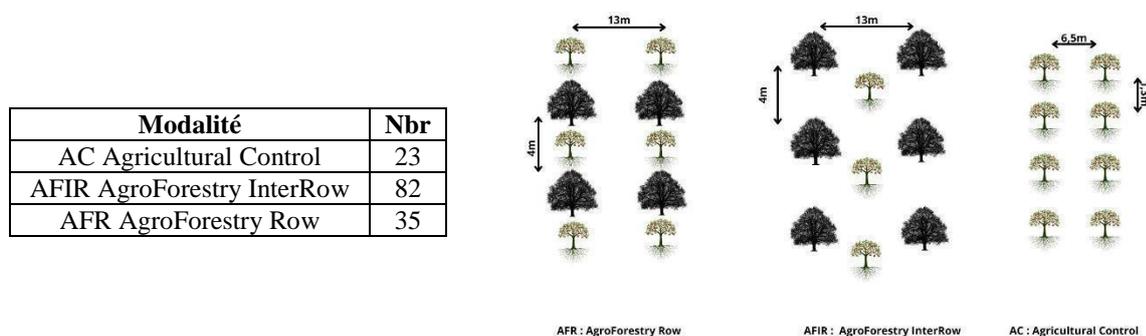


Figure 10 : Schéma explicatif des trois modalités agroforestières possibles pour les pommiers étudiés et situation sur la parcelle expérimentale (domaine départemental de Restinclières)

### II.1.3. Itinéraire technique

Sur cette parcelle, les interventions sont limitées au maximum afin qu'il y ait le moins de biais possible. En effet, il n'y a notamment pas d'opération de taille sur ces arbres car l'objectif est d'analyser les effets du contexte agroforestier sur le développement architectural naturel du pommier en évitant tout biais lié à des réactions dues à la taille. Ce verger est palissé pour faciliter sa gestion. Pour les apports et les traitements, l'intervention est reproduite de la même manière sur tous les individus. Les ressources en eau et en azote ne doivent pas être limitantes. L'irrigation est faite à trois reprises dans la semaine pendant deux heures à partir du mois de mai (dépend de la météo) en goutte à goutte. Ces apports doivent remplir les besoins des pommiers dès la floraison et tout au long du grossissement des fruits jusqu'à la récolte en septembre sans trop irriguer en fin de saison pour une bonne qualité et conservation des pommes (CTIFL, 2002). Les calculs ont été faits en considérant qu'un pommier mature a une évapotranspiration de 56 mm par semaine au maximum. 4 goutteurs sont placés aux pieds de chaque pommier avec un débit de 6,4 litres par heure. On apporte ainsi 38,4 litres d'eau par pommier et par semaine.

Concernant la fertilisation, il y a trois apports d'engrais organique. Les calculs de besoins en N, P et K des pommiers se trouvent en annexe 1.

Au pied des pommiers est disposé du BRF pour gérer l'enherbement (cf itinéraire technique en annexe 2). L'éclaircissage à 5 fruits/cm<sup>2</sup> de TCSA est effectué manuellement lorsqu'il n'y a plus de chutes physiologiques au début du mois de juin. En général, dans les vergers on le fait plus tôt pour réduire l'alternance de production.

L'indice de fréquence de traitement, de biocontrôle, est de 2 en 2021 et 5 en 2022 (traitements pour lutter contre le puceron cendré et le carpocapse). En moyenne, il est 20 en agriculture biologique (Agreste), dans le cadre de ce dispositif, on est en agriculture biologique très bas intrants.

## II.2. Choix des variables étudiées et protocoles

### Variable explicative

On considère que la lumière est le facteur dominant, celui qui peut influencer le plus sur le pommier (Pitchers et al., 2021), c'est pourquoi on choisit de considérer cette variable environnementale comme principale. Les pommiers sont placés de telle sorte qu'on distingue trois modalités agroforestières (15 de chaque) caractérisées chacune par la position par rapport aux noyers. Celui-ci est obtenu à partir de photographies hémisphériques prises avec un appareil muni d'un fisheye qui sont traitées à l'aide du logiciel Winscanopy. La moyenne de cette proportion de lumière reçue par le pommier permet de caractériser les trois classes. Le gap fraction peut aussi être pris comme nouvelle variable explicative. Il est mesuré dès que la feuillaison des noyers est pleinement mise en place, durant le 2<sup>ème</sup> 15aine de juin 2022 et est calculé à l'aide de la formule suivante pour les 45 arbres :

$$GapFraction = \frac{PPFD \text{ à la canopée du pommier}}{PPFD \text{ au dessus du noyer}}$$

PPFD : Photosynthetic Photon Flux Density

### Variables expliquées

Un certain nombre de variables expliquées sont collectées sur les pommiers eux-mêmes. Les mesures sont effectuées à différentes phases de développement du cycle du pommier avec pour objectif d'identifier quelles composantes du rendement vont être impactées par la présence des noyers, et à quel moment. Les variables mesurées que l'on cherche à expliquer sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessous.

	Mesure	Méthode	Population	Test
Avril	Hauteur de l'arbre	Annexe 3	110 pommiers Dalinette plantés en 2016 (19 AC , 68 AFIR, 23 AFR)	ANOVA type III
	Surface de section du tronc (TCSA)	$TCSA = \frac{\pi * d1 * d2}{4}$ d1 et d2 diamètres du tronc mesurés perpendiculairement Annexe 3	110 pommiers Dalinette plantés en 2016 (19 AC , 68 AFIR, 23 AFR)	ANOVA type III Tukey HSD
Mai	Séquence de fonctionnement pluriannuel des branches de pommier (« Filiation », Lauri et al., 1996) (Figure 10)	Détermination de la nature des bourgeons en 2021 et 2022 et mesure de la longueur du rameau 2021 Annexe 4	15 rameaux par pommier sur les 45 pommiers	SMA
	Charge florale	$\frac{Nb \text{ inflo}}{TCSA}$ Annexe 5	45 pommiers (15 répétitions par modalité)	ANOVA
Juin	Taux de nouaison	$\frac{Nb \text{ inflo avec 1 fruit}}{Nb \text{ inflo total}}$ Annexe 6	45 pommiers (15 répétitions par modalité)	Kruskal-Wallis

	Charge en fruits	$\frac{Nb\ fruits}{TCSA}$ Annexe 6	45 pommiers (15 répétitions par modalité)	ANOVA
Juillet	Dynamique de grossissement des fruits (Figure 11)	Suivi des diamètres de fruits et calcul du $RGR = \frac{\ln(d(t2)) - \ln(d(t1))}{t2 - t1}$ (Hoffmann et al., 2001) Annexe 7	4 fruits par pommier sur les 45 pommiers (60 répétitions par modalité)	ANOVA type III
Août	Dynamique nombre fruits touchés par le carpocapse	Comptage de fruits infestés	4 fruits par pommier sur les 45 pommiers (60 répétitions par modalité)	

Tableau 2 : Variables mesurées au cours du stage, méthode appliquée, population et tests effectués



Figure 12 : Exemple de « filiation » : bourgeon floral en 2021 (bourse) – mesure de la longueur de rameau 2021 - bourgeon floral en 2022



Figure 11 : Mesure de diamètre de pomme pour le suivi de croissance

Pour suivre la dynamique de croissance des fruits, les mesures ont été faites à deux reprises par semaine (lundi et jeudi) à partir du 10/06/2022 jusqu'au 08/08/2022 sauf la semaine du 18/07/2022. Les choix des tests appliqués dans les différentes situations sont expliqués dans le texte de la partie qui suit.

### II.3. Analyse statistiques hypothèses testées et validées

Le logiciel RStudio est utilisé pour réaliser les tests et les figures et le seuil de significativité est fixé à 0,01.

Les observations sont indépendantes, les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus sont vérifiées lorsqu'un test paramétrique est effectué (ANOVA, ANCOVA, Tukey, Pearson...).

Pour les mesures de hauteur d'arbre et de TCSA, on réalise une ANOVA de type III comme les effectifs sont déséquilibrés. Pour comparer les charges florales et les charges en fruits en fonction des modalités agroforestières, on fait une ANOVA classique. Pour comparer les taux de nouaison entre les modalités, on utilise un test non paramétrique de Kruskal-Wallis comme il s'agit d'un pourcentage qu'on calcule à partir de la mesure effectuée. Dans le cas de suivi de la dynamique des fruits, comme les fruits chutent entre les différentes dates de relevés, les effectifs de fruits suivis pour les différentes modalités changent et ne sont plus de 60 fruits comme au départ. On effectue donc une ANOVA de type III à chaque date. Lorsque l'analyse de variance montre un effet significatif du facteur (p-value de l'ANOVA <0.01), on fait un test post-hoc de Tukey HSD, test paramétrique, pour comparer les modalités deux à deux.

Les données de séquence de fonctionnement pluri-annuel des branches de pommier (succession des natures de bourgeon terminal en 2021 et 2022 et longueur des rameaux 2021 ; appelés couramment

« filiation » sont traitées à l'aide de la méthode SMA (Standardized Major Axis). C'est une régression linéaire symétrique, permettant d'estimer au mieux la droite décrivant la dispersion des deux variables sans faire d'hypothèses d'une relation causale entre les variables. Cette méthode est recommandée pour décrire une dispersion bivariée au lieu de la régression linéaire classique (Warton et al., 2006). On considère en effet, dans notre cas, que la longueur du rameau établi l'année N et son devenir au printemps de l'année N+1 dépendent tous deux de leur contexte architectural. L'objectif est de tester s'il existe une relation entre les variables longueur 2021 (cm) et la fréquence des bourgeons floraux en 2022, et d'en analyser les effets de la modalité agroforestière (pentes communes, si oui intercepts communs).

### III. Résultats

#### III.1. Caractérisation de l'environnement lumineux par le gap fraction

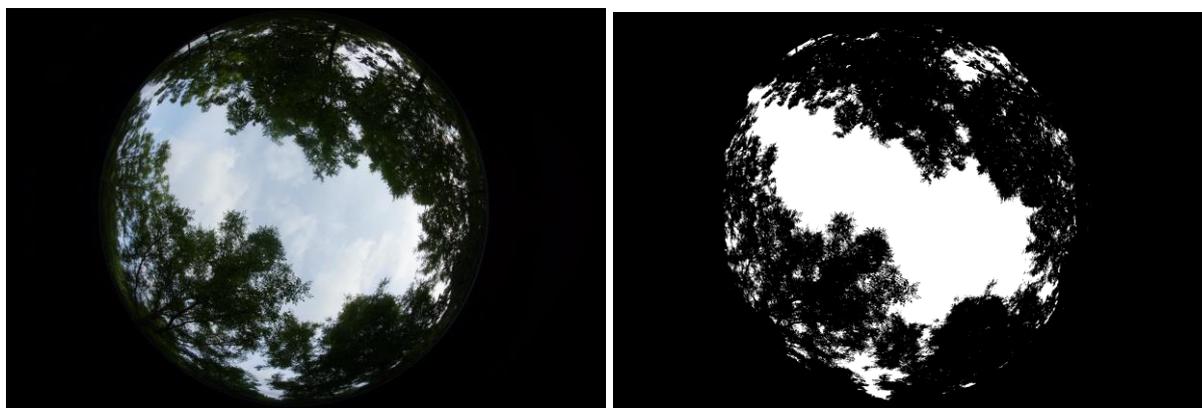


Figure 13 : Photographie hémisphérique (à gauche) du 20/06/2022 au domaine de Restinclières au-dessus du pommier n°109 de la modalité AFIR et photographie seuillée (à droite) avec le logiciel Winscanopy

Le gap fraction est calculé pour caractériser l'environnement lumineux au niveau des pommiers. Chaque photographie est traitée avec le logiciel Winscanopy (Figure 13). Avec cette nouvelle donnée, plusieurs pistes ont été explorées. Ces mesures permettent tout d'abord de caractériser les environnements lumineux des trois modalités par la moyenne de gap fraction au sein de chacune (Figure 14). On effectue un test de Kruskal-Wallis non paramétrique pour comparer les gap fraction mesurés en fonction des modalités car il s'agit d'une proportion (une grandeur calculée).

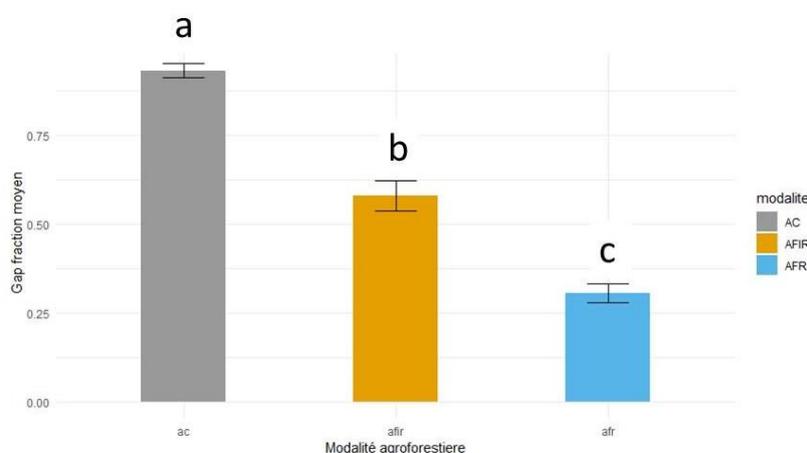


Figure 14 : Diagramme barres du gap fraction moyen pour les trois modalités agroforestières  
AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row  
Kruskal-Wallis ;  $p$ -value=2.2e-16. Test post-hoc de Dunn, les lettres correspondent aux groupes statistiques

Le gap fraction à la canopée des pommiers en 2022 a diminué depuis 2018 mais le gradient reste proche de celui établi en 2018. Pour traiter les données, j'ai choisi de travailler avec une variable catégorielle ; la modalité agroforestière. Les analyses effectuées en prenant en variable explicative le gap fraction (variable quantitative continue) sont en annexe.

## III.2. L'influence du contexte agroforestier sur les composantes du rendement du pommier

### III.2.1. Hauteur des arbres

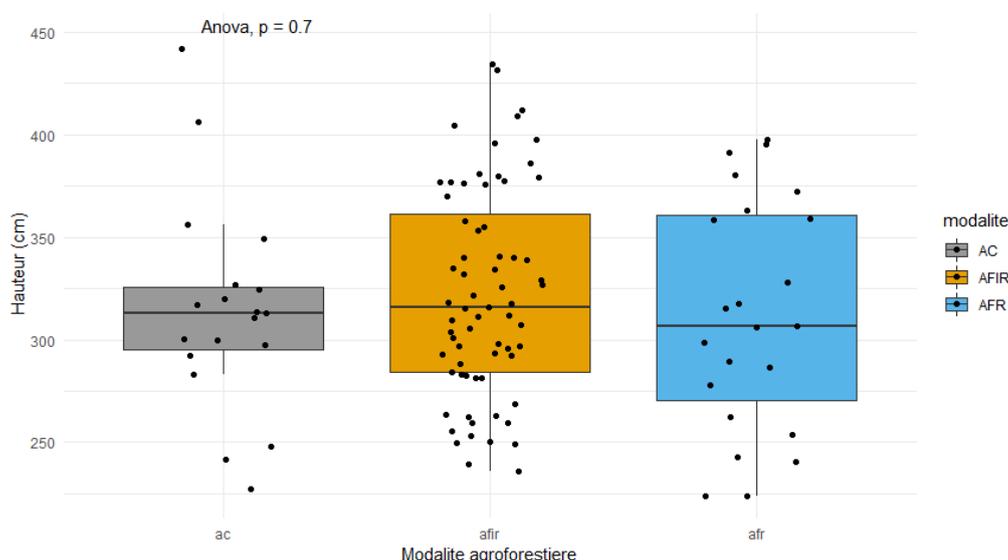


Figure 15 : Boxplot hauteurs des pommiers en cm en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row  
 Anova type III ; p-value = 0.7 > 0.01

Le diagramme boîte ci-dessus (Figure 15) visualise, pour les trois modalités, la hauteur des arbres. Un test ANOVA sur ces données nous permet de conclure que les hauteurs des pommiers ne sont pas significativement différentes (p-value=0,7). En annexe 9 se trouve le graphique représentant la hauteur des pommiers en fonction du gap fraction. Le résultat est confirmé, il n'y a pas de différence significative pour la hauteur des arbres.

### III.2.2. Surface de section des troncs (TCSA) des arbres

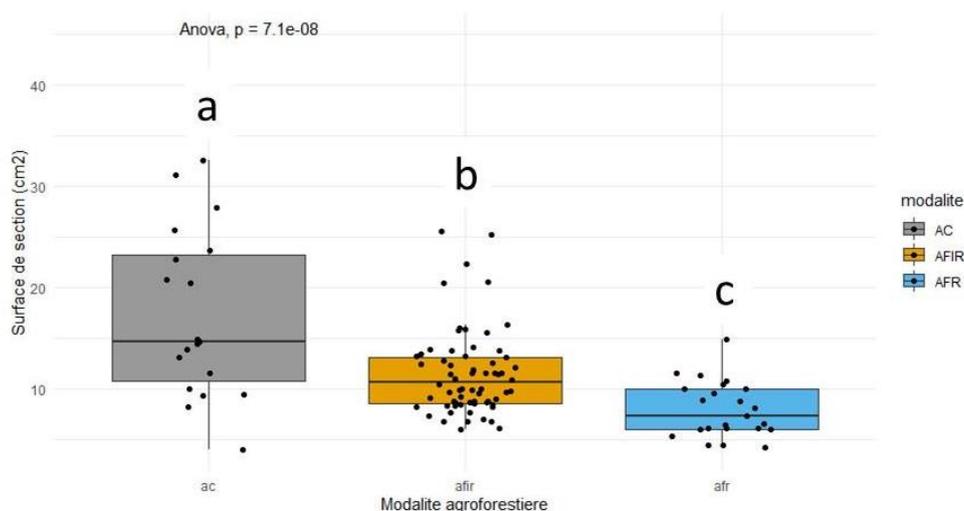


Figure 16 : Boxplot TCSA des pommiers en cm² en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row  
 Anova type III ; p-value = 7.1e-8 < 0.01. Test post-hoc Tukey HSD ; les lettres correspondent aux groupes statistiques

Il y a une différence significative entre les surfaces de section des pommiers pour les trois modalités (Figure 16). En effet, l'ANOVA effectuée montre cette différence (p-value=7,1e-8). Un test post-hoc

(Tukey HSD) permet de voir qu'elles sont bien différentes deux à deux. Les pommiers témoins (AC) ont une TCSA plus importante que les pommiers placés en agroforesterie (AFIR et AFR). La TCSA des AFIR est supérieure à celle des AFR, plus impactés par la présence des noyers.

Cette différence significative pour les sections des troncs est confirmée lorsqu'on effectue un test avec pour variable explicative le gap fraction (annexe 10). La TCSA augmente avec le gap fraction, plus il y a de lumière qui arrive à la canopée du pommier, plus la croissance végétative au niveau des méristèmes secondaires de l'arbre est importante.

### III.2.3. Filiations

Pour chaque point, on effectue des classes de longueurs de trois centimètres de sorte qu'il y ait au moins trois valeurs par classe. Au sein de chacune, on calcule la moyenne de longueur de rameaux 2021 et la fréquence de bourgeons floraux pour l'année 2022. L'étude des filiations est faite par la méthode SMA (Standardized Major Axis). Les données ont été transformées en logarithme pour répondre à l'hypothèse de distribution normale pour pouvoir tester l'isométrie et voir si la fréquence de floraison de 2022 évolue proportionnellement ou non en fonction de la longueur de rameau 2021.

Modalité agroforestière	Effectif	Pente	Intercept	Coefficient de corrélation	Significativité
AC	10	-0.16	0.042	0.19	0.21
AFIR	10	-0.24	0.087	0.11	0.36
AFR	10	-0.17	0.013	0.026	0.66

Tableau 3 : Résultats de la méthode SMA appliquée à la fréquence de bourgeons floraux en 2022 et la longueur des rameaux 2021

Les résultats de la SMA sont dans le Tableau 3. Avec une p-value = 0.643 > 0.01, on peut conclure qu'il y a bien une pente commune entre les trois modalités qu'on visualise sur la Figure 17. Cette pente traduisant le fait que plus le rameau 2021 est long, plus la fréquence de bourgeons floraux en position terminale diminue.

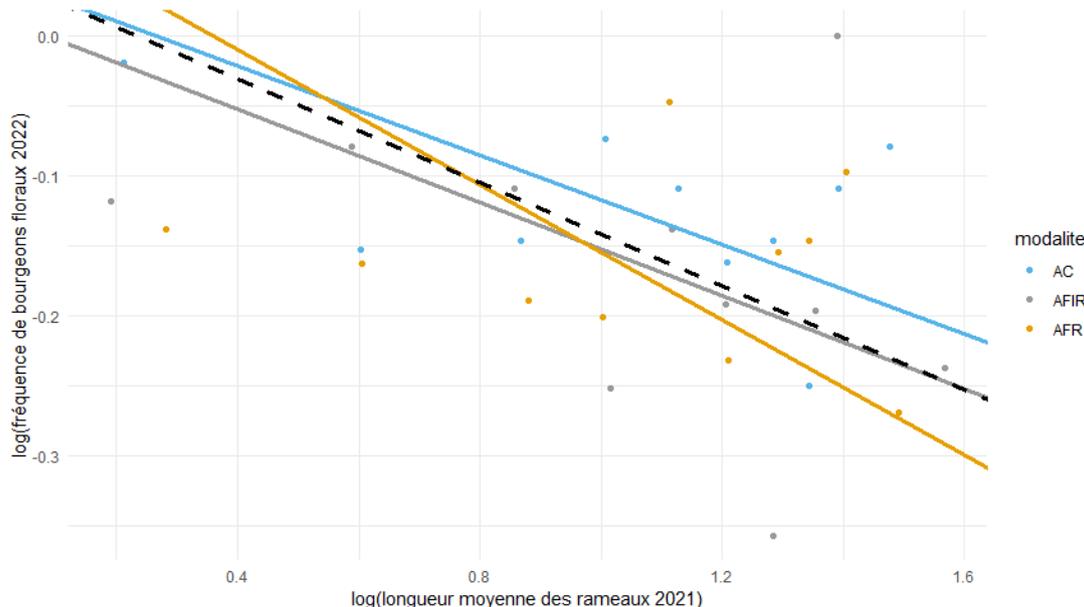


Figure 17 : Corrélation entre la fréquence des bourgeons floraux en 2022 et la longueur des rameaux 2021. Les droites sont ajustées (Tableau 5) à l'aide d'une régression SMA (Standardized Major Axis). La droite noire hachurée est la droite de pente commune

### III.2.4. Floraison : nombre de fleurs et charge florale

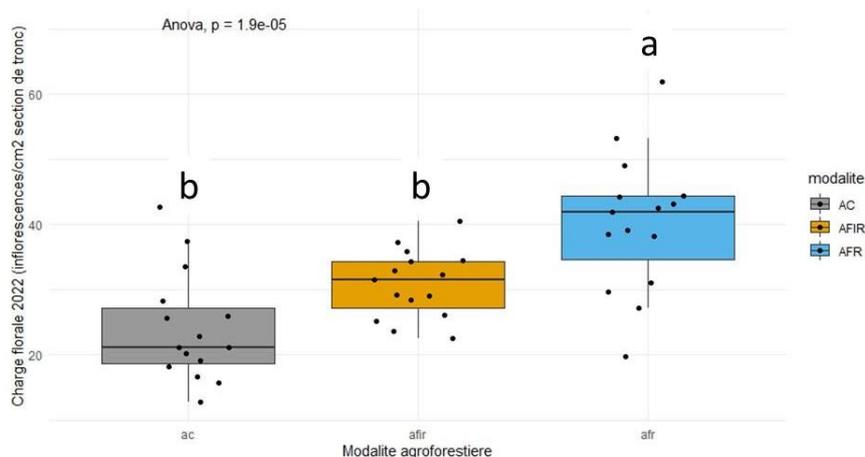


Figure 18 : Boxplot charge florale (fleurs/cm<sup>2</sup> de TCSA) des arbres en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row - ANOVA ;  $p\text{-value} = 1,9e-5 < 0,01$ . Test post-hoc Tukey HSD, les lettres correspondent aux groupes statistiques

La modalité d'agroforesterie n'affecte pas significativement le nombre d'inflorescences par arbre (annexe 11) mais affecte par contre significativement la charge florale (obtenue en divisant par la TCSA) comme sur la Figure 18. L'ANOVA donnant une  $p\text{-value} = 1,9e-5$ , un test post-hoc de Tukey HSD montre qu'il y a effectivement deux groupes différents. La charge florale des arbres en AFR est plus importante que pour les arbres AC et AFIR. Ceci est cohérent comme la TCSA significativement différente entre les modalités et que le nombre de fleurs par arbre ne l'est pas.

### III.2.5. Taux de nouaison et charge en fruits

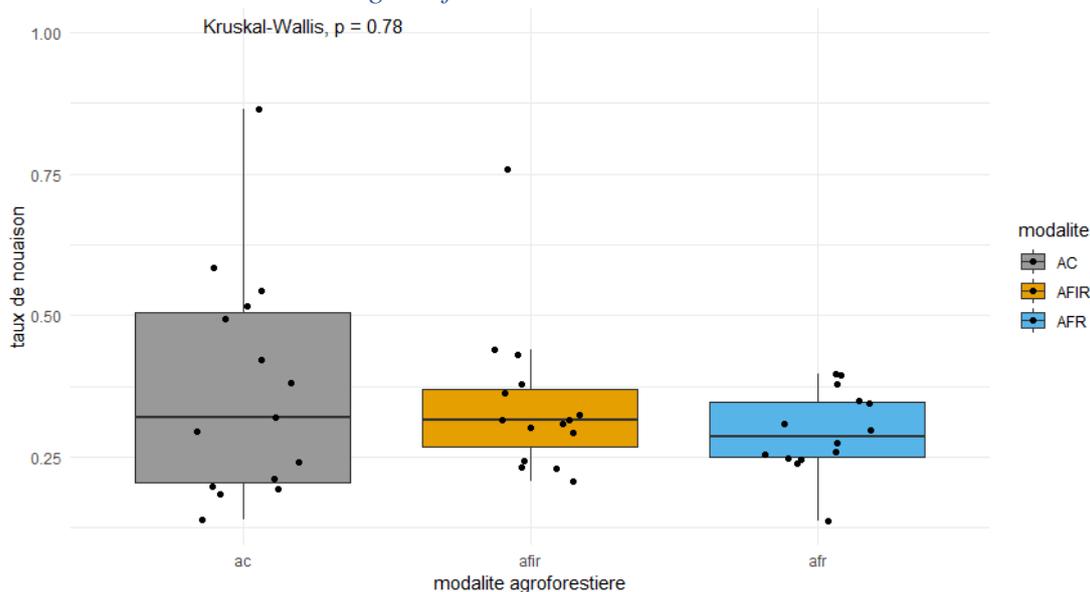


Figure 19 : Boxplot taux de nouaison (nombre de d'inflorescences avec au moins un fruit/nombre d'inflorescences total) des pommiers en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row - Kruskal-Wallis ;  $p\text{-value} = 0,78 > 0,01$

La nouaison dépend des insectes pollinisateurs, de la capacité de l'inflorescence à établir la transformation du pistil en fruit et de bien d'autres facteurs. D'après la figure 19, la présence de noyers n'influence pas la mise à fruit des pommiers. Le taux de nouaison, compris ici comme le nombre d'inflorescences qui donnent au moins un fruit, n'est pas significativement différent en fonction des modalités.

Comme pour la floraison, on peut prendre en compte le nombre de fruits par arbre ou la charge en fruits en fonction de la modalité.

Les chutes de fruits continuent après l'éclaircissage. Sur les 45 pommiers, le nombre de pommes a été déterminé mi-juillet pour avoir la charge en fruits exacte. Les surfaces de section des 45 individus concernés par ces mesures ont été mesurées une nouvelle fois car la croissance végétative des pommiers a continué entre avril et juillet (annexe 12 comparaison des charges en fruits). En effet, les charges sont significativement différentes aux deux dates. On conserve donc la TCSA mesurée en juillet 2022 pour cette analyse.

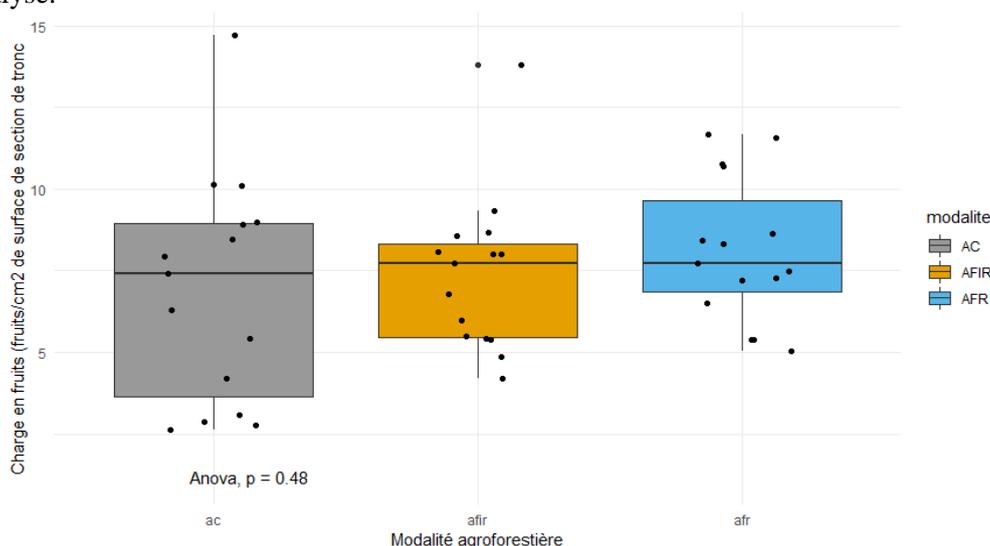


Figure 20 : Boxplot charge en fruits (fruits/cm<sup>2</sup> de TCSA) des arbres en fonction de la modalité agroforestière  
AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row. Test ANOVA ; p-value = 0,48 > 0,01

L'éclaircissage à 5 fruits/cm<sup>2</sup> de TCSA est fait manuellement début juin, c'est-à-dire une fois l'essentiel de la « chute physiologique » réalisée (Lakso, 2011). On vérifie que la charge en fruits des arbres soit proche de celle souhaitée et qu'elle ne soit pas significativement différente selon la modalité pour pouvoir comparer les suivis de dynamique de croissance des fruits (annexe ?).

### III.2.6. Dynamique de croissance des fruits

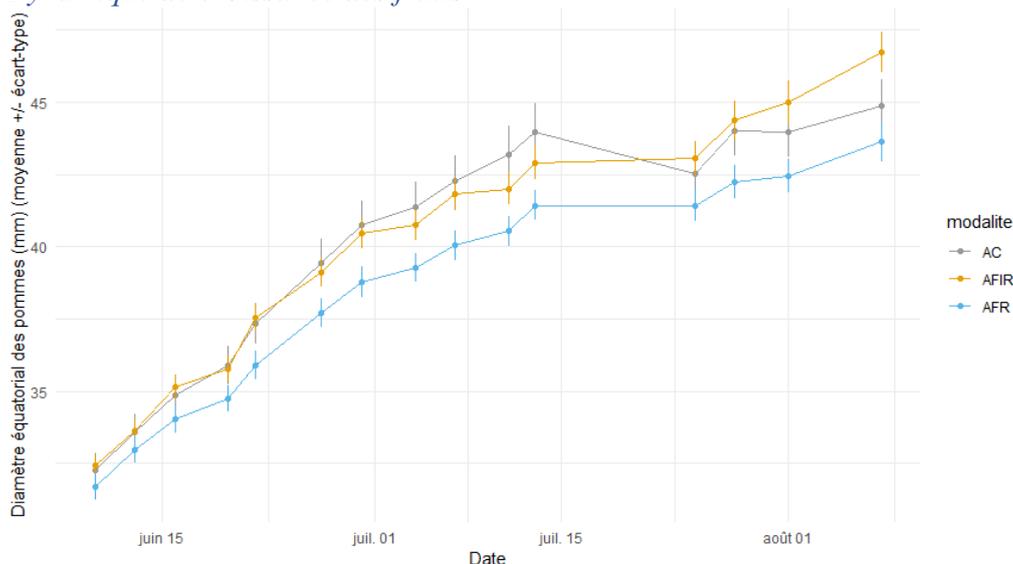


Figure 21 : Dynamique de croissance des diamètres des fruits (mm) du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières  
AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row

La tendance de la dynamique de grossissement des fruits est similaire quelle que soit la modalité. Le diamètre moyen des fruits aux différentes dates semble montrer des fruits plus petits pour la modalité AFR. L'effectif peut différer d'une date à l'autre comme il y a des chutes de fruits.

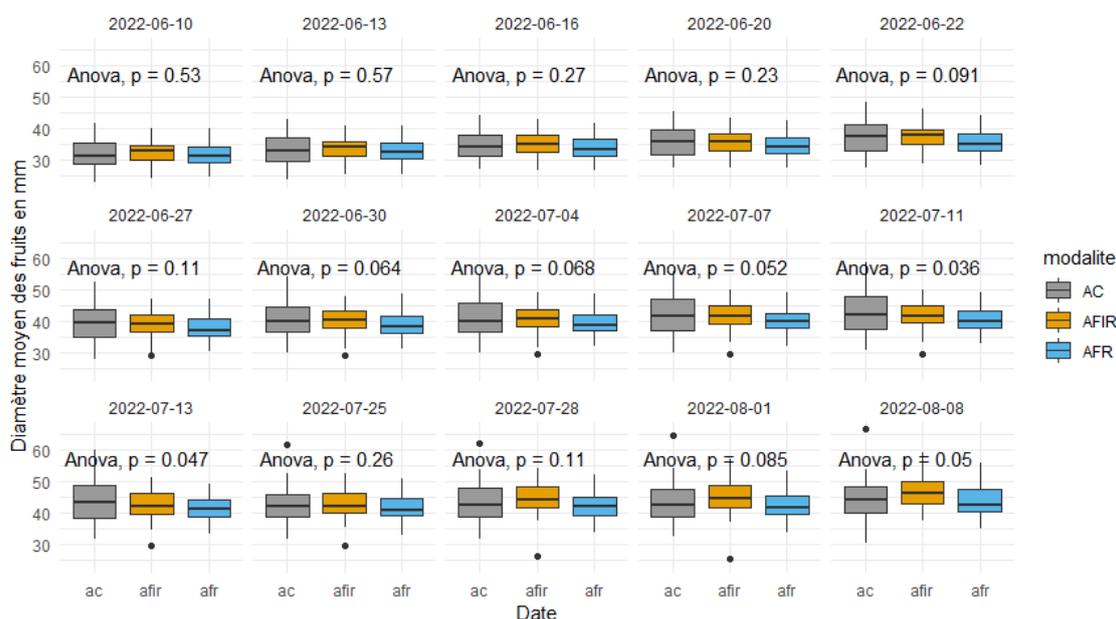


Figure 22 : Boxplot diamètres des fruits (mm) aux différentes dates du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières

AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row. ANOVA ;  $p$ -values  $>0,01$

A toutes les dates, une ANOVA de type III est effectuée (Figure 22). Les diamètres des pommes ne sont pas significativement différents. Ainsi, la croissance des fruits ne semble pas impactée par la modalité agroforestière.

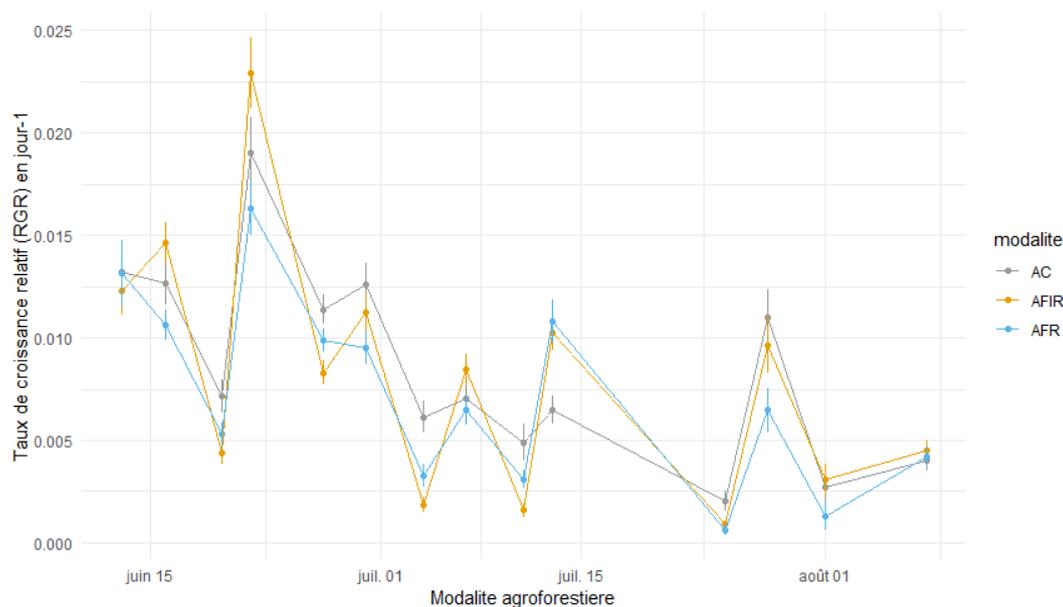


Figure 23 : Taux de croissance relatif (RGR) des pommes du 10/06/2022 au 08/08/2022 pour les trois modalités agroforestières

AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row

Les tests de comparaison de diamètres et de RGR donnent le même résultat, ils ne sont pas différents à toutes les dates d'observation pour toutes les modalités.

### III.2.7. Nuisibilité liée au carpocapse

Sur les 180 fruits suivis, à chaque date, on suit le nombre de fruits qui ont chuté et le nombre de fruits touchés par le carpocapse.

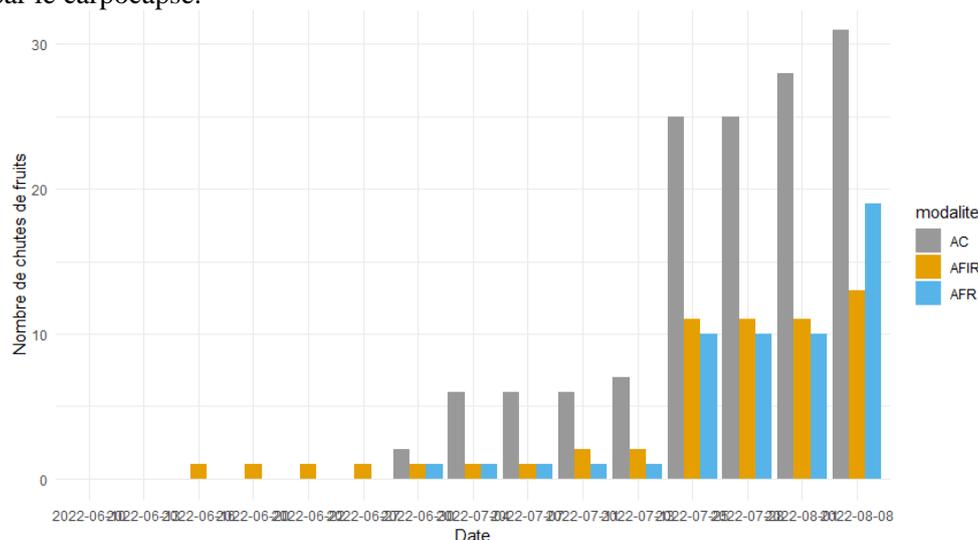


Figure 24 : Nombre de chutes de fruits aux différentes dates entre le 10/06/2022 et 08/08/2022 en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row

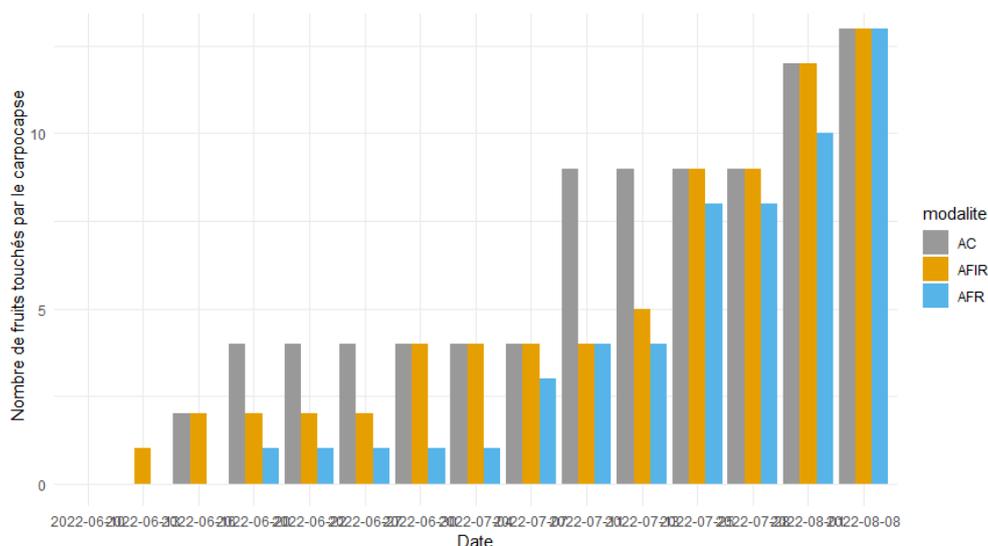


Figure 25 : Nombre de fruits attaqués par le carpocapse aux différentes dates entre le 10/06/2022 et 08/08/2022 en fonction de la modalité agroforestière  
 AC : Agricultural Control, AFIR : AgroForestry InterRow, AFR AgroForestry Row

Les arbres de la modalité AC sont ceux qui ont le plus de fruits qui chutent avec 31 fruits tombés au total entre le 10/06/2022 et le 08/08/2022. A la fin des relevés, le nombre de fruits touchés par le carpocapse est le même pour les trois modalités. Sur les 31 fruits qui ont chuté, 5 sont des fruits piqués par le carpocapse. Pour la modalité AFIR, on a 3 fruits infestés sur 13 chutes et pour les pommiers en AFR 4 sur les 19 chutes sont des fruits piqués. On peut également expliquer ces chutes par un rééquilibrage puits (fruits)/source (feuilles) des arbres mais aussi par les très fortes chaleurs du mois de juillet.

## IV. Discussion et perspectives

Un des objectifs est de créer des connaissances en agroforesterie fruitière en milieu tempéré. C'est un réel défi car l'agroforesterie est très complexe avec toutes les interactions qui y prennent place. Comprendre comment réagissent les pommiers dans ce système est au cœur de ces recherches. Plus particulièrement, les performances agronomiques et les régulations biologiques en contexte agroforestier du pommier associé au noyer.

### IV.1. Impact sur les pommiers de la situation agroforestière avec des noyers

#### *IV.1.1. Choix de la variable explicative*

Le fait de travailler avec trois modalités peut être remis en cause. C'est un choix effectué car cela semble être le plus parlant de travailler avec des classes mais il faut savoir que même si le positionnement est le même, les noyers n'ont pas tous la même architecture, la même phénologie et ne font donc pas le même ombrage aux pommiers. D'où l'idée de caractériser par le gap fraction.

Les photographies hémisphériques pour établir le gap fraction ont été prises fin juin, à 95% de croissance végétative (de la pleine feuillaison) des noyers et pas à 100%. On y serait plutôt au mois d'août mais les dates du stage ne permettent pas de faire les photographies, d'en extraire les gap fraction et de réaliser toutes les analyses avant la fin du stage.

Il y a plusieurs possibilités d'utilisation du gap fraction mesuré. On peut, comme on a choisi de le faire ici, prendre la moyenne de gap fraction au sein des classes existantes. Le gap fraction peut être considéré comme variable explicative continue, ces analyses se trouvent en annexe. Il est également possible de faire une nouvelle classification des arbres comme l'a effectuée Pitchers et al. (2021). Ces nouvelles classes peuvent être choisies par intervalle de gap fraction ou construites à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique (annexe 8). Les données n'ont pas été traitées avec ces nouvelles classes. On ne retrouve pas la classification de Benjamin Pitchers, un nouveau partitionnement des arbres ne présente pas d'intérêt ici encore plus si on veut comparer les années entre elles.

Pour la plupart des analyses, on se focalise sur la lumière pour caractériser l'environnement des pommiers. On pourrait s'intéresser plus à la température en tant que variable explicative. Les arbres en agroforesterie (AFIR et AFR) semblent protégés des températures extrêmes, les fruits chutent moins par exemple (31 pommes ont chuté en AC contre 13 en AFIR et 19 en AFR sur 60 fruits au départ pour chaque modalité). La distance par rapport aux noyers environnants qui entre dans le calcul du NCI peut aussi expliquer les modifications de comportement des pommiers.

Les sécheresses qui s'allongent et se multiplient rappellent l'importance de la gestion de l'eau qui peut également faire l'objet d'études sur cette parcelle. Dans sa thèse, Benjamin Pitchers étudie également de plus près l'utilisation de l'eau et la transpiration par unité de surface foliaire des pommiers (Pitchers, 2021).

#### IV.1.2. Contexte agroforestier et composantes du rendement du pommier

- Les composantes du rendement

Les composantes du rendement présentées dans la première partie n'existent pas dans la littérature, elles ont été identifiées pendant le stage. Plus particulièrement, travailler sur les composantes du rendement d'une culture pérenne est une nouveauté, il y a quelques essais sur pêcher par exemple (Aulagnier, 1995). La construction linéaire n'est pas idéale, il faudrait penser à schématiser en spirale ou de manière cyclique pour toujours faire référence aux années antérieures et ainsi tirer d'autres composantes du rendement. Le « orchard puzzle » de Bruce Barritt (Figure 26) traduit bien ce dynamisme et cette complexité.

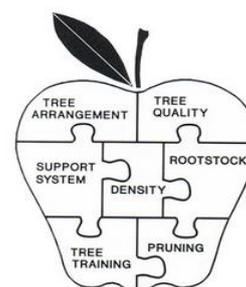


Figure 26 : Orchard puzzle (Barritt, 1992)

L'identification de ces composantes permet d'extraire les leviers et les freins pour proposer des solutions pour concevoir des vergers plus durables, on doit regarder toute la vie de l'arbre et pas uniquement une année, on ne peut pas raisonner comme pour une culture annuelle (Simon et al., 2017).

- Appareil végétatif

La croissance secondaire des pommiers placés en agroforesterie est moindre que pour les arbres témoins pour des pommiers jeunes établissant leur architecture (Pitchers et al., 2020 ; Kami et al., 2010). L'analyse statistique montre que la TCSA diffère en fonction de la modalité alors que la hauteur de l'arbre non. En 2022, cette relation reste vraie avec les arbres adultes.

On a pris uniquement la hauteur d'arbre et la TCSA mais le nombre de branches et leurs diamètres sont une information importante qui pourrait en dire plus sur le fonctionnement de la croissance végétative du pommier qui va conduire son architecture.

- Etude des filiations

Concernant les filiations (Figure 17), on a constaté que plus la longueur du rameau 2021 est importante, plus la fréquence de bourgeons floraux en position terminale diminue (Lauri et al., 2006). Nous observons les successions des natures des bourgeons pour 2021 et 2022 ce qui nous permet d'évaluer le potentiel de remise à fruit des arbres (Lauri et al., 2014). Il serait intéressant de faire le lien entre les couples de natures 2021-2022 et la longueur des rameaux 2021, mais les effectifs n'étaient pas assez importants pour faire des classes avec ces informations, il faudrait prendre plus de rameaux. On a cependant des mesures de filiations sur les 45 arbres pour 2019, 2020, 2021 et 2022 sur des rameaux a priori différents. On pourrait observer la floraison pour les trois couples d'années et les comparer.

- Floraison

On peut penser que la présence des noyers a des conséquences plus particulièrement lorsque la feuillaison de ceux-ci commence à être importante, après mi-juin. On a une différence significative pour la charge florale des arbres (Figure 18). Cette différence entre les modalités montre que la croissance secondaire a un rôle prépondérant dans la modulation des composantes du rendement du pommier dans ce système. Le taux de nouaison des arbres est le même quel que soit le contexte (Figure 19).

- Fructification

Le diamètre des fruits n'est pas différent à toutes les dates de relevés (Figure 22). Cependant, on remarque que la différence entre les diamètres mesurés semble se creuser de plus en plus, la p-value est de plus en plus petite. La tendance change complètement lorsque les pommiers témoins voient leur diamètre diminuer. Ceci pourrait s'expliquer par le stress thermique et hydrique subi par les pommiers à cette période qui fait chuter les fruits des pommiers témoins de plus grand diamètre. On peut également suggérer que les fruits peuvent devenir des réservoirs d'eau pour la plante (Morandi et al., 2017). Les arbres en agroforesterie sont moins stressés que les témoins et ainsi ne puisent pas ou peu l'eau des fruits.

La nouaison est corrélée avec la surface foliaire des inflorescences ; plus la surface foliaire de l'inflorescence est importante, plus celle-ci a de ressource pour faire la mise à fruit (Grauslund et al., 1974). Dans le cadre d'un autre stage, que j'ai co-encadré et qui complète les résultats de ce rapport, on a montré que les allométries longueur-largeur de feuilles sont identiques pour les trois modalités et qu'il en est de même pour le nombre de feuille ainsi que la surface foliaire des inflorescences. Ceci semble cohérent avec le taux de nouaison qui n'est pas significativement différent en fonction de la modalité, même s'il y a d'autres facteurs qui entrent en jeu.

Le contexte agroforestier est complexe, les modifications peuvent être directes ou indirectes. Notamment, la présence des noyers et de toutes les infrastructures agroécologiques modifient les populations d'insectes pollinisateurs et donc la nouaison (Bentrup et al., 2019).

Il peut être intéressant de croiser l'incidence du puceron cendré et du carpocapse, on peut penser que lorsque l'arbre est infesté de pucerons cendrés les fruits sont moins appétents (plus petits et déformés) pour les carpocapses. L'impact sur la croissance, la fructification et le développement des axes et des processus de régulation biologique de ces deux bioagresseurs peuvent être approfondis.

## IV.2. Limites du dispositif GAFAM

- La parcelle

De manière générale, le contexte du domaine départemental fait qu'il y a de nombreux passages de marcheurs et d'animaux domestiques qui peuvent par exemple prendre des fruits et modifier ainsi tout le fonctionnement de l'arbre et directement le rendement.

On peut prendre en compte deux blocs sur notre dispositif, un dans le fond dont la profondeur de sol n'est pas tout à fait la même que dans le bloc devant (Figure 9). De plus, la proximité avec le Lirou et le Lez a un impact sur la biodiversité.

Pour avoir un vrai rendement en fruit afin que les acteurs (agriculteurs surtout) se retrouvent et puissent se projeter dans cette expérimentation, on pourrait opter pour un système de conduite en agriculture biologique avec plus de protection.

- L'association

Le choix de cette association peut sembler risqué dans la mesure où les effets allélopathiques de la juglone sont connus (Pitchers et al., 2020). La réponse est spécifique à chaque espèce (Zubay et al., 2021). Même si les pommiers ont été identifiés parmi les espèces sensibles, le problème se pose moins avec les noyers hybrides qu'avec les noyers noirs (Jose, 2011), la concentration en juglone sous les hybrides est moins importante. Cependant, il existe plusieurs processus de fonctionnement des pommiers qui peuvent être modifiés par une concentration plus faible de juglone et qui peuvent limiter l'accès à l'eau et aux nutriments (Böhm et al., 2006). Pour les pommiers, on peut considérer que l'effet

de la juglone sera négligeable par rapport à l'effet de l'ombre. De plus, même sur le sainfoin situé directement aux pieds des noyers, il n'y a eu pas d'effet observé.

### **IV.3. Validité des modèles statistiques utilisés**

Pour les rameaux et pour les fruits suivis, dans l'analyse statistique on peut penser à mettre l'arbre en effet aléatoire car on prend plusieurs rameaux et plusieurs fruits sur un même arbre. On aurait aussi pu prendre en compte l'effet bloc dans l'analyse statistique.

Pour le suivi des diamètres de fruits, le nombre de répétitions est de moins en moins important à mesure que les fruits chutent (on divise pratiquement l'effectif par deux pour les pommiers témoins).

Les observations sur l'évolution des populations, les symptômes et les dégâts du carpocapse et du puceron cendré entre les trois systèmes sera un autre résultat qui sera au cœur du rapport d'un autre stage. Ces données peuvent être croisées avec celles de ce stage. Notamment pour la nouaison et le suivi du diamètre des fruits, il serait intéressant de voir l'interaction avec le taux d'infestation du puceron cendré et ainsi évaluer la nuisibilité du puceron cendré dans les trois modalités. En observant les foyers de pucerons cendrés on remarque qu'ils ont tendance à garder des fruits qui ne grossissent pas (De Berardinis et al., 1994). De manière générale, l'étude des interactions entre ces deux principaux agresseurs est capitale (Dib et al., 2010).

### **IV.4. Limites des protocoles**

Le suivi de la dynamique de croissance des fruits s'est faite à un moment où l'eau a été limitante et les fruits n'ont pas grossi. Même si tous les arbres ont eu le même apport, les besoins en eau et nutriments doivent être remplis pour voir l'effet de la modalité agroforestière sur l'arbre uniquement.

Pour les relevés d'entomologie, les parcelles sont très proches, les insectes sont très mobiles et se déplacent facilement entre les rangs.

### **IV.5. Perspectives**

La parcelle expérimentale permettra d'étudier d'autres services rendus par l'agroforesterie pour la lutte contre le réchauffement climatique et la séquestration de carbone. En effet, pour mettre en place un système agroforestier comme celui-ci, il aura fallu beaucoup de temps avant de pouvoir avoir des résultats. De nombreuses autres mesures potentielles sur cette parcelle en particulier au niveau souterrain (mycorhizes, matière organique...). Le suivi de croissance des fruits a été fait pour la première fois en 2022. On pourra le comparer d'une année à l'autre.

Il est important d'aller jusqu'à la récolte même s'il y a certains biais, car on s'intéresse aux composantes du rendement mais on n'a pas de rendement. De plus, avec cette donnée on pourra comparer avec les rendements en plein et calculer le LER (Land Equivalent Ratio) (Mead et Willey, 1980), souvent présenté en association de cultures.

Il faut noter qu'ici on se trouve dans un cas de figure particulier pour l'implantation du pommier et qu'il pourrait être différent. En effet, les pommiers ont été plantés lorsque les noyers étaient déjà implantés depuis 21 ans. On imagine que c'est un contexte difficile pour le développement du pommier au niveau aérien et souterrain mais il se peut justement que les noyers aient développé leurs racines en profondeur et qu'ils laissent la place aux pommiers. On peut se demander quel serait le comportement du pommier en situation de complantation et ainsi comparer les deux situations.

Ces résultats peuvent faire l'objet de publications pouvant aider à la conception de nouveaux vergers selon une boucle d'amélioration pour la conception itérative de systèmes de culture annuels (Debaeke et al., 2009) : expérimentation - évaluation - transfert - design. En prenant en compte les spécificités du design avec des plantes pérennes avec sa dimension temporelle que sa dimension spatiale (Simon et al., 2017) (Figure 27).

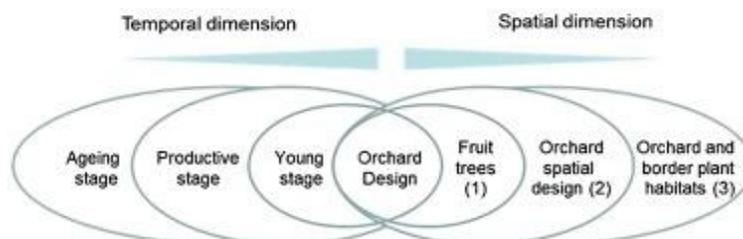


Figure 27 : Dimension temporelle et spatiale du design d'un verger (Simon et al., 2017)

## Conclusion

Un des objectifs est la production de connaissances scientifiques et opérationnelles pour une gestion des vergers fruitiers en France métropolitaine durables. L'étude du système agroforestier présent sur GAFAM permet d'acquérir des informations sur ce type d'association avec des arbres fruitiers en milieu tempéré. Particulièrement dans le cadre de ce stage, on obtient des résultats sur les composantes du rendement du pommier en agroforesterie.

Le premier apport de ce stage sont les photographies hémisphériques permettant d'obtenir le gap fraction. On peut ainsi caractériser l'environnement lumineux des pommiers en 2022, cela n'avait pas été fait depuis 2018. Les noyers comme les pommiers ont évolué depuis, on a maintenant une nouvelle référence.

Ce stage a aussi permis de confirmer certains résultats connus sur de jeunes arbres sur les pommiers matures. La hauteur des arbres n'est pas impactée par la modalité alors que la section des troncs l'est. L'étude des filiations permet également d'avoir plus de connaissances sur l'architecture de ces pommiers en agroforesterie. La charge florale est différente entre les arbres témoins et ceux en intrarang. Il n'y a pas de différence significative observée au niveau du taux de nouaison. Les données sont collectées, les analyses statistiques pourraient être reproduites avec des modèles mixtes.

L'idée est également de compléter les données existantes avec de nouvelles : le suivi de la croissance des fruits a été fait pour la première fois en 2022 tout comme le suivi des chutes et la nuisibilité du carpocapse.

Comme précisé auparavant, la notion de composantes du rendement avec une culture pérenne est nouvelle, on connaît ce terme avec les cultures annuelles surtout. Il est intéressant de construire de la même manière en observant les pommiers les critères déterminants. J'ai constaté que c'était bien différent de travailler sur une culture pérenne plutôt que sur une culture annuelle. En annuelle, on regarde les cultures précédentes, tout est différent en temporalité et c'est une manière de réfléchir que j'ai pu approcher pendant ce stage. Cela m'a permis également de travailler sur un sujet qui m'anime, l'agroforesterie. J'ai rencontré des acteurs de ce domaine tout au long de cette expérience ce qui m'a conforté dans ma volonté de travailler sur ce sujet. J'ai beaucoup apprécié faire de l'expérimentation, et encore plus particulièrement sur cette parcelle unique.

Les projets comme celui-ci montrent qu'il y a un réel mouvement et une volonté de transition agroécologique. Une fois les informations collectées et traitées, les résultats doivent être communiqués aux agriculteurs pour concevoir, avec les différents acteurs, des vergers plus résilients.

## Références bibliographiques

- M. A. Altieri, « The ecological role of biodiversity in agroecosystems », in *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes*, Elsevier, 1999, p. 19-31. doi: 10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4.
- M. A. Altieri, C. I. Nicholls, A. Henao, et M. A. Lana, « Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 35, n° 3, p. 869-890, juill. 2015, doi: 10.1007/s13593-015-0285-2.
- M. Aulagnier, « Elaboration de la production du pêcher, application à l'étude du potentiel qualitatif dans la Drôme », report, irstea, 1995. Consulté le: 9 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.inrae.fr/hal-02574193>
- B. Barritt, « Intensive Orchard Management », in *Good Fruit Grower*, 1992.
- T. Bennett, « PLANT-PLANT interactions », *Plant Cell Environ*, vol. 44, n° 4, p. 995-996, avr. 2021, doi: 10.1111/pce.14030.
- G. Bentrup, « Temperate Agroforestry Systems and Insect Pollinators: A Review », 2019. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/11/981/htm> (consulté le 9 août 2022).
- M.-C. Bopp *et al.*, « Les services rendus par les cultures fruitières. Rapport complet final - Septembre 2019 », 2019, doi: 10.15454/3W3D-W606.
- D. Christian, L. Fabien, A. Eléa, D. Gilles, et S. Monier, « Agroforesterie : des arbres et des cultures », p. 9.
- E. Costes, P. E. Lauri, S. Simon, et B. Andrieu, « Plant architecture, its diversity and manipulation in agronomic conditions, in relation with pest and pathogen attacks », *Eur J Plant Pathol*, vol. 135, n° 3, p. 455-470, mars 2013, doi: 10.1007/s10658-012-0158-3.
- A. Dambreville, F. Normand, et P.-É. Lauri, « Plant growth co-ordination in natura: a unique temperature-controlled law among vegetative and reproductive organs in mango », *Functional Plant Biol.*, vol. 40, n° 3, p. 280, 2013, doi: 10.1071/FP12243.
- W. Danelski, D. Kruczyńska, P. Bielicki, et E. Rozpara, « Variation in damage levels by codling moth to ten apple cultivars in an organic orchard in Poland », *Turk J Agric For*, p. 6.
- E. De Berardinis, P. Baronio, et J. Baumgärtner, « The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* pass., Hom., Aphididae) feeding on apple fruit growth », *Ecological Modelling*, vol. 72, n° 1, p. 115-127, mars 1994, doi: 10.1016/0304-3800(94)90147-3.
- H. Dib, B. Sauphanor, et Y. Capowiez, « Effect of codling moth exclusion nets on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, and its control by natural enemies », *Crop Protection*, vol. 29, n° 12, p. 1502-1513, déc. 2010, doi: 10.1016/j.cropro.2010.08.012.
- P. du Plooy, G. Jacobs, et N. C. Cook, « Quantification of bearing habit on the basis of lateral bud growth of seven pear cultivars grown under conditions of inadequate winter chilling in South Africa », *Scientia Horticulturae*, vol. 95, n° 3, p. 185-192, sept. 2002, doi: 10.1016/S0304-4238(02)00009-2.
- P. Dul, B. Pitchers, M. Carof, et P.-É. Lauri, « Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier », p. 69.

M. Duru, O. Therond, et M. Fares, « Designing agroecological transitions; A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 35, n° 4, p. 1237-1257, oct. 2015, doi: 10.1007/s13593-015-0318-x.

A. Fichtner, W. Härdtle, Y. Li, H. Bruelheide, M. Kunz, et G. von Oheimb, « From competition to facilitation: how tree species respond to neighbourhood diversity », *Ecol Lett*, vol. 20, n° 7, p. 892-900, juill. 2017, doi: 10.1111/ele.12786.

J. Fleckinger, « Phénologie et arboriculture fruitière », p. 362-372, 1964.

M. Gosme, L. Dufour, H. D. I. Aguirre, et C. Dupraz, « Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle », p. 5, 2016.

J. Grauslund et P. Hansen, « Fruit Trees and Climate. I | The Effect of Temperature on Fruit Set in Apple Trees », p. 8.

F. Halle, R. A. A. Oldeman, et P. B. Tomlinson, « Elements of Tree Architecture », in *Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis*, Springer Science & Business Media, 1978, p. 1-44.

F. Herzog, « Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperate Europe », p. 20.

C. Hillairet, « LES SEUILS INDICATIFS DE RISQUE », p. 19.

W. A. Hoffmann et H. Poorter, « Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate », *Annals of Botany*, vol. 90, n° 1, p. 37-42, juill. 2002, doi: 10.1093/aob/mcf140.

J. F. Howell et L. G. Neven, « Physiological Development Time and Zero Development Temperature of the Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) », *Environ Entomol*, vol. 29, n° 4, p. 766-772, août 2000, doi: 10.1603/0046-225X-29.4.766.

INRA, France, P.-É. Lauri, S. Simon, et INRA, France, « Advances and challenges in sustainable apple cultivation », in *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*, G. A. Lang, Éd. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019, p. 261-288. doi: 10.19103/AS.2018.0040.22.

J. Janick, *Horticultural Reviews, Volume 32*. John Wiley & Sons, 2010.

S. Jose, « Black walnut allelopathy: current state of the science | SpringerLink », 2011. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-8109-8\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-0348-8109-8_10) (consulté le 9 août 2022).

C. Kami, S. Lorrain, P. Hornitschek, et C. Fankhauser, « Light-Regulated Plant Growth and Development », in *Current Topics in Developmental Biology*, vol. 91, Elsevier, 2010, p. 29-66. doi: 10.1016/S0070-2153(10)91002-8.

C. Kremen, A. Iles, et C. Bacon, « Diversified Farming Systems: An Agroecological, Systems-based Alternative to Modern Industrial Agriculture », *E&S*, vol. 17, n° 4, p. art44, 2012, doi: 10.5751/ES-05103-170444.

A. N. Lakso, « EARLY FRUIT GROWTH AND DROP - THE ROLE OF CARBON BALANCE IN THE APPLE TREE », *Acta Hort.*, n° 903, p. 733-742, août 2011, doi: 10.17660/ActaHortic.2011.903.102.

P. Lauri, « Quantitative Analysis of Relationships between Inflorescence Size, Bearing-axis Size and Fruit-Set — An Apple Tree Case Study », *Annals of Botany*, vol. 77, n° 3, p. 277-286, mars 1996, doi: 10.1006/anbo.1996.0031.

- P.-E. Lauri et L. Corelli Grappadelli, « TREE ARCHITECTURE, FLOWERING AND FRUITING - THOUGHTS ON TRAINING, PRUNING AND ECOPHYSIOLOGY », *Acta Hortic.*, n° 1058, p. 291-298, déc. 2014, doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1058.34.
- P. -e. Lauri, K. Maguylo, et C. Trotter, « Architecture and size relations: an essay on the apple (*Malus x domestica*, Rosaceae) tree », *American Journal of Botany*, vol. 93, n° 3, p. 357-368, mars 2006, doi: 10.3732/ajb.93.3.357.
- P. É. Lauri, « Apple tree architecture and cultivation – a tree in a system », *Acta Hortic.*, n° 1261, p. 173-184, nov. 2019, doi: 10.17660/ActaHortic.2019.1261.27.
- P. É. Lauri, F. Combe, et L. Brun, « Regular bearing in the apple – Architectural basis for an early diagnosis on the young tree », *Scientia Horticulturae*, vol. 174, p. 10-16, juill. 2014, doi: 10.1016/j.scienta.2014.05.001.
- P. É. Lauri, B. Pitchers, L. Dufour, et S. Simon, « Apple farming systems – current initiatives and some prospective views on how to improve sustainability », *Acta Hortic.*, n° 1281, p. 307-322, juin 2020, doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1281.42.
- P.-E. Lauri, « Differentiation and growth traits associated with acrotony in the apple tree (*Malus x domestica*, Rosaceae) », *American Journal of Botany*, vol. 94, n° 8, p. 1273-1281, 2007, doi: 10.3732/ajb.94.8.1273.
- P.-É. Lauri, « Tree architecture and functioning facing multispecies environments: We have gone only halfway in fruit-trees », *American Journal of Botany*, vol. 108, n° 1, p. 3-7, janv. 2021, doi: 10.1002/ajb2.1598.
- P.-E. Lauri, K. Barkaoui, M. Ater, et A. Rosati, « Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa », in *Agroforestry for sustainable agriculture*, Burleigh Dodds Science Publishing, 2019, p. 542 p. Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02174034>
- P. Legendre, « MODEL II REGRESSION USER'S GUIDE, R EDITION », p. 14.
- R. Mead et R. W. Willey, « The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping », *Ex. Agric.*, vol. 16, n° 3, p. 217-228, juill. 1980, doi: 10.1017/S0014479700010978.
- S. Myriam, « Résistances des Lepidopteres et des Dipteres », p. 25.
- P. K. R. Nair, « Classification of agroforestry systems », p. 32.
- S. Penvern, B. Chieze, et S. Simon, « Trade-offs between dreams and reality: Agroecological orchard co-design », p. 12, 2018.
- B. Pitchers, L. Dufour, et P. É. Lauri, « Growing agroforestry systems with apple in Montpellier-Mediterranean – preliminary results on the influence of adult walnut trees on growth and branching of two-year-old apple trees », *Acta Hortic.*, n° 1281, p. 323-330, juin 2020, doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1281.43.
- B. Pitchers, « ARCHITECTURE AND FRUITING OF APPLE TREE IN AGROFORESTRY – LINKING ARCHITECTURAL DEVELOPMENT, FLOWERING AND XYLEM FLOW », Theses, Université de Montpellier - Institut Agro, 2021. Consulté le: 9 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.inrae.fr/tel-03328551>

- B. Pitchers, F. C. Do, et P.-E. Lauri, « A neighbourhood analysis to characterize competition in a multi-stratum agroforestry system of timber and fruit trees », p. 2.
- B. Pitchers, F. C. Do, C. Pradal, L. Dufour, et P.-E. Lauri, « Apple tree adaptation to shade in agroforestry: An architectural approach », *American Journal of Botany*, 2021, doi: 10.1002/ajb2.1652.
- B. Ricci, P. Franck, J.-C. Bouvier, D. Casado, et C. Lavigne, « Effects of hedgerow characteristics on intra-orchard distribution of larval codling moth », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 140, n° 3-4, p. 395-400, mars 2011, doi: 10.1016/j.agee.2011.01.001.
- B. Ricci, P. Franck, J.-F. Toubon, J.-C. Bouvier, B. Sauphanor, et C. Lavigne, « The influence of landscape on insect pest dynamics: a case study in southeastern France », *Landscape Ecol*, vol. 24, n° 3, p. 337-349, mars 2009, doi: 10.1007/s10980-008-9308-6.
- C. R. Rom, « Light Thresholds for Apple Tree Canopy Growth and Development », *HortSci*, vol. 26, n° 8, p. 989-992, août 1991, doi: 10.21273/HORTSCI.26.8.989.
- J. ROXBURGH, « Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments », *New Zealand Journal of Ecology*, vol.19, no. 2, p. 213-17, 1995.
- J.-P. Sarthou et N. Smits, « Effets des systèmes agroforestiers sur l'écologie et la gestion des populations d'insectes ravageurs », mai 2006.
- S. Simon, P. E. Lauri, L. Brun, H. Defrance, et B. Sauphanor, « Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchard », *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, vol. 81, n° 4, p. 765-773, janv. 2006, doi: 10.1080/14620316.2006.11512135.
- S. Simon, J.-C. Bouvier, J.-F. Debras, et B. Sauphanor, « Biodiversity and pest management in orchard systems. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 30, n° 1, p. 139-152, mars 2010, doi: 10.1051/agro/2009013.
- S. Simon, M. Lesueur-Jannoyer, D. Plénet, P.-É. Lauri, et F. Le Bellec, « Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences », *European Journal of Agronomy*, vol. 82, p. 320-330, janv. 2017, doi: 10.1016/j.eja.2016.09.004.
- S. Simon, B. Sauphanor, et P.-E. Lauri, « Control of Fruit Tree Pests through Manipulation of Tree Architecture », p. 5.
- R. J. Smith, « Use and misuse of the reduced major axis for line-fitting », *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 140, n° 3, p. 476-486, nov. 2009, doi: 10.1002/ajpa.21090.
- E. Somarriba, « Revisiting the past: an essay on agroforestry definition », *Agroforest Syst*, vol. 19, n° 3, p. 233-240, sept. 1992, doi: 10.1007/BF00118781.
- E. Torquebiau, « Agroforêts et forêts comestibles », in *Le livre de l'agroforesterie*, 2022, p. 80-90.
- E. Torquebiau, « Mélanges et interactions », in *Le livre de l'agroforesterie*, 2022, p. 150-158.
- J. Tromp, Éd., *Fundamentals of temperate zone tree fruit production*. Leiden: Backhuys, 2005.
- C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, et H. SINOQUET, « Structure of plant canopy and radiative transfers », in *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, 1993, p. 285-386.

D. I. Warton, I. J. Wright, D. S. Falster, et M. Westoby, « Bivariate line-fitting methods for allometry », *Biol. Rev.*, vol. 81, n° 02, p. 259, mai 2006, doi: 10.1017/S1464793106007007.

W. Zhang, T. H. Ricketts, C. Kremen, K. Carney, et S. M. Swinton, « Ecosystem services and dis-services to agriculture », *Ecological Economics*, vol. 64, n° 2, p. 253-260, déc. 2007, doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.024.

P. Zubay, J. Kunzelmann, A. Ittész, É. Németh Zámboiné, et K. Szabó, « Allelopathic effects of leachates of *Juglans regia* L., *Populus tremula* L. and juglone on germination of temperate zone cultivated medicinal and aromatic plants », *Agroforest Syst*, vol. 95, n° 2, p. 431-442, févr. 2021, doi: 10.1007/s10457-020-00572-9.

« Agreste, la statistique agricole ». <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/accueil/> (consulté le 29 mars 2022).

« Agroforesterie : Dictionnaire d'agroécologie ». <https://dicoagroecologie.fr/dictionnaire/agroforesterie/> (consulté le 18 mai 2022).

« Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018IFT et nombre de traitements », p. 12.

« FAOSTAT ». <https://www.fao.org/faostat/fr/#home> (consulté le 28 mars 2022).

« Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review | SpringerLink ». <https://link.springer.com/article/10.1051/agro:2008050> (consulté le 9 août 2022).

« Projet ALTO | Ecophytopic ». <https://ecophytopic.fr/dephy/concevoir-son-systeme/projet-alto> (consulté le 4 avril 2022).

## Annexes

### *Annexe 1 : Calcul de l'apport d'engrais organique*

#### calculs des dosers de Keraphos par pommier sur GAFAM

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	
quantité de N,P,K par ha	120	30	120	kg /ha
par arbre (avec hyp 2500 arbres /ha)	48	12	48	g /arbre
Keraphos	6	7	7	%
poids de Keraphos par arbre/an	800	200	800	g/arbre/an
<b>poids de Keraphos par arbre/an/apport (3 par an) :</b>	<b>267</b>	<b>67</b>	<b>267</b>	<b>g/arbre/a</b>

## Annexe 2 : Itinéraire technique appliqué à la parcelle GAFAM depuis 2017

### Actions sur parcelle A1 GAFAM (pommiers - noyers en agroforesterie) à Restinclières

pulvérisateur = 10 litre  
 AFIR = 0.06253 ha  
 AFR = 0.032955 ha  
 AC = 0.021125 ha  
**TOTAL : 0.11661 ha = 1166 m<sup>2</sup> pour plantation  
 uniquement en 2016. Au total (avec compléments en  
 2017 et 2018) : 1369m<sup>2</sup>**

Date	Opération
<b>Année 2016</b>	
7/3/16	Plantation 149 pommiers
16/3/16	Forage et mise en place des chaussettes irigasc
19/4/16	2ème remplissage des gaines d'irrigation (sable + terre). Palissage des pommiers terminé.
20/4/16	Mise en place de la cuve et de la pompe. Mise en place des tuyaux de Ø50mm (remplissage de la cuve ± :
21/4/16	Débroussaillage des 3 blocs de pommier (motofaucheuse dans l'inter-rang et rotofil dans le rang de noyer)
26/4/16	Mise en place des tuyaux goutte-à-goutte de Ø16mm
29/4/16	Lancement de la 1 <sup>ère</sup> irrigation
4/5/16	Installation des 2 crépines (en entrée dans la rivière + en sortie dans la cuve) et de la chaîne. Tuyaux de Ø
20/5/16	Pose du BRF lignes 1,2 et 3.
30/5/16	Pose du BRF terminé sur toutes les lignes
2/6/16	Apport d'ammonitrate 33.5 : 20g / pommier
6/6/16	Tuteurs (en bambou de 1m) placés sur tous les pommiers + pommiers accrochés.
22/6/16	Mise en place de bague aux pommiers (jaune à hauteur du 31/05 et orange à hauteur du 22/06) Changement du protocole d'irrigation suite à la réunion avec DUPRAZ :
27/6/16	- Gains : Irrigation × 1 (lundi) = 15L / semaine - GâG : Irrigation × 3 (lundi, mercredi, vendredi) = 45L / semaine
30/6/16	Fauchage de la luzerne en fleur et disposition le long des rangs de pommier
1/7/16	Sulfate de fer liquide mit dans la cuve : 5L pour 1000L
12/7/16	Traitement de la cochenille au savon noir (3 cuillères à café dans 1 litre d'eau) Traitement contre puceron vert :
4/8/16	Fertiligène (ref : 560488 castorama) dose : 50 ml dans 5 L d'eau = 50 pommiers pulvérisateur manuel
5/8/16	2ème Apport d'ammonitrate 33.5 : 30g / pommier = 3 bouchons
9/11/16	Pose deuxième fil de palissage sur rangs de pommiers
<b>Année 2017</b>	
16/3/17	Plantation de nouveau pommier en remplacement et des pommiers pollinisateurs
23/3/17	Apport de 12 g de chelate de fer par pommier Ajout de BRF sur le rang
30/3/17	Ajout de BRF manquant sur le rang
3/4/17	Gyrobroyage de la luzerne
18/4/17	Premier traitement localisée contre le puceron vert (Naturen)
19/4/17	Installation de l'irrigation (irrigation deux fois par semaine d'une durée de 2h)
22/5/17	Apport d'environ 12 g d'ammonitrate aux pommiers en retard et aux pommiers plantés en 2017 + installatic
30/5/17	Installation du 3ème fil
9/6/17	Traitement au suprême contre le puceron cendré (0,1g/400mL) sur un dizaine de pommier
15/6/17	Traitement au suprême contre le puceron cendré (0,1g/400mL) sur l'ensemble de la parcelle (bouillie de 10
19/6/17	Passage à trois irrigations de 4h par semaine (lundi/mercredi/vendredi)
23/6/17	Apport de 1,8 kg d'ammonitrate par fertirrigation
3/7/17	Deuxième apport de 1,8 kg d'ammonitrate par fertirrigation
28/9/17	Traitement au suprême contre le puceron cendré (0,1g/400mL) sur l'ensemble de la parcelle (bouillie de 10
19/9/17	Attache des pommiers sur la 3ème ligne
8/10/17	ajout de BRF
19-20/09/17	entretien des fosses
17/11/17	traitement bouillie bordelaise à 0,20/L
<b>Année 2018</b>	
27/3/18	re garnissage de BRF sur toutes les lignes.
21/3/18	apport du chelate de fer à 12g/pied
17/4/18	semis sainfoin (alternance avec la luzerne)
24/4/18	Traitement avec OVISPRAY contre le puceron cendré (0,025L/L) sur l'ensemble de la parcelle (3et ½ pulvé
2/5/18	3ème pose des sondes TTD et attache des pommiers sur le 2ème fil pour cause étranglement des troncs.

- 15/5/18 désherbage manuel des 10 rangs de pommiers (folles avoine etc. à la hauteur du premier fil)
- 17/5/18 Traitement avec OVISPRAY contre le puceron cendré (0,035L/L) sur l'ensemble de la parcelle (5 et un peu
- 18/5/18 Désherbage à la débroussailluse
- 25/5/18 Désherbage à la débroussailluse autour de la parcelle et aux sites des stations météo
- 31/5/18 250g Keraphos "6 4 4"/arbre
- 17/7/18 Débroussaillage des inters-lignes de pommiers
- 18/7/18 Fin de débroussaillage des pommiers et parcelle A1
- 19/7/18 Traitement au Sokalciarbo ( 1kg/10L) (cuve atomiseur) traitement de 3 atomiseurs ½ .
- 29/8/18 enlèvement des 1ers fils sur les lignes de noyers( arbres trop ceinturés et casse des attaches)
- 25/9/18 Keraphos (250g/arbre) et remise BRF, pose cartons hivernage auxiliaires à la base des arbres, attachage
- 26/9/18 Changement du 2ème fil sur les lignes de Noyers . Et pose <symbolique> d'un 4ème fil sur ligne 4 pour re
- 25/10/18 Traitement KOLTHIOR ( fongicide) 0,075g/L (3 pulvés de 10L pour la totalité des pommiers)
- 27/11/18 traitement de tous les pommiers avec "répuls" à 1L/10L en dilution dans le pulvérisateur.

#### Année 2019

- 11/1/19 Traitement de la parcelle pommiers avec "répuls" à 1L/10L en dilution dans le pulvérisateur.
- 13/2/19 pose de meches de cheveux aux pieds des fruitiers pour repousser ravageurs
- 28/2/19 1er Traitement ovispray à 0.025l/L
- 6/3/19 KERAPHOS 250g/pied et de CHELATE de FER 8 à 10g par pied. 2° remise de BRF sur les lignes d'arbres
- 22/3/19 installation pompe dans le LEZ et première irrigation 3H
- 28/3/19 2ème traitement ovispray à 0,025l/L. ( 3 pulvés ½ )
- 29/3/19 Pose de branches de Granny Smith (CEHM, stade F2) pour pollinisation des Dalinettes à GAFAM (stade D3-E). Environ 15 bouquet
- 10/4/19 Pose de branches d'Akane et Cripps Pink (CEHM, stade F-F2) pour pollinisation des Dalinettes à GAFAM (stade F). 20 bouquets de
- 10/4/19 attachage branches sur fil palissage
- 17/4/19 Enlèvement des 1ers fils sur les lignes de pommiers sauf sur 2 lignes ou les fruitiers sont trop jeunes. Atta
- 29/4/19 Mise de KERAPHOS ( 250g/pied) et vérification des goutteurs. Remise de BRF à certaines lignes.
- 29/4/19 enlèvement des branches fleuries posées le 10/4/2019
- 2/5/19 Réparation de l'irrigation lignes: 3 (embout), 5 (entière coté Sud), 6 ( moitié Nord) 7 (entière coté Sud). Dés
- 3/5/19 Traitement SOKALCIARBO (1kg/10L) 5 pulvés dont 1 à vitesse trop rapide ( erreur de ma part donc à véri
- 6-7/5/2019 fauchage près des lignes d'irrigations et autour des dispositifs techniques (débroussailluse)
- 9-10/5/2019 fauchage au gyrobroyeur
- 20/5/19 pose 2 micro à chiroptères (ultrasons : 18-100Khz) aux extrémités diagonales de GAFAM\_Avec Michel
- 5/6/19 Débroussaillage des lignes
- 6/6/19 désherbage et remise de BRF. Constatation d'une attaque de pic-vert sur un autre pommier
- 7/6/19 Eclaircissage manuel (règle : 1 fruits/inflo) de tous les pommiers blocs 1-2-3
- 3/7/19 Fauchage entre rangs avec rotobroyeur + le long des rangs avec faucheuse à fil
- 4/7/19 Désherbage manuel sur le rang + pose de cartons-pièges à la base des arbres (sauf les 45 arbres de la th
- 19/7/19 Attache et redressement des pommiers sur toutes les lignes et "réparations" ( au peltron) sur certains bas de
- 27/8/19 attaches branches
- 16/9/19 pose 2 micro à chiroptères (ultrasons : 18-100Khz) aux extrémités diagonales de GAFAM
- 30/9/19 récolte Dalinette
- 3/10/19 Mise du KERAPHOS (250g/pieds) . Remise de BRF a certaines lignes. Enlèvement des protections des sc
- 17/10/19 traitement SOKALCIARBO (1kg/10L) 5 pulvés et 1/2 forçage sur les arbres de bordures.
- 19/11/19 Installation de l'irrigation ( 1er 1/3
- 20/11/19 fin de la tranchée et de la pose des tuyaux. Reste juste les raccords à installer

#### Année 2020

- 29/30/01/20 Dépose et pose des fils ondulés sur toutes les lignes. Quelques amarres de montées . Pommiers attachés
- 12/2/20 Taille et palissage des pommiers
- 14/2/20 fin de pose des cables sur les noyers porteurs du 3ème fil bloc B et de du pommier 49
- 4/3/20 Tuyaux gouttes à gouttes retirés et pose des nouveaux sur toutes les lignes.
- 5/3/20 griffage des inters-rangs
- 9/3/20 Passage du rotovateur sur les inters-rangs
- 11/3/20 Semis bandes enherbées
- 12/3/20 traitement OVISPRAY 0.025l/L ( 4 pulvés) entrées maritimes et donc pulvérisation qu' à partir de 8h40 tron
- 4/5/20 gyrobroyage
- 19/5/20 fauchage rang pommier et inter rangs sans toucher aux bandes fleuries.
- 20/5/20 fin de l'entretien parcelle et fruitiers ( taille des rejets et adventices à la main)
- 26/5/20 Kéraphos B141
- 11/6/20 Préparation des "pré-trous" pour plantation de romarins
- 16/6/20 Plantation des romarins selon modalité aux pieds des pommiers
- 1/9/20 Lâcher de Mastrus ridens
- 3/9/20 Montage de la nouvelle motopompe
- 15/9/20 ramassage et pesée des pommes tombées ou mangées
- 16/9/20 récolte avancée d'une 10aine de jours éviter trop de pertes dues aux frelons, guêpes et carpo
- 17/9/20 Suite et fin de la récolte abondante

- 28/9/20 Démontage final de la motopompe pour 2020
- 15/9/20 préparation des bandes enherbées: griffage
- 7/10/20 préparation des bandes enherbées: rotovator
- 8/10/20 semis bandes enherbées : cosmos,bleuet,phacélie,tagète,souci + passage Rouleau GEVES (hors prépar
- 8/10/20 mise keraphos 250g/pieds + BRF sur rangs 8-9-10
- 9/10/20 Débroussaillage et pose BRF sur les lignes 5-6-7

#### Année 2021

- 13 & 14/1/2021 encombrement spatial) et attachage pommiers.
- 15/1/21 pose des protections anti lapins. Ratissage des feuilles sur bandes enherbées.
- 17/2/21 élagage des branches retombantes des noyers au-dessus des pommiers
- 12/3/21 Mise du Kéraphos (6-7-7) ( 285g/p) plantation de 5 variétés de romarins (2pieds/pommier)
- 16/3/21 1er passage d'Ovispray (2.5L/HL) 4 pleins et1/2
- 16/3/21 remontage de la pompe et 1 ère irrigation lancée de 2h30.(surtout pour les romarins)
- 31/3/21 Traitement Oviphyt ( 2l/HL donc 0.020L/L ) 4 passages 1/2
- 20/4/21 Nettoyage autour des romarins très enherbés 10% de mortalité (varié selon les blocs)
- 21/4/21 Mise du Kéraphos (6-7-7) ( 285g/p) re-plantation de romarins morts. Pose de BRF sur toutes les lignes
- 20/5/21 1ère mise en route de la STEP 2h30+1h00
- 25/5/21 Début de débroussaillage des inter-lignes d'herbacées. 2 blocs. Non fauche du sainfoin et luzernes fleuris.
- 21/6/21 éclaircissage de tous les arbres à 5fr/cm<sup>2</sup> section de tronc
- 21/7/21 Débroussaillage des lignes fleuries ( mais sèches) et entretien de la parcelle A1.
- 27/7/21 nettoyage des goutteurs sur les lignes 1-2-3-4-5-6
- 6/8/21 avec Bertrand Alison : échantillonnage pommes pour fréquence carpocapse G2 : Bloc1 plus touché (90%)
- 16/9/21 Nettoyage et ramassage des pommes au sol ' 1ère partie)
- 17/9/21 Nettoyage et ramassage des pommes au sol ' 2ère partie)
- 23/9/21 Mise du Kéraphos(6-7-7) (285g/p) .Vérification des lignes de goutteurs.
- 23/9/21 Récolte de tous les fruits sur les pommiers, même si les fruits ne sont pas totalement mûrs, car trop de frui

#### Année 2022

- 11/3/22 kéraphos (6-4-4 engrais organique) 285g/pied ( 2sacs)
- 22 & 24/03/2022 attachage troncs et branches, tension fil palissage...
- 25/3/22 traitement oviphyt (2l/HL donc 0.020L/L) 5 pulvérisateurs 1/2 .
- 15/4/22 Traitement oviphyt (2l/HL donc 0.020L/L) 6 pulvérisateurs
- 19/4/22 2h d'irrigation
- 20/4/22 Débroussaillage sur les lignes des pommiers ( Très dense en haut et peu sur bloc du bas)
- 21/4/22 Mise du Kéraphos( 285g/p) + RAK3 ( diffuseurs confusion sexuelle carpo) + remise du BRF sur les lignes
- 7/6/22 pose d'un 2ème lot de RAK3 systématiquement sur le 3ème fil
- 7/6/22 1er traitement carpovirusine, 2000
- 8/6/22 éclaircissage tous les pommiers de GAFAM, 5fr/cm<sup>2</sup> TC SA
- 9/6/22 fin éclaircissage tous les pommiers de GAFAM, 5fr/cm<sup>2</sup> TC SA
- 15/6/22 2ème traitement carpovirusine, EVO2
- 24/6/22 3ème traitement carpovirusine, 2000

### *Annexe 3 : Protocole de mesure de la hauteur des arbres*



## **PROTOCOLE DE MESURES HAUTEUR ET DIAMETRE**

### **Introduction**

La parcelle expérimentale étudiée est un système agroforestier avec des pommiers et noyers et se situe à 15km au nord de Montpellier au domaine de Restinclières. L'étude de ce système a pour but de concevoir des agroécosystèmes diversifiés plus résilients et moins dépendants des produits phytosanitaires.

### **Objectifs de l'étude**

L'objectif de ces mesures est de voir si le contexte agroforestier influence la hauteur et la surface de section des troncs des pommiers. Pour cela, on prend les mesures sur des arbres qui se situe dans 3 situations différentes : AC, AFR, AFIR. Mesures effectuées sur 110 pommiers de la variété Dalinette plantés en 2016.

AC Agricultural Control (pommiers éloignés des noyers)

AFIR AgroForestry InterRow (pommiers placés entre les rangs de noyers)

AFR AgroForestry Row (pommiers placés dans les rangs de noyers)

### **Méthode d'étude**

Pour la hauteur, on utilise la perche télescopique en plaçant le haut au niveau du point le plus haut du pommier et on lit le résultat.

Pour la surface de section des troncs, on prend un premier diamètre à l'aide du pied à coulisse à 15cm au-dessus du point de greffe. On prend ensuite un second diamètre perpendiculairement au premier.

On calcule ainsi avec ces deux diamètres la valeur de la surface.

### **Matériel**

Perche télescopique pour mesurer la hauteur.

Pied à coulisse pour le diamètre du tronc.

### **Calendrier de l'étude**

Ces mesures peuvent être effectuées à tout moment de l'année.

## Annexe 4 : Protocole de détermination des filiations



### PROTOCOLE MESURE « FILIATION »

#### Introduction

La parcelle expérimentale étudiée est un système agroforestier avec des pommiers et noyers et se situe à 15km au nord de Montpellier au domaine de Restinclières. L'étude de ce type de système a pour but de concevoir des agroécosystèmes diversifiés plus résilients et moins dépendants des produits phytosanitaires.

#### Objectifs de l'étude

L'objectif de ces mesures est de voir si le contexte agroforestier influence la nature des bourgeons d'année en année et la croissance végétative entre les deux années. Pour cela, on prend les mesures sur des arbres qui se situent dans 3 situations différentes : AC, AFR, AFIR.

AC Agricultural Control (pommiers éloignés des noyers)

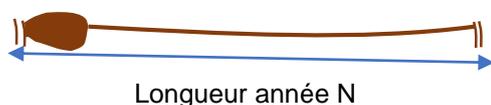
AFIR AgroForestry InterRow (pommiers placés entre les rangs de noyers)

AFR AgroForestry Row (pommiers placés dans les rangs de noyers)

#### Méthode d'étude

Déterminer la nature de l'année N-1 (observer s'il y a une bourse ou non) mesurer la longueur jusqu'au bourgeon de l'année N (prendre la bourse dans la mesure s'il y a une bourse, cf schéma) et compter le nombre d'écaïlles. Enfin, déterminer la nature de ce bourgeon. Le bourgeon est soit floral (F) soit végétatif (V).

Choisir les rameaux exposition sud à hauteur de poitrine. S'il n'y a pas assez de rameaux, prendre ailleurs sur l'arbre mais le notifier.



Photographie prise le 14/04/2022 rameau « FF »

#### Matériel

Règle ou mètre

#### Période de mesures

Les mesures peuvent débuter au moment de la floraison lorsque la nature des bourgeons de l'année en cours est visible (Stade E – E2)

*Annexe 5 : Protocole de comptage du nombre d'inflorescences par arbre*

## PROTOCOLE COMPTAGE INFLORESCENCES



### Introduction

La parcelle expérimentale étudiée est un système agroforestier associant des pommiers et des noyers. Elle se situe à 15km au nord de Montpellier au domaine de Restinclières. L'étude de ce système a pour but de concevoir des agroécosystèmes diversifiés plus résilients et moins dépendants des produits phytosanitaires.

### Objectifs de l'étude

L'objectif de ces mesures est de voir si le contexte agroforestier influence la floraison des pommiers. Pour cela, on prend les mesures sur des arbres qui se situent dans 3 situations différentes : AC, AFR, AFIR. Ces mesures sont effectuées sur 45 arbres, 15 de chaque modalité.  
AC Agricultural Control (témoin, pommiers éloignés des noyers)  
AFIR AgroForestry InterRow (pommiers placés entre les rangs de noyers)  
AFR AgroForestry Row (pommiers placés dans les rangs de noyers)

### Méthode d'étude

Compter toutes les fleurs de bas en haut à l'aide du compteur puis faire de même pour les pousses végétatives.



*Pommier, pousse végétative et inflorescence en avril 2022, Domaine de Restinclières*

### Matériel

Compteur manuel

### Calendrier de l'étude

Les mesures peuvent débuter que la nature des bourgeons est visible. Il faut éviter de trop attendre pour éviter que le développement soit bien avancé et que ce soit plus difficilement lisible.

## *Annexe 6 : Protocole de comptage fruits*



# PROTOCOLE COMPTAGE FRUITS

## **Introduction**

La parcelle expérimentale étudiée est un système agroforestier associant des pommiers et des noyers. Elle se situe à 15km au nord de Montpellier au domaine de Restinclières. L'étude de ce système a pour but de concevoir des agroécosystèmes diversifiés plus résilients et moins dépendants des produits phytosanitaires.

## **Objectifs de l'étude**

L'objectif de ces mesures est de voir si le contexte agroforestier influence la floraison des pommiers. Pour cela, on prend les mesures sur des arbres qui se situe dans 3 situations différentes : AC, AFR, AFIR. Ces mesures sont effectuées sur 45 arbres, 15 de chaque modalité.

AC Agricultural Control (témoin, pommiers éloignés des noyers)

AFIR AgroForestry InterRow (pommiers placés entre les rangs de noyers)

AFR AgroForestry Row (pommiers placés dans les rangs de noyers)

## **Méthode d'étude**

Selon l'objectif, il ne faut pas compter de la même manière.

- Si on compte les fruits pour savoir combien de fruits on doit en enlever au moment de l'éclaircissage, il faut compter tous les fruits sur l'arbre,
- Si on compte les fruits pour calculer le taux de nouaison, il faut compter le nombre d'inflorescences qui portent au moins un fruit.

## **Matériel**

Compteur manuel

## **Calendrier de l'étude**

Les mesures peuvent débuter que la nature des bourgeons est visible. Il faut éviter de trop attendre pour éviter que le développement soit bien avancé et que ce soit plus difficilement lisible.

## *Annexe 7 : Protocole suivi croissance des fruits*

### **PROTOCOLE SUIVI CROISSANCE DES FRUITS**



#### **Introduction**

La parcelle expérimentale étudiée est un système agroforestier avec des pommiers et noyers et se situe à 15km au nord de Montpellier au domaine de Restinclières. L'étude de ce système a pour but de concevoir des agroécosystèmes diversifiés plus résilients et moins dépendants des produits phytosanitaires.

#### **Objectifs de l'étude**

L'objectif de ces mesures est de voir si le contexte agroforestier influence la hauteur et le diamètre des pommiers. Pour cela, on prend les mesures sur des arbres qui se situe dans 3 situations différentes : AC, AFR, AFIR. Mesures effectuées sur des fruits exposés face sud et à hauteur de poitrine.

AC Agricultural Control (pommiers éloignés des noyers)

AFIR AgroForestry InterRow (pommiers placés entre les rangs de noyers)

AFR AgroForestry Row (pommiers placés dans les rangs de noyers)

#### **Méthode d'étude :**

Placer des repères (bagues) pour identifier les fruits suivis : 10 fruits par arbre sur 45 arbres (15 par traitement). Mesurer le diamètre du fruit chaque semaine en prenant soin de ne pas l'abîmer ou de le faire tomber.



Mesure de diamètre de pomme, domaine de Restinclières (le 13/06/2022)

Il est préférable que ce soit la même personne qui mesure tout au long de la croissance du fruit.

#### **Matériel**

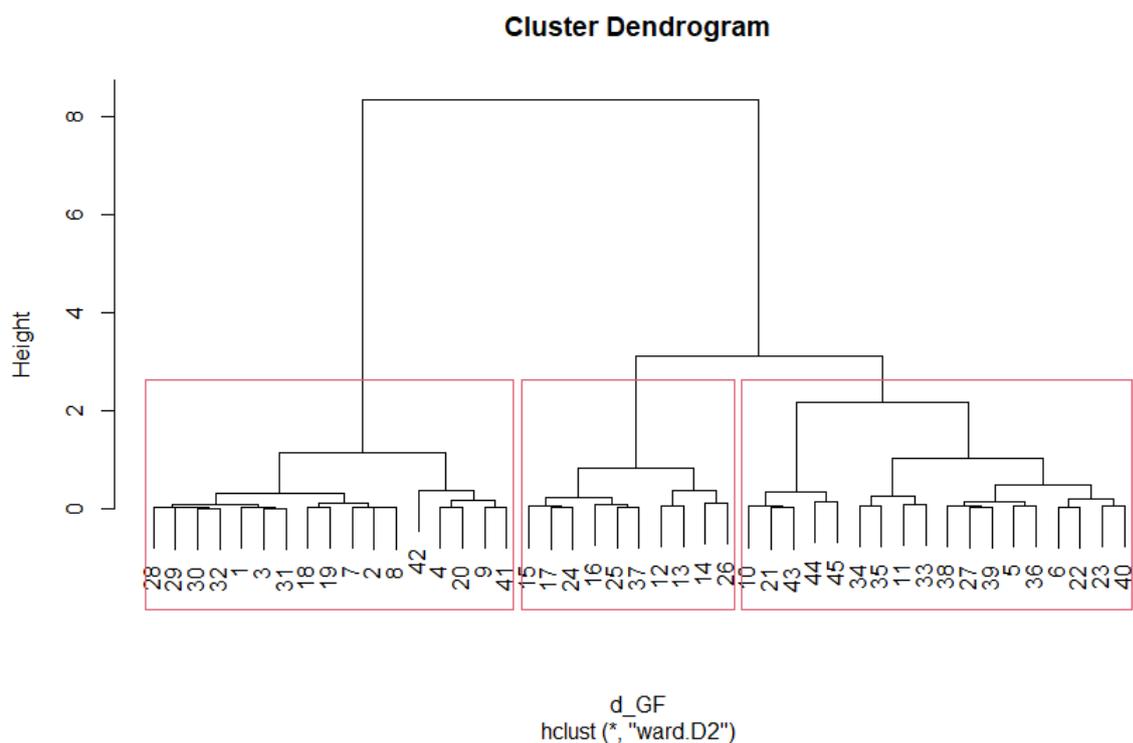
Bagues de marquage

Pied à coulisse

#### **Calendrier de l'étude**

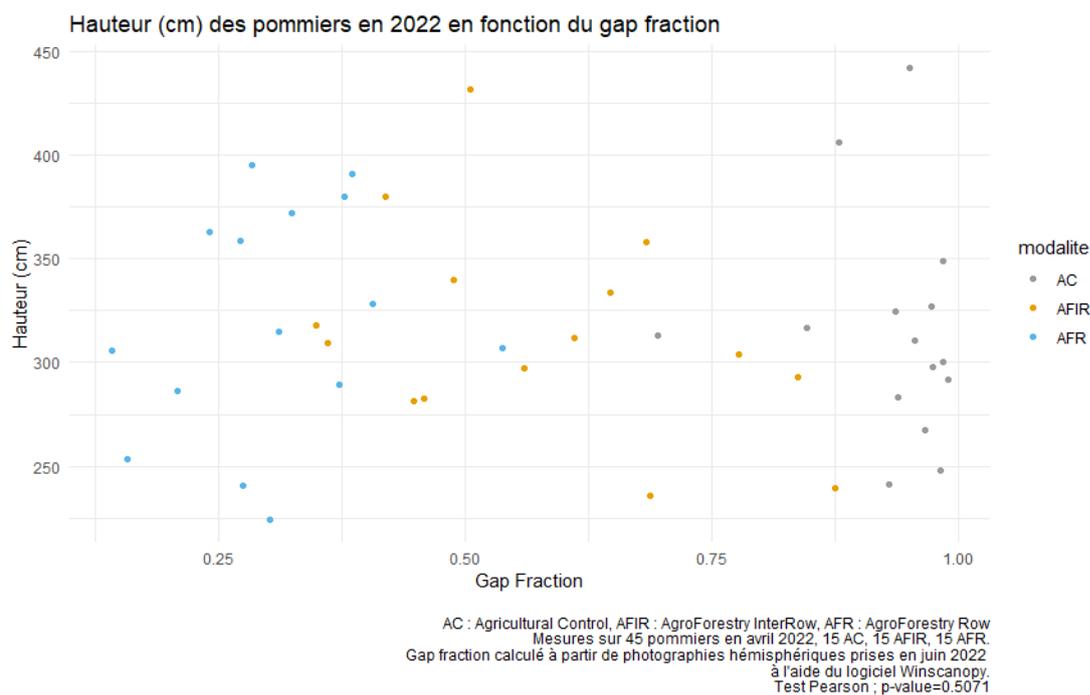
Les mesures peuvent débuter dès que l'éclaircissage est effectué et peuvent se terminer à la récolte

*Annexe 8 : Classification ascendante hiérarchique avec les données de gap fraction*

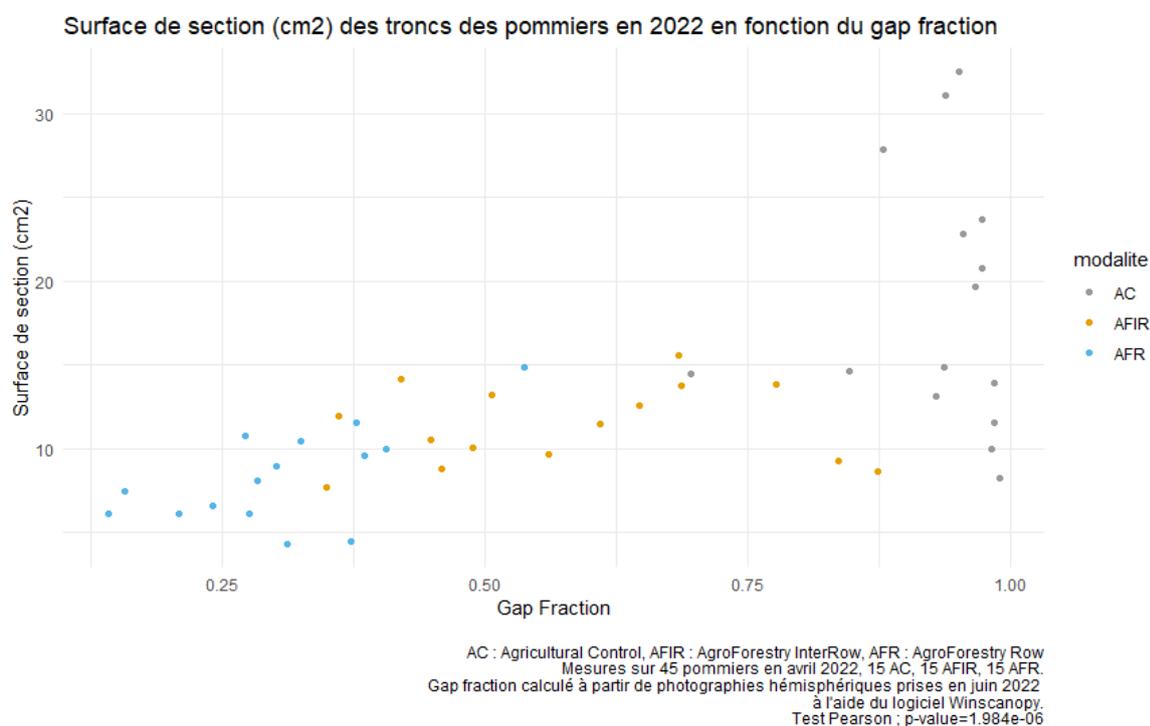


Nouvelles classes obtenues avec une classification hiérarchique ascendante avec le logiciel Rstudio

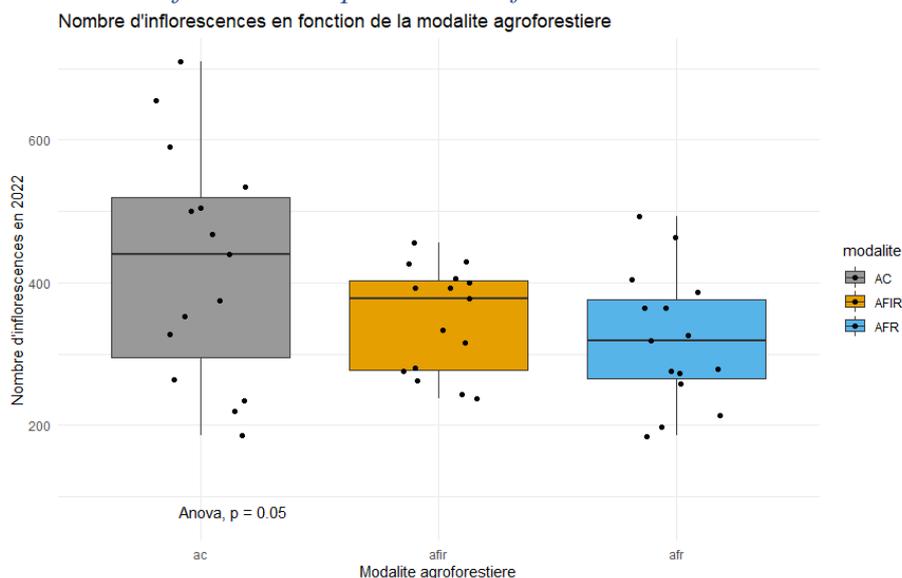
*Annexe 9 : Hauteur des pommiers en fonction du gap fraction pour les trois modalités*



*Annexe 10 : TCSA en fonction du gap fraction pour les trois modalités*



*Annexe 11 : Nombre d'inflorescences par arbre en fonction de la modalité*



Pour les données de comptage comme ici, on utilise un modèle linéaire généralisé (glm) quasipoisson

*Annexe 12 : Comparaison des charges en fruits calculées avec le TCSA d'avril et le TCSA de juillet*

Modalité agroforestière	Charge en fruits moyenne (fruits/cm2 de TCSA avril 2022)	Ecart-type de charge en fruits moyenne (TCSA avril 2022)	Charge en fruits moyenne (TCSA juillet 2022)	Ecart-type de charge en fruits moyenne (fruits/cm2 de TCSA juillet 2022)
AC	7.74	3.23	6.93	3.48
AFIR	8.26	2.69	7.36	2.38
AFR	10.1	3.78	8.14	2.20

Anova Table (Type II tests)

```

Response: chargef$charge1
Sum Sq Df F value Pr(>F)
chargef$charge2 329.49 1 85.893 8.236e-12 ***
Residuals 164.95 43
    
```

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

*Annexe 14 : comparaison de la charge en fruits avec la TCSA mesurée en avril 2022 et celle mesurée en juillet 2022, test anova*