



ISARA  
23 rue J.Baldassini  
69364 LYON CEDEX 07

INRAE Centre Occitanie Montpellier  
2 Place Pierre Viala  
34060 MONTPELLIER CEDEX 1  
FRANCE

## **LE POMMIER EN AGROFORESTERIE : ANALYSE DES COMPOSANTES DU RENDEMENT**

**Mémoire de Fin d'Études**

Promotion 51 (2018 – 2023)  
Date de la soutenance : 6 septembre 2023

Tuteur Pédagogique : Olivier DUCHENE

GAUTIER Anna  
Élève Ingénieure ISARA-Lyon

Directeur de mémoire :  
Pierre-Éric LAURI, ingénieur de recherche,  
UMR ABSys

Avec la participation financière de :  
GIS Fruit, Département de l'Hérault, Programme ALTO



Ce document ayant été réalisé par des Élèves-Ingénieurs de l'ISARA dans le cadre d'une convention avec INRAE, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine Isara.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
ÉTAT DE L'ART.....	5
I.    Le pommier : caractéristiques et culture .....	5
1.    Biologie du pommier .....	5
1.1.    Croissance et organogénèse.....	5
1.2.    Inflorescence.....	7
1.3.    Croissance du fruit.....	7
1.4.    Dormance des bourgeons.....	8
2.    Le pommier en arboriculture.....	8
2.1.    Système de conduite des pommiers en arboriculture.....	8
2.2.    Effets des bioagresseurs sur le verger de pommier.....	10
II.    L'agroforesterie en réponse aux enjeux de durabilité des systèmes agricoles .....	11
1.    Concepts et intérêts de l'agroforesterie.....	11
2.    Le cas des systèmes agroforestiers fruitiers, et leur intérêt face au changement climatique .	12
3.    Le cas du pommier en agroforesterie .....	14
MATÉRIELS ET MÉTHODES .....	15
I.    Présentation de la parcelle.....	15
II.    Analyse et collecte des données.....	17
1.    Principes généraux sur les statistiques menées dans ce rapport.....	17
2.    Collecte des données et détermination des variables d'étude.....	18
2.1    Hauteur de l'arbre et surface de section du tronc et des branches .....	18
2.2    Séquences de formation des rameaux .....	19
2.3    Indicateurs de la floraison.....	21
2.4    Taux de nouaison.....	21
2.5    Suivi de la croissance des pommes .....	22
2.6    Nuisibilité du puceron cendré et du carpocapse .....	22
RÉSULTATS .....	23
I.    Effets de l'agroforesterie sur les différentes composantes du rendement .....	23
1.    Hauteur de l'arbre et surface de section du tronc et des branches .....	23
1.1.    Analyse univariée de la hauteur de l'arbre et de la surface de section du tronc et des branches .....	23
1.2.    Analyse SMA de la surface de section du tronc par rapport à la hauteur de l'arbre....	26
2.    Séquences de formation des rameaux .....	28
3.    Indicateurs de la floraison .....	32
3.1.    Analyse univariée sur les indicateurs de la floraison : nombre d'inflorescences, charge florale, taux de floraison .....	32
3.2.    Analyse SMA sur la charge florale.....	33
4.    Indicateurs de la nouaison.....	36
4.1.    Analyse univariée sur le nombre d'inflorescences ayant noué.....	36

4.2.	Analyse univariée sur le taux de nouaison.....	36
4.3.	Analyse SMA sur le nombre d'inflorescences par rapport au nombre d'inflorescences ayant noué .....	37
5.	Suivi de la croissance des pommes .....	38
II.	Effets de l'agroforesterie sur la nuisibilité des bioagresseurs du pommier.....	40
1.	Nuisibilité du puceron cendré .....	40
2.	Nuisibilité du carpocapse .....	40
DISCUSSION	.....	41
I.	Effets de l'agroforesterie sur le verger de pommiers .....	41
1.	Effets de l'agroforesterie sur la hauteur de l'arbre et sa surface de section de tronc et de branches.....	41
2.	Effet de l'agroforesterie sur les séquences de formation des rameaux .....	42
3.	Effets de l'agroforesterie sur la floraison.....	43
4.	Effets de l'agroforesterie sur la nouaison .....	43
5.	Effets de l'agroforesterie sur la croissance des pommes .....	44
6.	Effets de l'agroforesterie sur les ravageurs du pommier .....	45
II.	Limites de l'étude .....	46
III.	Perspectives .....	47
RÉFLEXION AUTOUR DE LA QUALITÉ DE VIE AU TRAVAIL	.....	48
CONCLUSION	.....	49
BIBLIOGRAPHIE	.....	
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	.....	
ANNEXES	.....	

## REMERCIEMENTS

Je remercie le GIS Fruits pour avoir financé ce stage ainsi que le programme ALTO pour le soutien au financement de mes activités et déplacements, et le Département de l'Hérault, partenaire du projet en faveur du développement agricole. Je remercie aussi Sylvaine Simon, et l'équipe de l'UERI de Gotheron, INRAE, pour leur accueil, ainsi que François Warlop, GRAB, et Jean-Michel Ricard et Marion Michaud, Ctifl, pour leur accueil et leurs conseils.

Je tiens à remercier Pierre-Éric Lauri pour son encadrement tout au long de mon stage, son implication dans mon travail et dans mon mémoire, sa pédagogie et sa bonne humeur. J'ai pu apprendre beaucoup et dans de très bonnes conditions, ce qui a fait de mon stage une expérience riche et épanouissante.

Je remercie Olivier Duchêne pour son encadrement en tant que tuteur pédagogique à l'ISARA.

J'aimerais également remercier Alain Sellier, Axelle Perrot et les personnes de l'équipe TEAM pour leur aide sur le terrain et au bureau, ainsi que toute l'UMR ABSys et l'ensemble des stagiaires.

## INTRODUCTION

1,43 millions de tonnes de pommes produites en France en 2022 : avec ce chiffre colossal, cette espèce tempérée se place en première position dans le classement des productions fruitières françaises (Agreste, 2022a). Elle est également le fruit le plus consommé par les français·e·s : 65% d'entre eux·elles déclarent en consommer au moins une fois par semaine (CTIFL, 2019).

L'origine géographique de la pomme (*Malus domestica*) n'est pas totalement claire : issue probablement du centre de l'Asie, sa présence est déjà mentionnée en 6500 avant Jésus-Christ. Sa culture s'est ensuite répandue dans le monde entier grâce aux nombreuses routes du commerce, notamment en Amérique durant les seizième et dix-septième siècles ; elle est maintenant cultivée dans la plupart des zones de latitudes tempérées, ou encore à haute altitude sous climat tropical. La production de pommes a commencé à connaître une augmentation après la seconde guerre mondiale, mais les volumes ont réellement explosés avec l'expansion de la production par la Chine, au début des années 1990 : elle produisait 4 millions de tonnes de pommes à cette époque (Warrington, Ferree, 2003), et en produit 45 millions actuellement (FAO, 2021). Cette accélération de la production s'explique par les nouveaux systèmes de culture mis en place avec la révolution verte, impliquant les nouvelles développés herbicides, fongicides et insecticides. Ceux-ci, conjointement aux progrès mécaniques, ont permis l'obtention de fruits de haute qualité, dans des zones où la production était autrefois difficile. Des avancées techniques concernant le matériel végétal tels les porte-greffe ou les variétés, l'amélioration de la conduite des vergers et de l'arrangement spatial des pommiers sont également des éléments qui ont menés aux 130,2 millions de tonnes de pommes produites en 2021 dans le monde (Lauri, Simon, 2019 ; FAO, 2021).

Mais la clé de réussite de cette production massive n'est pas sans soulever quelques questionnements. En effet, les vergers conventionnels sont très fortement dépendants d'intrants : qu'ils soient de l'ordre des fertilisants, des produits phytosanitaires ou encore de l'eau, leur utilisation massive dans le contexte global de réchauffement climatique pose la question de la durabilité de ces systèmes. La pomme est le produit issu de l'arboriculture dont l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) est le plus élevé : il s'élève à 31,5 en moyenne en 2018, contre 8,2 par exemple pour la cerise la même année (Agreste, 2022b). Les vergers de monoculture en haute densité ne sont pas étrangers à cette forte dépendance aux intrants.

De plus, la production de pommes est également menacée directement par le changement climatique, et ce par plusieurs aspects. Premièrement, les modifications de températures selon les saisons impliquent des perturbations dans la phénologie des arbres, ce qui influence le rendement final en fruit. Ensuite, des observations récentes indiquent que les pommes subissent déjà des dégâts dus aux excès de températures et de rayonnement, qui se manifestent sous la forme de coups de soleil : ceci se traduit par une décoloration de la peau et peut aller jusqu'à des nécroses, rendant les fruits inaptes à la commercialisation (Olivares-Soto *et al.*, 2018). Afin de tenter de minimiser l'impact des rayonnements

et des températures sur les arbres fruitiers, des techniques ont été mises en place dans plusieurs vergers : c'est le cas par exemple des filets d'ombrage – qui servent également de filet anti-grêle –, déployés sur les arbres afin de créer de l'ombre sur la culture. Ces filets ont vocation à baisser l'indice de radiation et la température à la surface du fruit, afin de prévenir l'apparition des coups de soleil ; la question demeure cependant de savoir si ces filets ont d'autres impacts sur les arbres qu'ils couvrent, notamment sur la température au sein du verger.

Une analyse basée sur des températures de l'air relevées au sein de pommeraies du CETA Hérault Vidourle a été réalisée afin de répondre à cette interrogation. Le climat y est méditerranéen. Les relevés de températures ont été faits une fois par heure, toute la journée, de juin à novembre 2019. Les données ont été collectées sous deux modalités : la première correspond aux vergers protégés par des filets d'ombrage de couleur grise. A chaque date de relevé, la température sous le filet a été prise à trois hauteurs différentes : à un mètre au-dessus du sol, à deux mètres au-dessus du sol, et à dix centimètres en-dessous du filet. La deuxième modalité sert de témoin sans filet, pour laquelle les températures ont été mesurées à un mètre et à deux mètres du sol, ainsi qu'au-dessus de la cime des arbres. Le graphique suivant rend visible la différence de température qui existe entre les vergers avec filets gris et les vergers sans filets, pour le mois de juillet 2019 et pour la hauteur d'un mètre au-dessus du sol.

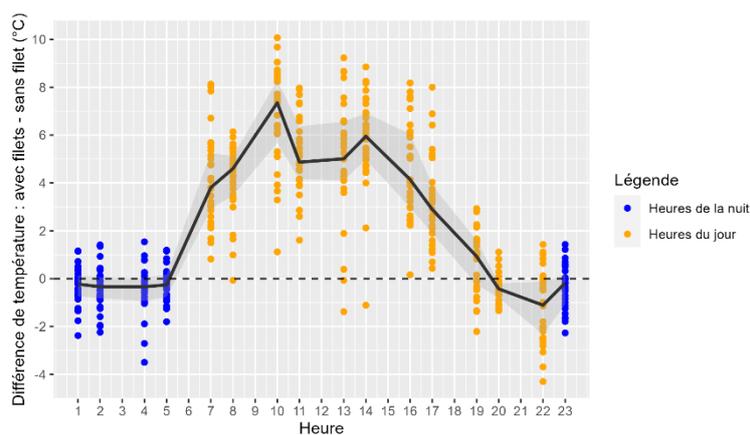


Figure 1 : Différence de température entre les vergers de pommiers avec filets et ceux sans filet, à 1m du sol, en juillet 2019. La ligne noire représente la médiane de la différence entre la température sous filets gris et la température sans filet, la zone ombrée représente les intervalles interquartiles (Données : CETA Hérault-Vidourle)

Une différence de température positive pour la plupart des heures de la journée est constatée, spécialement les heures du début du jour. Les filets augmentent les températures moyennes de l'air au sein du verger en journée, ce qui contre-indique leur utilisation dans le cas de réchauffement du climat. Les résultats sont similaires pour les différentes hauteurs de relevés de températures.

Les filets d'ombrage ne semblent donc pas être une solution satisfaisante pour protéger les pommiers des excès de températures. Mais d'autres pistes peuvent être explorées : en effet, selon Gosme et al (2016), dans des systèmes conduits en association de cultures et d'arbres, l'ombre faite le jour par les arbres réduit la température de l'air et protège les cultures contre la chaleur extrême. C'est le principe de l'agroforesterie, définie comme l'exploitation des terres avec une association d'arbres et de cultures

ou d'animaux (Dupraz, Liagre, 2011). Une étude menée en 2015 sur un système agroforestier sous climat méditerranéen montre les résultats suivants :

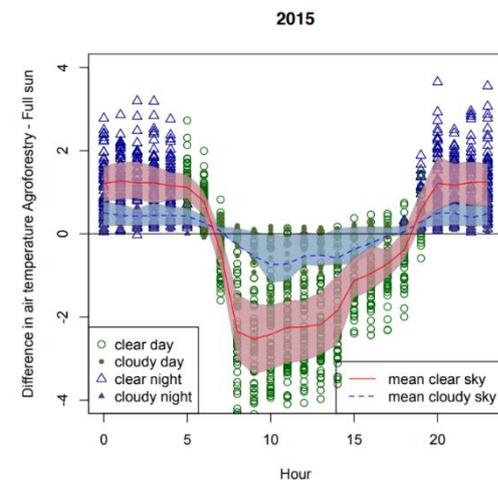


Figure 2 : Différence de la température de l'air entre les systèmes en agroforesterie et ceux en plein soleil, en fonction de l'heure, pendant la saison de croissance 2015. Les cercles correspondent aux observations pendant le jour, les triangles aux observations pendant la nuit. Les symboles ouverts désignent les jours clairs, les symboles pleins sont les jours couverts. La ligne pleine correspond à la moyenne de la différence de température les jours clairs, la ligne en pointillés les jours couverts. La partie grisée correspond aux quartiles (25 et 75%) (Gosme et al., 2016).

La présence d'arbres augmente donc la température nocturne sur le système agricole, mais diminue les températures diurnes. L'agroforesterie a donc le potentiel de limiter les risques de stress liés à la chaleur le jour. La moins forte baisse de température pendant la nuit pourrait engendrer des problèmes de baisse de rendement, mais ne semble pas porter atteinte à la vernalisation (période de froid nécessaire pour le passage du stade végétatif au stade reproductif) des plantes annuelles (Gosme *et al.*, 2016). Étudier la possibilité de faire pousser des pommiers sous l'ombre portée par des arbres pourrait donc être une solution pour limiter les effets des trop fortes chaleurs diurnes sur les arbres.

C'est dans ce contexte et à la suite d'observations de ce type qu'a été pensé le projet sur lequel porte ce mémoire de fin d'études. Il s'agit d'étudier le pommier et l'intérêt de sa mise en culture en système agroforestier, par le biais d'un système expérimental particulier. Le dispositif de recherche GAFAM - Growing Agroforestry systems with Apple in the Mediterranean (Lauri *et al.*, 2022b) , vise à cultiver du pommier en association avec une strate haute, composée de noyer à bois, d'une hauteur de dix à quinze mètres. Trois modalités sont testées sur la parcelle d'expérimentation : des pommiers plantés en inter-rang des noyers, des pommiers plantés sur le rang de noyers, et des pommiers hors noyers constituant les témoins. En effet, les noyers pourraient contribuer à créer des microclimats favorables à la croissance des arbres fruitiers en évitant les excès de rayonnement, comme évoqué plus haut ; il est cependant nécessaire de savoir si l'ombrage apporté par les noyers ainsi que leur proximité avec les arbres fruitiers ont un impact sur leur développement. Plus précisément, dans le cadre de notre étude, il s'agit de **savoir si la situation agroforestière a un impact sur les composantes de rendement du pommier**, soit : leur hauteur, leur diamètre de tronc et de branches, leur floraison, leur nouaison ainsi que leur aptitude de retour à fleur et à fruit. La période de stage ne m'a pas permis d'analyser la production de fruits proprement dite. De plus, nous nous intéressons non seulement à la caractérisation des données en 2023, mais aussi à l'ensemble des résultats obtenus pendant les années précédentes (2018-2023), l'objectif étant de réaliser une synthèse nous permettant de mieux comprendre l'impact de

la présence des noyers sur le développement des pommiers. Les analyses de données seront donc également réalisées dans le but de caractériser l'évolution des composantes du rendement au cours des années de suivi. L'impact d'insectes ravageurs – puceron cendré et carpocapse – sur les composantes du rendement sera également étudié.

Ce dispositif de recherche est porté par la composante INRAE de l'Unité Mixte de Recherche ABSys – Agrosystèmes Biodiversifiés, et s'inscrit dans le cadre de deux programmes. D'un côté, le Programme Interdisciplinaire de Recherche Développement en Agroforesterie, abrégé sous l'acronyme PIRAT, qui travaille sur les composantes en biologie et en agronomie des systèmes agroforestiers et est soutenu par un financement départemental (Hérault) ; de l'autre, le programme multi-site ALTO, Systèmes en Arboriculture et Transition agroécologique, financé par Dephy Expe, concerne plus spécifiquement l'entomofaune et les régulations biologiques. Le stage est financé principalement par le GIS Fruit et est conduit en partenariat avec le CTIFL et le GRAB.

Ce mémoire va tout d'abord établir un état de l'art des caractéristiques de la pomme et de sa mise en culture, puis de l'agroforesterie et de sa mise en place dans le cadre de l'arboriculture. Puis il présentera les matériels et méthodes utilisés dans le cadre de l'expérimentation, suivis par les résultats de l'étude, puis par la discussion de ces résultats. Enfin, il finira sur les perspectives que dégage ce travail autour du pommier en agroforesterie.

# ÉTAT DE L'ART

## I. Le pommier : caractéristiques et culture

### 1. Biologie du pommier

Le pommier est une plante pérenne faisant partie de la famille des Rosaceae, de la sous-famille des *Maloideae* et du genre *Malus*. Ce genre comprend entre 25 et 47 espèces. Son aire de croissance est l'une des plus étendues que l'on connaisse pour une seule espèce, mais chaque variété peut présenter des exigences plus restreintes. La gamme de sol sur lequel il peut se développer est très variable, même s'il s'adapte mieux sur les sols de limon profonds et bien drainés (Trillot *et al.*, 2002).

#### 1.1. Croissance et organogenèse

La croissance des arbres résulte de la division d'ensemble de cellules appelées méristèmes, responsables du développement des différents organes composant la plante. Ces méristèmes sont appelés différemment selon leur position et leur fonction : les méristèmes apicaux (ou primaires) sont situés en position terminale des axes et contribuent à leur allongement, tandis que les méristèmes secondaires sont placés à l'intérieur des axes et assurent leur croissance en diamètre (Trillot *et al.*, 2002). Les méristèmes primaires caulinaires (relatifs à la tige) se divisent pour donner naissance aux feuilles, aux nœuds et aux entre-nœuds (Massonnet, 2005).

Si les conditions de développement ne sont pas complètement favorables (intrinsèquement à l'arbre ou reliées à l'environnement extérieur), les ébauches foliaires jeunes, entassées au sommet du méristème, se transforment en écailles. Ceci ralentit l'organogenèse et mène à la formation d'un bourgeon, qui peut donc être considéré comme un axe caulinaire temporairement bloqué dans sa croissance, portant à son extrémité le méristème qui l'a produit. Il continuera sa croissance quand les conditions deviendront optimales (Massonnet, 2005; Trillot *et al.*, 2002). La croissance des pommiers est donc rythmique, se déroulant en une ou plusieurs vagues successives non seulement entre chaque saison de croissance imposée par l'hiver, mais également au cours d'une même saison végétative (Stephan, 2012). Si le développement n'est pas perturbé, le méristème va donner naissance à un rameau feuillé. Il existe plusieurs types de pousses végétatives : la pousse terminale, qui se développe à partir du bourgeon apical de la saison précédente, ou les pousses se développant à partir des bourgeons axillaires. Il existe également les pousses de bourses, qui elles croissent depuis la base des inflorescences (Mehri, Crabbé, 2002).

Au sein de ces pousses végétatives, deux sortes de rameaux sont à différencier. D'un côté, les pousses courtes ou brachyblastes, dont la croissance internodale est très réduite. Ces pousses peuvent être obtenues dans des conditions défavorables de croissance, comme un manque d'eau ou de glucides, mais peuvent aussi simplement être des pousses caractéristiques de certaines variétés (rameaux de type « spurs »). Les structures formées par le méristème vont s'accumuler, ayant un effet inhibiteur sur l'activité organogénétique et sur la poursuite du développement des ébauches foliaires. Ces ébauches

foliaires, ainsi bloquées dans leur développement, vont se transformer en écailles, et permettre la formation précoce d'un bourgeon terminal. De l'autre côté, les pousses longues, également appelées auxiblastes, présentent une croissance internodale importante, permise grâce à des conditions environnementales favorables. Leur activité d'allongement et organogénétique se prolonge jusqu'à l'arrêt de leur élongation, variable selon leur environnement (souvent au début du mois de juillet) selon Mehri et Crabbé (2002) et Massonet (2005), ou le plus souvent à la suite d'un arrêt de croissance estival puis d'une reprise de croissance, durant l'automne (Lauri, Térouanne, 1995). L'arrêt de la croissance internodale en conditions défavorables s'explique par le phénomène de compétition intrinsèque à la plante : les mêmes ressources sont mobilisées pour le développement des feuilles, pour l'organogénèse ainsi que pour l'allongement des entre-nœuds, où ce dernier apparaît comme le moins prioritaire (Trillot *et al.*, 2002).

La taille du rameau en année  $n$  a une influence positive sur la proportion de bourgeons floraux en année  $n+1$ , selon les variétés ; tailler de manière optimale un rameau pourrait donc avoir une influence sur la production de fleurs et donc de fruits (Lauri, 2019). Les variétés présentant des rameaux courts auront tendance à avoir des fruits de manière alternative d'une année sur l'autre, quand celles avec de longs rameaux en produiront annuellement (Lauri, Trottier, 2004).

Le bourgeon issu de ce développement peut être soit végétatif, soit floral. Dans le premier cas, il porte uniquement des primordias foliaires (soit des groupes de cellules destinés à former de nouvelles feuilles) ; dans le cas d'un bourgeon floral, il porte en plus des primordias floraux, et pourra porter des fruits plus tard dans la saison. La nature du bourgeon est déterminée l'année précédant sa floraison (Pitchers, 2021). L'induction florale est généralement liée positivement à la surface foliaire, qui joue le rôle de productrice d'assimilats, et est associée au rythme de croissance des rameaux : elle sera donc influencée par les conditions climatiques, une faible luminosité ou une grande vigueur de la croissance végétative pouvant mener à la réduction de l'induction (Legave, 2021).

L'inflorescence se développe sur un axe qui, en accumulant des réserves, va gonfler et devenir charnu. Cet axe va porter le nom de « bourse ». Le relais de croissance qui se développe depuis la bourse est appelé « pousse de bourse », comme évoqué plus haut. L'année suivante, les méristèmes terminaux de la pousse de bourse pourront se développer en bourgeons végétatifs ou floraux. Les bourgeons végétatifs pourront eux donner naissance à des rameaux courts ou longs dans la saison, ou la saison suivante.

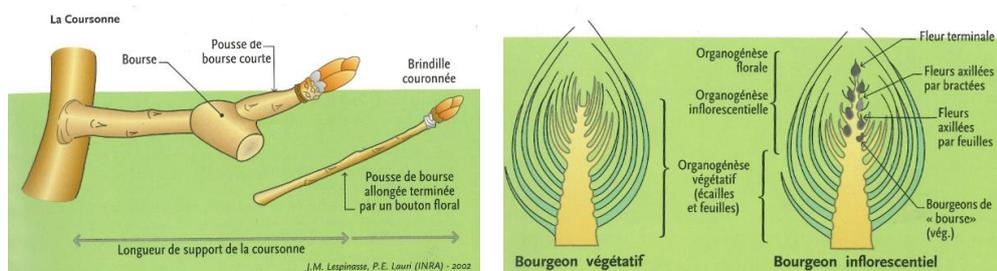


Figure 3 : à gauche : rameau du pommier (Source : Lespinasse et Lauri, cité par Trillot et al., 2002) ; à droite : Bourgeons végétatifs et floraux de pommier (Source : IRISIA, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, cité par Trillot et al., 2002)

## 1.2. Inflorescence

L'inflorescence du pommier comprend cinq ou six fleurs organisées en corymbe, dans laquelle chaque fleur est composée en moyenne de cinq pétales, cinq sépales et de vingt étamines. La reproduction est assurée par allogamie car les fleurs sont auto-incompatibles. Il est donc nécessaire d'employer une autre variété comme pollinisateur. Le principal agent pollinisateur du pommier est l'abeille domestique, qui représente 60 à 90% de la faune pollinisatrice, les grains de pollen étant peu adaptés au transport par le vent. La réceptivité des stigmates à la fécondation est à son maximum quand la fleur est au stade d'ouverture F selon la classification de Fleckinger (Fleckinger, 1964) : 84% de nouaison sont observés à cette période. Elle diminue ensuite (Trillot *et al.*, 2002).

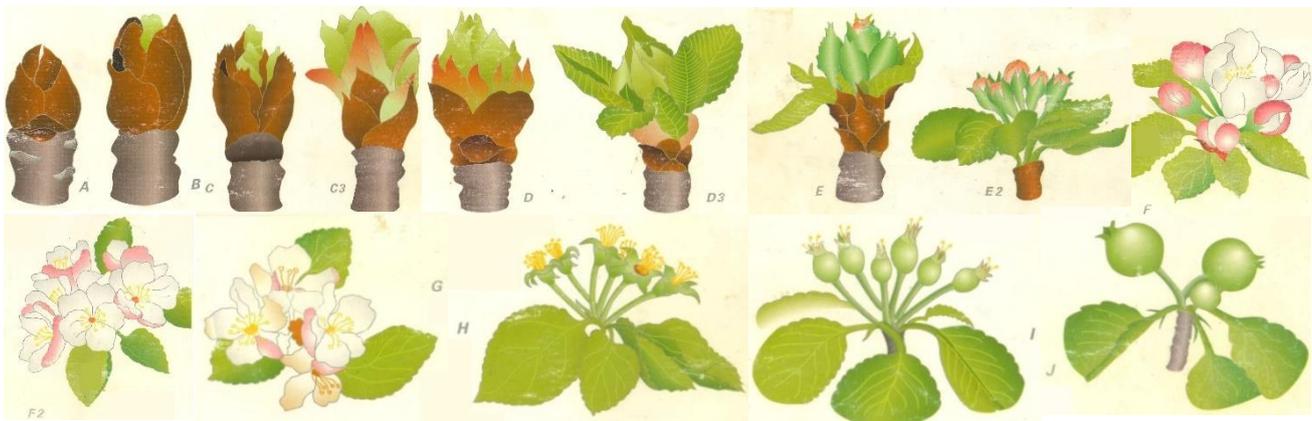


Figure 4 : Stade de développement du bourgeon de pommier selon la classification de Fleckinger (CTIFL, s. d.)

Les inflorescences peuvent être présentes en position latérale ou terminale des rameaux, mais certains cultivars portent peu d'inflorescences latérales. La fleur terminale est généralement la première à s'ouvrir et donne naissance aux fruits les plus gros (cela peut différer selon les cultivars) ; les fleurs latérales s'ouvrent plus tard et produisent généralement des fruits plus petits (Warrington, Ferree, 2003).

## 1.3. Croissance du fruit

La pomme mature est un fruit charnu complexe, récolté d'août à octobre selon les climats et les variétés. Peu après la fécondation, l'ovaire et les tissus du réceptacle commencent à se développer pour commencer la formation du fruit. Les parenchymes du fruit en développement entament une division cellulaire qui dure de trois à quatre semaines. Cette croissance se fait grâce à l'apport de nutriments (eau et glucides notamment) issus des tissus de réserve situés dans les organes ligneux proches, puis par la photosynthèse assurée par les feuilles et par le fruit lui-même ; les feuilles proches n'exportent pas assez d'assimilats pour être utiles à la croissance du fruit après la nouaison (Trillot *et al.*, 2002; Lauri, Téroanne, 1999).

Ensuite, les cellules grossissent grâce aux nutriments provenant des feuilles des pousses de bourse ; réciproquement, la présence du fruit stimule la photosynthèse des feuilles adjacentes (Lauri, Trottier, 2004). Si plusieurs fruits se développent sur le même rameau, on observe une compétition pour les ressources, où le fruit terminal prend le dessus sur le fruit latéral (Warrington, Ferree, 2003). Cette

compétition entre les fruits implique une réduction du calibre des pommes au moment de la récolte sur les arbres présentant de fortes charges en fruits, ce qui justifie la pratique de l'éclaircissage, systématique en verger.

Les fleurs qui n'ont pas été fécondées tombent rapidement. Certains fruits tombent également avant d'arriver à maturité : c'est le phénomène d'abscission. Elle a lieu jusqu'à neuf semaines après la floraison. Les fleurs terminales dans l'inflorescence ont moins tendance à tomber que les fleurs latérales, et les fruits qui grandissent lentement ou ceux qui portent peu de graines tombent en premier, car ils sont moins compétitifs. Selon Warrington et Ferree (2003), une météo nuageuse limite la photosynthèse et donc favorise l'abscission.

#### 1.4. Dormance des bourgeons

Durant la saison hivernale, le bourgeon entre en repos. Cette entrée en dormance est généralement considérée comme une acclimatation à des conditions environnementales défavorables. Cette phase peut être découpée en trois moments distincts : la paradormance, l'endodormance et l'écodormance. La paradormance se met en place dès la formation des bourgeons, la croissance étant inhibée par les autres organes de l'arbre. L'endodormance se met en place ensuite, due à des facteurs internes ; sa levée conditionne l'intensité et l'homogénéité du débourrement végétatif et de la floraison. Cette levée est principalement corrélée à une exposition prolongée à des températures basses, ce qui est désigné par le terme de « besoin en froid ». L'écodormance quant à elle est levée par un besoin en chaleur propre à chaque variété, et mènera aux stades de floraison et de feuillaison. Sans une exposition à des températures adéquates, le bourgeon ne se comporte pas de la même façon et le rendement du pommier en est donc affecté (Legave, 2021; Farrera, 2023).

## 2. Le pommier en arboriculture

La surface consacrée à la production de pommes en France est importante : 37 000 hectares étaient couverts de vergers de pommiers en 2021, largement devant les poires et les fruits à pépins. (Agreste, 2021a). Les vergers de pommiers sont soumis à un système de conduite particulier, ayant pour objectif l'obtention d'un rendement optimal. Les opérations menées sur les arbres ne sont pas sans conséquences sur leur développement ; elles sont néanmoins guidées par les études menées sur la biologie et le mode de croissance du pommier.

### 2.1. Système de conduite des pommiers en arboriculture

#### a) Le greffage

Les espèces fruitières présentent un haut niveau d'hétérozygotie, ce qui implique un grand nombre de recombinaisons génétiques possibles et donc une grande diversité de descendants, incompatible avec la production commerciale : la reproduction sexuée est donc écartée au profit de la multiplication

végétative, qui permet un clonage et donc une bonne maîtrise de la production, en matière de qualité des fruits mais aussi de phénologie (Legave, 2021).

Dans le cas des arbres fruitiers, la multiplication végétative se fait grâce au greffage : il s'agit d'unir une portion de végétal, appelée greffon, sur une autre, appelé porte-greffe. En se développant, le greffon donnera la partie aérienne de la plante, et portera les fruits conformes à la variété choisie. Ce choix de l'association greffon et porte-greffe est un élément clé de la réussite du verger et repose sur plusieurs critères. Le premier aspect pris en compte dans ce choix sera la compatibilité avec la variété, ainsi que la vigueur du porte-greffe et son adaptation au sol et au climat. Dans le cas de vergers de production, une mise à fruit rapide et régulière sera aussi un élément très important du choix de porte-greffe, puisqu'il permet entre autre de raccourcir la période non productive de l'arbre, qui correspond aux premières années d'un plant où celui-ci ne présente pas de floraison. La sensibilité du porte-greffe aux parasites et aux maladies cryptogamiques est également à prendre en compte (Trillot *et al.*, 2002).

Après le greffage viennent d'autres opérations qui vont également conditionner la croissance et le rendement du pommier tout au long de sa vie.

#### b) L'éclaircissage

Plusieurs pratiques sont couramment mises en place dans les vergers de production, notamment l'éclaircissage. Il s'agit d'une méthode de maîtrise de la charge de l'arbre qui consiste à enlever un certain nombre de pommes pour ne laisser qu'un nombre choisi de fruits sur l'arbre, en fonction du potentiel du verger, et a pour objectif d'optimiser la croissance et la qualité du fruit laissé sur l'arbre : cela atténue en effet la compétition avec les autres fruits de la branche. De plus, cela permet de maîtriser les phénomènes d'alternance de la production : certaines variétés sont dites alternantes, ce qui signifie que la présence de fruits sur une année donnée inhibe la mise à fleur l'année suivante. Les variétés non alternantes sont celles qui sont caractérisées par un retour à fruit élevé au niveau de chaque coursonne. Les fruits abîmés sont enlevés, et seul un fruit par inflorescence est laissé : pour le même nombre de fruits sur l'arbre, les fruits grossiraient plus s'ils sont seuls par inflorescence que s'ils sont plusieurs (Kon, Schupp, 2013). Le choix de l'intensité de l'éclaircissage se fait selon différents paramètres : nature de la variété, vigueur et âge des arbres, taux de floraison ou encore taux de nouaison. Il peut se calculer en fonction de la surface de section du tronc ou des branches : on peut laisser par exemple cinq fruits par centimètre carré de section (Trillot *et al.*, 2002). Ces opérations sont menées dans l'objectif d'améliorer le rendement du verger.

#### c) Définition du rendement en arboriculture

La production d'une plante fruitière s'élabore sur deux années : elle est en effet dépendante des mécanismes de différenciation des bourgeons en année  $n$ , pour une floraison et une nouaison en année  $n+1$ . Les conditions environnementales ont donc leur importance sur les deux années consécutives. La production est également soumise aux mécanismes d'alternance de production.

Le rendement est composé premièrement du nombre de fruits : celui-ci est déterminé par le nombre d'arbres, le nombre de bourgeons floraux par arbre, le nombre de fleur par bourgeon, le taux de floraison, et enfin, en fonction de la pollinisation, du taux de nouaison. Afin d'obtenir un rendement annuel en tonnage par hectare, ce nombre de fruit doit être multiplié par le poids moyen des fruits. La figure ci-dessous (inspiré de Legave, 2021) présente les principales composantes du rendement chez les arbres fruitiers.

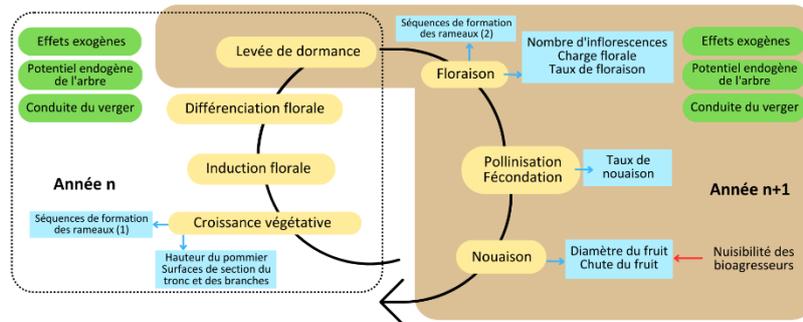


Figure 5 : Principales composantes du rendement chez les arbres fruitiers (inspiré de Legave, 2021)

## 2.2. Effets des bioagresseurs sur le verger de pommier

L'effet des bioagresseurs est un élément qui peut fortement influencer le rendement d'un verger, d'où l'importance de le prendre en compte. Les insectes ravageurs sont en effet sources d'importantes pertes de rendement au sein des systèmes arboricoles, et leur méthode de lutte est principalement basée sur l'utilisation de produits phytosanitaires : sur les 37,5 IFT (Indice de Fréquence de Traitement) appliqués en moyenne sur les pommiers (26,5 en agriculture biologique), 9 sont des insecticides (8,3 en agriculture biologique) (Agreste, 2021b).

Notre étude se concentre sur deux bioagresseurs majeurs du pommier : le puceron cendré et le carpocapse. Le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*) est un hémiptère ne dépassant pas les cinq millimètres. Son cycle de vie se déroule sur deux hôtes : le pommier en automne, hiver et printemps, puis, généralement, le plantain (*Plantago lanceolata*) en été où ils se multiplient. Les colonies se développent sur les feuilles et provoquent leur enroulement ainsi que la déformation des fruits, qui arrêtent par la suite de grandir. C'est ainsi le puceron le plus dommageable sur les pommiers (Trillot *et al.*, 2002). Les auxiliaires connus pour lutter contre cet insecte sont principalement la chrysope verte, la coccinelle à deux points, la cécydomie du puceron ainsi que le forficule.



Figure 6 : Dégâts causés par le puceron cendré sur la pomme (source personnelle)

Le carpocapse (*Cydia pomonella* L.) est un lépidoptère également présent sur plusieurs arbres fruitiers. Les dégâts qu'il cause sont principalement dus à sa larve, qui pénètre dans les fruits et y creuse des galeries, rendant ainsi la chair impropre à la consommation. Le fruit finit par chuter. La présence de deux fruits côte-à-côte en contact augmente le risque de pénétration d'une larve. Ses prédateurs peuvent être certains oiseaux, ainsi que certains hyménoptères ou diptères qui la parasitent (Trillot *et al.*, 2002).

## II. L'agroforesterie en réponse aux enjeux de durabilité des systèmes agricoles

Les composantes de rendement du pommier sont donc dépendantes non seulement de la biologie du pommier et de son mode de croissance, mais également des interventions humaines sur sa structure et de la gestion des ravageurs. Mais la culture du pommier, et plus généralement des arbres fruitiers, fait face à de nombreux défis – utilisation de nombreux produits phytosanitaires et changement climatique, principalement – qui posent la question de la reconception des vergers classiques vers de nouveaux systèmes se voulant plus durables et plus résilients : les systèmes agroforestiers en sont un exemple.

### 1. Concepts et intérêts de l'agroforesterie

Une définition de l'agroforesterie peut être l'exploitation des terres avec une association d'arbres et de cultures ou d'animaux (Dupraz, Liagre, 2011). Mais ce terme englobe en réalité de nombreuses pratiques, qui ont toutes pour point commun de conjuguer sur un même espace des plantes appartenant à des types biologiques différents : herbacées, arbres, ou encore arbustes. Loin d'être une pratique récente, elle est déjà en place au Moyen-Âge sous différentes formes : le pré-verger, associant des animaux de pâture sous des arbres fruitiers, était une forme d'agroforesterie largement répandue en France entre le XVI<sup>ème</sup> et le XX<sup>ème</sup> siècle. Viennent à l'esprit également les *coltura promiscua*, présentes en Italie du Moyen-Âge au XVIII<sup>ème</sup> siècle, qui désignaient des systèmes associant plusieurs cultures sur le même terrain, souvent des cultures légumières sous des oliviers. Jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, les arbres de plein champ et les haies couvraient une partie importante du paysage agricole français.

Dans un contexte de raréfaction des terres arables, la parcelle agroforestière est présentée comme avantageuse car elle a une double vocation de production : annuelle grâce aux cultures ou aux pâtures, et à long terme avec les produits issus de la sylviculture. Afin d'estimer la valeur de la productivité d'une parcelle agroforestière, une mesure est utilisée : c'est la Surface Équivalente Associée (SEA) en français, ou Land Equivalent Ratio (LER) en anglais. Il s'agit de la surface nécessaire, en séparant arbres et cultures sur deux parcelles différentes, pour obtenir la même production que sur un hectare agroforestier. Obtenir une SEA supérieure à 1 indique que l'association agroforestière est plus productive que les cultures et les arbres séparés, ce qui est souvent le cas dans le cas d'associations de plusieurs cultures (Dupraz, Liagre, 2011; Paut *et al.*, 2018). Cette association permettrait également de réduire de risque de variabilité de rendement des cultures (Paut *et al.*, 2018).

Les arbres ont des effets sur l'environnement dans lequel ils sont présents ; en cela, ils influencent les cultures avec lesquelles ils sont associés. Ils sont notamment facteurs de modifications des paramètres du climat : les arbres augmenteraient l'évapotranspiration et baisseraient la température de l'air, comparé aux cultures (Bonan, 2008). En phase feuillée, d'importants niveaux d'échanges thermiques se créent, et une augmentation de l'humidité absolue moyenne de l'air sous le couvert de l'arbre est observée (Baldy *et al.*, 1993). Comme déjà illustré plus haut, sous une canopée, l'amplitude de variation de température entre le jour et la nuit est également réduite (Gosme *et al.*, 2016). La présence

des arbres modifie également les composantes du vent au sol, car l'effet brise-vent se répartit sur toute la parcelle de façon homogène. En résumé, Dupraz et Liagre (2011) affirment qu'en combinant les effets de réduction du rayonnement sous les houppiers et de la vitesse du vent, et de l'augmentation de l'humidité de l'air par transpiration des arbres, la demande en eau des cultures sous un peuplement arboré peut être réduite de 30% en période estivale (dans le sud de la France, pour un peuplement de 50 arbres adultes par hectare).

Un autre service rendu par la présence des arbres est la facilitation de l'infiltration des pluies permise par le peuplement arboré et herbacé : la rugosité de surface est augmentée, ce qui freine le ruissellement des eaux et permet le stockage transitoire de l'eau en excès. Le système racinaire des arbres permet également l'infiltration profonde de l'eau (Baldy *et al.*, 1993). De plus, les racines profondes des arbres permettent une remontée d'eau dans les couches superficielles du sol (« hydraulic lift ») par le biais des racines superficielles (Dawson, 1993).

Des services écosystémiques sont également rendus par l'association des arbres dans les cultures. Les arbres apportent une plus grande diversité au sein du verger : cela favorise la venue d'auxiliaires naturels aux bioagresseurs ou d'insectes pollinisateurs par une plus grande offre de niches naturelles. Le contrôle biologique peut ainsi être augmenté (Lauri, Simon, 2019).

La question se pose néanmoins des phénomènes de compétition au sein d'un système agroforestier, les ressources utilisées par les différentes plantes composant le système étant similaires. Ceci a par exemple été observé dans les vergers où la culture intercalaire de jeunes pommiers avec de l'herbe annuelle non fixatrice d'azote diminue le rendement en pommes. Mais cette compétition peut se transformer en facilitation quand des légumineuses herbacées fixatrices d'azote plantées au pied des pommiers diminuent les besoins en apports d'engrais (Lauri *et al.*, 2022a). Dans une expérience qui associe des noyers avec de la luzerne en inter-rang, il a été observé que l'ombre améliore l'efficacité de l'utilisation de la lumière par la luzerne de 35%, et la fixation d'azote est stimulée aux zones proches des arbres. Il y a donc un développement de mécanismes de facilitation et de compensation qui ne sont pas observés quand la luzerne et le noyer poussent séparément (Lauri, Simon, 2019).

## 2. Le cas des systèmes agroforestiers fruitiers, et leur intérêt face au changement climatique

Comme mentionné plus haut, l'agroforesterie peut être déclinée de nombreuses manières, en diversifiant les niveaux des strates végétales et le type biologique des plantes. Parmi ces possibilités, les systèmes incluant des arbres fruitiers sont nombreux, souvent sous la forme de vergers maraîchers ou de pré-vergers.

Il existe une dénomination donnée aux systèmes agroforestiers incluant des pommiers, comme celui mis en place à Restinclières : ce sont les Apple-Tree-based AgroForestry Systems, ou AT-AFS (Pitchers, 2021). Ils sont composés de mélange de plantes ligneuses, les pommiers, avec éventuellement d'autres arbres et des cultures herbacées. L'objectif principal de production est la pomme. La SEA d'un système

AT-AFS n'a pas été étudiée, mais certaines études sur l'association de cerisiers et de noyers montrent une SEA de 1,3, ce qui signifie que ces systèmes seraient, pour une même surface, plus productifs que des vergers classiques. Classiquement, la plupart des systèmes agroforestiers se composent de deux strates : une strate herbacée basse, et une haute composée d'arbres à vocation fruitière ou de sylviculture. Le concept des AT-AFS est inspiré des systèmes tropicaux multi-strates qui associent des arbres bas – le caféier est l'exemple le plus répandu – avec une strate arborée plus haute ; la même configuration est présente à Restinclières avec les noyers à bois en strate haute, surplombant les pommiers (Lauri, Simon, 2019).

Associer des pommiers avec des noyers n'est pas sans intérêt face aux enjeux de changement climatique. En effet, dans le contexte de hausse des températures, les fruits subissent des dégâts dus à l'excès de rayonnement : les coups de soleil en sont un exemple. Ceux-ci se manifestent sous la forme de blanchiments de la chair quand les températures à la surface du fruit excèdent les 45°C, puis par une mortalité de la peau et des cellules de la chair après 52°C. Une seule heure d'exposition à des températures telles que celles-ci peuvent suffire à compromettre la commercialisation du fruit (Olivares-Soto *et al.*, 2018; Legave, 2021). L'exposition à des températures élevées pourrait aussi entraîner l'élévation de la concentration en sucres dans le fruit, par le biais de la stimulation intense de l'enzyme impliquée dans le stockage des sucres et par la diminution de la teneur en eau des fruits. Les contraintes hydriques peuvent aussi être à l'origine de la réduction de la croissance du fruit et de la surface foliaire de l'arbre, ce qui a pour conséquence d'inhiber la photosynthèse. Des fentes et des éclatements peuvent également résulter de la mauvaise alimentation en eau, ces phénomènes étant exacerbés par les irrégularités pluviométriques (Legave, 2021). Ces effets ont d'ailleurs été montrés sur l'expérimentation GAFAM en 2019 (Lauri *et al.*, 2022b).

Les effets du changement climatique se font également ressentir sur la phénologie de l'arbre. En effet, comme vu plus haut, les différentes levées de dormance des bourgeons sont, pour certaines, dépendantes des facteurs environnementaux et notamment de la température. Dans certaines zones géographiques, des températures plus chaudes au printemps induisent un raccourcissement de la période de besoin en chaleur, et donc une avancée de la sortie d'écodormance. Ceci implique un risque de gel accru, puisque les pommiers fleurissent plus tôt et sont donc plus susceptibles de porter des fleurs pendant les épisodes de gels printaniers qui, eux, interviennent sensiblement aux mêmes périodes. Il existe également un risque de non concordance des périodes de floraison entre variétés inter-fécondes, ce qui peut poser des difficultés lors de la pollinisation (Farrera, 2023). Les excès de températures peuvent aussi mener à une réduction de la période effective de pollinisation, et donc à un taux de nouaison réduit. D'autres phénomènes sont observés en réaction aux fortes températures : les avortements floraux semblent plus fréquents, ainsi que la formation de doubles pistils. Cette spécificité, qui est un trait d'adaptation aux conditions tropicales, mène à la formation de fruits doubles difficilement commercialisables. Les températures élevées ont également tendance à altérer la réceptivité des

stigmates chez les arbres fruitiers, ce qui a un impact sur la pénétration du pollen dans le stigmate et le style, et sur sa germination (Legave, 2021).

### 3. Le cas du pommier en agroforesterie

Ces conséquences de la hausse des températures sur les fruits justifient les recherches menées en agroforesterie, et notamment celle étudiée spécifiquement ici. Des études ont déjà été menées autour du verger en agroforesterie de Restinclières : de manière générale, les observations montrent que les pommiers expriment des traits d'adaptation à l'ombre qui affectent leur morphologie, leur architecture ainsi que leur phénologie.

Premièrement, il a été observé que tous les arbres, quelle que soit leur exposition au soleil, ont la même hauteur ; en revanche, les arbres les plus à l'ombre présentent une surface de section de tronc plus petite et une ramification réduite. La somme des sections des branches latérales est également moins importante sur les arbres moins exposés. Cela signifie que ce n'est pas la croissance primaire de l'arbre, responsable de la croissance apicale, qui est affectée par le manque de luminosité, mais la croissance secondaire, responsable elle de la croissance en diamètre (Pitchers, 2021; Lauri *et al.*, 2022b).

Concernant la floraison, il y a une différence significative entre le nombre d'inflorescences sur les pommiers en situation agroforestière et ceux du témoin agricole : les pommiers en pleine lumière présentent plus d'inflorescences que ceux en lumière modérée, qui eux en présentent plus que ceux en faible lumière (Lauri *et al.*, 2022a). Une autre observation a été que l'ombre induit une chute prématurée des pétales, et donc une fenêtre de pollinisation plus petite. Or, la pleine lumière aurait aussi réduit le taux de nouaison : la chute des pétales n'aurait donc finalement pas d'impact sur le nombre de fruit final. Il n'a pas été montré que l'agroforesterie modifie la date de la floraison, mais cela peut être dû à la date de débourrement tardive des noyers placés au-dessus : il n'est donc pas forcément pertinent de s'intéresser à la phénologie des pommiers (Pitchers, 2021).

La réduction de la luminosité entre 15 et 30 jours après la pleine floraison réduit la charge en fruit et peut induire leur chute (McArtney et al, 2004 ; cité par Pitchers, 2021). Le manque de photosynthétats dû à une ombre modérée pourrait également ralentir la croissance et le développement de l'arbre, mais ne semble pas affecter sa capacité de fructification. Il a été observé en revanche que sur la parcelle, les pommiers en pleine lumière avaient tous atteints leurs objectifs de production de fruit, tandis que les arbres sous les noyers présentaient des résultats hétérogènes, ce qui soulignerait une plus grande capacité de production de fruits en pleine lumière qu'à l'ombre (Pitchers, 2021).

# MATÉRIELS ET MÉTHODES

## I. Présentation de la parcelle

Le terrain d'expérimentation sur lequel porte le sujet de ce stage se situe dans le Domaine départemental de Restinclières, à Prades-le-Lez (Hérault, France : 43°42'12.168"N, 3°51'29.872"E). Le climat est de type méditerranéen. La parcelle, d'une surface de 1,5 hectares, est régulièrement suivie depuis 1995, date de la plantation des 35 noyers. Ceux-ci sont des arbres hybrides (*Juglans nigra* × *Juglans regia* NG23), cultivés pour le bois d'œuvre. Les rangs de noyers sont espacés de 13 mètres. L'espace entre chaque noyer est de 4 mètres, ou un multiple de 4, certains arbres ayant été enlevés au cours d'opérations d'éclaircissage dans les années 2000, car estimés trop faibles.

Les pommiers ont été plantés dans le cadre du dispositif « GAFAM » : Growing Apple in AgroForestry in the Mediterranean. 149 pommiers ont été plantés sur la parcelle en mars 2016 : 90% sont de la variété « Chouquette® Dalinette », dénommée « Dalinette » dans la suite du texte, et les 10% de la variété « Story » jouent le rôle de pollinisateurs, tous greffés sur les porte-greffes « Geneva® G202 C.O.V. ». Les rangs de pommiers sont espacés de 6,5 mètres, et les arbres (pommiers ou noyers) entre eux de 1,3 mètres. Une partie de la collecte des données a été effectuée sur les 140 arbres encore sur la parcelle – certains ont été arrachés – et les analyses statistiques ont souvent porté uniquement sur ceux de la variété Dalinette plantés en 2016, soit 112 arbres. Pour l'analyse d'une grande partie des variables, seuls 45 arbres ont été pris en compte, soit 15 de chaque modalité. Ceux-ci avaient été sélectionnés en 2018 dans le cadre de la thèse de Benjamin Pitchers (Pitchers, 2021). Ils sont considérés comme représentatifs après l'analyse en annexe 1.

Tableau 1 : Nombre de pommiers sur la parcelle de Restinclières

Modalité	Nombre total d'origine	Nombre total moins ceux arrachés	Variété Dalinette, plantés en 2016, moins ceux arrachés	Arbres sélectionnés pour les analyses
<b>AC</b>	27	23	20	15
<b>AFIR</b>	85	82	69	15
<b>AFR</b>	37	35	23	15
<b>Total</b>	149	140	112	45

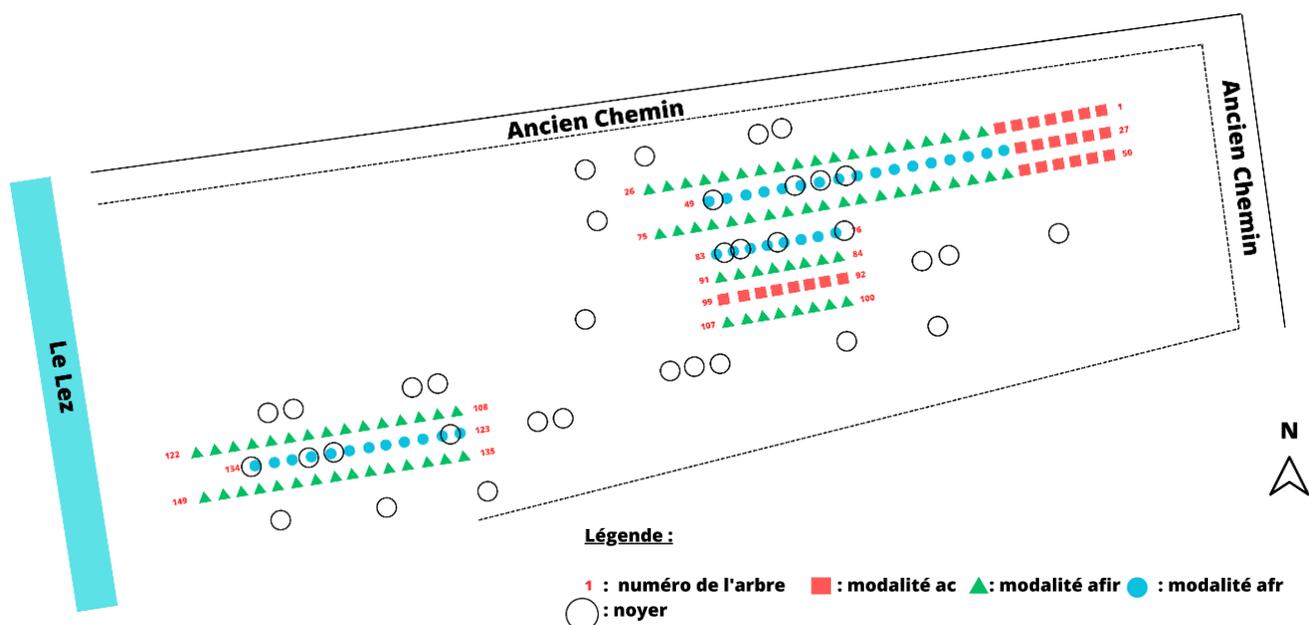


Figure 7 : Carte de la parcelle de Restinclières en 2023 (vue aérienne)

L'objectif de l'expérimentation est de caractériser la croissance et le fonctionnement reproducteur des pommiers en agroforesterie : pour cela, trois modalités différentes sont testées, qui sont caractérisées par un Gap Fraction différent (soit le flux de photons photosynthétiques arrivant sur le pommier sans noyer au-dessus, par rapport au flux de photons synthétiques arrivant sur le pommier avec un noyer présent au-dessus).

La modalité « témoin agricole » (appelée AC, Agricultural Control) désigne les arbres plantés comme dans un verger classique. Ils sont placés en pleine lumière (hors de l'ombre portée par les noyers) (Pitchers, 2021). Les pommiers plantés en « inter-rang des noyers » (AFIR, AgroForestry Inter-Row), sont placés à 6,5 mètres en parallèle des rangs de noyers : ils sont considérés comme bénéficiant d'un apport de lumière intermédiaire. Enfin, la modalité « sur le rang des noyers » (AFR : AgroForestry Row), désigne les pommiers plantés sur la même ligne que les noyers et considérés comme bénéficiant d'un bas apport de lumière.

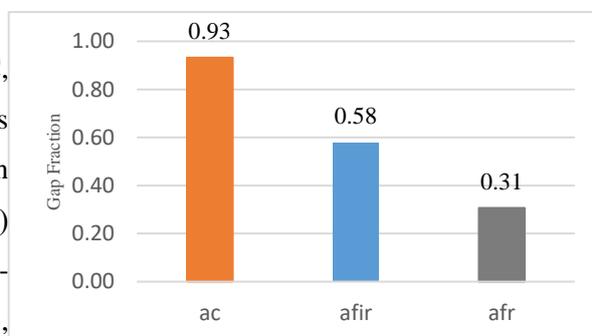


Figure 8 : Moyenne de Gap Fraction sur les trois modalités de pommiers en 2022. Le Gap Fraction désigne le flux de photons photosynthétiques arrivant sur le pommier sans noyer, sur ce même flux avec noyer. L'écart-type est symbolisé par les barres noires (issu de Kuhn, 2022)

La distance entre les pommiers, ou entre un pommier et un noyer, est de 1,3 mètre, et ce sur les 10 lignes d'arbres. Les pommiers sont conduits en agriculture biologique très bas intrants : 2 OVI PHYT (huile de paraffine) contre le puceron cendré, 7 CARPOVIRUSINE contre le carpocapse, 1 RAPAX insecticide. Les pommiers sont irrigués au goutte-à-goutte. Ils ne subissent aucune taille dans l'année. Par contre, une opération d'éclaircissage est menée au début du mois de juin afin que tous les arbres

aient la même charge en fruit : 5 fruits par cm<sup>2</sup> de section du tronc sont laissés sur le pommier. L'entre-rang des pommiers a été semé avec des bandes fleuries, mais n'est pas exploité actuellement.

## II. Analyse et collecte des données

### 1. Principes généraux sur les statistiques menées dans ce rapport

Une analyse statistique univariée a été réalisée pour toutes les variables, sauf pour les séquences de formation. Une analyse statistique bivariée a également servi à analyser les relations entre certaines variables.

L'analyse univariée menée est basée sur l'application du modèle linéaire. Celui-ci implique que les variables soient distribuées selon une loi normale. Après analyse des histogrammes de fréquence et des diagrammes quantile-quantile, il a été estimé que les distributions statistiques des variables satisfaisaient globalement aux hypothèses de normalité. De plus, la taille de l'échantillon étant relativement importante (égale à 45 ou à 112 individus selon les analyses), les tests statistiques seront plus facilement capables de résister à un écart important aux hypothèses, puisqu'il est généralement considéré que s'il y a plus de 30 individus dans l'échantillon, alors le modèle linéaire peut être appliqué même sans respect total des conditions d'application (Vaudor, 2015). Le choix a été fait également de ne pas transformer les variables avec des fonctions qui leur auraient conféré un meilleur respect des hypothèses (log par exemple), afin de garder dans les analyses et les représentations graphiques une certaine cohérence et lisibilité par rapport à la réalité des variables observées.

Premièrement, une analyse de l'effet de la modalité (AC, AFIR et AFR) sur chacune des variables a été menée, grâce à une ANOVA de type III. L'objectif était de savoir s'il existait une différence entre les moyennes des différentes modalités de l'expérience. Le seuil de significativité choisi était 0,01 à chaque fois.

L'hypothèse est la suivante :

H<sub>0</sub> : les moyennes de la variable observée sur les différentes modalités sont égales.

Ensuite, dans le cas où l'hypothèse H<sub>0</sub> est rejetée, un test post-hoc a été appliqué afin de réaliser une comparaison multiple de moyennes. Le test de Tukey (HSD.test sous R, package *agricolae*) a été choisi, afin de savoir quelles étaient les modalités dont les moyennes étaient similaires (dont la p-value de la comparaison deux à deux est supérieure à 0,01), et celles dont les moyennes étaient différentes (dont la p-value de la comparaison deux à deux est inférieure à 0,01). Le test rassemble les modalités selon les lettres a, b ou c, selon qu'elles ont des moyennes significativement différentes ou non.

L'analyse multivariée consiste en l'application de la méthode SMA (Standardised Major Axis) qui permet d'estimer des relations allométriques, avec une approximation linéaire, sans prédire l'effet d'une variable sur l'autre (Warton *et al.*, 2006). Pour cela est utilisée la fonction *sma* sous R, issue du package *smatr*.

Deux hypothèses différentes sont testées :

H0 : les pentes sont communes

et si celles-ci sont communes, H0 : les intercepts sont communs, ou H0 : les shifts sont communs

Premièrement, la présence d'une pente commune aux trois modalités est testée grâce à la formule :  $\text{sma}(x \sim y * \text{modalité})$ . Si les pentes ne sont pas égales, un test de comparaison multiple est effectué avec  $\text{multcomp} = \text{TRUE}$ , afin de déterminer quelles sont les modalités dont les pentes sont différentes ou égales. Les modalités sont ensuite classées selon la valeur de leur pente, et regroupées selon que leur pente soit significativement différente l'une de l'autre ou non. Par exemple, si AC est du groupe a, et qu'AFR et AFIR sont du groupe b, cela signifie que AFR et AFIR ont une pente commune, mais que la pente d'AC est significativement plus forte.

Si les pentes sont égales, nous testons la différence d'intercept avec  $\text{sma}(x \sim y + \text{modalité}, \text{type} = \text{"elevation"}, \text{multcomp} = \text{TRUE})$ . Le même classement et les mêmes groupes sont définis, en prenant cette fois comme référence les valeurs d'intercept et non de pente. Enfin, les shifts sont testés avec  $\text{sma}(x \sim y + \text{modalité}, \text{type} = \text{"shift"}, \text{multcomp} = \text{TRUE})$ .

La valeur du seuil de significativité choisi est de 0,01, mais celle-ci doit parfois être ajustée. En effet, nous utilisons entre autres des tests de comparaison multiple, ce qui augmente le risque d'erreur de type I (rejeter à tort l'hypothèse) puisque nous multiplions les tests avec les mêmes données sur divers paramètres. Afin de limiter ce risque, il faut appliquer la correction de Bonferroni, qui ajuste la valeur du seuil de significativité en l'abaissant (Baccini, 2010). Ceci peut être fait automatiquement avec la fonction  $\text{multcompmethod} = \text{« adjusted »}$  de R (package *smatr*).

Nous avons également porté attention à la significativité de la pente obtenue par les analyses SMA. Pour cela a été pris en compte l'hypothèse « H0 : les variables sont corrélées » de l'analyse SMA, au même seuil de significativité de 0,01.

## 2. Collecte des données et détermination des variables d'étude

### 2.1 Hauteur de l'arbre et surface de section du tronc et des branches

Les premiers relevés de données effectués, réalisés début mars, ont concerné la croissance des pommiers durant la saison végétative passée. Plusieurs indicateurs ont été pris en compte : la hauteur de l'arbre, la surface de la section du tronc, le nombre de branches et la surface de section de ces branches.

La hauteur de l'arbre a été mesurée grâce à une perche télescopique. La mesure a été faite en prenant en compte la hauteur atteinte par la branche la plus haute, et non la hauteur de l'axe principal de l'arbre. La mesure a été faite sur 112 arbres.

La surface de la section du tronc se calcule à partir de la mesure du diamètre du tronc. Deux diamètres perpendiculaires l'un à l'autre ont été mesurés sur chacun des 112 arbres. En effet, le tronc n'étant pas forcément parfaitement cylindrique, une seule prise de mesure de diamètre ne serait pas représentative de la surface du tronc. Les diamètres ont été mesurés à chaque fois à 20cm au-dessus du porte-greffe. Ensuite, la formule suivante a été appliquée, afin de trouver la surface de la section :

$$\text{section} = \frac{\pi d_1 d_2}{4}$$

où  $d_1$  et  $d_2$  représentent les deux diamètres mesurés, en cm. La surface de la section est en  $\text{cm}^2$ .

Concernant les branches, un seul diamètre a été pris à chaque fois, en juin, sur 45 arbres. Le nombre de branche a été compté en ne prenant en compte que les ramifications partant du tronc principal et supérieures à 10 mm de diamètre. S'il y avait un doute entre plusieurs branches pour savoir laquelle était considérée comme le tronc principal, celle avec le diamètre le plus important était considérée comme tel.



Figure 9 : Dispositif de mesure de la hauteur (gauche) et du diamètre (droite) des pommiers en mars 2023 (source personnelle)

L'hypothèse de travail sur laquelle est basée l'analyse est la suivante : la modalité n'affecte pas la hauteur de l'arbre, mais a une influence sur sa surface de section. De plus, la somme des sections des branches latérales est plus importante sur la modalité agricole que sur les modalités agroforestières (Lauri *et al.*, 2022a).

L'analyse de données a également porté sur le nombre de branches et la somme de surface de section de branche par arbre, ainsi que sur l'AGR ou Absolute Growth Rate, qui désigne la croissance de l'arbre par unité de temps :

$$\text{AGR} = \text{section}_{2023} - \text{section}_{2022}$$

## 2.2 Séquences de formation des rameaux

Une séquence de formation désigne la succession de deux bourgeons selon leur nature, le premier l'année  $n$  et le second l'année  $n+1$ . Le bourgeon est désigné selon qu'il soit de nature florale (F) ou végétative (V). Les successions sont donc codées comme suit :

- FF : bourgeon floral en année  $n$  auquel a succédé un bourgeon floral en année  $n+1$ ,
- FV : bourgeon floral en année  $n$  auquel a succédé un bourgeon végétatif en année  $n+1$ ,
- VF : bourgeon végétatif en année  $n$  auquel a succédé un bourgeon floral en année  $n+1$ ,
- VV : bourgeon végétatif en année  $n$  auquel a succédé un autre bourgeon végétatif en année  $n+1$ .



Figure 10 : Exemple de séquence de formation FF (à gauche) et VV (à droite) (source personnelle)

La collecte des données consistait en la mesure de la taille du rameau développé pendant la saison végétative qui venait de s'achever (2022), selon la nature de son bourgeon 2022 et 2023. Elle s'est déroulée durant la première et la deuxième semaine d'avril, soit entre le stade E2 et le stade F selon la classification de Fleckinger (Fleckinger, 1964). Les mesures ont été effectuées sur 112 arbres. Idéalement, sur chaque arbre, 16 mesures ont été prises, en essayant au maximum de varier leur localisation : hauteur dans l'arbre, accès à lumière, proximité avec le tronc, orientation par rapport à la parcelle. Les 16 mesures étaient divisées en deux groupes : 8 mesures concernaient les rameaux présentant un bourgeon floral en 2022, 8 mesures concernaient les rameaux présentant un bourgeon végétatif en 2022. La première série de mesures (première semaine d'avril) concernait uniquement les rameaux qui présentaient un bourgeon floral en 2023, la deuxième (deuxième semaine d'avril) ceux qui présentaient un bourgeon végétatif en 2023. La mesure a été prise sans prendre en compte la bourse, et s'arrête aux écailles du bourgeon 2023.



Figure 11 : Mesure d'un rameau FF (à gauche) et VF (à droite) en avril 2023 à Restinclières (source personnelle)

L'hypothèse de travail sur laquelle est basée l'analyse est la suivante : il existe une relation entre la longueur d'un axe en année n et la nature du bourgeon apical en année n+1 (Lauri *et al.*, 2022b). Afin de tester cette hypothèse, des classes de longueur ont été définies, au sein desquelles le pourcentage de bourgeon de type F est calculé. En 2023, les classes sont de deux centimètres et la dernière classe rassemble les rameaux de plus de 16 centimètres. Pour les autres années, les classes sont de trois centimètres et la dernière classe rassemble les rameaux de plus de 27 centimètres. En effet, il a fallu adapter les classes en fonction du nombre de données disponibles et de la croissance des rameaux, qui n'est pas la même en fonction de l'âge de l'arbre. Il fallait également définir un nombre de données en-dessous duquel les pourcentages n'étaient plus assez fiables. Il a été choisi d'enlever les classes de longueur pour lesquelles le nombre de succession FF ou FV (ou VF/VV) était strictement inférieur à 6, ou que l'une des successions ne présentait aucune valeur. Cela explique que sur certaines années, les

analyses sur la séquence de formation présentant un bourgeon végétatif en année n n'aient pas été faites, car les données n'étaient pas assez nombreuses.

Les analyses ne portent que sur les successions FF et VF, car les analyses des successions FV et VV leur sont complémentaires puisque basées sur les mêmes données.

### 2.3 Indicateurs de la floraison

La collecte des données de floraison s'est déroulée en deux temps entre le 11 et le 18 avril 2023, au stade F à F2 du pommier selon la classification de Fleckinger. La première partie de la collecte de données a consisté au comptage des inflorescences présentes sur les 45 arbres sélectionnés dans la parcelle. Un premier comptage a concerné uniquement les inflorescences terminales, suivi d'un comptage complémentaire pour les inflorescences latérales, peu nombreuses. La deuxième partie de la collecte a concerné le comptage des bourgeons végétatifs des bourgeons végétatifs, uniquement en position terminale cette fois-ci, sur les mêmes 45 arbres.

Trois indicateurs ont été pris en compte :

- Nombre d'inflorescences
- Taux de floraison = 
$$\frac{\text{nombre d'inflorescences}}{\text{nombre d'inflorescences} + \text{nombre de rameaux végétatifs}}$$
- Charge florale = 
$$\frac{\text{nombre d'inflorescences}}{\text{surface de section en cm}^2}$$

L'objectif étant de tester les hypothèses de travail suivantes : la charge florale et le taux de floraison sont constants selon les modalités (Lauri *et al.*, 2022a).

Le nombre d'inflorescences comprend à chaque fois les inflorescences terminales et latérales (comme réalisés les années précédentes), le nombre de rameaux végétatifs comprend uniquement les terminaux. Les rameaux végétatifs latéraux étant très peu nombreux, il a été considéré que prendre en compte uniquement les terminaux ne changeraient pas les analyses de manière significative.

L'analyse univariée a été réalisée sur toutes les variables indiquées, l'analyse SMA uniquement sur la charge florale.

### 2.4 Taux de nouaison

Le taux de nouaison correspond au nombre d'inflorescences ayant noué par rapport au nombre d'inflorescences comptabilisées en avril. Le comptage des inflorescences ayant noué a été réalisé début juin, soit entre le stade I et J de la classification de Fleckinger, sur les mêmes 45 arbres. Le comptage ne prend pas en compte le nombre de fruits, mais le nombre d'inflorescences ayant donné au moins un fruit. Une analyse univariée puis une analyse SMA ont été réalisées.

## 2.5 Suivi de la croissance des pommes

Un suivi de la croissance des pommes a été réalisé de mi-juin à fin août. Pour cela, quatre pommes par arbre ont été choisies et identifiées, et ce sur les 45 arbres sélectionnés. Les pommes ont été choisies de manière à être facilement accessibles pour effectuer les mesures, soit à hauteur d'épaules environ et à l'extérieur de la canopée, toujours sur la face sud de l'arbre. Les mesures ont été effectuées trois fois par semaine pendant les deux premières semaines, puis deux fois par semaine jusqu'au 18 août, en veillant à respecter un maximum de trois jours plein entre deux mesures. Le diamètre transversal de la pomme est mesuré grâce à un pied à coulisse. Une seule mesure est prise par pomme à chaque passage.



Figure 12 : Mesure du diamètre d'une pomme au pied à coulisse (source personnelle)

## 2.6 Nuisibilité du puceron cendré et du carpocapse

La méthode d'analyse de la nuisibilité des pucerons cendrés s'est faite par le protocole Quantipest (Simon, [sans date]), sur les conseils du CTIFL de Balandran. Chaque arbre est observé afin de déterminer, de manière visuelle, quel est le taux d'infestation du pommier. Différentes classes sont ensuite définies en fonction du nombre de rameaux de l'arbre touchés par les symptômes d'infestation propres au puceron cendré :

- Classe 0 : arbre non touché
- Classe 1 : impact compris entre 1 et 10%
- Classe 2 : impact compris entre 10 et 25%
- Classe 3 : impact compris entre 25 et 50%
- Classe 4 : impact supérieur à 50%

Cette observation des symptômes du puceron cendré a été réalisée mi-juin, au moment où les pucerons de la première génération avaient déjà gagné leur hôte secondaire et n'étaient plus présents sur les arbres.

Pour l'analyse de données un modèle de régression de Poisson a été utilisé, puis une ANOVA de type III suivie d'un test post-hoc de Tukey.

Concernant le carpocapse, l'étude des symptômes de la nuisibilité a consisté en la sélection de 20 fruits au hasard sur l'arbre, de toutes hauteurs et de toutes expositions, sur les 45 arbres identifiés. Ensuite, le nombre de pommes atteintes par une piqûre de carpocapse parmi ces 20 fruits est relevé. La même analyse statistique est réalisée.

# RÉSULTATS

## I. Effets de l'agroforesterie sur les différentes composantes du rendement

### 1. Hauteur de l'arbre et surface de section du tronc et des branches

#### 1.1. Analyse univariée de la hauteur de l'arbre et de la surface de section du tronc et des branches

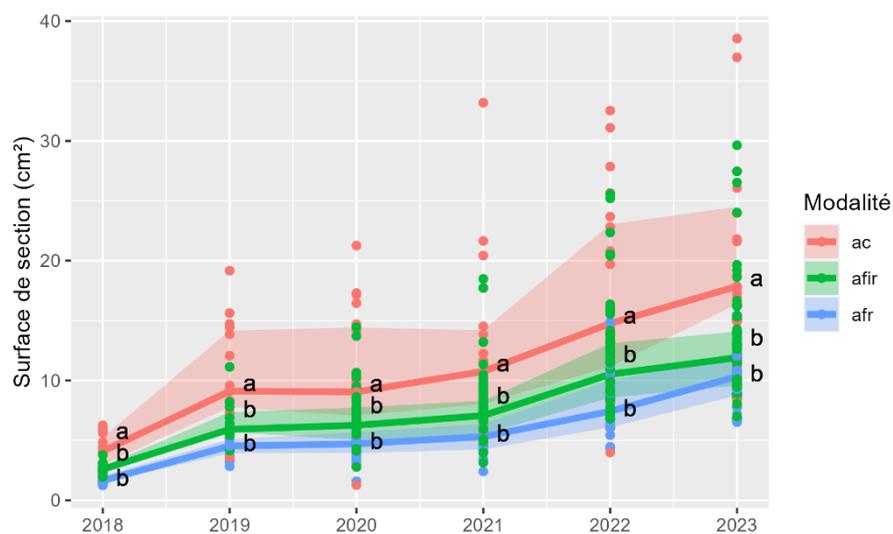


Figure 13 : Évolution de la surface de section de tronc des pommiers, sur les trois modalités entre 2018 et 2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

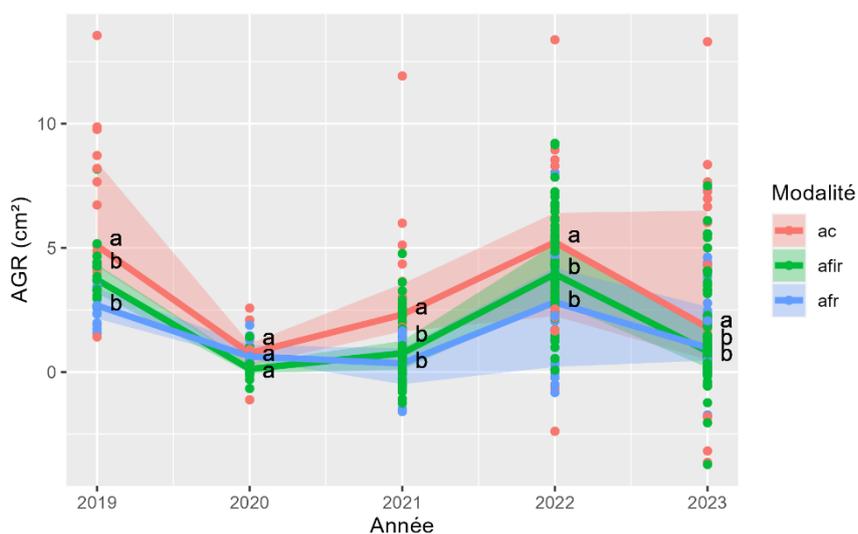


Figure 14 : Évolution de l'AGR (Absolute Growth Rate = surface de section en année « n+1 » – surface de section en année « n ») de la section du tronc sur les trois modalités entre 2018-2019 et 2022-2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

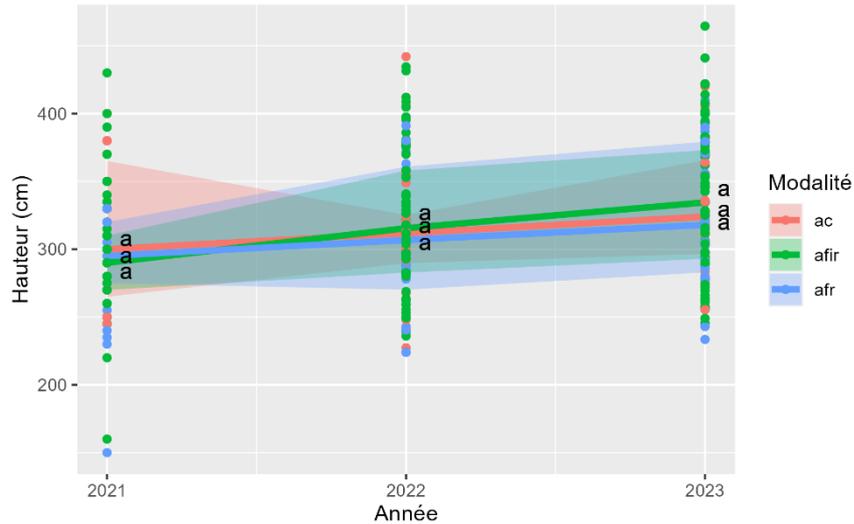


Figure 15 : Évolution de la hauteur des pommiers, sur les trois modalités entre 2021 et 2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

La surface de section croît de manière régulière sur les six années étudiées, avec la modalité AC toujours au-dessus des modalités agroforestières, et AFIR au-dessus de AFR, mais sans différence significative. AC présente également un intervalle interquartile plus important. L'AGR semble suivre également cette tendance avec en revanche une moins grande distinction entre les modalités, notamment pour l'année 2020. Contrairement à la surface de section, l'analyse des hauteurs montre des moyennes similaires pour les trois modalités, et ce pour les trois années étudiées.

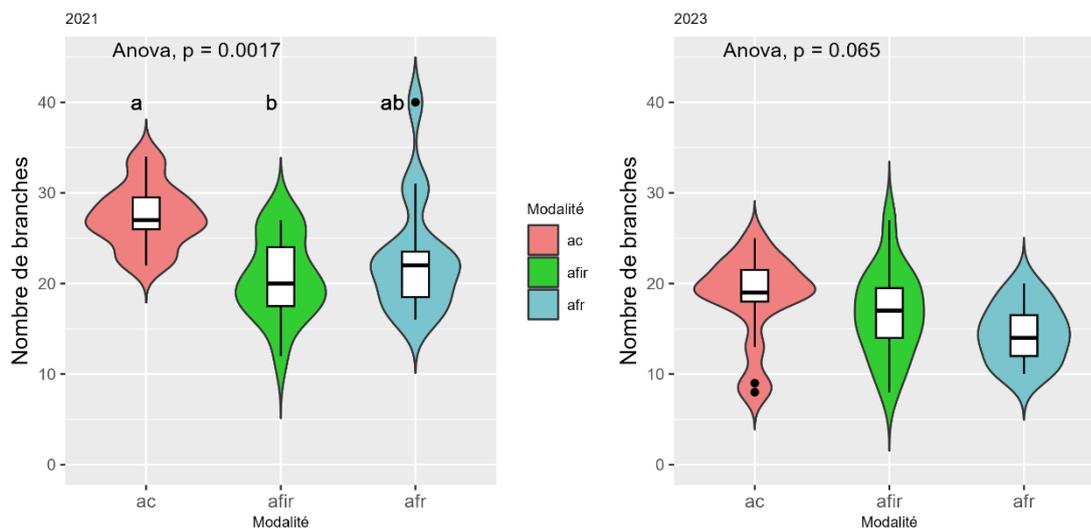


Figure 16 : Nombre de branches par arbre en 2021 et 2023. La largeur est proportionnelle au nombre d'arbre. Les box-plots montrent pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a et b indiquent les modalités similaires ou différentes, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

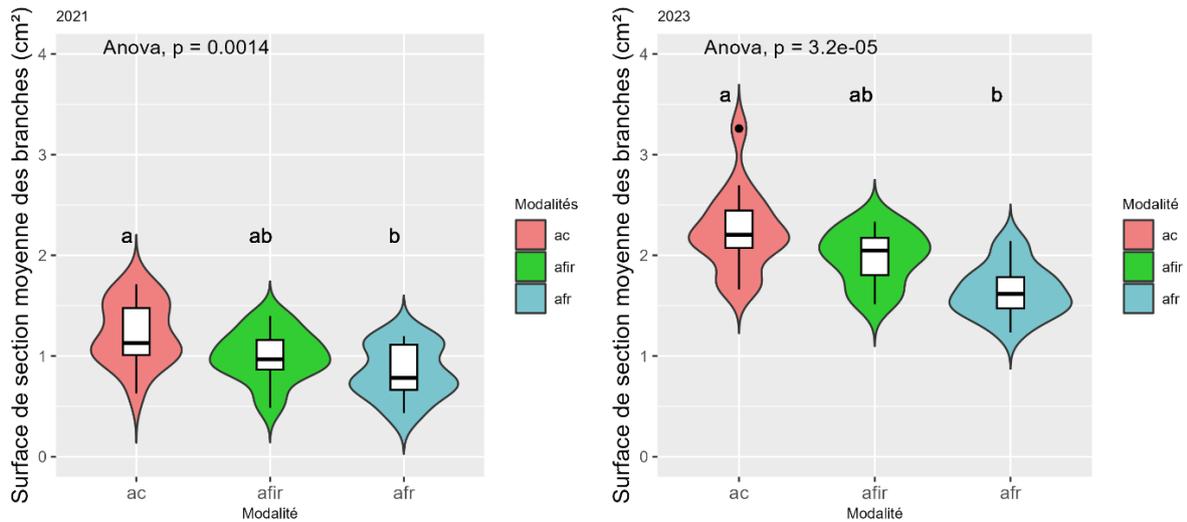


Figure 17 : Surface de section moyenne des branches en 2021 et 2023. La largeur est proportionnelle au nombre d'arbre. Les box-plots montrent pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a et b indiquent les modalités similaires ou différentes, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

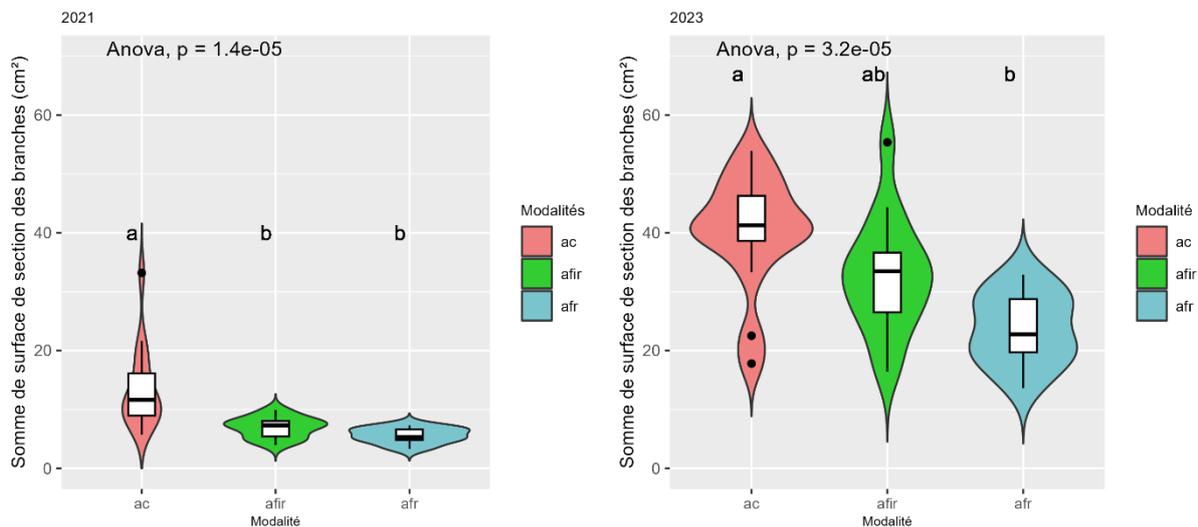


Figure 18 : Somme de la surface de section des branches en 2021 et 2023. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres. Les box-plots montrent pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a et b indiquent les modalités similaires ou différentes, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

AC présente significativement plus de branches qu'AFIR en 2021, et AFR est semblable aux deux modalités. Le nombre de branches en 2023 est égal pour toutes les modalités, et est inférieur au nombre de branches en 2021, probablement dû à l'élagage des branches gênantes ou abîmées. Les surfaces de section moyennes des branches sur AC sont supérieures aux deux autres modalités pour les deux années, et significativement différentes d'AFR. AFIR se situe entre les deux modalités. Entre 2021 et 2023, les surfaces de section ont augmenté pour les trois modalités. La somme de surface de section est également plus haute pour AC que pour les modalités agroforestières. Cela est concordant avec le fait qu'AC présente plus de branches et de sections plus importantes. AFIR se distingue d'AC en 2021, mais plus en 2023.

## 1.2. Analyse SMA de la surface de section du tronc par rapport à la hauteur de l'arbre

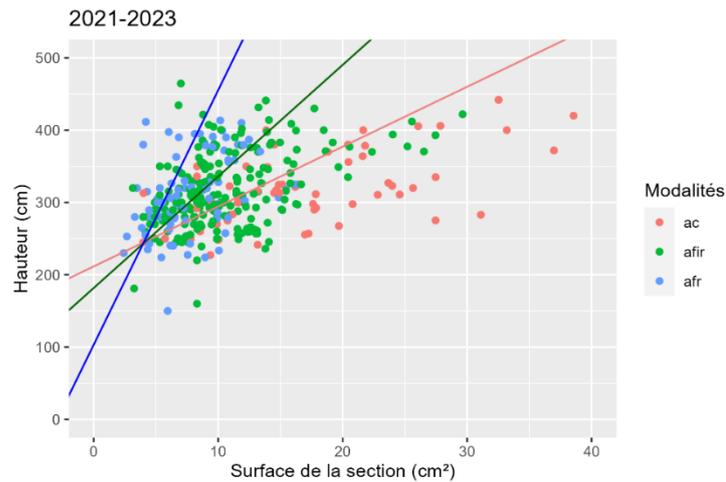


Figure 19 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la hauteur par rapport à la section sur les années 2021 à 2023 confondues. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{hauteur} \sim \text{section} * \text{modalité})$ .

Tableau 2 : Résultats de l'analyse SMA sur la hauteur par rapport à la section pour les années 2021 à 2023 confondues. Le seuil de significativité est 0,01. Les valeurs de pentes sont prises avec l'analyse SMA :  $sma(\text{hauteur} \sim \text{section} * \text{modalité})$ . Les groupes désignent les modalités dont les pentes peuvent être qualifiées de semblables (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 2 pour les résultats détaillés)

Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+
	Significative ?	Oui	Oui	Oui
	Égales ou différentes ?	Différentes		
Groupes statistiques et classement par rapport à la pente		AFR : a AFIR : b AC : c		

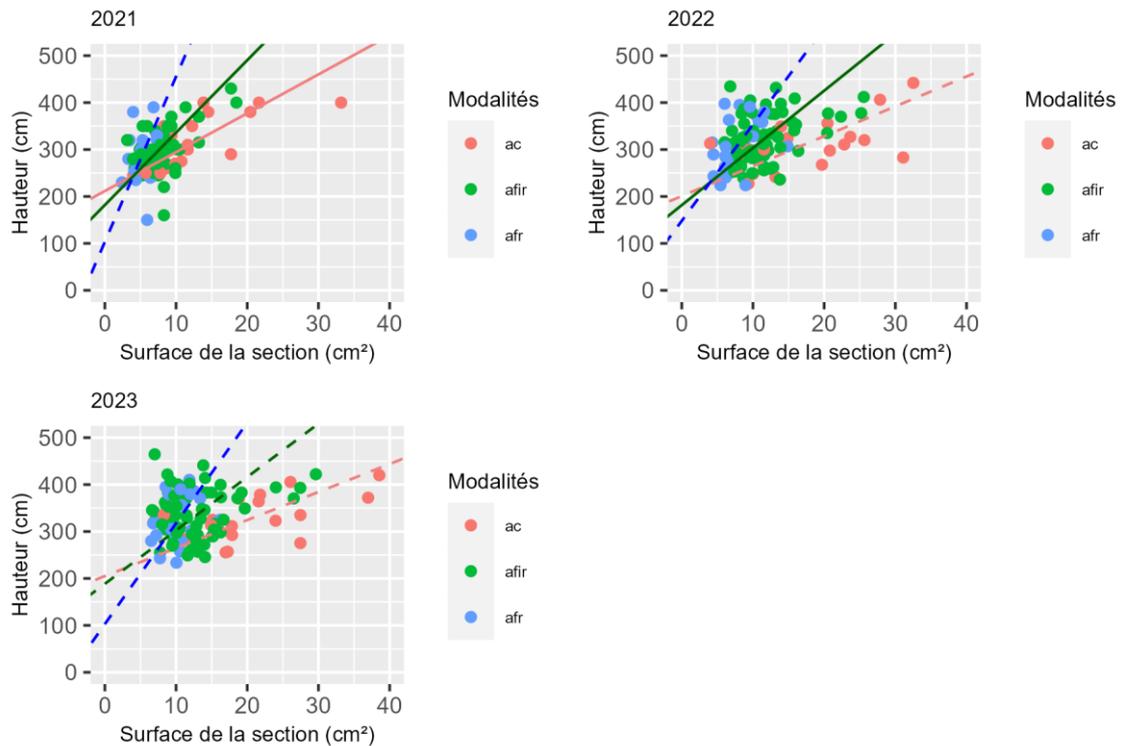


Figure 20 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la hauteur par rapport à la section pour chaque année de 2021 à 2023. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{hauteur} \sim \text{section} * \text{modalité})$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 3 : Résultats de l'analyse SMA sur la hauteur par rapport à la section pour les années 2021 à 2023. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{hauteur} \sim \text{section} * \text{modalité})$ . Les groupes désignent les modalités dont la pente peut être qualifiée de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 2 pour les résultats détaillés).

Année		2021			2022			2023		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Significative ?	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
	Égales ou différentes ?	Différentes			Différentes			Différentes		
	Groupes statistiques et classement par rapport à la pente	AFR : a AFIR : a AC : b			AFR : a AFIR : a AC : b			AFR : a AFIR : b AC : c		

Il existe une relation positive entre la surface de section et la hauteur de l'arbre pour les trois modalités, même si la non-significativité d'un certain nombre de pentes doit nuancer cette interprétation. Les modalités agroforestières présentent des pentes plus élevées, avec AFR au-dessus de AFIR, traduisant donc un profil plus effilé des arbres agroforestiers par rapport aux arbres témoins et probablement mécaniquement plus fragiles. Les coefficients de pente diminuent au fur et à mesure des années : AC par exemple a une valeur de pente d'environ 8,28 en 2021, 6,37 en 2022 et 5,97 en 2023 (Annexe 2), et la tendance est la même pour AFIR. AFR lui diminue entre 2021 et 2022, et stagne en 2023. De plus, les pentes ne sont pas égales entre les modalités : AC se démarque de AFIR et AFR, sauf en 2023 où les trois modalités se séparent.

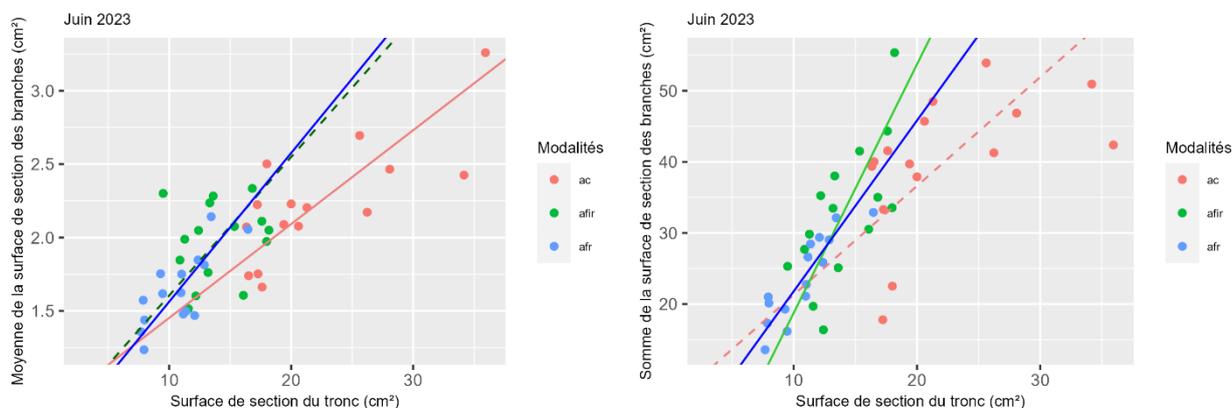


Figure 21 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la moyenne de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc en juin 2023 (gauche), et de la somme de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc en juin 2023 (droite). L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{moyenne de surface de section des branches} \sim \text{surface de section du tronc} * \text{modalité})$  et  $sma(\text{somme de surface de section des branches} \sim \text{surface de section du tronc} * \text{modalité})$ .

		Moyenne de la surface de section des branches			Somme de la surface de section des branches		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+	+	+	+
	Significative ?	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui
	Égales ou différentes ?	Égales			Égales		
Intercepts égaux ou différents ?		Égales			Égales		
Shifts	Égales ou différents ?	Différents			Différents		
	Groupe statistique	AC : a AFIR : b AFR : c			AC : a AFIR : b AFR : c		

Tableau 4 : Résultats de l'analyse SMA sur la moyenne et la somme de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique  $sma(\text{moyenne de surface de section des branches} \sim \text{surface de section du tronc} * \text{modalité})$  et  $sma(\text{somme de surface de section des branches} \sim \text{surface de section du tronc} * \text{modalité})$ , les tests d'égalité des intercepts et des shifts sont issus de l'analyse spécifique (type = « elevation » ou type = « shift »). Les groupes désignent les modalités dont la pente peut être qualifiée de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple.

Il existe une relation positive entre la moyenne de surface de section des branches et la surface de section du tronc, et entre la somme de surface de section des branches et la surface de section du tronc. AFR et AFIR se situent au-dessus d'AC, mais les pentes et les intercepts sont égaux, indiquant l'absence de différence de croissance entre les modalités. En revanche, les shifts sont différents : AC présente en moyenne des branches plus épaisses, et une somme de surface de branche plus importante.

## 2. Séquences de formation des rameaux

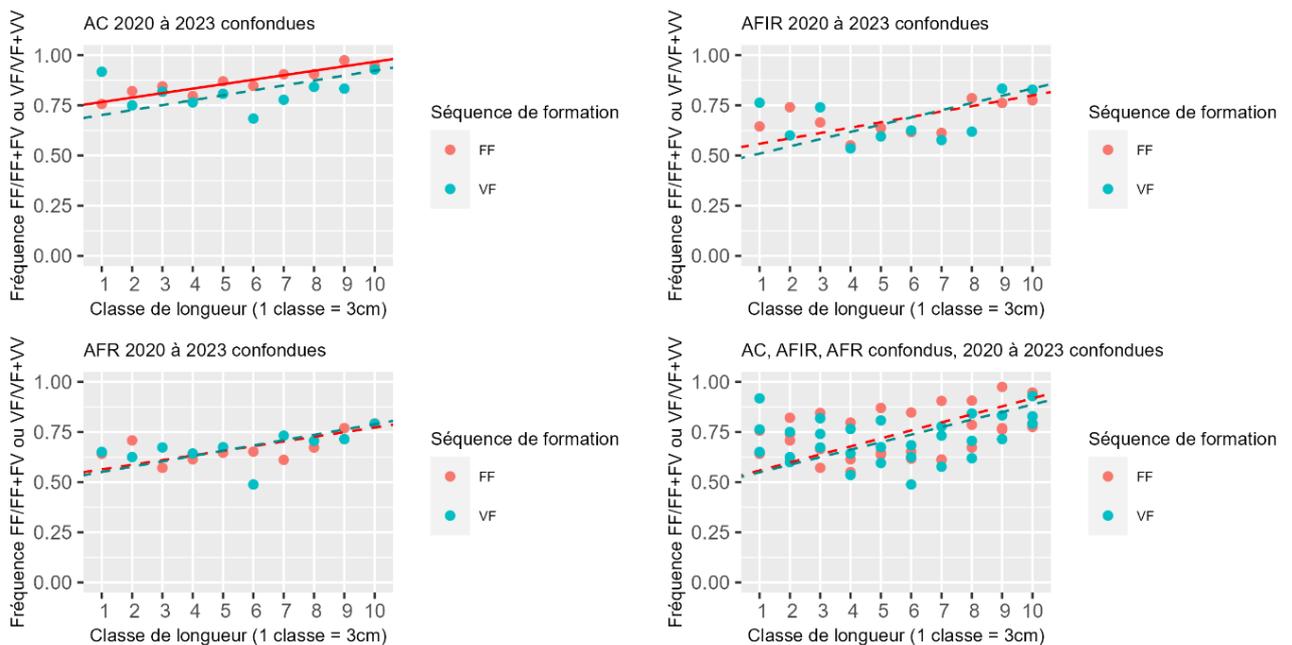


Figure 22 : Représentation graphique de l'analyse SMA des séquences de formation des années 2019-2020 à 2022-2023 confondues. FF : bourgeon floral en année  $n$ , floral en année  $n+1$  ; VF : végétatif en  $n$ , floral en  $n+1$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse SMA sur les séquences de formation pour les années 2019-2020 à 2022-2023 confondues. FF : bourgeon floral en année n, floral en année n+1 ; FV : floral en n, végétatif en n+1 ; VF : végétatif en n, floral en n+1 ; VV : végétatif en n, végétatif en n+. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique : sma(fréquence ~ classe \* filiation). Les tests d'égalité des intercepts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts : sma(fréquence ~ classe + filiation, type="elevation"). Les groupes désignent les modalités dont l'intercept peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 3.1 pour les résultats détaillés).

Modalité		AC		AFIR		AFR		Toutes modalités confondues	
Séquence de formation		FF	VF	FF	VF	FF	VF	FF	VF
Pente	Signe	+	+	+	+	+	+	+	+
	Significative ?	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	Égales ou différentes ?	Egales		Egales		Egales		Egales	
Intercepts égaux ou différents ?		Égaux		Égaux		Égaux		Égaux	

Les pentes sont égales pour les successions FF et VF, et ce pour les trois modalités, de même pour les intercepts.

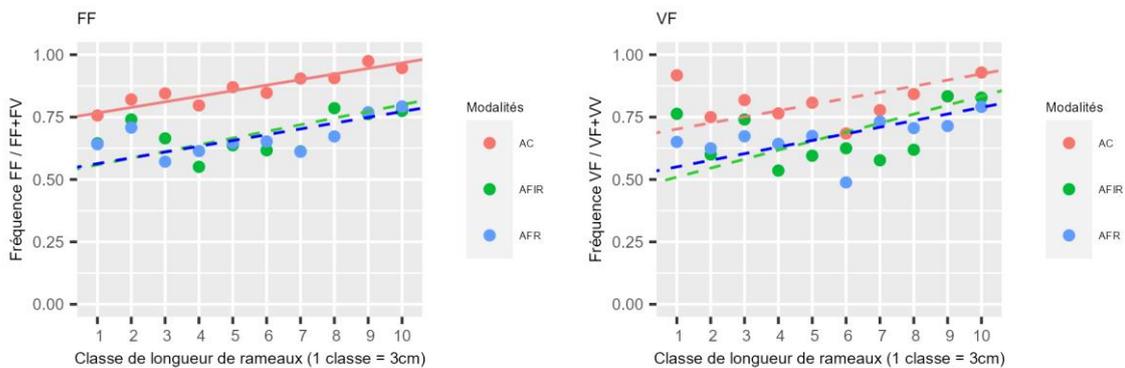
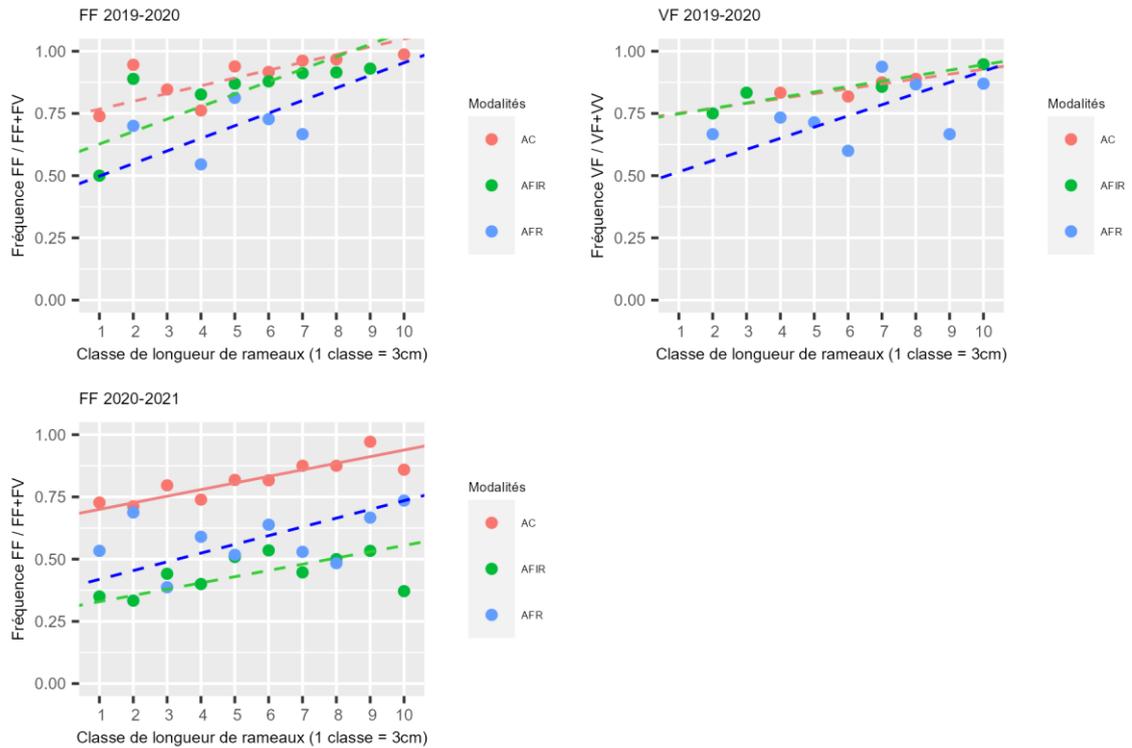


Figure 23 : Représentation graphique de l'analyse SMA des séquences de formation sur les années 2019-2020 à 2022-2023 confondues. FF : bourgeon floral en année n, floral en année n+1 ; VF : végétatif en n, floral en n+1. Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 6 : Résultats de l'analyse SMA les séquences de formation pour les années 2019-2020 à 2022-2023 confondues. FF : bourgeon floral en année n, floral en année n+1 ; VF : végétatif en n, floral en n+1. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique : sma(fréquence ~ classe \* succession). Les tests d'égalité des intercepts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts : sma(fréquence ~ classe + succession, type="elevation"). Les groupes désignent les modalités dont l'intercept peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 3.2 pour les résultats détaillés).

Modalité		FF			VF		
Pente		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Signe		+	+	+	+	+	+
Significative ?		Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Égales ou différentes ?		Égales			Égales		
Intercepts égaux ou différents ?		Différents			Différents		
Groupes statistiques et classement par rapport à l'intercept		AC : a AFIR : b AFR : b			AC : a AFIR : ab AFR : b		

Quand toutes les années sont confondues, il existe une relation positive entre la longueur du rameau et la fréquence de floraison terminale en année n+1. Cette relation est commune pour les trois modalités puisque les pentes sont égales, et ce, que le bourgeon en année n soit végétatif ou floral. Mais après analyse de la significativité des pentes, il ressort que celles-ci ne sont pas significatives, on ne peut donc pas conclure sur la relation entre la longueur du rameau et la fréquence de floraison terminale. Les intercepts des modalités agroforestières sont significativement différents du témoin agricole pour la succession VF, AFIR se situe entre AC et AFR pour la succession VF.



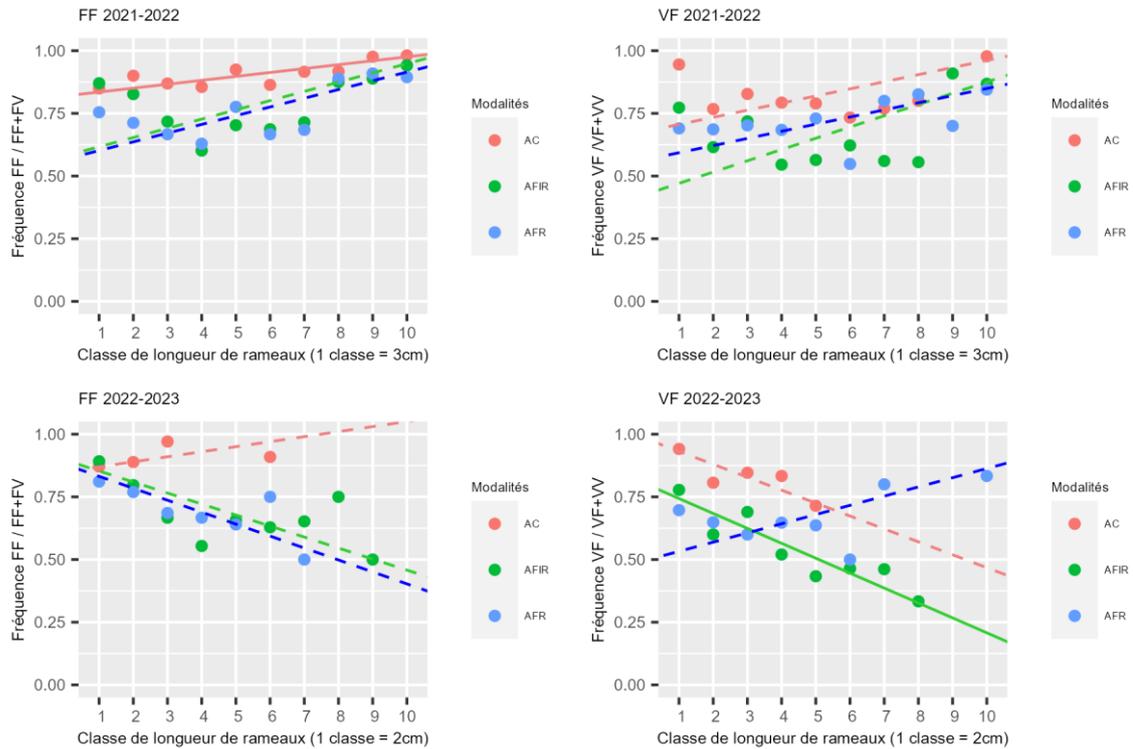


Figure 24 : Représentation graphique de l'analyse SMA sur les séquences de formation pour chaque année de 2019-2020 à 2022-2023. FF : bourgeon floral en année  $n$ , floral en année  $n+1$  ; VF : végétatif en  $n$ , floral en  $n+1$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret. NB : données insuffisantes pour les séquences VF en 2020-2021.

Tableau 7 : Résultats de l'analyse SMA sur les fréquences de séquences de formation sur les années 2019-2020 à 2022-2023. FF : bourgeon floral en année  $n$ , floral en année  $n+1$  ; VF : végétatif en  $n$ , floral en  $n+1$ . Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{fréquence} \sim \text{classe} * \text{filiation})$ . Les tests d'égalité des intercepts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts :  $sma(\text{fréquence} \sim \text{classe} + \text{filiation}, \text{type} = \text{"elevation"})$ . Les groupes désignent les modalités dont l'intercept peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 3.2 pour les résultats détaillés).

Années		2019-2020		2020-2021	2021-2022		2022-2023	
Séquence de formation		FF	VF	FF	FF	VF	FF	VF
Pente	Signe	AC : + AFIR : + AFR : +	AC : + AFIR : - AFR : -	AC : - AFIR : - AFR : +				
	Significative ?	AC : Non AFIR : Non AFR : Non	AC : Non AFIR : Non AFR : Non	AC : Oui AFIR : Non AFR : Non	AC : Non AFIR : Oui AFR : Non			
	Egales ou différentes ?	Égales						
Intercepts égaux ou différents ?		Égaux	Égaux	Différents	Différents	Différents	Égaux	Différents
Groupes statistiques et classement par rapport à l'intercept				AC : a AFR : b AFIR : c	AC : a AFIR : b AFR : b	AC : a AFIR : b AFR : b		AC : a AFR : ab AFIR : b

En s'intéressant aux résultats année par année, une relation positive entre longueur d'axe et fréquence de floraison terminale est mise en évidence (les pentes sont globalement positives). En revanche, les coefficients diminuent au fur et à mesure des années : AC par exemple passe d'une valeur de pente de 0,031 en 2019-2020 à 0,020 en 2022-2023 (Annexe 3.2). Mais l'analyse montre que les

pentés ne sont pas significatives pour la plupart des séquences de formation et des années, il est donc impossible de conclure sur ces observations.

Les pentés sont communes pour les trois modalités, mais les intercepts sont différents pour les années 2020-2021, 2021-2022 et 2022-2023 en FF. AC se distingue de AFIR et AFR en 2021-2022, et AC et AFIR sont différents en 2022-2023, avec AFR similaire aux deux autres modalités.

### 3. Indicateurs de la floraison

#### 3.1. Analyse univariée sur les indicateurs de la floraison : nombre d'inflorescences, charge florale, taux de floraison

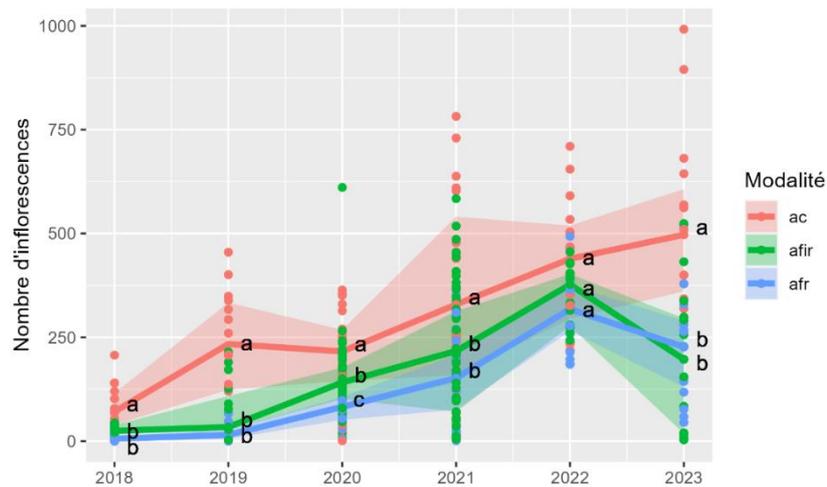


Figure 25 : Évolution du nombre d'inflorescences sur les trois modalités entre 2018 et 2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

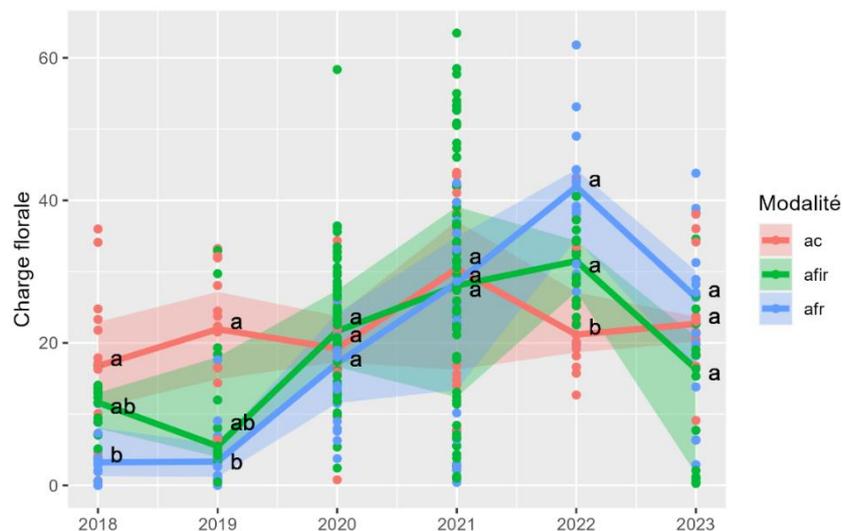


Figure 26 : Évolution de la charge florale (nombre d'inflorescences par  $\text{cm}^2$  de section du tronc) sur les trois modalités entre 2018 et 2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

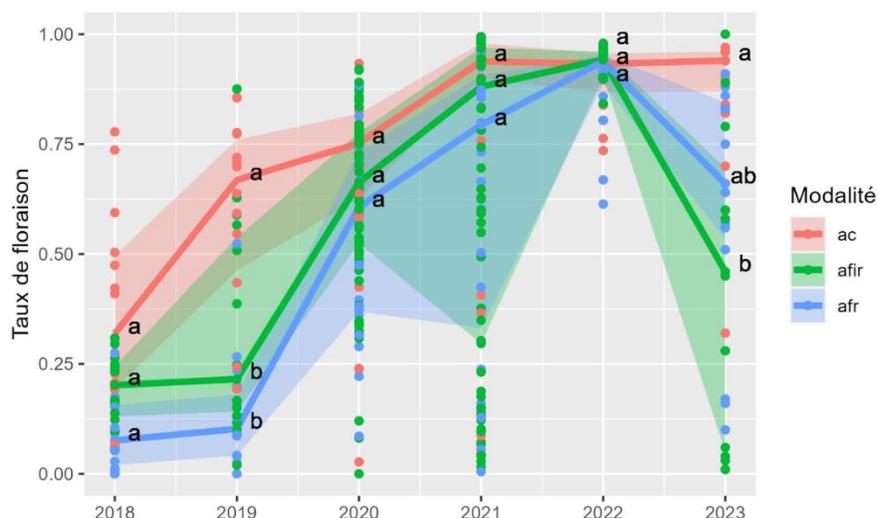


Figure 27 : Évolution du taux de floraison (nombre de bourgeons floraux sur le total de bourgeons floraux et végétatifs) sur les trois modalités entre 2018 et 2023. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. Les lettres indiquent les modalités significativement semblables ou différentes après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

Le nombre d'inflorescences est toujours supérieur pour AC, modéré pour AFIR et bas pour AFR, sauf en 2023. Pour toutes les années sauf 2020 et 2022, AC est significativement différente des modalités agroforestières. Concernant la charge florale, l'influence de la modalité est plus floue : AC a une charge florale plus forte quand les arbres sont plus jeunes, puis cette charge florale redescend au fur et à mesure que les arbres vieillissent, où les trois modalités s'équilibrent. Le taux de floraison quant à lui est globalement plus fort pour AC, puis pour AFIR, et moins fort pour AFR, mais les modalités ne sont pas significativement différentes pour la plupart des années, sauf les en 2019 où AC se distingue d'AFIR et AFR, et en 2023 où AC se distingue d'AFR mais pas d'AFIR.

### 3.2 Analyse SMA sur la charge florale

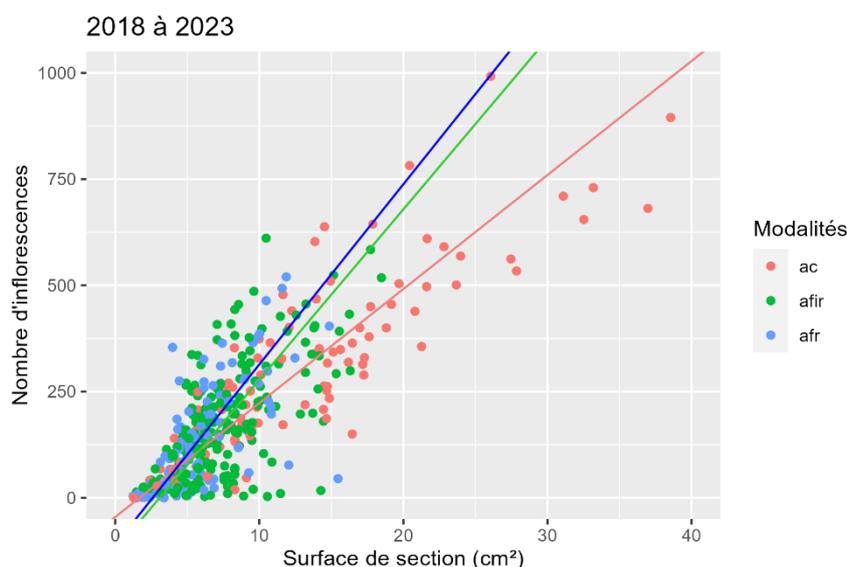


Figure 28 : Analyse SMA de la charge florale sur les années 2018 à 2023 confondues. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{section} * \text{modalité})$ .

Tableau 8 : Résultats du SMA sur la charge florale pour les années 2018 à 2023 confondues. Le seuil de significativité est 0,01. Les valeurs de pentes sont prises avec l'analyse SMA :  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{section} * \text{modalité})$ . La probabilité que les pentes soient égales correspond à la p-value de ce test. Les groupes désignent les modalités dont la pente peut être qualifiée de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 4 pour les résultats détaillés).

Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+
	Significative ?	Oui	Oui	Oui
	Égales ou différentes ?	Différentes		
Groupes statistiques et classement par rapport à la pente		AFR : a AFIR : a AC : b		

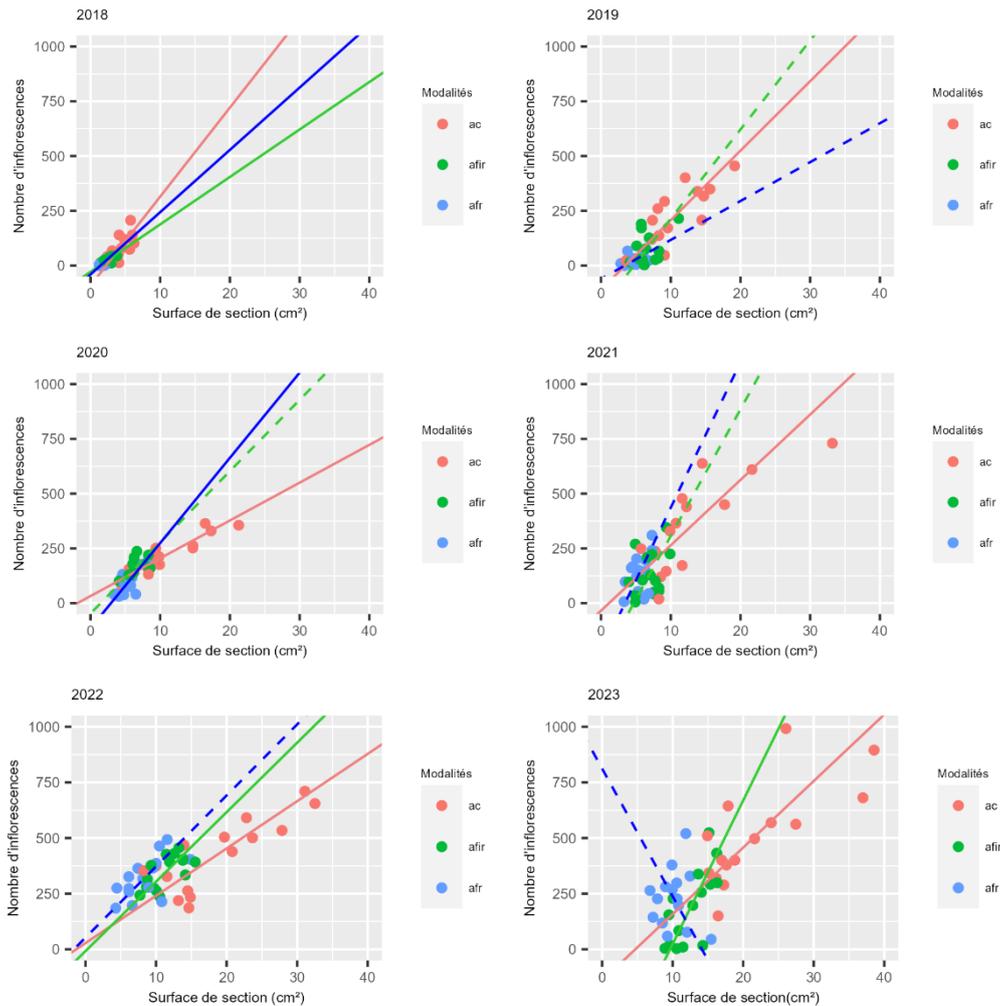


Figure 29 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la charge florale pour chaque année de 2018 à 2023. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{section} * \text{modalité})$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 9 : Résultats de l'analyse SMA sur la charge florale pour les années 2018 à 2023. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{surface de section} * \text{modalité})$ . Les tests d'égalité des intercepts et des shifts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts :  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{surface de section} + \text{modalité}, \text{type} = \text{"elevation"})$  ou  $\text{type} = \text{"shift"}$ . Les groupes désignent les modalités dont l'intercept ou le shift peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 4 pour les résultats détaillés).

Année		2018	2019	2020	2021	2022	2023
Pente	Signe	AC : + AFIR : + AFR : +	AC : + AFIR : + AFR : -				
	Significative ?	AC : Oui AFIR : Non AFR : Oui	AC : Oui AFIR : Non AFR : Non	AC : Oui AFIR : Non AFR : Oui	AC : Oui AFIR : Non AFR : Non	AC : Oui AFIR : Oui AFR : Non	AC : Oui AFIR : Oui AFR : Non
	Égales ou différentes ?	Égales	Égales	Différentes	Égales	Égales	Égales
	Groupe statistique			AC : a AFIR : ab AFR : b			
Intercept	Egax ou différents ?	Égax	Égax		Égax	Différents	Égax
	Groupe statistique					AFIR : a AFR : ab AC : b	
Shift	Egax ou différents ?	Différents	Différents		Différents	Différents	Différents
	Groupe statistique	AC : a AFIR : b AFR : c	AC : a AFIR : b AFR : c		AC : a AFIR : b AFR : b	AC : a AFIR : ab AFR : b	AC : a AFIR : b AFR : b

L'analyse met en évidence une relation positive entre le nombre d'inflorescences et la surface de section du tronc, et ce sur les trois modalités – certaines pentes sont néanmoins non significatives. L'analyse toutes années confondues montre une différence de pente entre la modalité agricole témoin et les modalités agroforestières.

Mais l'analyse année par année révèle des pentes et des intercepts égaux sauf en 2020 où AC et AFR sont différents, et AFIR similaire aux deux. Pour les autres années, la différence se situe au niveau des shifts : AFR est toujours différent d'AC, et similaire à AFIR en 2021, 2022 et 2023. AFIR est différent d'AC en 2018 et en 2019.

## 4. Indicateurs de la nouaison

### 4.1. Analyse univariée sur le nombre d'inflorescences ayant noué

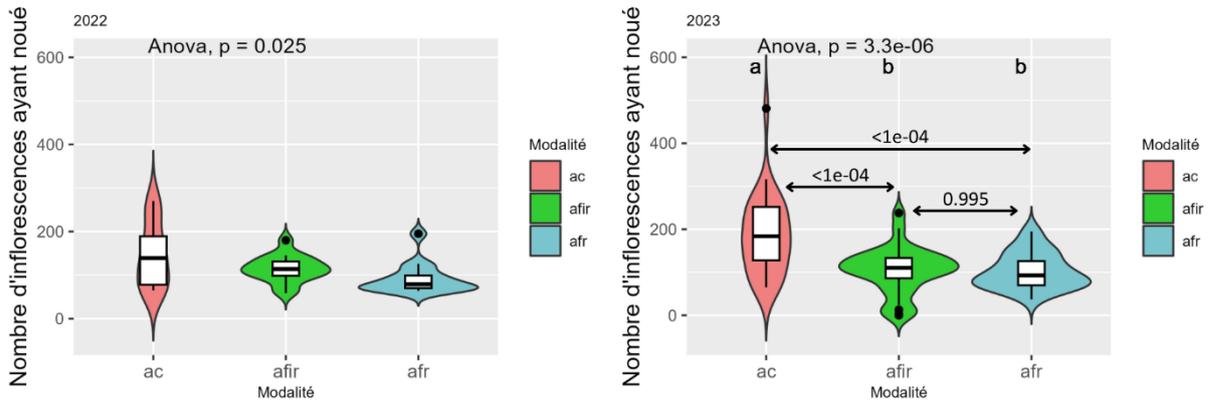


Figure 30 : Nombre d'inflorescences ayant noué pour les années 2022 et 2023. Une inflorescence ayant donné plusieurs fruits compte pour une inflorescence ayant noué. La largeur est proportionnelle au nombre d'arbres. Les box-plots montrent pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a et b indiquent les modalités similaires ou différentes, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

Le nombre d'inflorescences ayant noué augmente peu entre 2022 et 2023 (les valeurs médianes en 2022 pour AC, AFIR et AFR sont respectivement 139, 114 et 79, et en 2023 ce sont 184, 110 et 93). En 2022, la différence entre les modalités n'est pas significative. En revanche, AC se distingue des modalités agroforestières en 2023.

### 4.2. Analyse univariée sur le taux de nouaison

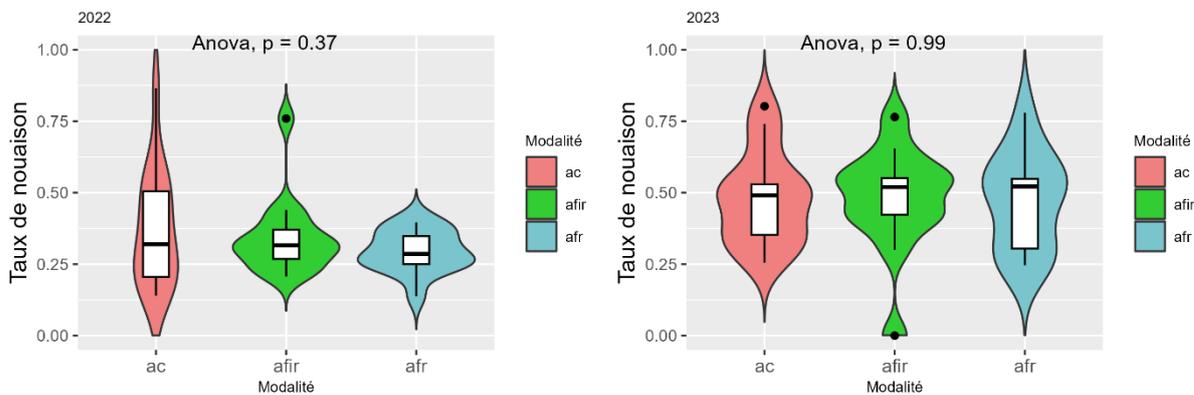


Figure 31 : Taux de nouaison (nombre d'inflorescences ayant noué par rapport au nombre d'inflorescences) pour les années 2022 et 2023. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres au taux de nouaison. Les box-plots montrent, pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. L'ANOVA de type III ne montre pas de différence significative entre les modalités au seuil de significativité de 0,01.

Aucune différence significative de moyenne n'est constatée entre les différentes modalités. Il est néanmoins observable qu'en 2022 sur AC, la variabilité est nettement plus importante que sur les autres modalités. C'est le cas pour AFR en 2023.

### 4.3. Analyse SMA sur le nombre d'inflorescences par rapport au nombre d'inflorescences ayant noué

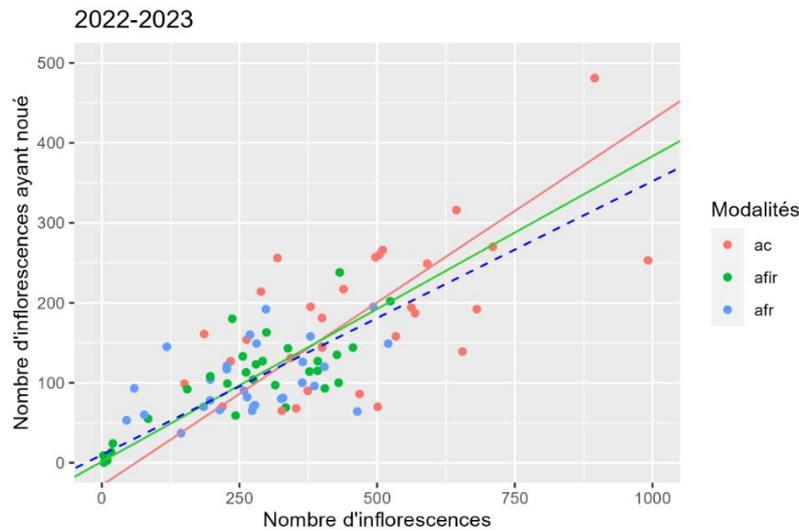


Figure 32 : Représentation graphique de l'analyse SMA sur le taux de nouaison sur les années 2022 et 2023 confondues. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} * \text{modalité})$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 10 : Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison pour les années 2022 et 2023 confondues. Le seuil de significativité est 0,01. Les valeurs de pentes sont prises avec l'analyse SMA :  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} * \text{modalité})$ . Les groupes désignent les modalités dont la pente peut être qualifiée de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 5 pour les résultats détaillés).

Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+
	Significative ?	Oui	Oui	Non
	Égales ou différentes ?	Égales		
Intercept égaux ou différents ?		Égaux		
Shift	Égaux ou différents ?	Différents		
	Groupes statistiques	a	b	b

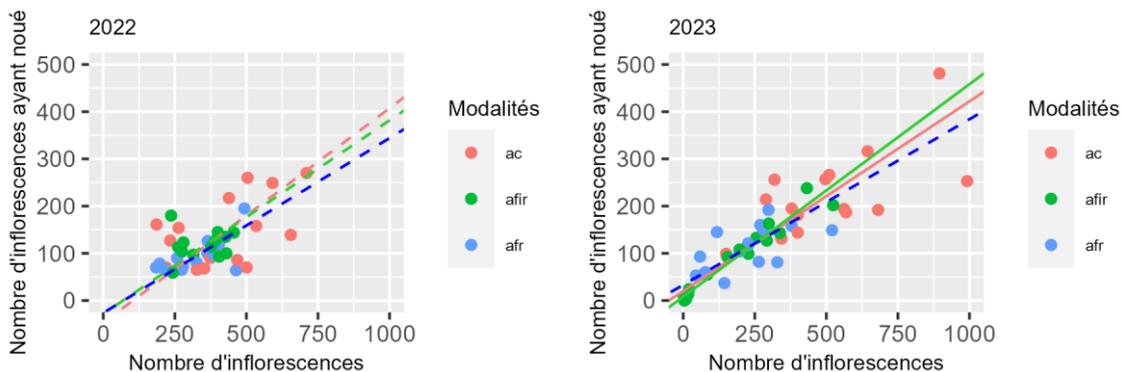


Figure 33 : Résultats graphiques de l'analyse SMA sur le taux de nouaison en 2022 et 2023. L'analyse se fait avec la formule  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} * \text{modalité})$ . Les pentes non significatives sont marquées par des lignes en tiret.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison en 2022 et 2023. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} * \text{modalité})$ . Les tests d'égalité des intercepts et des shifts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts :  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} + \text{modalité, type = "elevation"})$  ou  $\text{type = "shift"}$ . Les groupes désignent les modalités dont l'intercept ou le shift peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple (voir Annexe 5 pour les résultats détaillés).

Année		2022			2023		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Signe	+	+	+	+	+	+
	Significative ?	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
	Égales ou différentes ?	Égales			Égales		
Intercepts égaux ou différents ?		Égaux			Égaux		
Shift	Égaux ou différents ?	Égaux			Différents		
	Groupes statistiques				a	b	b

Les pentes et les intercepts sont égaux pour toutes les analyses, seul le shift est différent pour l'année 2023 et les deux années confondues : AC se distingue d'AFIR et d'AFR.

## 5. Suivi de la croissance des pommes

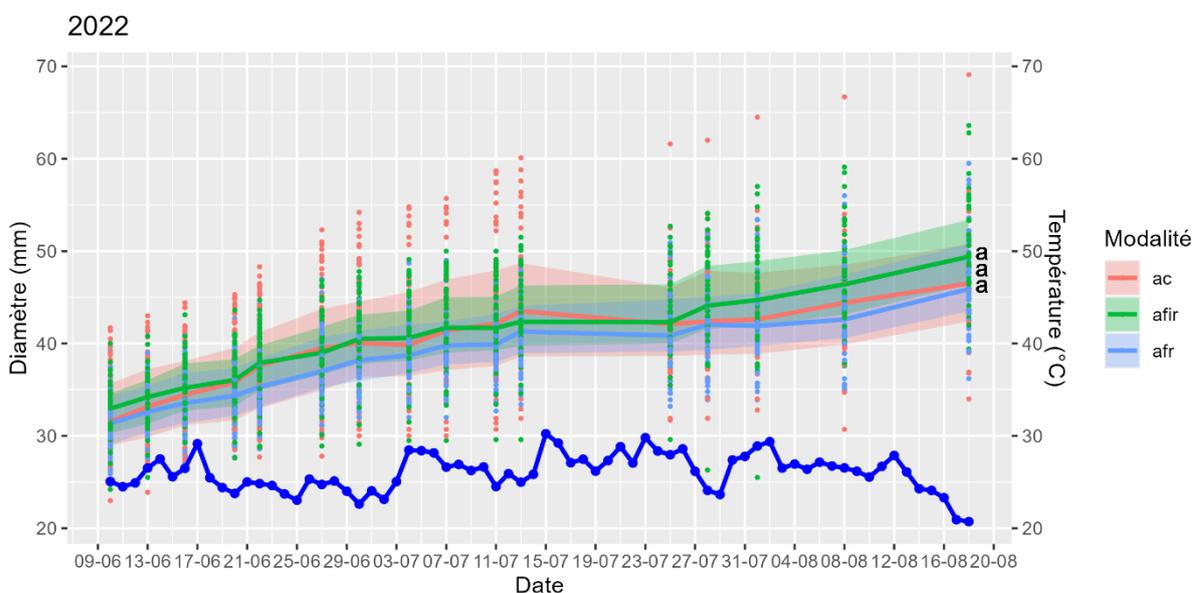


Figure 34 : Évolution du diamètre des pommes, en parallèle des températures moyennes en 2022 en AC. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. La lettre a indique que les trois modalités sont semblables après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

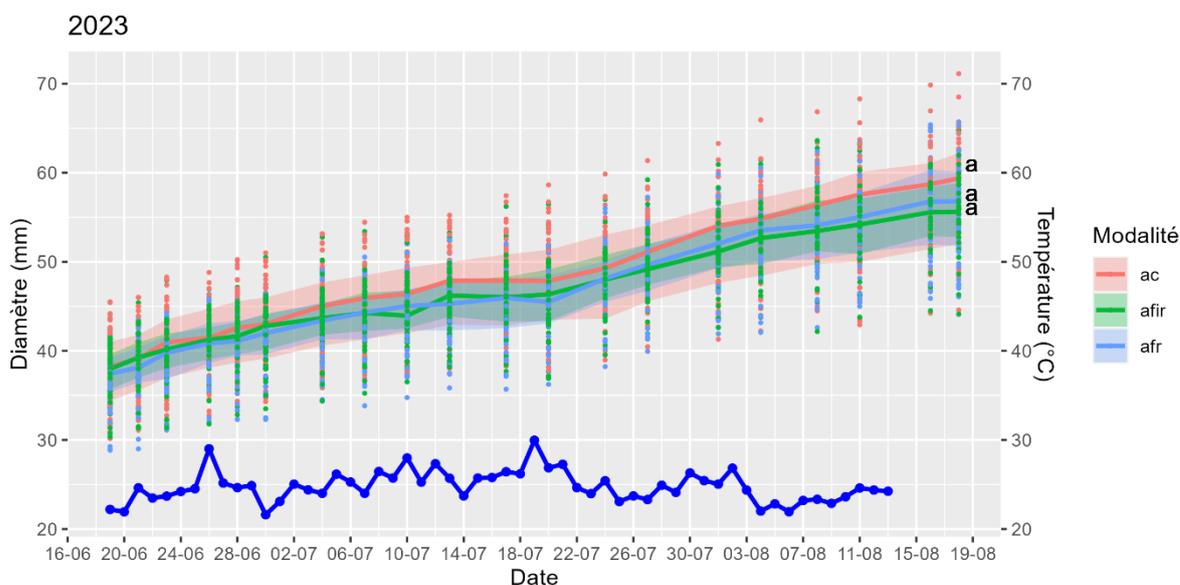


Figure 35 : Évolution du diamètre des pommes, en parallèle des températures moyennes en 2023 en AC. La ligne représente la médiane, les zones ombrées représentent les intervalles interquartiles. La lettre a indique que les trois modalités sont semblables après une analyse par Anova de type III puis un test post-hoc de Tukey, avec un seuil de significativité de 0,01.

En 2022, la croissance des pommes est régulière, sauf entre le 14 et le 25 juillet où la taille des pommes régresse, en parallèle d'un pic de température, qui dépasse les 30°C. AFIR prend le dessus sur AC et sur AFR du début du mois d'août jusqu'à la fin des mesures, mais le diamètre des pommes sur les trois modalités à la date de l'arrêt des mesures n'est pas significativement différent. En 2023, AC présente des pommes plus grosses tout le long de l'été (les données de températures n'ont pas pu être prises jusqu'à la fin du mois d'août), sans impact des fortes températures. En revanche, il n'y a pas de différence statistique entre les modalités. La taille des pommes sur les trois modalités a considérablement augmenté d'une année sur l'autre, avec plus de 10mm en plus pour chacune.

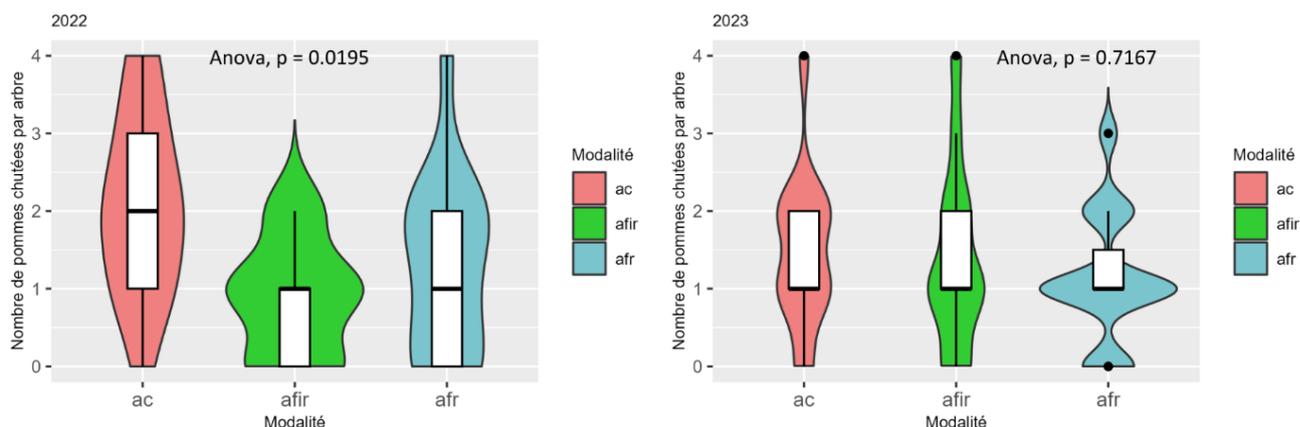


Figure 36 : Nombre de pommes chutées par arbre en août 2022 puis en août 2023. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres concernés par le nombre de chutes. Les box-plots montrent, pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. En 2022 et en 2023, les modalités sont similaires après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

Il n'y a pas de différence significative du nombre de pommes chutées sur les différentes modalités, sur les deux années. En revanche, en 2022, la médiane d'AC est à 2 tandis que celles d'AFIR et AFR sont à 1, ce qui note un plus haut nombre de chutes en témoin agricole.

## II. Effets de l'agroforesterie sur la nuisibilité des bioagresseurs du pommier

### 1. Nuisibilité du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*)

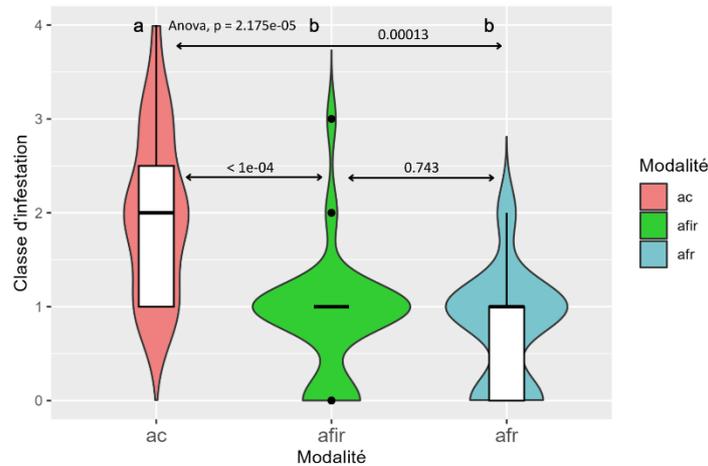


Figure 37 : Pommiers infestés par le puceron cendré sur les trois modalités expérimentales. Les classes d'infestations sont définies comme suit : 0 = arbre non touché ; 1 = impact inférieur à 10% ; 2 = impact compris entre 10 et 25% ; 3 = impact compris entre 25 et 50% ; 4 = impact supérieur à 50%. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres concernés par la classe d'infestation. Les box-plots montrent, pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a et b signifient que les modalités AFIR et AF ont des moyennes similaires, quand AC est différente, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01. Les p-value sont indiquées au-dessus des flèches.

Le test de Tukey montre une différence significative entre la modalité AC et les deux autres modalités. On observe également une plus grande variabilité dans l'infestation des arbres en AC que dans les deux autres classes, pour qui la classe d'infestation 1 est dominante.

### 2. Nuisibilité du carpocapse (*Cydia pomonella*)

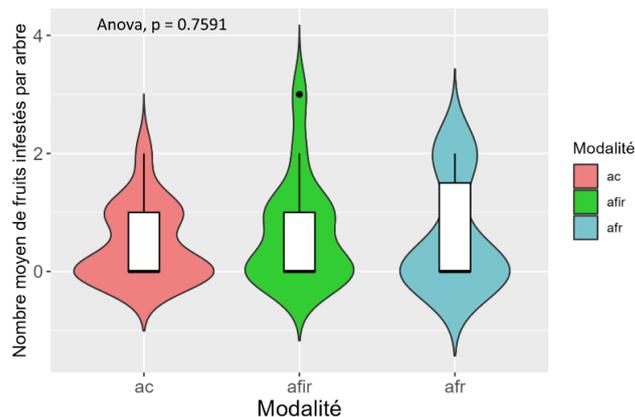


Figure 38 : Pommes infestées par arbre par le carpocapse sur les trois modalités expérimentales. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres concernés par la classe d'infestation. Les box-plots montrent, pour chaque modalité, la valeur médiane ainsi que les intervalles inter-quartiles supérieurs et inférieurs. Les lettres a signifient que les modalités ont toutes des moyennes similaires, après une ANOVA de type III puis un test post-hoc de Tukey. Le seuil de significativité est de 0,01.

Les différentes modalités présentaient les pourcentages d'infestation suivant : 2,33% pour AC, 4,07 pour AFIR et 2,00% pour AFR. D'après le test de comparaison de moyenne, la modalité ne semble néanmoins pas avoir d'effet sur le nombre de fruits infestés par le carpocapse.

# DISCUSSION

## I. Effets de l'agroforesterie sur le verger de pommiers

Pour l'ensemble des discussions à venir, il est indispensable de noter que le nombre de données exploitées reste limité (du fait des moyens matériels et humains disponibles). Par conséquent, beaucoup des résultats issus de l'analyse SMA ne sont pas significatifs.

### 1. Effet de l'agroforesterie sur la hauteur de l'arbre et sa surface de section de tronc et de branches

Contrairement à la surface de section du tronc, qui elle est plus importante dans la modalité agricole que dans les modalités agroforestières, la hauteur de l'arbre ne semble pas être modifiée par la baisse de luminosité causée par la présence des noyers. La mise en situation agroforestière induirait donc un développement d'arbres plus minces mais de même hauteur que les arbres en vergers traditionnels. L'analyse SMA a souligné une relation positive entre la surface de section du tronc et la hauteur de l'arbre, et ce, quelle que soit la modalité. Cependant, les modalités agroforestières ont des coefficients de pente plus élevés que la modalité témoin, ce qui va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle l'ombre affecte surtout la surface de section du tronc et non la hauteur de l'arbre. Les coefficients de pentes sont de moins en moins forts au fil des années (Annexe 2) : cette évolution traduit le fait qu'avec le vieillissement de l'arbre, le tronc de l'arbre continue de s'épaissir mais l'arbre de croître plus en hauteur. Ceci est lié au fait que le tronc et les branches les plus hautes s'arquent systématiquement, ce qui est caractéristique des arbres fruitiers à partir de leur cinquième ou sixième année. Concernant les branches des pommiers, leur nombre baisse entre 2021 et 2023, probablement dû à l'élagage. On remarque cependant que les branches ont en moyenne une surface de section plus réduite en AFR : cela explique que la somme de surface de section soit également supérieure pour la modalité agricole. L'analyse SMA sur les branches n'a pas montré de différence entre la surface de section des branches et celle du tronc entre les modalités, mis à part au niveau du shift : la relation entre la croissance secondaire du tronc et des branches n'est donc pas affectée par l'ombre.

L'analyse de pentes a montré que AFIR et AFR croissent de la même façon puisque leurs pentes sont égales (et AFR présente des coefficients de pente plus élevés qu'AFIR), quand AC s'en distingue, sauf pour la dernière année où les trois modalités sont différentes. Cette différenciation en 2023 peut être due au vieillissement de l'arbre, qui induit une croissance apicale moins forte. Les analyses tendent vers la même conclusion : la croissance primaire de l'arbre, responsable de la croissance apicale, n'est pas affectée par l'ombre, au contraire de la croissance secondaire, responsable de la croissance en diamètre. Cette observation avait déjà été faite par B. Pitchers dans sa thèse sur les pommiers du système GAFAM, entre 2018 et 2021 : la dynamique de croissance en hauteur et en surface de section n'a donc pas changé avec le vieillissement de l'arbre (Pitchers, 2021; Lauri *et al.*, 2022b). Les méristèmes apicaux fonctionnent donc normalement, quand les méristèmes secondaires sont affectés. On remarque

également dans l'analyse SMA que les coefficients de pente sont moins élevés en 2021 qu'en 2023, ce qui peut s'expliquer par ce ralentissement de la croissance primaire au profit de la croissance secondaire.

Il est important de souligner qu'il existe une grande variabilité du port des arbres chez le pommier. Ceux-ci sont classés en quatre types, qui présentent des différences notamment dans leur modèle de ramification (basitome ou acrotone) ou la longueur et largeur de ces ramifications : l'architecture du pommier telle que nous l'avons décrite peut donc être largement influencée par la variété de l'arbre (Costes *et al.*, 2009). La variété Dalinette est de type III : elle présente un port ouvert, buissonnant avec une ramification importante. Les variétés de type I auront par exemple moins de rameaux longs, celles de type IV auront une faible ramification sur la partie basse de l'arbre (Trillot *et al.*, 2002; Lauri *et al.*, 1995)

## 2. Effet de l'agroforesterie sur les séquences de formation des rameaux

Concernant les séquences de formation, on pourrait suggérer une tendance positive entre la longueur du rameau et la fréquence de floraison terminale en année  $n+1$ , au vu des pentes généralement positives de l'analyse SMA. Cette tendance ne changerait pas avec la nature du bourgeon de l'année  $n$ , ni avec la modalité. Ceci confirme le fait que la variété Dalinette est peu alternante, et fortement floribonde. Mais le nombre de données est faible et les pentes ne sont pas significatives pour la plupart, ce qui ne permet pas de conclure.

De même et sous les mêmes précautions, la modalité semble avoir un effet sur la nature du bourgeon en année  $n+1$  : AC présente plus de bourgeons floraux qu'AFIR et AFR. Les arbres à l'ombre ont tendance à avoir moins de bourgeons floraux que ceux en pleine lumière, pour une même classe de longueur. Or, l'induction florale est liée à la surface foliaire qui joue le rôle de productrice d'assimilats (Legave, 2021) : le manque de luminosité baisse donc la production de ces assimilats, et peut réduire l'induction florale. Une analyse de la surface foliaire pourrait permettre de mieux comprendre quels sont les mécanismes impliqués dans la réduction de l'induction florale. On observe également que quand l'arbre vieillit, comme l'illustrent les résultats de l'année 2023, les rameaux se raccourcissent et la floraison semble apparaître autant sur les petits que sur les grands rameaux : les coefficients de pente sont moins élevés, voire négatifs. L'alternance de retour à fleur et à fruit est aussi fortement dépendante de la variété : en effet, selon les types de pommiers évoqués plus haut, la proportion de retour à fleur et à fruit n'est pas la même. Deux stratégies sont mises en lumière dans la régularité de production : le caractère « bourse sur bourse » qui correspond à une régularité de production au niveau de chaque rameau fructifère individuel, ou la désynchronisation des rameaux fructifères. Dans ce cas, une partie des rameaux sera fructifère une année, tandis que l'autre sera végétative (Costes *et al.*, 2009). Par exemple, les variétés de type I, qui présentent des rameaux courts, ont une grande tendance à alterner, ce qui appuierait l'hypothèse selon laquelle la longueur des rameaux influence la nature du bourgeon. Les variétés de type IV ont elles une floraison et fructification régulière, sans forcément de lien avec la longueur des rameaux. Pouvoir classer les variétés en alternantes ou non alternantes suggère que cette

caractéristique est déterminée génétiquement (Lauri *et al.*, 1995), les observations faites sur Dalinette sont donc très liées à son type.

### 3. Effets de l'agroforesterie sur la floraison

Par rapport à la floraison des pommiers, le nombre d'inflorescences est significativement plus haut sur AC que sur les deux autres modalités, ce qui rejoint les observations faites auparavant sur GAFAM (Lauri *et al.*, 2022a) : l'ombre peut donc avoir un effet sur le nombre d'inflorescences qui se développent.

La charge florale d'AC est forte en AC quand les arbres sont jeunes, puis diminue au fur et à mesure que les arbres vieillissent. Cela peut être expliqué par le fait qu'AC présente certes plus d'inflorescences, mais a aussi des surfaces de section de tronc qui croissent plus vite que sur les deux autres modalités, ce qui diminue la charge florale. Pour la plupart des années, la charge florale est égale entre les modalités. Les analyses SMA montrent une relation positive entre le nombre d'inflorescences et la surface de section du tronc sur les trois modalités. En considérant les analyses prenant en compte toutes les années confondues, une différence entre les pentes est mise en évidence entre la modalité témoin et les autres : l'ombre aurait donc bien un effet sur la charge florale, comme le montrent les analyses univariées. On peut considérer que les modalités agroforestières sont plus efficaces que la modalité témoin, puisqu'elles présentent un rapport du nombre d'inflorescences sur leur croissance secondaire plus élevé. Mais l'analyse année par année révèle des pentes et des intercepts globalement égaux, avec une différence entre les shifts. Cela montre que le nombre d'inflorescences et la surface de section suivent une même loi de proportionnalité entre les modalités mais ont des valeurs plus fortes selon la mise en situation agroforestière ou non.

Le taux de floraison est égal entre les modalités sur la plupart des années de mon étude, ce qui induit que la mise en situation agroforestière n'a pas d'effet sur la proportion de bourgeons végétatifs ou floraux sur les pommiers. Il faut noter cependant des résultats étonnants sur les mesures de 2022, qui dénotent peut-être des erreurs de comptage. De plus, l'année 2023 révèle une différence du taux de floraison entre les modalités AC et AFR : c'est également le cas pour la séquence de formation de 2022-2023 que les intercepts issus de l'analyse SMA diffèrent, montrant une différence entre la modalité AC et AFIR. L'année 2019 présente aussi une différence entre AC et les deux autres modalités, ce qui est souligné par l'analyse de l'intercept de la séquence de formation 2019-2020 qui distingue également AC d'AFR. On peut donc supposer un effet – faible – de l'ombre sur la nature du bourgeon  $n+1$ .

### 4. Effets de l'agroforesterie sur la nouaison

L'étude du nombre d'inflorescences ayant noué donne une idée du potentiel de production du verger, et de sa variation en fonction des modalités. Conjugée à une étude du poids moyen du fruit selon son diamètre, cela donne une indication du rendement en tonne par hectare. La période sur laquelle s'est déroulé mon stage n'a malheureusement pas permis de réaliser une estimation du poids des pommes à

la récolte. Le nombre d'inflorescences ayant noué doit être ajusté car il est modifié par l'éclaircissage, puis par la chute des fruits pendant leur croissance. En 2022, la modalité n'avait pas d'influence sur le nombre de fruits ayant noué, mais AC se distingue des modalités agroforestières en 2023. Cela peut être lié au fait qu'en 2022, le nombre d'inflorescences était le même entre les trois modalités, alors qu'en 2023, il était supérieur pour AC.

Le taux de nouaison ne semble pas être affecté par la modalité, si ce n'est qu'AC présente plus d'inflorescences (ce qui a été constaté dans l'analyse sur la floraison) et par conséquent plus d'inflorescences ayant noué. On pourrait supposer que la pollinisation n'est pas affectée par l'agroforesterie. Or, cette hypothèse peut être écartée car l'intérêt de l'expérimentation est que, les modalités se situant très proches spatialement les unes des autres, la pollinisation est supposée optimale pour tous les pommiers ; les résultats de l'étude nous renseignent donc bien sur le fonctionnement propre de l'arbre et non sur d'autres possibles effets environnementaux. Le taux de nouaison constant peut aussi être expliqué par le fait que, d'un côté, l'ombre induit une chute prématurée des pétales et donc une fenêtre de pollinisation plus petite, mais la pleine lumière réduisant aussi le taux de nouaison, la chute des pétales n'aurait donc pas d'impact sur le nombre de fruit final et mènerait à un équilibre entre les modalités (Pitchers, 2021).

Il faut également souligner que la date de débourrement des noyers est tardive : elle arrive après la floraison et la nouaison des pommiers. La présence des noyers au-dessus des pommiers peut donc ne pas avoir d'effet sur la floraison et sur la nouaison par le simple fait que la luminosité n'est pas affectée jusqu'à tard dans la phénologie du pommier. La présence d'autres essences en strate haute, avec une date de débourrement moins tardive, aurait certainement influencé autrement la floraison et la nouaison des pommiers en agroforesterie.

## 5. Effets de l'agroforesterie sur la croissance des pommes

En 2022, les pommes croissent de manière régulière, mais une baisse de diamètre est observée mi-juillet. Cette baisse est marquée sur AC, dont le calibre moyen des fruits devient inférieur à celui en AFIR. Bien que le manque de données prises à ce moment-là ne permette pas une visualisation précise, ceci peut être corrélé au pic de chaleur observé à la même période : les pommes auraient rétrocedé de l'eau à l'arbre pour assurer sa survie (Tromp, 1984), ce qui aurait fait baisser leur calibre. Ceci n'est pas observé en 2023, où même au moment de fortes chaleurs, les fruits en AC restent plus gros. En revanche, sur les deux années, aucune différence statistique significative n'est observée entre les diamètres des pommes sur les différentes modalités. Un élément important à prendre en compte est la présence des pucerons cendrés majoritairement au niveau des AC, qui a un effet sur le grossissement des fruits et peut avoir contribué à ce que les trois modalités aient des résultats statistiquement similaires.

Au cours de l'été, de nombreuses pommes ont chuté : cela peut être dû à des fortes rafales de vent, ainsi qu'au phénomène d'abscission. Celui-ci est expliqué par des mécanismes hormonaux complexes influencés par les conditions environnementales. En 2023, environ 25% des fruits suivis étaient tombés,

de manière similaire entre les modalités. En 2022, aucune différence significative n'est observée entre les modalités, mais AC présente une médiane à 2 fruits chutés par arbre, quand AFIR et AFR présentent une médiane à 1. Ceci, corrélé à la baisse de diamètre des pommes en AC observée pendant l'été 2022, peut amener à suggérer que les fruits en AC étaient moins protégés de la chaleur que ceux en agroforesterie.

## 6. Effets de l'agroforesterie sur les ravageurs du pommier

Enfin, concernant les ravageurs du pommier, les pucerons semblent s'attaquer d'avantage aux arbres en témoin agricole qu'à ceux en agroforesterie. Cette observation avait également été faite en 2021 et 2022, où une étude sur l'incidence du puceron cendré (pourcentage de rameaux infestés) sur la parcelle avait été menée : en 2021, au pic d'infestation, son incidence était 30% supérieure dans la modalité AC qu'en AFR. En 2022, l'incidence en AC était 45% supérieure par rapport à AFIR et AFR. L'abondance du puceron cendré en AC était aussi supérieure aux autres modalités. Cette plus faible infestation sous les noyers peut être expliquée par la modification du microclimat par la strate haute (Gosme *et al.*, 2016), qui entraîne des températures plus basses, impliquant peut-être un retard de développement des pucerons sous les arbres. En regardant la répartition spatiale des arbres infestés (Annexe 6), il est visible que le côté Est du verger est plus attaqué que le reste ; cela peut être dû à la présence du chemin, donc d'une faible densité de plantes, au lieu d'une grande densité de plantes comme c'est le cas pour les autres côtés du verger. Les arbres en AC étant surtout présents sur la face Est du verger, la présence majoritaire des pucerons sur cette modalité peut être influencée par leur position dans l'espace. Pour les carpocapses, il n'y a pas de différence entre les modalités, et l'analyse de la répartition spatiale ne fournit pas plus d'explication.

Le carpocapse ne semble pas affecté par la présence des noyers. Cela peut être expliqué par le fait qu'il s'agisse d'un individu ailé, qui peut donc facilement se disperser entre les modalités. Les arbres des différentes modalités de l'expérimentation sont très rapprochés les uns des autres, ce qui facilite encore plus la dispersion.

## II. Limites de l'étude

Quelques limites sont à souligner dans le travail réalisé.

La période de stage n'a pas permis de mesurer le diamètre des pommes jusqu'au moment de leur récolte, ni de mesurer leur poids moyen. Cela aurait pu mener à l'évaluation du rendement final du verger pour chaque modalité, ce qui aurait conclu l'étude.

Les mesures ont été réalisées par plusieurs personnes différentes, et sur plusieurs années différentes. Il y a donc un biais dans la manière de prendre des mesures entre deux personnes sur la même année, ainsi qu'entre deux années.

Les résultats ne prennent pas en compte (à part concernant la croissance des pommes) les différences météorologiques entre les années d'étude. En effet, les indicateurs de pluviométrie, de température de l'air ou de degré-jour dont ont bénéficié les arbres ne sont pas indiqués et pris en compte dans les analyses. De plus, l'irrigation n'était pas automatisée pendant la plupart des années et n'a pas été tout le temps maîtrisée suite à de nombreux problèmes de matériel. La dose en eau apportée aux pommiers n'est donc pas parfaitement connue, mais les pommiers sont considérés comme ayant été irrigués au-dessus de leurs besoins pour la majeure partie du temps.

La répartition des pommiers au sein de la parcelle peut également être un facteur à prendre en compte, qui n'a pas été analysé afin de simplifier les résultats. En effet, les pommiers sont répartis en deux blocs différents, l'un plus proche du chemin et l'autre plus proche de la rivière. Le contexte dans lequel grandissent les pommiers peut donc être différent selon le bloc : la nature du sol peut varier légèrement, ainsi que le type de végétation aux alentours ou encore la faune présente. Néanmoins, les 45 arbres sur lesquels nous travaillons pour une grande partie des analyses ont originellement été choisis pour couvrir un gradient de diamètre du tronc le plus large possible dans chaque modalité, et sont répartis sur la totalité de la surface d'expérimentation.

Il faut souligner également que l'étude concerne un couple de porte-greffe et de variété très précis, et que les résultats avec un autre couple seraient certainement différents. En effet, il existe une très grande variabilité génétique entre les variétés de pommiers, qui présentent des architectures et des comportements très divers. Notamment, les mécanismes de retour à fleur et à fruit responsables de l'alternance de production peuvent varier : celles à rameaux courts ont tendance à alterner d'avantage que celles à rameaux longs, qui elles produisent annuellement (Lauri, Trottier, 2004). D'autres études seraient nécessaires sur d'autres variétés pour conclure à un comportement général du pommier en agroforesterie.

Enfin, cette expérimentation a été menée en contexte méditerranéen, qui est caractérisé par un fort ensoleillement ; répliquer ce dispositif dans une zone géographique moins ensoleillée aurait probablement un plus grand effet sur les pommiers en agroforesterie, et baisserait considérablement le rendement final. Les résultats de cette étude restent donc très cantonnés à un contexte climatique précis.

### III. Perspectives

Cette étude nous fournit des pistes pour la conception de vergers de pommiers en agroforesterie.

Premièrement, le choix de la variété plantée sur la parcelle de Restinclières s'est fait sur des critères propres à l'expérimentation, mais il est envisageable de choisir une variété plus propice à la croissance à l'ombre. Par exemple, les vergers de Granny Smith sont fréquemment recouverts de filets d'ombrage afin que la pomme ne jaunisse pas – elle perdrait sa valeur de commercialisation. Remplacer les filets d'ombrage par des arbres sur les vergers de Granny Smith serait donc un dispositif pertinent, d'avantage encore si ces filets augmentent les températures dans les vergers, ce que l'on a mentionné au début de ce mémoire. Plus largement, les enjeux du changement climatique doivent amener à reconsidérer la sélection variétale des arbres fruitiers. Le conception des idéotypes variétaux - qui consiste à définir explicitement les plantes désirées pour un environnement et un type d'agriculture donnés, sur la base de la variation de leurs traits caractéristiques (Donald, 1968; Costes *et al.*, 2009) – doit être repensée par une approche globale de l'environnement plutôt que de la variété en elle-même. Le choix de la variété peut se faire pour sa tolérance à l'ombre, mais également sur d'autres critères. Par exemple, les variétés présentent des stratégies différentes d'utilisation de l'eau : « Braeburn » a un comportement plus économe que « Fuji », ce qui peut devenir un critère de choix à l'avenir pour la conception de vergers résilients (Massonnet *et al.*, 2007).

Ensuite, un système pourrait également être envisagé avec des pommiers plantés avant les arbres de la strate haute ; ils pourraient ainsi acquérir une certaine vigueur et entrer en phase productive sans subir l'effet de l'ombre induite par les autres arbres. Eux seraient plantés plus tard et fourniraient leur ombre au moment où les pommiers sont déjà assez vigoureux pour moins subir cet effet. En revanche, le choix du noyer comme essence en strate haute est pertinent : comme mentionné plus haute, sa date de débourrement tardive laisse au pommier le temps de fleurir et de nouer au soleil, et l'ombre du noyer n'intervient que quand le rayonnement devient plus important. Le choix de l'essence en strate haute reste donc un élément important à prendre en compte dans la conception du système. Le noyer est aussi générateur de revenus sur un pas de temps plus long que les quelques années de cette étude, il doit donc aussi rentrer en compte dans l'évaluation de ce système en terme de rendement sur le long terme.

L'étude montre également que la modalité en inter-rang des noyers (AFIR) se développe mieux que la modalité sur le rang des noyers (AFR) en termes de composantes du rendement (bien que les résultats présentent souvent une forte variabilité). Un système avec des pommiers en inter-rang des noyers pourrait donc être pertinent, avec des pommiers espacés d'au moins 6,5 mètres de la strate haute.

Enfin, si les filets servent à limiter les excès de rayonnement, leur fonction première est souvent celle d'anti-grêle. Il paraît donc difficile pour un arboriculteur de s'en passer au profit d'arbres en strate haute. Mais les arbres en strate haute pourraient servir à amortir les chutes de grêle sur les pommiers puisqu'ils recevraient les grêlons avant les arbres en-dessous. Des études seraient nécessaires afin d'approfondir cette piste.

## RÉFLEXION AUTOUR DE LA QUALITÉ DE VIE AU TRAVAIL

Au cours de mon stage à l'UMR ABSys, j'ai pu développer l'un des aspects du référentiel de la Qualité de Vie au Travail : favoriser un dialogue social de qualité. Le projet dans lequel s'insérait mon stage rassemblait principalement trois acteurs (mon encadrant de stage, le technicien responsable du verger et moi-même). Dès mon arrivée, le dialogue a été fluide avec Pierre-Éric Lauri, avec des points formels de discussion régulièrement mais aussi la possibilité de poser des questions de manière moins formelle, cela grâce au temps qu'il a mis à cœur de mettre à ma disposition dès que j'en avais besoin. Concernant le projet, il était important que chacun-e soit au courant des avancées des travaux, ou des stades de développement des arbres : pour cela, le technicien et moi-même prenions soin de prendre des photos des installations ou des pommiers, et de faire des compte-rendu oraux après le retour du terrain si certains éléments remarquables étaient notables.

L'UMR ABSys est composée de plusieurs équipes, dont l'équipe TEAM dont je faisais partie. Chaque lundi matin, une réunion avait lieu afin d'organiser la semaine à venir. Il était important notamment de communiquer autour des trajets jusqu'au Domaine de Restinclières – où ont lieu plusieurs des expérimentations en agroforesterie de l'équipe – et de mutualiser les voitures. Pour cela, nous prenions soin de remplir un agenda partagé avec nos activités de la semaine, mais il fallait aussi se coordonner sur les horaires de départ et de retour : en effet, il nous est parfois arrivé de devoir attendre plus longtemps que prévu une équipe partie en même temps que nous sur le terrain, alors que cela aurait pu être évité en ayant au préalable mieux communiqué sur le temps que devait prendre nos activités. La réunion hebdomadaire apparaissait alors comme indispensable pour se mettre au clair sur l'organisation de la semaine.

Cette UMR présente aussi la particularité d'être composée à moitié d'agent·e·s de l'INRAE et à moitié du CIRAD. L'équipe est séparée entre deux sites géographiques différents, mais beaucoup de personnes sont également expatriées sur tous les continents, ce qui rend la communication autour de projets et d'objectifs communs difficile. Des réunions d'unité et des séminaires ont lieu afin d'échanger autour des volontés ou avancées de l'UMR. De plus, chaque jeudi en début d'après-midi a lieu le « Café des Sciences » qui consiste en la présentation d'exposés sur différents sujets (j'ai d'ailleurs eu l'occasion d'y présenter les résultats de mon stage), auquel tout le monde dans l'unité peut assister s'il-elle le souhaite ; de mon point de vue, c'est un moment central pour la cohésion de l'équipe, car toute personne peut apprendre sur des sujets qu'elle n'a pas l'habitude de traiter, et c'est également l'occasion de savoir ce sur quoi travaillent les collègues éloignés géographiquement (l'exposé est disponible en visioconférence). Cela donne lieu également à des discussions et des échanges entre les membres de l'équipe. C'est grâce à ces Cafés des Sciences que j'ai pu rencontrer certain·e·s collègues et en apprendre plus sur les travaux d'ABSys en milieu tropical, par exemple.

## CONCLUSION

Le système d'expérimentation sur lequel porte cette étude est composé d'une strate haute de noyers, sous laquelle sont placés des pommiers selon trois modalités différentes : en témoin agricole (AC), en inter-rang des noyers (AFIR) et sur le rang des noyers (AFR). L'objectif de l'étude menée était de comprendre quel est l'effet de l'agroforesterie sur le pommier. Plus précisément, mon stage se concentrait sur l'analyse des composantes du rendement dans ce système de verger en agroforesterie, de 2018 à 2023. Cela nécessitait donc de réaliser une collecte de données de terrain pour l'année 2023, et des analyses statistiques sur les données déjà collectées les années précédentes.

Les résultats montrent que les arbres placés en agroforesterie ont globalement une structure plus effilée que les témoins agricoles, avec une taille semblable mais des branches et des troncs plus fins. L'analyse des séquences de formation des rameaux, qui nous renseignent sur la longueur du rameau par rapport à la fréquence de floraison l'année suivante, n'ont pas donné de résultats significatifs, du au faible nombre de données. La tendance générale allait vers une plus grande fréquence de retour à fleur sur les rameaux les plus longs, et ce, indépendamment de la nature du bourgeon l'année précédente. La modalité témoin semble également présenter une fréquence de retour à fleur plus élevée. La floraison est affectée par l'agroforesterie : le nombre d'inflorescences est supérieur pour la modalité agricole. En revanche, les modalités agroforestières présentent un rapport du nombre d'inflorescences sur la surface de section de leur tronc plus élevé : elles peuvent être considérées comme plus efficaces. Enfin, le taux de floraison ne change pas selon les modalités, l'agroforesterie n'a donc pas d'effet sur la proportion de bourgeons végétatifs ou floraux se développant sur le pommier. La nouaison du pommier n'est, elle non, plus, pas affectée par l'ombre portée des noyers. Concernant la croissance des pommes, le calibre des fruits est statistiquement le même sous les trois modalités, bien qu'AC présente des fruits plus gros en 2023, et AFIR en 2022. En 2022, les fortes chaleurs semblent avoir induit un rétrécissement des fruits, plus marqué en AC qu'en agroforesterie, soulignant une possible protection des noyers contre les excès de températures. Enfin, les relevés de nuisibilité montrent une distribution différente du puceron cendré entre les modalités, le témoin présentant plus de symptômes que les deux autres modalités. Pour le carpocapse en revanche, aucune différence significative n'a été relevée.

La présence de noyers au-dessus des pommiers affecte donc la croissance du pommier et son rendement final. Mais d'autres études doivent être menées avant de tirer des conclusions sur un système comme celui-ci : en effet, il s'agit d'une expérimentation sur une variété de pommier particulière, avec une strate haute et un contexte précis. D'autres conditions amèneraient certainement des observations très différentes. En revanche, quelques lignes de conduite peuvent d'ores et déjà être suivies : choisir une variété plus tolérante à l'ombre serait pertinent, et une adaptation de la distance des pommiers à la strate haute pourrait également améliorer le rendement, la modalité inter-rang étant apparue comme le compromis le plus viable.

La réalisation des missions de ce stage a été portée par les valeurs illustrées par la Charte d'Éthique de l'Ingénieur-e publiée par l'IESF. Le projet général de l'expérimentation en place à Restinclières s'inscrit dans une démarche d'innovation au service du développement durable : elle a pour objectif de contribuer à la transition agricole pour concevoir des systèmes plus résilients face au changement climatique puisqu'elle propose des alternatives aux vergers traditionnels, victimes des excès de températures. Les résultats de cette étude, bien que pour l'instant cantonnés au domaine de la recherche, ont pour vocation d'être ensuite diffusés aux arboriculteur·trice·s afin de leur donner des perspectives en termes de conception de vergers, et des éléments de réflexion sur ces nouveaux systèmes de culture.

Pendant la réalisation de mon mémoire, j'ai suivi une démarche la plus méthodique et la plus scientifique possible, afin de tirer des conclusions objectives et fondées. L'objectif, dès le début, n'a pas été d'absolument montrer les bénéfices de l'agroforesterie, mais d'observer les comportements des pommiers dans cette situation particulière, en gardant en tête les potentielles baisses de rendement et les difficultés techniques découlant d'un tel système. En cela, les dimensions humaines et économiques d'un tel verger ont été prises en compte, bien qu'elles n'aient pas été étudiées sur cette parcelle.

## BIBLIOGRAPHIE

AGRESTE, 2021a. *En 2021, une production française de pommes prévue inférieure à la moyenne 2016-2020* [en ligne]. septembre 2021. Disponible à l'adresse : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru21118/2021\\_118inforappomme.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraFru21118/2021_118inforappomme.pdf)

AGRESTE, 2021b. Enquête Pratiques phytosanitaires en arboriculture en 2018 IFT et nombre de traitements. [en ligne]. mai 2021. [Consulté le 24 juillet 2023]. Disponible à l'adresse : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8\\_IFT-phytofruits\\_2018.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8_IFT-phytofruits_2018.pdf)

AGRESTE, 2022a. *Bilan conjoncturel 2022* [en ligne]. [xls]. 15 décembre 2022. [Consulté le 28 avril 2023]. Disponible à l'adresse : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/BilanConj2022/detail/>

AGRESTE, 2022b. *Graph'agri 2022* [en ligne]. 2022. Disponible à l'adresse : [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2022Chap3.1/GraFra2022\\_pratiques-cultureales.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2022Chap3.1/GraFra2022_pratiques-cultureales.pdf)

[Auteur ?], 2021. FAOSTAT. [en ligne]. [Consulté le 15 mai 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL>

BACCINI, Alain, 2010. *La procédure GLM de SAS, les commandes means et lsmeans, la méthode de Bonferroni et les graphiques d'interactions* [en ligne]. avril 2010. [Consulté le 23 mai 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.math.univ-toulouse.fr/~baccini/zpedago/bonfer.pdf>

BALDY, Charles, DUPRAZ, Christian et SCHILIZZI, Steven, 1993. Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens. *Cahiers Agricultures*. 1993. pp. 375-386.

BONAN, Gordon B., 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*. 13 juin 2008. Vol. 320, n° 5882, pp. 1444-1449. DOI 10.1126/science.1155121.

COSTES, Evelyne E, LAURI, Pierre-Eric, LAURENS, Francois, DUREL, Charles Eric et PARISI, Luciana L, 2009. Construire un idéotype de variétés de pommier pour des vergers agronomiquement performants et à faibles intrants. [en ligne]. 2009. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02655988/document>

CTIFL, 2019. *Baromètre de la consommation des pommes en 2019* [en ligne]. 2019. [Consulté le 28 avril 2023]. Disponible à l'adresse : [https://www.ctifl.fr/subscription/file/check/id/6497/field/edition\\_file/](https://www.ctifl.fr/subscription/file/check/id/6497/field/edition_file/)

DAWSON, Todd E., 1993. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*. octobre 1993. Vol. 95, n° 4, pp. 565-574. DOI 10.1007/BF00317442.

DONALD, C. M., 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica*. décembre 1968. Vol. 17, n° 3, pp. 385-403. DOI 10.1007/BF00056241.

DUPRAZ, Christian et LIAGRE, Fabien, 2011. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. Groupe France Agricole. Agriproduction. ISBN 978-2-85557-205-5.

FARRERA, Isabelle, 2023. Phénologie des espèces fruitières et changement climatique. . Diaporama. INRAE Mauguio. 8 juin 2023.

FLECKINGER, J., 1964. *Le bon jardinier*. Paris. La maison rustique.

GOSME, Marie, DUFOUR, Lydie, INURETTA AGUIRRE, HD et DUPRAZ, Christian, 2016. *Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle* [en ligne]. 23 mai 2016. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/325644974\\_Microclimatic\\_effect\\_of\\_agroforestry\\_on\\_diurnal\\_temperature\\_cycle](https://www.researchgate.net/publication/325644974_Microclimatic_effect_of_agroforestry_on_diurnal_temperature_cycle)

KON, Thomas M. et SCHUPP, James R., 2013. *Thinning tall spindle apple based on estimations made with a hand-thinning gauge* [en ligne]. décembre 2013. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/287934600\\_Thinning\\_Tall\\_Spindle\\_Apple\\_Based\\_on\\_Estimations\\_Made\\_With\\_a\\_Hand-thinning\\_Gauge](https://www.researchgate.net/publication/287934600_Thinning_Tall_Spindle_Apple_Based_on_Estimations_Made_With_a_Hand-thinning_Gauge)

LAURI, DOUARD, S., CHAPPOT DE LA CHANONIE, J. et NORMAND, F., 2022a. Biodiversified agrosystems: do we need more knowledge on plant architecture and functioning? The case of fruit trees. *Acta Horticulturae*. décembre 2022. N° 1355, pp. 133-140. DOI 10.17660/ActaHortic.2022.1355.17.

LAURI, Pierre-Éric, 2019. Apple tree architecture and cultivation – a tree in a system. *Acta Horticulturae*. novembre 2019. N° 1261, pp. 173-184. DOI 10.17660/ActaHortic.2019.1261.27.

LAURI, Pierre-Éric et SIMON, Sylvaine, 2019. *Achieving sustainable cultivation of temperate zone tree fruits and berries Volume 2: Case studies* [en ligne]. Michigan State University : Burleigh Dodds Science Publishing. [Consulté le 28 mars 2023]. Burleigh Dodds Series in Agricultural Science. ISBN 978-1-78676-212-2. Disponible à l'adresse : <https://shop.bdspublishing.com/store/bds/detail/workgroup?id=3-190-72794>

LAURI, Pierre-Éric et TÉROUANNE, E., 1995. *Analyse de la croissance primaire de rameaux de pommier (Malus x domestica Borkh.) au cours d'une saison de végétation* [en ligne]. 1995. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/237165555\\_Analyse\\_de\\_la\\_croissance\\_primaire\\_de\\_rameau\\_x\\_de\\_pommier\\_Malus\\_X\\_domestica\\_Borkh\\_au\\_cours\\_d%27une\\_saison\\_de\\_vegetation](https://www.researchgate.net/publication/237165555_Analyse_de_la_croissance_primaire_de_rameau_x_de_pommier_Malus_X_domestica_Borkh_au_cours_d%27une_saison_de_vegetation)

LAURI, Pierre-Éric, TÉROUANNE, Eric, LESPINASSE, Jean-Marie, REGNARD, Jean-Luc et KELNER, Jean-Jacques, 1995. Genotypic differences in the axillary bud growth and fruiting pattern of apple fruiting branches over several years—an approach to regulation of fruit bearing. *Scientia Horticulturae*. décembre 1995. Vol. 64, n° 4, pp. 265-281. DOI 10.1016/0304-4238(95)00836-5.

LAURI, Pierre-Éric et TROTTIER, Catherine, 2004. Patterns of size and fate relationships of contiguous organs in the apple ( *Malus domestica* ) crown. *New Phytologist*. septembre 2004. Vol. 163, n° 3, pp. 533-546. DOI 10.1111/j.1469-8137.2004.01136.x.

LAURI, PITCHERS, B. et SIMON, S., 2022b. Designing a sustainable orchard – plant diversity as a key and ways to implement it. *Acta Horticulturae*. septembre 2022. N° 1346, pp. 19-26. DOI 10.17660/ActaHortic.2022.1346.3.

LAURI et TÉROUANNE, Éric Té, 1999. Effects of inflorescence removal on the fruit set of the remaining inflorescences and development of the laterals on one year old apple (*Malus domestica* Borkh.) branches. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. janvier 1999. Vol. 74, n° 1, pp. 110-117. DOI 10.1080/14620316.1999.11511082.

LEGAVE, Jean-Michel, 2021. *Les productions fruitières à l'heure du changement climatique : Risques et opportunités en régions tempérées Ed. 1* [en ligne]. Editions Quae. [Consulté le 31 mars 2023]. ISBN 978-2-7592-3251-2. Disponible à l'adresse : <https://unrra.scholarvox.com/catalog/book/docid/88922842>

MASSONNET, Catherine, 2005. Variabilité architecturale et fonctionnelle du système aérien chez le pommier (*Malus domestica* Borkh.): comparaison de quatre cultivars par une approche de modélisation structure-fonction. [en ligne]. 27 octobre 2005. Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-00010748/document>

MASSONNET, Catherine, COSTES, Evelyne, RAMBAL, Serge, DREYER, Erwin et REGNARD, Jean Luc, 2007. Stomatal Regulation of Photosynthesis in Apple Leaves: Evidence for Different Water-use Strategies between Two Cultivars. *Annals of Botany*. novembre 2007. Vol. 100, n° 6, pp. 1347-1356. DOI 10.1093/aob/mcm222.

MEHRI, Hechmi et CRABBÉ, Jacques, 2002. Processus de croissance et d'organogenèse chez le pommier cv Golden Delicious. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* [en ligne]. 2002. Disponible à l'adresse : <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=17436&file=1&pid=14501>

OLIVARES-SOTO, Héctor, BASTÍAS, Richard M., OLIVARES-SOTO, Héctor et BASTÍAS, Richard M., 2018. Photosynthetic efficiency of apples under protected shade nets. *Chilean journal of agricultural research*. mars 2018. Vol. 78, n° 1, pp. 126-138. DOI 10.4067/S0718-58392018000100126.

PAUT, R., SABATIER, R. et TCHAMITCHIAN, M., 2018. *Horticultural agroforestry systems : a modelling framework to combine diversification and association effects*. 2018.

PITCHERS, Benjamin, 2021. ARCHITECTURE AND FRUITING OF APPLE TREE IN AGROFORESTRY – LINKING ARCHITECTURAL DEVELOPMENT, FLOWERING AND XYLEM FLOW. [en ligne]. 2021. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/tel-04068209/>

SIMON, Sylvaine, [sans date]. *Evaluation of the severity of rosy apple aphid infestation in spring*.

STEPHAN, Jean, 2012. Architecture 3D et microclimat lumineux de l'arbre. Comparaison de cultivars de pommier soumis à des manipulations de conduite. . 16 juillet 2012.

TRILLOT, Michel, MASSERON, Alain, MATHIEU, Vincent, BERGOUGNOUX, François, HUTIN, Christian et LESPINASSE, Yves, 2002. *Le pommier*. CTIFL. ISBN 2-87911-154-4.

TROMP, J., 1984. Diurnal fruit shrinkage in apple as affected by leaf water potential and vapour pressure deficit of the air. *Scientia Horticulturae*. janvier 1984. Vol. 22, n° 1-2, pp. 81-87. DOI 10.1016/0304-4238(84)90086-4.

VAUDOR, Lise, 2015. Non-respect des hypothèses du modèle linéaire (ANOVA, régression): c'est grave, docteur?? *R-atique* [en ligne]. 30 janvier 2015. [Consulté le 12 mai 2023]. Disponible à l'adresse : <http://perso.ens-lyon.fr/lise.vaudor/non-respect-des-hypotheses-du-modele-lineaire-anova-regression-cest-grave-docteur/>

WARRINGTON, I.J. et FERREE, D.C., 2003. *Apples - botany, production and uses*. CABI Publishing. ISBN 0-85199-592-6.

WARTON, David I., WRIGHT, Ian J., FALSTER, Daniel S. et WESTOBY, Mark, 2006. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*. mai 2006. Vol. 81, n° 02, pp. 259. DOI 10.1017/S1464793106007007.

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

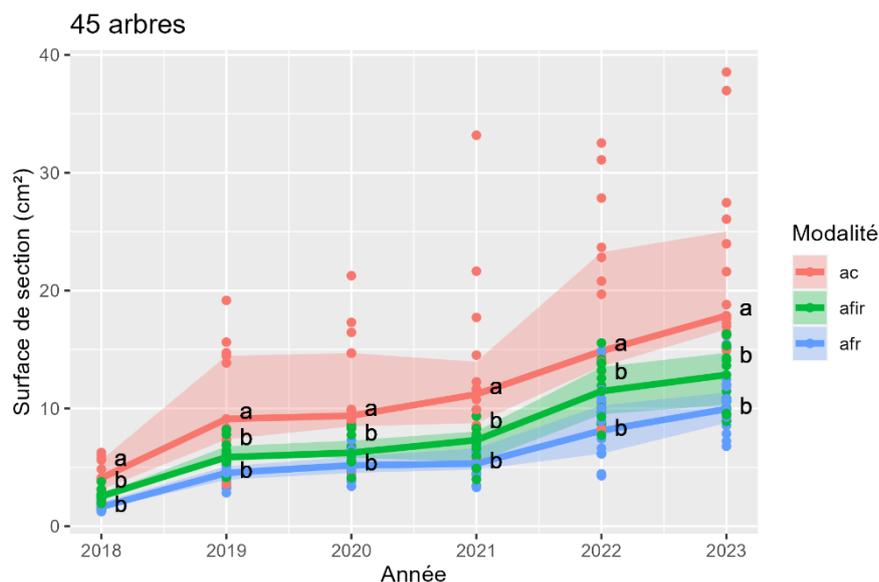
Figure 1 : Différence de température entre les vergers de pommiers avec filets et ceux sans filet, à 1m du sol, en juillet 2019. (Données : CETA Hérault-Vidourle).....	2
Figure 2 : Différence de la température de l'air entre les systèmes en agroforesterie et ceux en plein soleil, en fonction de l'heure, pendant la saison de croissance 2015 (Gosme et al., 2016).....	3
Figure 3 : rameau du pommier (Source : Lespinasse et Lauri, cité par Trillot et al., 2002) ; Bourgeons végétatifs et floraux de pommier (Source : IRISIA, Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, cité par Trillot et al., 2002).....	6
Figure 4 : Stade de développement du bourgeon de pommier selon la classification de Fleckinger (CTIFL, s. d.).....	7
Figure 5 : Principales composantes du rendement chez les arbres fruitiers (inspiré de Legave, 2021)	10
Figure 6 : Dégâts causés par le puceron cendré sur la pomme (source personnelle) .....	10
Figure 7 : Carte de la parcelle de Restinclières en 2023 (vue aérienne).....	16
Figure 8 : Moyenne de Gap Fraction sur les trois modalités de pommiers en 2022 .....	16
Figure 9 : Dispositif de mesure de la hauteur (gauche) et du diamètre (droite) des pommiers en mars 2023 (source personnelle) .....	19
Figure 10 : Exemple de séquence de formation FF (à gauche) et VV (à droite) (source personnelle) .	20
Figure 11 : Mesure d'un rameau FF (à gauche) et VF (à droite) en avril 2023 à Restinclières (source personnelle) .....	20
Figure 12 : Mesure du diamètre d'une pomme au pied à coulisse (source personnelle).....	22
Figure 13 : Évolution de la surface de section de tronc des pommiers, en cm <sup>2</sup> , sur les trois modalités entre 2018 et 2023 .....	23
Figure 14 : Évolution de l'AGR (Absolute Growth Rate = surface de section en année « n+1 » – surface de section en année « n ») de la section du tronc sur les trois modalités entre 2018-2019 et 2022-2023 .....	23
Figure 15 : Évolution de la hauteur des pommiers, en cm, sur les trois modalités entre 2021 et 2023.	24
Figure 16 : Nombre de branches par arbre en 2021 et 2023.....	24
Figure 17 : Surface de section moyenne des branches en cm <sup>2</sup> en 2021 et 2023. La largeur est proportionnelle au nombre d'arbre.....	25
Figure 18 : Somme de la surface de section des branches en cm <sup>2</sup> en 2021 et 2023. La largeur des figures est proportionnelle au nombre d'arbres.....	25
Figure 19 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la hauteur par rapport à la section sur les années 2021 à 2023 confondue.....	26
Figure 20 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la hauteur par rapport à la section pour chaque année de 2021 à 2023 .....	26
Figure 21 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la moyenne de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc en juin 2023 (gauche), et de la somme de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc en juin 2023 (droite).....	27
Figure 22 : Représentation graphique de l'analyse SMA des séquences de formation des années 2019-2020 à 2022-2023 confondues.....	29
Figure 24 : Représentation graphique de l'analyse SMA sur les séquences de formation pour chaque année de 2019-2020 à 2022-2023.....	31
Figure 25 : Évolution du nombre d'inflorescences sur les trois modalités entre 2018 et 2023.....	32
Figure 26 : Évolution de la charge florale (nombre d'inflorescences par cm <sup>2</sup> de section du tronc) sur les trois modalités entre 2018 et 2023.....	32
Figure 27 : Évolution du taux de floraison (nombre de bourgeons floraux sur le total de bourgeons floraux et végétatifs) sur les trois modalités entre 2018 et 2023 .....	33
Figure 28 : Analyse SMA de la charge florale sur les années 2018 à 2023 confondues.....	33

Figure 29 : Représentation graphique de l'analyse SMA de la charge florale pour chaque année de 2018 à 2023 .....	34
Figure 30 : Nombre d'inflorescences ayant noué pour les années 2022 et 2023. Une inflorescence ayant donné plusieurs fruits compte pour une inflorescence ayant noué.....	36
Figure 31 : Taux de nouaison (nombre d'inflorescences ayant noué par rapport au nombre d'inflorescences) pour les années 2022 et 2023 .....	36
Figure 32 : Représentation graphique de l'analyse SMA sur le taux de nouaison sur les années 2022 et 2023 confondues.....	37
Figure 34 : Évolution du diamètre des pommes, en parallèle des températures moyennes en 2022 en AC .....	38
Figure 35 : Évolution du diamètre des pommes, en parallèle des températures moyennes en 2023 en AC .....	39
Figure 36 : Nombre de pommes chutées par arbre en août 2022 puis en août 2023 .....	39
Figure 37 : Pommiers infestés par le puceron cendré sur les trois modalités expérimentales.....	40
Figure 38 : Pommes infestées par arbre par le carpocapse sur les trois modalités expérimentales.....	40
Tableau 1 : Nombre de pommiers sur la parcelle de Restinclières .....	15
Tableau 2 : Résultats de l'analyse SMA sur la hauteur par rapport à la section pour les années 2021 à 2023 confondues.....	26
Tableau 3 : Résultats de l'analyse SMA sur la hauteur par rapport à la section pour les années 2021 à 2023 .....	27
Tableau 4 : Résultats de l'analyse SMA sur la moyenne et la somme de la surface de section des branches par rapport à la surface de section du tronc.....	28
Tableau 5 : Résultats de l'analyse SMA sur les séquences de formation pour les années 2019-2020 à 2022-2023 confondues .....	29
Tableau 6 : Résultats de l'analyse SMA les séquences de formation pour les années 2019-2020 à 2022-2023 confondues.....	29
Tableau 7 : Résultats de l'analyse SMA sur les fréquences de séquences de formation sur les années 2019-2020 à 2022-2023.....	31
Tableau 8 : Résultats du SMA sur la charge florale pour les années 2018 à 2023 confondues. Le seuil de significativité est 0,01 .....	34
Tableau 9 : Résultats de l'analyse SMA sur la charge florale pour les années 2018 à 2023.....	35
Tableau 10 : Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison pour les années 2022 et 2023 confondues .....	37
Tableau 11 : Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison en 2022 et 2023 .....	38

## ANNEXES

Annexe 1 : Analyse de la représentativité des 45 arbres sélectionnés pour l'étude. ....	7
Annexe 2 : Résultats de l'analyse SMA de la hauteur de l'arbre par rapport à la surface de section du tronc.....	7
Annexe 3: Résultats de l'analyse SMA sur les séquences de formation .....	8
Annexe 4: Résultats de l'analyse SMA sur la charge florale.. .....	9
Annexe 5: Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison. ....	11
Annexe 6: Carte de la répartition de l'infestation par les pucerons cendrés sur le verger en juillet 2023 (génération 1) .....	12
Annexe 7: Carte de la répartition de l'infestation par les carpocapses sur le verger en juillet 2023 (génération 1) .....	12

Annexe 1 : Analyse de la représentativité des 45 arbres sélectionnés pour l'étude. L'étude consiste à visualiser les différences qui existent entre l'évolution de la surface de section des 112 arbres de la parcelle (cultivar Dalinette, plantés en 2016), et les 45 arbres sélectionnés pour les autres analyses. La surface de section du tronc semble suivre la même évolution que soit l'échantillon.



Annexe 2 : Résultats de l'analyse SMA de la hauteur de l'arbre par rapport à la surface de section du tronc. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{surface de section} * \text{modalité})$ . Les groupes désignent les modalités dont la pente peut être qualifiée de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple.

Année		2021		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	8.280436	15.42518	35.20725
	Probabilité que la pente soit significative	0.00033773	5.3282e-06	0.43603
	Probabilité que les pentes soient égales	6.251e-06		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 0.0082045 AC AFR : 2.9487e-06 AFIR AFR : 0.0028060		

Année		2022		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	6.367600	12.187264	20.55524
	Probabilité que la pente soit significative	0.011414	0.0018773	0.055026
	Probabilité que les pentes soient égales	0.00042764		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 0.0185189 AC AFR : 0.0002517 AFIR AFR : 0.0771826		

Année		2023		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	5.972542	11.373750	21.46556
	Probabilité que la pente soit significative	0.011851	0.091359	0.2068
	Probabilité que les pentes soient égales	0.00016756		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 0.021668 AC AFR : 9.1532e-05 AFIR AFR : 0.031317		

Année		2021-2023 confondues		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	6.174256	11.36535	18.41586
	Probabilité que la pente soit significative	9.3155e-07	2.4158e-11	0.00050461
	Probabilité que les pentes soient égales	2.2334e-11		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 2.2334e-11 AC AFR : 7.7158e-12 AFIR AFR : 0.00027689		

Annexe 3: Résultats de l'analyse SMA sur les séquences de formation

Résultats détaillés de l'analyse SMA sur les fréquences de séquences de formation sur les années 2019-2020 à 2022-2023. FF : bourgeon floral en année n, floral en année n+1 ; VF : végétatif en n, floral en n+1. Le seuil de significativité est de 0,01. Les valeurs de pentes sont prises avec l'analyse SMA classique (sma(frequence~classe\*filiation), tandis que les valeurs d'intercept sont issues de l'analyse SMA spécifique aux intercepts (sma(frequence~classe+filiation, type="elevation").

Modalité		AC		AFIR		AFR		Toutes modalités confondues	
Séquence de formation		FF	VF	FF	VF	FF	VF	FF	VF
Pente	Valeurs de pente	0.02229305	0.02455005	0.02677006	0.03603104	0.02316633	0.02647263	0.03990751	0.03752716
	Probabilité que la pente soit significative	0.00014406	0.62417	0.16738	0.40408	0.066503	0.15241	0.031359	0.18531
	Probabilité que les pentes soient égales	0.80284		0.53229		0.7578		0.80918	
Intercepts	Valeurs d'intercept	0.7425497	0.6882131	0.5102517	0.5028858	0.5323978	0.5342915	0.5246828	0.5047466
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.08971		0.88382		0.95574		0.56456	

Résultats détaillés de l'analyse SMA sur les fréquences de séquences de formation sur les années 2019-2020 à 2022-2023. FF : bourgeon floral en année n, floral en année n+1 ; VF : végétatif en n, floral en n+1. Le seuil de significativité est de 0,01. Les valeurs de pentes sont prises avec l'analyse SMA classique (sma(frequence~classe\*filiation), tandis que les valeurs d'intercept sont issues de l'analyse SMA spécifique aux intercepts (sma(frequence~classe+filiation, type="elevation").

Couple d'années		Toutes années confondues					
Séquence de formation		FF			VF		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de pente	0.02229305	0.02677006	0.02316633	0.02455005	0.03603104	0.02647263
	Probabilité que la pente soit significative	0.00014406	0.16738	0.066503	0.62417	0.40408	0.15241
	Probabilité que les pentes soient égales	0.87349			0.71453		
Intercept	Valeurs d'intercept	0.7403021	0.5526062	0.5413667	0.6555661	0.5148409	0.5128610
	Probabilité que les intercepts soient égaux	< 2.22e-16			0.0029567		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 3.4808e-11 AC AFR : < 2.22e-16 AFIR AFR : 0.98351			AC AFIR : 0.0258524 AC AFR : 0.0021879 AFIR AFR : 0.9999683		

Couple d'années		2019-2020					
Séquence de formation		FF			VF		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de pente	0.03129073	0.05012838	0.05062623	0.019619812	0.02196031	0.04491855
	Probabilité que la pente soit significative	0.031644	0.045264	0.82127	0.22958	0.066455	0.25123
	Probabilité que les pentes soient égales	0.48037			0.26732		
Intercept	Valeurs d'intercept	0.6883209	0.6266967	0.4953335	0.7009564	0.7124139	0.6008831
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.013962			0.045905		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.4813922 AC AFR : 0.0056443 AFIR AFR : 0.2729744			AC AFIR : 0.971948 AC AFR : 0.095190 AFIR AFR : 0.047299		

Couple d'années		2020-2021		
Séquence de formation		FF		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de pente	0.02647582	0.02508004	0.03511121
	Probabilité que la pente soit significative	0.0010533	0.14454	0.30435
	Probabilité que les pentes soient égales	0.72741		
Intercept	Valeurs d'intercept	0.6679123	0.2908506	0.4256899
	Probabilité que les intercepts soient égaux	< 2.22e-16		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : < 2.22e-16 AC AFR : 2.3739e-09 AFIR AFR : 0.011404		

Couple d'années		2021-2022					
Séquence de formation		FF			VF		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de pente	0.015596838	0.03682250	0.03478698	0.02836793	0.04491074	0.02846167
	Probabilité que la pente soit significative	0.0046597	0.3079	0.036497	0.78591	0.40427	0.15586
	Probabilité que les pentes soient égales	0.037479			0.56872		
Intercept	Valeurs d'intercept	0.7671795	0.6443814	0.6200795	0.6540165	0.4917350	0.5398289
	Probabilité que les intercepts soient égaux	1.1478e-06			0.027496		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.0031074 AC AFR : 1.6257e-06 AFIR AFR : 0.9506202			AC AFIR : 0.045280 AC AFR : 0.067285 AFIR AFR : 0.800234		

Couple d'années		2022-2023					
Séquence de formation		FF			VF		
Modalité		AC	AFIR	AFR	AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de pente	0.020072908	-	-	0.05153814	-	0.03671787
	Probabilité que la pente soit significative	0.65679	0.06859	0.046632	0.083159	0.0015129	0.24016
	Probabilité que les pentes soient égales	0.60052			0.51485		
Intercept	Valeurs d'intercept	1.0359415	0.8875526	0.8569942	0.9905117	0.7783378	0.9271634
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.05842			1.7895e-08		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.102351 AC AFR : 0.042608 AFIR AFR : 0.857454			AC AFIR : 7.9507e-08 AC AFR : 0.71993 AFIR AFR : 0.27416		

Annexe 4: Résultats de l'analyse SMA sur la charge florale. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{nombre d'inflorescences} \sim \text{surface de section} * \text{modalité})$ . Les tests d'égalité des intercepts et des shifts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts :  $sma(\text{frequence-classe+filiation, type} = \text{"elevation"})$  ou  $\text{type} = \text{"shift"}$ . Les groupes désignent les modalités dont l'intercept ou le shift peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple.

Année		2018		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	40.62454	21.65213	28.43527
	Probabilité que la pente soit significative	0.0014961	0.0069434	0.0022202
	Probabilité que les pentes soient égales	0.09443		
Intercept	Valeurs d'intercept	-46.933708	-49.17187	-42.81699
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.41862		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.99993 AC AFR : 0.71878 AFIR AFR : 0.92051		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	1.0895e-08		
	Comparaison deux à deux des shifts	AC AFIR : 0.0018147 AC AFR : 2.7982e-06 AFIR AFR : 4.2856e-05		

Année		2019		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	31.70565	40.66573	17.75122
	Probabilité que la pente soit significative	0.00016934	0.13672	0.41112
	Probabilité que les pentes soient égales	0.085457		
Intercept	Valeurs d'intercept	-92.471118	-122.62786	-116.25029
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.63085		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.96324 AC AFR : 0.51176 AFIR AFR : 0.99992		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	4.9384e-09		
	Comparaison deux à deux des shifts	AC AFIR : 0.00121305 AC AFR : 4.2103e-07 AFIR AFR : 0.00070282		

Année		2020		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	17.25367	32.50983	38.87462
	Probabilité que la pente soit significative	1.6481e-06	0.048031	0.0033575
	Probabilité que les pentes soient égales	0.0014132		
	Comparaison deux à deux des pentes	AC AFIR : 0.0662282 AC AFR : 0.0038908 AFIR AFR : 0.9206341		

Année		2021		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	29.83708	57.79718	66.39743
	Probabilité que la pente soit significative	0.00085432	0.24128	0.06904
	Probabilité que les pentes soient égales	0.022078		
Intercept	Valeurs d'intercept	-226.61309	-179.2654	-106.2488
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.071896		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.999998 AC AFR : 0.561306 AFIR AFR : 0.065063		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	0.0012874		
	Comparaison deux à deux des shifts	AC AFIR : 0.0024460 AC AFR : 0.0009253 AFIR AFR : 0.5373891		

Année		2022		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	21.25262	31.20996	31.93559
	Probabilité que la pente soit significative	0.00021187	0.006026	0.010268
	Probabilité que les pentes soient égales	0.21805		
Intercept	Valeurs d'intercept	-69.93286	45.58691	98.00728
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.0020966		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.0328432 AC AFR : 0.0062265 AFIR AFR : 0.0709737		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	0.0013235		
	Comparaison deux à deux des shifts	AC AFIR : 0.028807 AC AFR : 0.001677 AFIR AFR : 0.105773		

Année		2023		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	29.90163	64.48428	-57.41539
	Probabilité que la pente soit significative	0.0020308	0.0027133	0.88468
	Probabilité que les pentes soient égales	0.021345		
Intercept	Valeurs d'intercept	-517.4893	-403.9362	-250.96612
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.012046		
	Comparaison deux à deux des intercepts	AC AFIR : 0.754118 AC AFR : 0.327302 AFIR AFR : 0.012965		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	5.6353e-06		
	Comparaison deux à deux des shifts	AC AFIR : 4.8074e-05 AC AFR : 6.2334e-06 AFIR AFR : 0.58656		

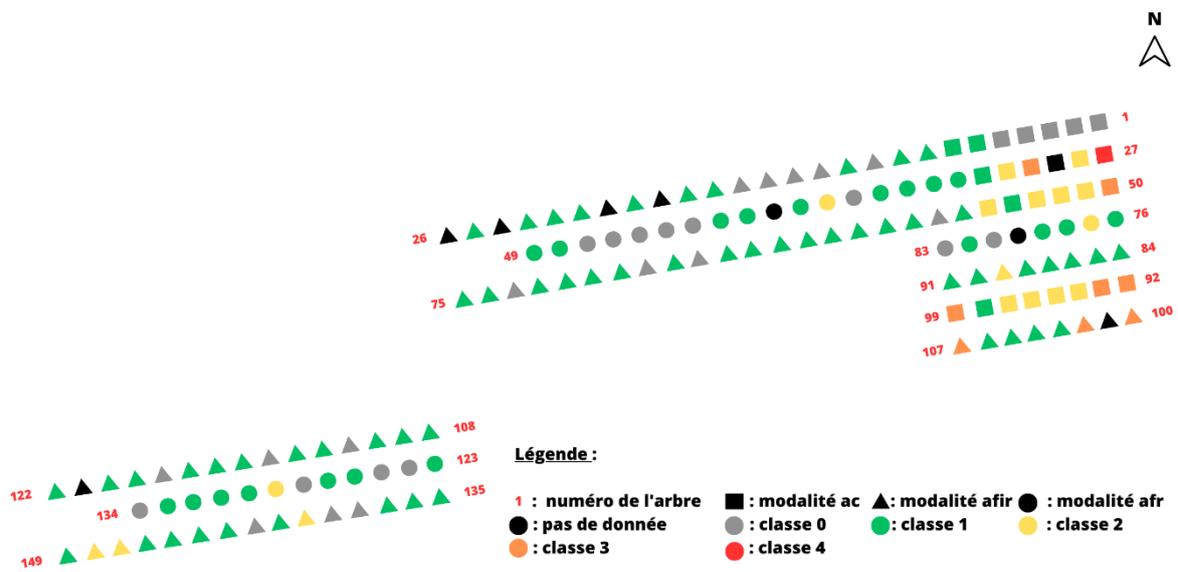
Annexe 5: Résultats de l'analyse SMA sur le taux de nouaison. Le seuil de significativité est 0,01. La significativité des pentes, leur signe et leur test d'égalité sont issus de l'analyse SMA classique :  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} * \text{modalité})$ . Les tests d'égalité des intercepts et des shifts sont issus de l'analyse SMA spécifique aux intercepts :  $sma(\text{nombre d'inflorescences ayant noué} \sim \text{nombre d'inflorescences} + \text{modalité, type} = \text{"elevation"})$  ou type = "shift". Les groupes désignent les modalités dont l'intercept ou le shift peut être qualifié de semblable (désignées par la même lettre) après une analyse par comparaison multiple.

Année		2022-2023 confondues		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	0.4573630	0.3819453	0.3422707
	Probabilité que la pente soit significative	0.00024129	1.1396e-07	0.016328
	Probabilité que les pentes soient égales	0.42553		
Intercept	Valeurs d'intercept	1.796593	-1.644301	-4.04549
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.94262		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	2.7387e-06		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 2.7161e-05 AC AFR : 4.6801e-06 AFIR AFR : 1		

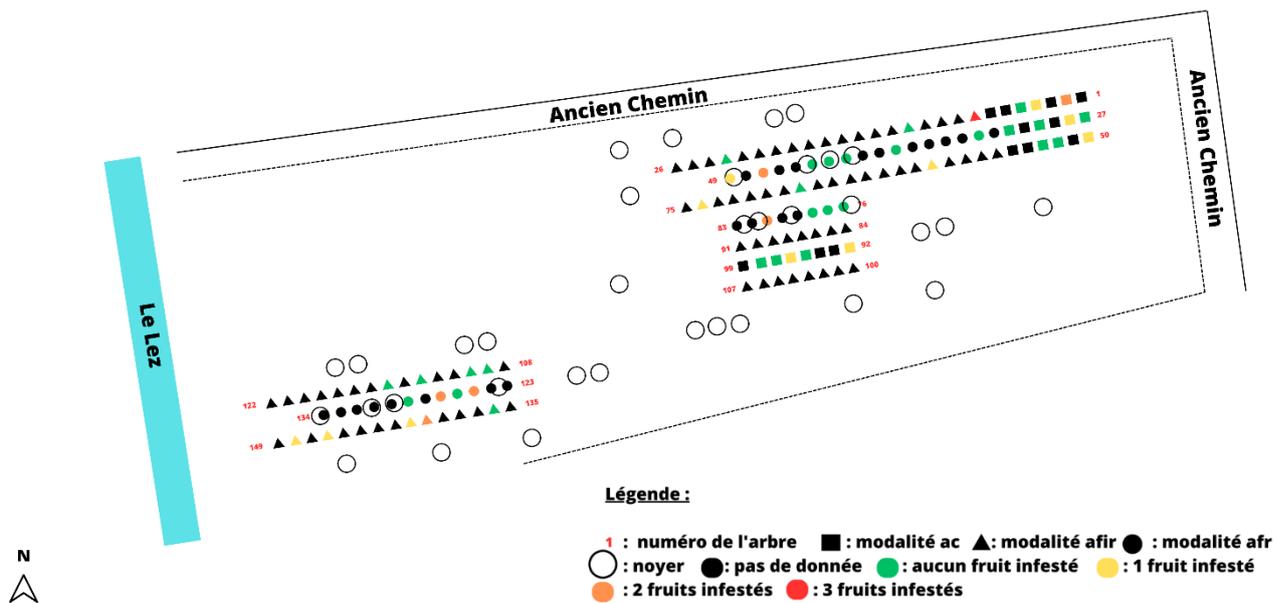
Année		2022		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	0.4542824	0.4098751	0.3703545
	Probabilité que la pente soit significative	0.053756	0.60369	0.012354
	Probabilité que les pentes soient égales	0.82767		
Intercept	Valeurs d'intercept	-27.08183	-27.37647	-38.139388
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.70748		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	0.038253		

Année		2023		
Modalité		AC	AFIR	AFR
Pente	Valeurs de la pente	0.4018515	0.4501578	0.3510109
	Probabilité que la pente soit significative	0.0078126	2.2673e-09	0.022738
	Probabilité que les pentes soient égales	0.54093		
Intercept	Valeurs d'intercept	1.754637	10.506978	13.19500
	Probabilité que les intercepts soient égaux	0.90695		
Shift	Probabilité que les shifts soient égaux	1.0171e-05		
	Comparaison deux à deux	AC AFIR : 3.6328e-05 AC AFR : 6.9714e-05 AFIR AFR : 0.82027		

Annexe 6: Carte de la répartition de l'infestation par les pucerons cendrés sur le verger en juillet 2023 (génération 1)



Annexe 7: Carte de la répartition de l'infestation par les carpocapses sur le verger en juillet 2023 (génération 1)



---

Le pommier en agroforesterie : analyse des composantes du rendement

Apple tree in agroforestry : analysis of yield components

---

---

**Mots-clés** : pommier, agroforesterie, arboriculture, architecture végétale, fruits

**Key-words** : apple tree, agroforestry, arboriculture, plant architecture, fruits

---

**Résumé :**

Le verger expérimental agroforestier du Domaine de Restinclières est composé d'une strate haute de noyers, avec laquelle sont placés des pommiers selon trois modalités différentes : en témoin agricole, en inter-rang des noyers et sur le rang des noyers. L'objectif de l'étude menée est de comprendre quel est l'effet de l'agroforesterie sur le pommier, dans un contexte de changement climatique où les vergers subissent des dégâts dus aux excès de températures. Plus précisément, ce stage se concentrait sur l'analyse des composantes du rendement de ce système, en comparant les trois modalités de 2018 à 2023. Cela nécessitait donc de réaliser une collecte de données de terrain pour l'année 2023, et des analyses statistiques sur les données déjà collectées les années précédentes. Les résultats montrent que les pommiers en agroforesterie, par rapport au témoin, présentent une structure plus fine mais sont de même hauteur, ont moins d'inflorescences mais un taux de floraison, de nouaison et une charge florale similaires. Ils ont des fruits de même taille, et le même nombre de chutes de fruit en été. Les pucerons cendrés (*Dysaphis plantaginae*) s'attaquent moins aux pommiers en agroforesterie, les carpocapses (*Cydia pomonella*) ne semblent pas affectés par ce paramètre. La présence de noyers au-dessus des pommiers affecte donc le pommier principalement dans sa croissance végétative, ce qui a un impact sur le rendement final. Des études sur différents aménagements et variétés doivent être menées afin de conclure sur la pertinence de ce système.

**Abstract :**

The experimental agroforestry orchard at Domaine de Restinclières is composed of a high stratum of walnut trees, with which are placed apple trees in three different modalities : some apple trees serve as the agricultural control, some are placed between the rows of walnut trees, and some are positioned within the rows of walnut trees. The objective of this study is to understand the effect of agroforestry on apple trees, within the context of climate change, where orchards are susceptible to damage from excessive temperatures. More specifically, this internship focused on the yield components of the system, comparing the three modalities from 2018 to 2023. To achieve this, we collected data for 2023, and we also drew upon data collected in previous years. The results indicate that agroforestry apple trees, when compared to the control, have a finer structure but have the same height, fewer inflorescences but a similar rate of flowering, fruit set and flower load. They have the same fruit size, and the same number of fruit falls in summer. Apple aphids (*Dysaphis plantaginae*) are less prevalent in agroforestry apple trees, while codling moths (*Cydia pomonella*) do not appear to be influenced by this factor. The presence of walnut trees above the apple trees predominantly affects the vegetative growth of the trees, which in turn has an impact on the final yield. Further studies on different arrangements and varieties are required draw conclusions regarding the suitability of this system.

**Nombre de pages du document final : 50**

Demandeur (entreprise, organisme...) :  
INRAE CENTRE OCCITANIE MONTPELLIER