HAL open science

Pommiers en système agroforestier : Architecture, phénologie et flux de sève

Martin Garaux, Benjamin Pitchers, Bertrand Vandoorne, Pierre-Éric Lauri

To cite this version:

Martin Garaux, Benjamin Pitchers, Bertrand Vandoorne, Pierre-Éric Lauri. Pommiers en système agroforestier : Architecture, phénologie et flux de sève. [Stage] INRAE. 2018. hal-03030300

HAL Id: hal-03030300

https://hal.inrae.fr/hal-03030300v1

Submitted on 30 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ISA LILLE
48 Boulevard Vauban,
59 046 Lille Cedex

Montpellier
2 Place Viala, Bât.
Montpellie

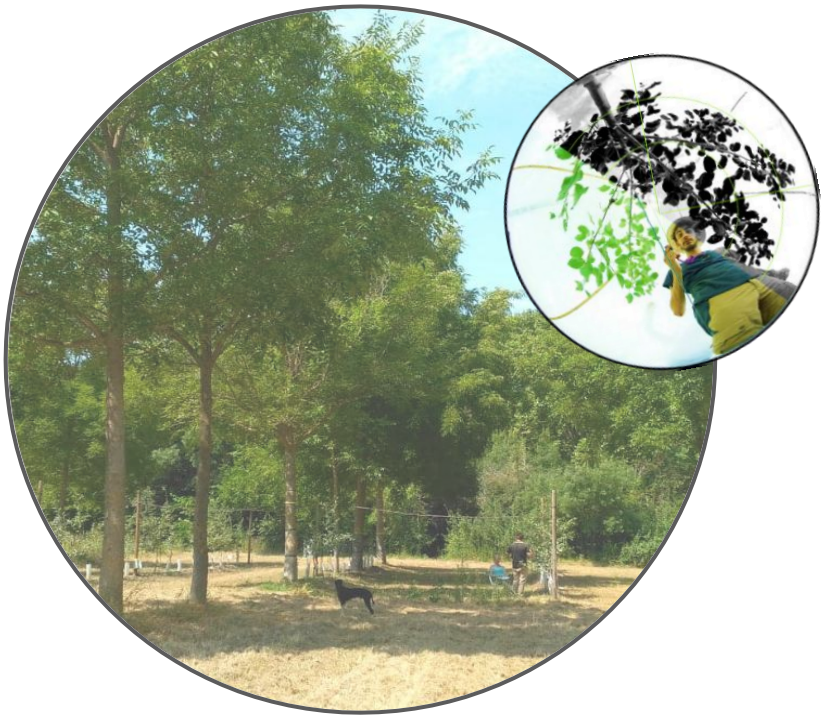
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur ISA LILLE

Pommiers en système agroforestier :

Architecture, phénologie et flux de sève

Martin Garaux
Promotion ISA 51
Date de soutenance : 04/09/2018



Année académique 2017/2018
Maître de stage : Pierre-Eric LAURI
Co-encadrant : Benjamin PITCHERS
Enseignant référent : Bertrand Vandoorne

Résumé

La diversification des systèmes agricoles est un enjeu majeur dans le contexte actuel de réduction des produits phytosanitaires. De nombreux travaux de conception d'agroécosystèmes plurispécifiques tentent de substituer les services écosystémiques aux intrants chimiques. La culture de la pomme, détenteur du record de nombre de traitements, doit faire face à ces enjeux. Le projet GAFA, mis en place par l'équipe ressource de l'UMR System de Montpellier, aborde ce problème en proposant un concept de verger agroforestier à trois strates : des noyers hybrides (23ème année), des pommiers de variété Dalinette (3ème année) et une culture de légumineuse dans l'inter-rang. L'objectif du projet est d'étudier le comportement des pommiers dans différents contextes de compétition pour la lumière. Les pommiers sont cultivés selon trois modalités caractérisées par leur position relative aux noyers : rang, inter-rang et témoins (verger traditionnel sans noyers). Cette étude se concentre sur le développement de l'architecture, la phénologie du pommier ainsi que les flux de sève. Par allométries, les surfaces foliaires ont été déterminées et des dynamiques de la croissance et des stades phénologiques ont été réalisées. Les résultats révèlent qu'une forte compétition (modalité rang) pour la lumière engendre un retard de développement des pommiers qui présentent des surfaces foliaires plus faibles, des ramifications moins nombreuses, et également moins d'inflorescences. Les arrêts de croissance sont plus longs et plus fréquents. Ces retards de développement sont corrélés à une intensité de flux de sève plus faible. Les pommiers situés en conditions d'expositions intermédiaires (inter-rang) présentent cependant un retard de développement sur les témoins moins important que les pommiers des rangs de noyers, voire négligeable.

Mots clés : Pommier, Agroforesterie, Architecture, Phénologie.

Abstract

Diversification of agricultural system has become a major stake in the current movement for the decrease of pesticides use. Various works on multispecies agroecosystem conception try to substitute ecosystemic services to chemical inputs. Apple tree orchards, holder of highest number of treatment record, must face these stakes. GAFA project, set up by the resource team of the UMR System of Montpellier, tackles this issue through the conception of an agroforestry orchard composed with three layers: hybrid walnut trees (23rd years), Dalinette apple trees (3rd year), and a leguminous crop in the inter row. The aim of this project is to study the behaviour of apple trees in various light competition contexts. These apple trees are classed in three modalities characterized by their position relative to the walnut trees: row, inter-row and control (traditional orchard without walnut). This study focuses on the development of apple trees architecture, phenology and sap flow. Using allometric relationships, the leaf areas were determined and a dynamic of growth and phenological stages were realized. The results reveal that a strong competition (modality "row") for the light causes a delay in the development of the apple trees which present smaller leaf areas, fewer ramifications, and less inflorescences. Stunting is longer and more frequent. These developmental delays are correlated with a lower sap flow intensity. However, apple trees in intermediate exposure conditions (inter-row) have a developmental delay on the control that is much smaller than the row-apple trees, or even negligible.

Key-words: Apple trees, Agroforestry, Architecture, Phenology

Remerciement

Ce projet a été initié et dirigé par Pierre-Eric Lauri, qui a encadré mon stage. Sa disponibilité, son implication et sa tolérance m'ont permis d'obtenir de précieux conseils. Merci de m'avoir intégré dans ce projet, et de m'avoir aguillé dans la réalisation de ce mémoire.

Mon stage s'est inscrit dans la première année de thèse de Benjamin Pitchers qui m'a co encadré. Les nombreuses discussions et les questionnements n'ont cessé d'alimenter ma réflexion et m'ont permis de m'immerger dans ce projet. Notre collaboration pendant les relevées d'architecture a rendu agréables ces longues journées terrain. Merci aussi pour les formations de statistiques qui m'ont aidé dans le traitement des données.

Merci également à mon enseignant référant de l'ISA Monsieur Bertrand Vandoorne pour ses recommandations qui ont su donner une meilleure direction à mon rapport.

Un grand merci à toute l'équipe des stagiaires et des doctorants pour l'ambiance amicale que chacun a contribué à créer.

Je tiens enfin à remercier l'équipe des techniciens Lydie Dufour, Alain Sellier, Jean-François Bourdoncle, avec qui les opérations de terrain se sont passées dans une atmosphère chaleureuse.

Table des matières

Introduction 1

Contexte de l'étude 3

1 - PRESENTATION DE L'UMR SYSTEM : 3

2- CADRE DE L'ETUDE : 4

Etat de l'art 5

1- L'AGROFORESTERIE, UN NOUVEAU NOM POUR UNE PRATIQUE ANCIENNE 5

1.1 L'Agroforesterie dans le monde et dans le temps 5

1.2 Agroforesterie et noyers : 6

2- LES INTERETS DE L'AGROFORESTERIE EN TERMES DE RESILIENCE 7

3- L'ARCHITECTURE ET LE FONCTIONNEMENT DU POMMIER. 10

3.1 Historique de Malus domestica 10

3.2. Morphologie et architecture du pommier. 10

3.3. La transpiration et le flux xylémien 12

3.4. Le cycle de développement du pommier 12

Problématique et hypothèses 14

Matériels et Méthodes 15

1- PRESENTATION DU DISPOSITIF 15

1.1 La parcelle d'étude et le matériel végétal : 15

1.2 Le sol 16

1.3 Le climat 17

2- PRESENTATION DES PROTOCOLES 17

2.1 Mesure de la Surface foliaire 17

2.2 Calcul du LAI 18

2.3. Arrêts de croissance : 20

2.4 Stades phénologiques : 20

2.5 Flux de sèves : 20

2.6 Analyse des données : 21

Résultats 22
1. ENVIRONNEMENT DES POMMIERS : 22
1.1 Lumière incidente 22
1.2. NCI 2018 23
2. ARCHITECTURE DES POMMIERS EN 2018 24
2.1 la ramification de 2017 24
2.2. La surface foliaire de 2018 24
2.3. Le nombre d'inflorescence de 2018 et leur structure 29
3. LA PHENOLOGIE VEGETATIVE ET FLORAL D'AVRIL A JUILLET 2018 : 30
3.1 les arrêts de croissance 30
3.2 La phénologie des fleurs : 31
4. FLUX DE SEVES 32
4.1. Quantité d'eau transpirée… 32
4.2. … En liens avec l'architecture 33

Discussion 34
1. L'IMPACT DE L'AGROFORESTERIE SUR LES POMMIERS : 34
1.1. Une architecture foliaire moins développée : 34
1.2. Une production d'inflorescence diminuée 35
1.3. Une quantité d'eau transpirée plus faible. 35
2. CRITIQUES DES RESULTATS : 36
3. PERSPECTIVES DE RECHERCHES : 37
3.1. Suivis de la croissance, flux de sèves et production de fruits 37
3.2. Le NCI 37
3.3. Améliorer le protocole LAI 37
3.4. Observations du terrain 38
4. PERSPECTIVES AGRONOMIQUES 38

Conclusion 40

Introduction

« L'imagination et l'ingéniosité paysannes sont au rendez-vous des enjeux environnementaux, climatiques et sociaux de notre époque ». Cette phrase de Nicolas Verzotti, directeur de l'exploitation la ferme du Colibri (Vaucluze) illustre la démarche dans laquelle s'inscrit ce projet.

Depuis la fin du XXème, le modèle agricole résultant de la « Révolution verte » des années 50 est remis en question. L'intensification de la production liée à l'arrivée de la mécanisation et de la chimie a répondu à des besoins alimentaires grandissant dans un contexte post seconde guerre mondiale (Rivry-Fournier 2005). Les systèmes de cultures se sont simplifiés (monocultures, rotations courtes…) et le remembrement a agrandi les parcelles en séparant les arbres et les cultures dans le paysage (Fuzeau et al 2012). Mais l'introduction de ces changements s'est accompagnée d'une dégradation de qualité des sols, de l'eau, de la biodiversité, mais aussi de la durabilité économique des exploitations (Cox and Atkins 1979, Gliessman 1990, Stoate 2001). La mise en perspectives de ces constats et des prévisions démographiques et climatiques a fait naitre une volonté du monde agricole de s'adapter à ces nouveaux enjeux.

Ce souhait partagé par les agriculteurs, et plus largement par la société (Claveirole 2016), trouve des réponses dans des innovations agronomiques permettant de diversifier la production pour s'adapter à des aléas de moins en moins prévisibles, et de diminuer l'utilisation d'intrants phytosanitaires pour des questions économiques et environnementales. L'innovation est un processus défini par le GREMI (Groupe de Recherche Européen sur les Milieux Innovateurs) comme l'intégration d'un élément qui détermine et favorise la dynamique et la transformation du système techno-productif. (Maillat et al 1993). Cet élément, matériel (végétal, technologique, chimique…) ou immatériel (rotation, méthode de travail…), n'est pas systématiquement nouveau au sens inédit du terme, mais absent du système considéré (Toillier et al, 2018).

En ce sens, l'agroforesterie constitue un exemple d'innovation. Ce système de production millénaire repose sur l'association d'espèces ligneuses pérennes et d'espèces annuelles ou pluriannuelles sur une même parcelle (Nair 1993). Eliminés par le remembrement du siècle dernier, les arbres et les haies font peu à peu leur retour dans les cultures (Van Lerberghe 2015). Cette réintégration de l'agroforesterie aux systèmes de culture s'inscrit dans une démarche innovante répondant aux enjeux de diversification et de durabilité des systèmes de culture (Dupraz et Liagre 2008). D'un point de vue environnemental, elle permet de réduire l'utilisation d'intrants en s'appuyant sur les services écosystémiques (Millenium Ecosystème Assessment 2005), et d'optimiser l'utilisation des ressources du sol. De plus, la diversification des sources de revenus par parcelle, en valorisant les arbres pour le bois d'œuvre, de chauffage ou pour les fruits, offre plus de résilience à l'exploitation (Jose et al 2018). Les systèmes agroforestiers principalement retrouvés en climat tempéré sont constitués d'une strate herbacée dominée par une strate arborée. Il est néanmoins possible d'enrichir un système de strates intermédiaires.

Sous climat tropical, la combinaison de plusieurs strates arborées est assez fréquente (Dupraz et Liagre 2008). Dans certains pays, des parcelles se transforment en forêts cultivées mélangeant papayers, manguiers, cocotiers, poiriers… Ce type de conduite est peu fréquente en Europe, mais certains exemples existent, comme l'Arbustra qui consiste à cultiver de la vigne sous des arbres tuteurs.

Cultiver des essences fruitières en système agroforestier pourrait présenter des intérêts en termes de diminution d'intrants par le biais des services écosystémiques. En effet, les productions fruitières font partie des cultures les plus consommatrices d'intrants (insecticides, fongicides…), notamment la pomme qui arrive en tête du classement (Agreste 2015, Dewailly 2015). Le pommier est classiquement cultivé en vergers monospécifiques (Van Lerberghe 2015). Il se retrouve également dans des systèmes sylvopastoraux mais reste peu associé à d'autres cultures. Sa forte sensibilité aux ravageurs tels que l'oïdium, la tavelure ou le carpocapse oblige le passage d'une trentaine de traitements en moyenne (Trillot et al 2002). Le pommier est donc une espèce pour laquelle la conduite en système agroforestier, conjuguant d'autres plantes pérennes (ex, arbre à bois, herbacée) et/ou annuelles (ex, céréale, plante maraichère), peut se révéler bénéfique sur le plan de la réduction d'intrants. Cependant, les compétitions pour la lumière et l'eau entre le pommier et ces espèces associées affectent également son développement et sa croissance.

Le projet GAFA (Growing AgroForestery systems with Apple), développé à l'UMR système de Montpellier, aborde cette question de l'effet d'un tel environnement sur les dynamiques de développement et de croissance du pommier. Plus précisément, l'observation se porte sur des pommiers cultivés sous différents contextes de compétition vis-à-vis de noyers hybrides plus âgés. L'objectif global de ce projet de recherche est de contribuer à l'enrichissement des systèmes agroforestiers à travers la conception de systèmes plurispécifiques, incluant des fruitiers. Les connaissances ainsi produites devraient servir à enrichir progressivement les systèmes existants, le plus souvent bi-strates (arbre à bois/céréales ou arbre fruitier/maraichage). A plus court terme (2020) l'objet de la recherche se concentre sur l'architecture du pommier et les relations sources-puits au sein de l'arbre cultivé en système agroforestier à trois strates (annuelles – fruitiers – arbre à bois).

L'étude présentée ici s'intègre dans cette réflexion et interroge le comportement de jeunes pommiers soumis à un contexte agroforestier. Plus précisément, il s'agit de répondre à la question : De quelle manière se manifestent les compétitions aériennes sur la croissance et la mise en place de l'architecture des pommiers en agroforesterie ? Après avoir présenté le contexte de l'agroforesterie, le pommier et sa physiologie, le dispositif de recherche et les méthodes permettant de répondre à cette question seront détaillés. Les résultats concernant l'architecture, la phénologie et les flux de sèves des pommiers seront décrits. Enfin ces résultats seront discutés et des pistes de recherche seront mises en avant.

1 Contexte de l'étude

1 - PRESENTATION DE L'UMR SYSTEM :

L'Unité Mixte de Recherche System (fonctionnement et conduite de systèmes de culture tropicaux et méditerranéens) fait partie des 24 unités présentes sur le campus de Montpellier Sup Agro. Elle est placée sous la tutelle du CIRAD, de l'INRA et de Montpellier SUP AGRO, et appartient au département MRPS (milieu, production, ressources et systèmes). Ses objectifs sont de produire des connaissances et des outils d'évaluation et de conception de systèmes de culture conciliant services écosystémiques et performances économiques. Les domaines de recherche principaux sont l'agroforesterie et la viticulture, abordés à travers quatre équipes de recherche, (1) BASE : Biodiversité Associée et Services Ecosystémiques, (2) TTR : Transitions, Trajectoires, Résilience (3) Ressources : disponibilité, partage et utilisation des ressources (lumières, eau et azote) dans les systèmes plurispécifiques et (4) SYME : Systèmes de culture, Modélisation, Expérimentation. Ces quatre équipes regroupent 33 agents permanents au sein de l'UMR (figure 1) dirigée par Christian Gary (INRA, directeur) et Patrick Jagoret (Cirad, co-directeur). L'UMR system fut créée en 2001 par Jacques Wery à partir de la séparation d'une branche de l'UMR Lepse (Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux).

Les recherches menées par cet UMR ciblent les systèmes agroforestiers et viticoles tempérés méditerranéens et tropicaux, à travers des dispositifs de recherches à Montpellier mais aussi au Cameroun et en Amérique Centrale. Ces dispositifs ont pour but d'explorer et de concevoir des systèmes de culture écologiquement intensifs et performants. Parmi ces thèmes généraux, les travaux de l'équipe Ressources, dans lesquels s'inscrit ce mémoire, se concentrent sur la disponibilité, le partage et la valorisation des ressources au sein d'agroécosystèmes complexes. L'objet des recherches est de caractériser les interactions entre espèces associées, autour de la compétition et/ou facilitation d'accès pour les ressources (eau, lumière et azote), afin de concevoir des systèmes de culture plurispécifiques (2 espèces ou plus) plus efficients.

Les expérimentations présentées dans cette étude se situent à quinze kilomètres au Nord de Montpellier dans le domaine de Restinclières. Site remarquable pour son patrimoine naturel et architectural, le domaine de Restinclières abrite le dispositif d'expérimentation en agroforesterie le plus important d'Europe. Ce dispositif rassemble 8 agents de l'UMR SYSTEM et les études sont menées en partenariat avec 3 agriculteurs, les bureaux d'études d'AGROOF, le Conseil Général de l'Hérault, de la Chambre d'Agriculture de l'Hérault et de Valorhiz ainsi que différentes UMR de l'INRA de Montpellier (Eco&Sols, AMAP, EcoBio, …). Le domaine compte environ 220 hectares appartenant au département de l'Hérault, dont 54 sont utilisés pour les expérimentations de l'INRA, du CRPF (centre régional de la propriété foncière) ou encore de la Chambre d'Agriculture. Les travaux

d'aménagement ont débuté en 1995 avec la plantation de 12 000 arbres financée par le Conseil Général de l'Hérault et la DDAF, et imaginée par l'INRA sous l'impulsion de Christian Dupraz.

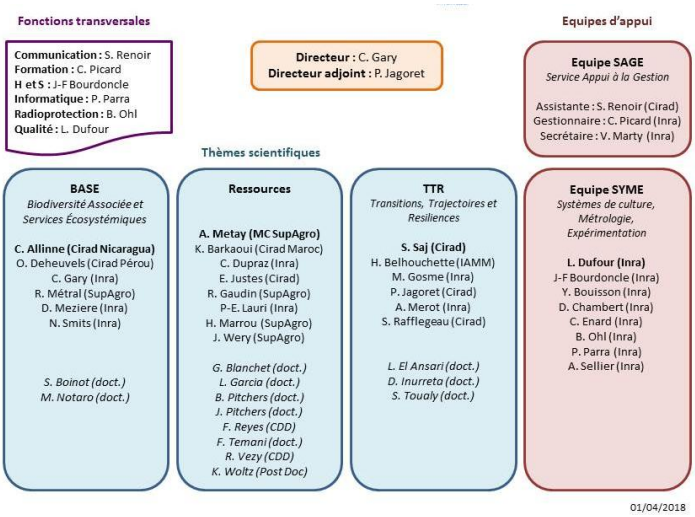


Figure 1 : organigramme de l'UMR System (source : INRA 2018)

2- CADRE DE L'ETUDE :

Cette étude intervient deux ans après l'installation d'un dispositif d'expérimentation qui se veut précurseur sur le sujet des agroécosystèmes plurispécifiques. Ce dispositif consistant pour le moment en un système à trois strates (légumineuses – pommiers de 2 ans – noyers de 23 ans), constitue un premier pas dans l'élaboration de modèles plus complexes et diversifiés. Le projet de recherche GAFA ayant permis la mise en place et l'étude d'un tel dispositif a été lancé en 2016 par Pierre-Eric Lauri, (chercheur à l'INRA dans l'équipe Ressources de l'UMR system). Dans le cadre de ce projet, une thèse démarrée en novembre 2017 est financée par la Fondation de France. Cette thèse menée par Benjamin Pitchers, et codirigée par Pierre-Eric Lauri et Frédéric Do (chercheur à l'IRD dans l'UMR « Eco&Sols » de Montpellier), a pour objet d'étude la compétition interspécifique entre noyers et pommiers en contexte agroforestier au niveau des parties aériennes. Les pistes de recherches portent donc sur l'influence des noyers sur l'architecture des pommiers, la surface foliaire, les flux de sève, et la dynamique de mise en place des différents stades phénologiques. Un premier stage de fin d'études a été réalisé en 2017 (par Benjamin Pitchers) permettant de mettre en lumière les premières différences dans la croissance et le développement des pommiers alors âgés de deux ans. Cette étude s'inscrit donc dans la première année de relevés de données et de résultats concernant la thèse, mais s'appuie sur les observations faites lors d'un premier état des lieux en 2017. Le sujet du stage porte plus précisément sur la relation entre le développement foliaire des pommiers et les flux de sève selon différents degrés de proximité par rapport au noyer.

2 Etat de l'art

1- L'AGROFORESTERIE, UN NOUVEAU NOM POUR UNE PRATIQUE ANCIENNE

Une définition relativement détaillée de P.K. Nair (1993) caractérise l'agroforesterie comme *« un système d'utilisation des terres dans lequel les plantes vivaces ligneuses (arbres, arbustes, palmiers, bambous) sont délibérément utilisées comme cultures agricoles (ligneuses ou non), animales ou les deux, ou dans une forme d'arrangement spatial ou de séquence temporelle ».* Il ajoute *« dans les systèmes agroforestiers, il existe à la fois des interactions écologiques et économiques entre les différentes composantes »*. Plus récemment Van Noordwijk et al (2016) en donnaient une définition plus sommaire et concise : *« L'agroforesterie, une contraction des termes agriculture et foresterie, est l'utilisation des terres qui combine les aspects des deux, y compris l'utilisation agricole des arbres »*. Il s'agit donc d'une pratique agricole consistant à optimiser la valorisation des ressources d'une parcelle à travers un système plurispécifique, en s'appuyant sur la diversité d'espèces pérennes et annuelles, et leurs interactions

1.1 L'Agroforesterie dans le monde et dans le temps

Des exemples de systèmes agroforestiers à travers le monde et le temps sont innombrables. En Asie, en Afrique, en Amérique ou en Europe, l'utilisation de terres arborées pour des cultures annuelles ou pérennes est une pratique ancestrale (Nair 1993). En Europe, par exemple, certaines traces d'agroforesterie datent de l'âge de bronze (Eichhorn et al. 2006). Au Moyen âge une pratique courante consistait à défricher et brûler les débris d'une parcelle de forêt dégradée afin d'y cultiver des cultures vivrières, en y replantant des arbres dans le même temps (Nair 1993).

Figure 2 : Illustration du Tacinium Sanitis : culture d'ail sous des arbres au moyen âge. (D'après Dupraz et Liagre 2008, et Daunay et al 2009)

Une scission apparaît cependant à partir du vingtième siècle. Alors que les pays du Sud en développement cherchent à optimiser ce procédé (par accumulation de strates arborées et cultivées grâce aux cacaoyers, caféiers, manguier, teck, ou cocotier par exemple) (Dupraz et Liagre 2008), l'agroforesterie est peu à peu abandonnée dans les pays du nord (Guyomard et al. 2013, Van Elsen 2000). La mécanisation et la motorisation de l'agriculture font de l'agroforesterie un modèle « obsolète », où les haies, arbres et arbustes constituent des obstacles à l'agrandissement des parcelles et aux engins agricoles plus imposants (Dupraz et Liagre 2008, Van Elsen 2000, Guitton et al. 1994,).

Cependant dans les années 1970-80, les limites environnementales, écologiques et économiques de l'intensification que l'agriculture a connues au cours de la « révolution verte » sont mises en lumière (Stoate and al. 2001, Van elsen 1999, Hüppe 1990). Des études sont alors développées sur les dangers des systèmes intensifs (érosion, sensibilité aux maladies, pollution des nappes, perte de biodiversité, …) ainsi que sur la conception de systèmes de culture plus durables dans lesquels la diversification des cultures prend une place primordiale. Dans ce contexte l'utilisation oubliée des arbres en agriculture connaît un regain d'intérêt (Guyomard et al. 2013). L'étude de cette pratique met en lumière les bénéfices agronomiques environnementaux, et économiques potentiels qu'elle peut offrir, et permet de mieux la définir et de lui donner un nom.

Figure 3 : photo d'un champ de céréales en agroforesterie (d'après Dupraz et Liagre 2008)

Désormais, l'agroforesterie est réintégrée à certains systèmes de culture, dans le but de les rendre plus durables, et adaptés aux conduites de culture d'aujourd'hui, et notamment à la mécanisation (Young 1995, Baumer 1997, Dupraz et al. 2011, Noordwijk et al. 2016). Cette adaptation de l'agroforesterie aux systèmes de culture actuels en matière de conduite des arbres (disposition, densité…) fait de sa réapparition une innovation agronomique (Nair 1993, Dupraz et Liagre 2008, Guyomard et al. 2013). De plus, les arbres ne sont plus utilisés comme simple facteur d'amélioration du milieu, à l'image des techniques centenaires (Van Elsen 2000), mais comme source supplémentaire de revenu (production de bois d'œuvre, de bois chauffage, de BRF, de fruits, ou même de fourrage). Depuis 2006, le statut de terres agricoles est attribué aux parcelles en agroforesterie, officiellement reconnues par l'Union européenne et désormais éligibles aux DPU (Droits à Paiement Unique) (Guyomard et al. 2013).

1.2 Agroforesterie et noyers :

Le noyer du Dauphiné illustre particulièrement bien l'adaptation que connait l'agroforesterie à la modernisation de l'agriculture (Dupraz et Liagre 2008). Dans cette région, des traces de vergers de noyers datant de l'époque romaine montrent la présence de cultures intercalaires. Aujourd'hui, le noyer a résisté à la modernisation et cette conduite adaptée aux passages des engins agricoles (écartement des rangs), permet une meilleure production de biomasse par noyer (figure 4). La durabilité de cette association est liée à la complémentarité du cycle du noyer par rapport aux cultures de céréales d'hiver. Selon une étude de G. Talbot (2011), le débourrement tardif du noyer (fin avril début mai) laisse le temps au blé de se développer dans les premiers stades de sa croissance (figure 5). Au moment des sécheresses estivales, il fournit un microclimat. Le maïs peut également servir de culture intermédiaire dans les premières années de croissance du noyer, afin de le forcer à se développer en hauteur et former les charpentières plus rapidement. Cette association de culture permet également une meilleure durabilité économique. En plus du revenu annuel de la culture intercalaire et de la production de noix, l'arbre constitue un capital sur pied très intéressant pouvant valoir entre 300 et 1000 euros le mètre cube (Dupraz et Liagre 2008).

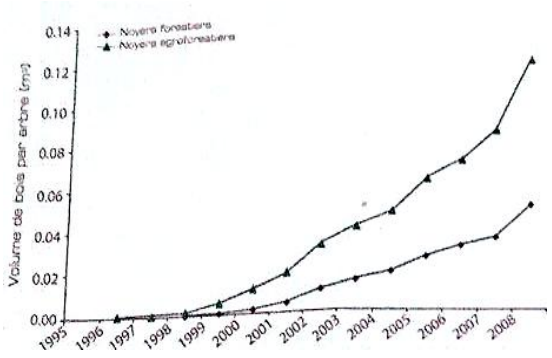


Figure 4 : Dynamique du volume de biomasse produit par noyer (en m^3) par an selon des conduites classiques (ronds rouges) ou agroforestières (triangles verts). (Dupraz et Liagre 2008)

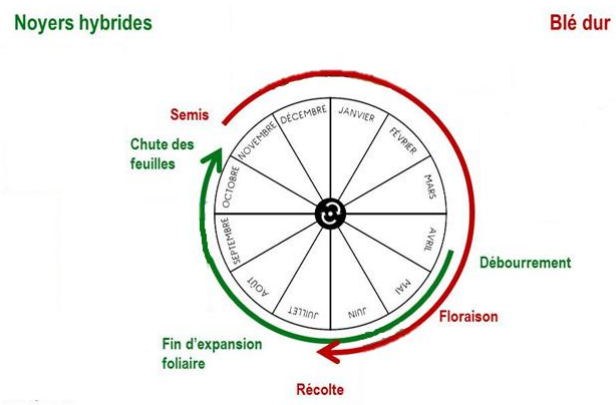


Figure 5 : Cycles complémentaires du blé dur et du noyer hybride (Talbot 2011)

2- LES INTERETS DE L'AGROFORESTERIE EN TERMES DE RESILIENCE

Le but de l'Agroforesterie est triple. Il s'agit (1) d'optimiser les ressources en eau, lumière, et nutriments du sol d'une parcelle, (2) de diversifier les sources de revenu provenant d'une parcelle par des productions variées et étalées dans le temps, et enfin (3) de favoriser au mieux les services écosystémiques (définis lors du Millenium Ecosystem Assessment de 2005), en substitution de certains produits phytosanitaires. De nombreuses études permettent de confirmer ces impacts.

Les performances économiques et agronomiques d'une parcelle cultivée en agroforesterie sont globalement meilleures (Guyomard et al. 2013). En termes de SAU et de rendements de la culture sous-jacents aux arbres, les résultats sont en baisse, mais au regard de la biomasse globale produite sur une parcelle en agroforesterie, les résultats peuvent être jusqu'à 30% supérieurs à des parcelles reboisées ou occupées par une culture annuelle uniquement (Grave et al. 2006). Ce principe est appelé LER, Land Equivalent Ratio, (figure 6) et peut s'expliquer entre autres par une optimisation des ressources partagées par les espèces présentes sur un même sol, dans le temps et l'espace (Dupraz et al. 2011).

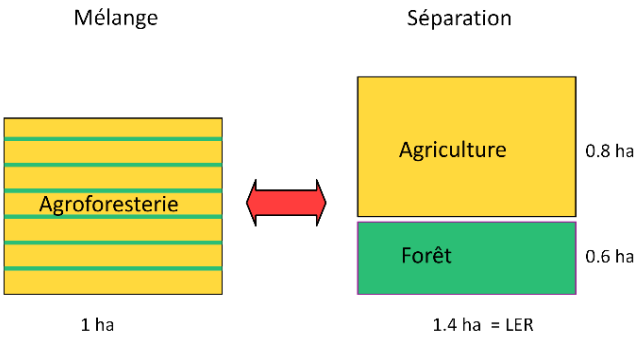


Figure 6 : principe du LER (d'après Dupraz et al. 2011)

Outre cette augmentation de biomasse produite, l'agroforesterie présente l'avantage de diversifier les sources de revenu de l'exploitation (Dupraz et Liagre 2008). Les arbres, par leur valorisation à long terme, ajoutent un capital sur pied aux ventes des récoltes annuelles de la culture associée, ce qui peut être très intéressant à condition de sélectionner les essences de bois adaptées à la valorisation souhaitée, que ce soit en fruitier, bois d'œuvre ou énergétique (Guyomard et al. 2013,

Guitton et al. 1994). Cette diversité de revenu permet de diminuer la sensibilité aux aléas économiques et climatiques auxquels doivent faire face les agriculteurs.

En plus de l'aspect économique, l'agroforesterie se révèle intéressante sur le plan environnemental. De nombreuses études ont mis en lumière une augmentation de la capacité de séquestration de carbone du sol dans des parcelles agroforestières (Jose 2008, Dupraz et al. 2011. Noordwijck et al. 2016). Dans un contexte où, en France, l'agriculture représente près d'un cinquième des émissions de gaz à effet de serre (Pellerin et al. 2013), la perspective de limiter les émissions nettes de CO2 fait de l'agroforesterie un levier contre le réchauffement climatique.

L'agroforesterie offre également des services en termes de biodiversité. Tout d'abord dans des paysages agricoles généralement très ouverts, les arbres servent de refuge à la faune ou la flore naturelle (Jose 2008). De plus en termes de préservation des sols, la présence des arbres permet de limiter l'érosion de façon pérenne, ce qui peut inscrire l'agroforesterie dans des réflexions de conservation des sols (Young 1995).

Ces différents impacts de la présence des arbres dans les systèmes agricoles peuvent être qualifiés de services écosystémiques. Les services écosystémiques caractérisent certaines formes d'interactions positives entre les éléments d'un même écosystème ou agroécosystème. Les différents types d'interactions existant entre deux espèces sont décrits suivant un vocabulaire spécifique en écologie (Annexe 1) permettant de renseigner les effets positifs ou négatifs sur l'une ou l'autre des espèces concernées (Jose et al. 2004). En agroforesterie, ces interactions sont présentes au niveau des parties aériennes et sous-terraines entre les arbres et la culture sous-jacente (figure 7). Il est donc important qu'un système agroforestier soit conduit de manière à favoriser les interactions « positives » (apport de matière organique, présence d'insectes auxiliaires…) et diminuer les interactions « négatives » (compétitions pour les ressources, présence de ravageurs...). Parmi les interactions aériennes, l'ombre présente un inconvénient majeur en système agroforestier pour le rayonnement intercepté par la culture sous-jacente mais elle peut être atténuée en diminuant la densité d'arbre. De plus, l'ombre peut limiter le réchauffement du sol en journée et réduire l'évaporation l'eau (Dupraz et Liagre 2011). Ce microclimat (protection du vent et régulation des températures) constitue un atout important de l'agroforesterie de même que l'attrait d'insectes auxiliaires de culture (tableau 1).

Tableau 1 : : interactions aériennes entre les arbres et les cultures annuelles en système agroforestier (noir = non impacté, rouge = impacté négativement, vert = impacté positivement) Jose et al. 2004.

Facteurs environnementaux	**Interactions**	**Effets**	**Interactions**
Rayonnements	Compétition	Chaque espèce intercepte un rayonnement plus faible	Arbre ↔ culture
	Amensalisme	Les espèces sous la canopée souffrent d'un manque de lumière	Arbre → culture
Vent / températures	Commensalisme	Des arbres âgés peuvent réduire la vitesse du vent et créer un micro climat sous la canopée favorable à la culture	Arbre → culture
Niche écologique	Mutualisme	Les arbres et la culture constituent un abri favorisant la diversité d'insectes auxiliaires	Arbre ↔ culture
	Prédation, parasitisme	Les arbres sont un abri pour certains ravageurs	Arbre ↔ culture

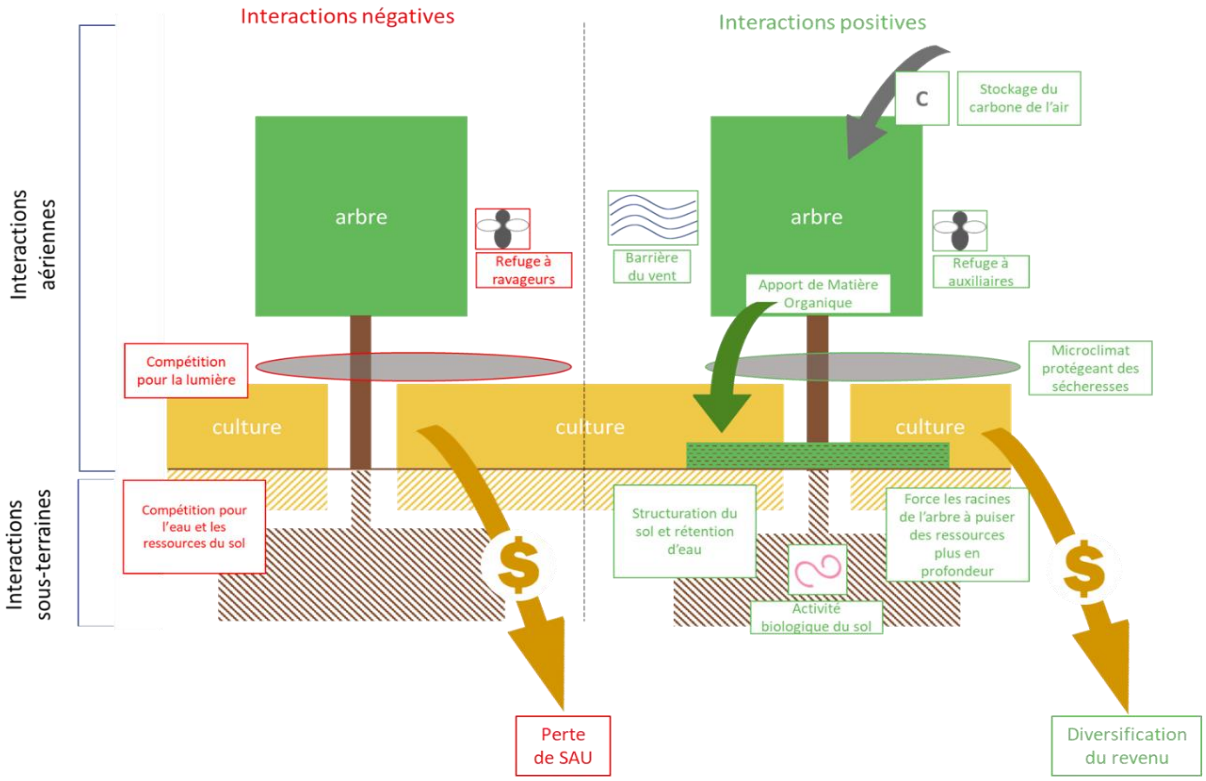


Figure 7 : Schéma récapitulatif des interactions aériennes et sous-terraines entre les arbres et la culture sous jacente dans un système agroforestier classique. (encadrés rouge : interactions négatives / encadrés verts : interactions positives)

De manière générale, l'arboriculture est un secteur agricole très consommateur de traitement phytosanitaire. Menacé entre autres par la tavelure, l'oïdium le puceron cendré, ou encore le carpocapse, le pommier domine le classement des traitements (Dewailly 2014, Trillot et al. 2002). Largement en tête devant la pêche, la prune, l'abricot ou la cerise, une pomme reçoit en environ 36 traitements différents (fongicides, bactéricides, acaricides, insecticides, herbicides, régulateurs de croissance) ce qui en fait la production en France au plus fort IFT (Agreste 2015). La France fait partie des plus gros exportateurs de pommes mondiaux (7ème en 2016) et des plus gros producteurs européens, derrière la Pologne, l'Italie, avec 1,82 million de tonnes produites en 2016 (Avelin 2017). Cependant, la consommation est en légère baisse sur l'année 2016 due à des prix plus élevés. Le gel survenu en avril 2016 aurait causé une baisse de production de 5% par rapport à la moyenne 2012-2016 en France (Agreste 2017), et une baisse record en Europe depuis 10 ans de 21%. Ces aléas créent un contexte économique peu stable pour une production très consommatrice de produits phytosanitaires (Agreste 2012).

A travers les différents services qu'elle peut offrir, l'agroforesterie peut répondre à des enjeux du même ordre en agriculture de manière générale (diminution d'intrants, diversification des revenus…) et pourrait consister en un levier concernant la production de pommes. Cependant, la culture des pommiers en contexte agroforestier est quasi inexistante. Historiquement, les pommiers peuvent se trouver en système de sylvopastoralisme (comme en Normandie avec les élevage ovins et bovins) ou en Maraichage (Van Lerberghe 2015). Quelques études ont aussi porté sur les compétitions entre pommier et culture annuelle (Gao et al. 2013, Schroth 1995), mais le pommier constitue toujours la strate supérieure dans ces systèmes agroforestiers. Les effets d'une conduite où le pommier serait dominé par une autre essence d'arbre sont donc inconnus.

3- L'ARCHITECTURE ET LE FONCTIONNEMENT DU POMMIER.

3.1 Historique de Malus domestica

La pomme est l'un des fruits les plus anciens et les plus répandus à travers le globe en zone de climat tempéré essentiellement (Harris et al. 2002). En Europe, l'archéologie a mis en évidence une consommation de ce fruit datant de plus de onze mille ans (époque néolithique puis à l'Age de bronze), et les premières traces de verger en Israël remontent à un millénaire av J-C. (Harris et al 2002).

Le pommier appartient à la famille des Rosacées, genre *Malus* Mill. Le nombre d'espèces appartenant au genre Malus ne fait pas l'unanimité. Selon les approches taxonomiques, 8 à 78 espèces sont reconnues comme appartenant au genre Malus (Robinson et al., 2001). Elles sont groupées en sections (*Malus, Sorbomalus, Eriobolus, Docyniopsis, et Chloromeles*) dans lesquelles des séries sont déterminées (comme *Malus* et *Baccata* dans la section *Malus*) (Luby, 2003). Le pommier le plus cultivé aujourd'hui, *Malus domestica* Borkh, est un complexe hybride de trois espèces (Fumey 2007). Un des ancêtres les plus connus du pommier actuel est *Malus siversii* (Harris et al. 2002).

3.2. Morphologie et architecture du pommier.

En verger de production, les pommiers sont composés d'une partie productive, appelée scion, greffée à un support appelé porte-greffe, tous deux de variétés diverses (Trillot et al. 2002, Hanke et al. 2007). L'utilisation de portes greffes permet d'éviter la période de juvénilité, d'avoir un meilleur contrôle sur la croissance végétative, de favoriser la formation des boutons floraux, d'améliorer l'efficacité de la culture et la qualité des fruits, et de fournir une certaine résistance à certaines maladies. (Hanke et al. 2007). Le choix du porte greffe prend en compte de sa compatibilité avec la variété du scion, le contexte géo climatique et les maladies potentiellement présentes (maladies bactériennes principalement) (Trillot et al. 2002).

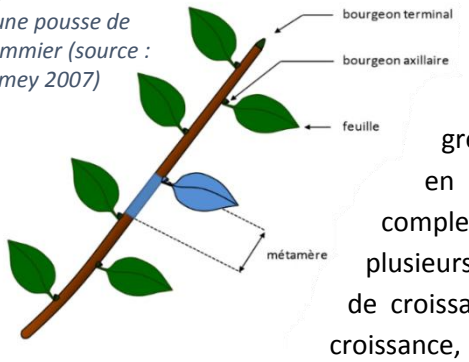


Figure 8 : schéma d'une pousse de pommier (source : Fumey 2007)

Le scion se développe sur le porte-greffe, et gagne en volume et en complexité à travers plusieurs mécanismes de croissance. L'unité de croissance, appelée métamère (ou phytomère), est constituée du nœud et de l'entre-nœud, ainsi que de la feuille présente sur ce nœud, et du bourgeon axillaire situé à l'aisselle de la feuille (figure 8) (Fumey 2007, Trillot et al. 2002). Premièrement, l'organogénèse permet la mise en place des organes, par exemple les bourgeons eux-mêmes constitués de plusieurs métamères. Ceux-ci vont augmenter leurs dimensions et conduire à la mise en place des axes (Lauri & Térouanne 1995, Trillot et al. 2002). La partie basale de ces axes est donc préformée dans le bourgeon et s'allonge au moment du débourrement. Selon la position de cet axe dans l'architecture de la plante, des métamères néoformés apparaissent ensuite successivement et se déploient grâce au fonctionnement du méristème caulinaire apical. Dans un second temps le diamètre de cet axe s'accroit par l'activité des méristèmes secondaires : le cambium et le phellogène. Après avoir gagné en volume, l'architecture de l'arbre se complexifie par l'apparition de nouveaux axes, à partir des méristèmes axillaires situés le long d'un axe déjà établi (Lauri & Térouanne 1995, Fumey 2007). La ramification ainsi créée a été définie par Bugnon (1980) comme étant « la croissance d'une ou de plusieurs unités morphologiques nouvelles et semblables à l'unité génératrice ». Chaque axe mis en place au cours de la croissance du pommier provient d'un bourgeon formé l'année précédant son ouverture (Trillot et al. 2002). Il renferme la partie préformée de la pousse qui va se développer, et se classe en deux catégories (figure 9) : les bourgeons inflorescentiels qui renferment une inflorescence préformée, qui donnera les fruits à la fin de croissance, et les bourgeons végétatifs qui n'en contiennent pas et qui mettent en place la ramification (Costes et al. 2006, Hanke et al. 2007, Trillot et al. 2002). Une troisième catégorie de bourgeons est dite latente lorsque de tels bourgeons ne s'expriment pas (Lauri 2016). De ces bourgeons naissent différents types de pousses classées selon leur développement.

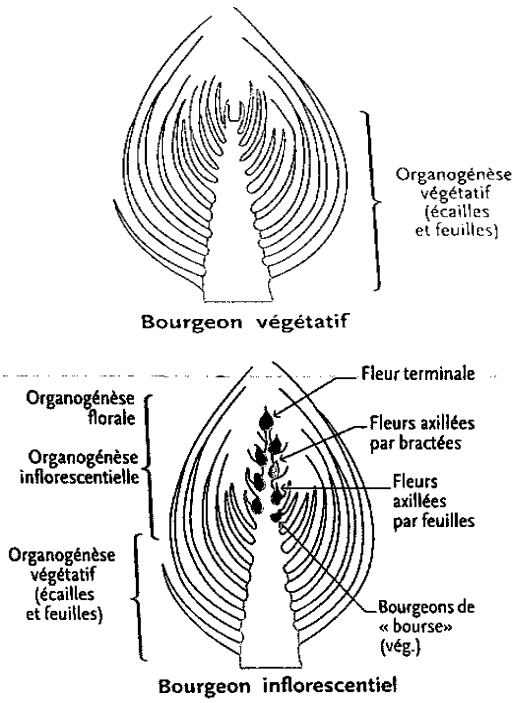


Figure 9 : structure anatomique d'un bourgeon végétatif (haut) et inflorescentiel (bas) (source : Trillot et al. 2002)

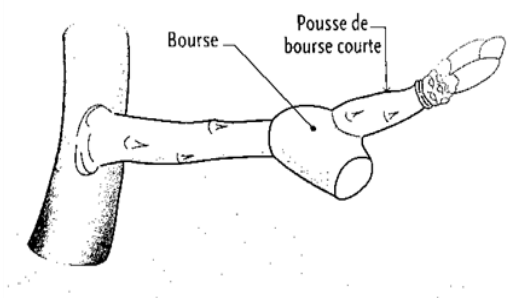


Figure 10 : dessin d'une bourse et de sa pousse de bourse (source : Trillot et al. 2002).

Les pousses courtes (1 à 5 cm) sont composées uniquement de la partie préformée du bourgeon, les pousses moyennes ou "brindilles", et les pousses longues (8 à 30 cm) sont composées d'une partie préformée et d'une partie dite néoformée (qui se développe consécutivement à la partie préformée)

(Lauri et Térouanne 1995). Les bourgeons floraux se trouvent potentiellement en position terminale de toutes les pousses courtes et en position terminale et latérale sur les pousses longues. Les fleurs que ces bourgeons produisent donneront (pour certaines) les fruits qui seront cueillis ou tomberont (chute physiologique). Le point auquel s'attachent les fruits produit un renflement au fur et à mesure de la croissance du fruit. On parle alors de « bourse ». De cette bourse de nouvelles pousses peuvent naître appelées « pousses de bourses » (figure 10). Elles constituent des relais de croissance végétative qui poursuivent la croissance de la branche puisque le méristème terminal de la pousse s'est transformé en inflorescence.

3.3. La transpiration et le flux xylémien

Il existe deux types de sève parcourant l'arbre. La sève élaborée transporte les éléments nutritifs à travers le phloème des sources vers les puits. La sève brute est transportée par le xylème et monte des racines vers les parties aériennes pour acheminer l'eau et les sels minéraux (figure 11). Le xylème est constitué de cellules mortes, perforées de manière à faciliter le flux de sève, situées dans la partie centrale du tronc et des branches.

L'eau remonte au sein de la plante grâce à un gradient de potentiel hydrique, induit par le phénomène d'évapotranspiration. C'est le moteur principal de la sève brute, qui aspire l'eau à l'extérieur de la plante sous forme de gaz. Par capillarité, la colonne d'eau formée au sein de la plante est donc en mouvement. Cette transpiration d'eau se produit au niveau des stomates. La régulation stomatique permet à la plante de contrôler le débit de la transpiration en fonction des conditions environnementales (température, luminosité, humidité de l'air, état hydrique du sol…). La grande majorité de l'eau absorbée par la plante et transportée par la sève brute est évaporée par les stomates (Petit et al. 2018), le reste étant utilisé pour la matière fraiche ou pour le métabolisme de la plante. La quantité d'eau transpirée peut donc être estimée par le flux de sève brute dans le réseau de xylème (Fuchs et al.2017, Dragoni et al. 2005, Granier et al. 2000).

Figure 11 : xylème (bleu) et phloème (marron) transportant la sève brute (flèche montante) et élaborée (flèche descendante) au sein d'une tige.

3.4. Le cycle de développement du pommier

Le cycle de croissance d'un pommier se déroule sur une année. Les stades physiologiques et les processus de son développement se calquent sur les variations climatiques des zones tempérées dans lesquelles il se développe (Hänninen & Kramer 2007). L'éclosion des bourgeons, ou débourrement, a lieu au début du printemps une fois la vernalisation passée et l'accumulation de degrés-jours suffisante pour le déclencher (Jackson et al. 2003). Les bourgeons vont alors pouvoir développer la partie préformée qui les compose. Dans le cas des bourgeons floraux apicaux l'inflorescence se développe au milieu d'une rosette de feuille d'où part également la pousse de

bourse (Webster et al. 2005). Pendant l'été les nouvelles poussent poursuivent leur développement jusqu'à la formation d'un bourgeon terminal de repos. Dès lors, des bourgeons floraux se développent en positions terminales ou axillaires. Cette phase d'induction florale détermine le nombre potentiel d'inflorescence de l'année suivant et peut être influencé par plusieurs facteurs. La température, la photopériode ou la surface foliaire peuvent en faire partie (Hackett & Hartmann, 1964), mais les mécanismes de l'induction florale sont encore mal compris Ces processus de croissance se produisent parallèlement au développement des fruits ce qui induit une compétition pour la ressource au sein même d'un arbre (Quinlan & Preston 1971, Hanke et al. 2007). Jackson (2003) décrit le ralentissement que provoque la présence de fruits sur la croissance des pousses, et sur la formation de bourgeons floraux. Puis, avec la diminution des températures et de la durée du jour en automne, l'arbre passe par une série de changements physiologiques conduisant à l'abscission des feuilles (Jackson 2003).

Ces processus de développement des parties aériennes sont donc fortement dépendant des conditions environnementales, comme la température ou la lumière. Au cours du développement de la plante, la lumière est la seule source de compétition aérienne. Utilisés pour produire l'énergie de la plante, les rayons lumineux sont interceptés par les feuilles, où se produit le processus de photosynthèse, dans les chloroplastes. Le rayonnement utilisé est précis : la lumière verte (entre 500 et 650 nm de longueur d'onde) n'est pas absorbée par la feuille, seul le rouge (plus de 650 nm) et le bleu (moins de 500 nm) sont utilisés pour différentes étapes de la croissance et du fonctionnement de la plante (figure 12) (Folta & Maruhnich 2007, Kami et al. 2008). Donc l'absorption de ces longueurs d'ondes par les couches supérieures de la canopée prive les couches inférieures d'une partie du rayonnement utile, en renvoyant un rayonnement plus vert.

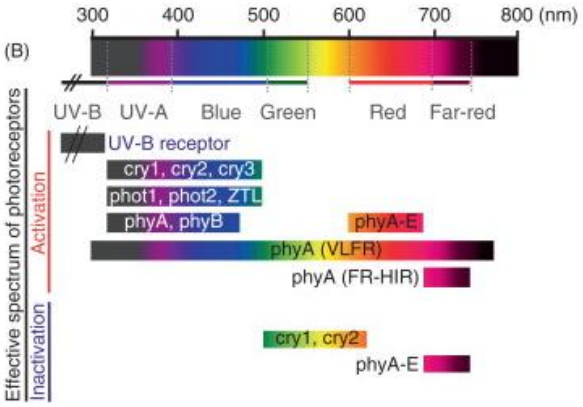


Figure 12 : schéma des longueurs d'ondes permettant l'activation ou l'inactivation des photorécepteurs (Kami et al 2010)

Cette compétition est à la fois la cause et la conséquence de la forme que prend la canopée pour intercepter les rayonnements lumineux. Il a été démontré qu'une modification de l'architecture de l'arbre (comme la densité du feuillage et la position des rameaux dans la couronne de pommier) avait une répercussion directe sur ses capacités d'interception du rayonnement (Willaume et al., 2004). Les feuilles à l'ombre développent des surfaces foliaires ou des pétioles plus grands, ou modifient leur inclinaison pour capter plus de rayonnement. De plus, certaines phases du développement des feuilles ou des fruits dépendent de longueurs d'ondes spécifiques et peuvent donc être ralenties par ces compétitions aériennes (Kami et al 2010).

3 Problématique et hypothèses

Les pommiers en verger traditionnel sont depuis longtemps très étudiés et les mécanismes de leur développement sont désormais bien connus et maitrisés. Cependant, leur comportement lorsqu'ils sont soumis à un contexte agroforestier, et les compétitions potentielles que cela engendre, est inconnu. Ce constat a suscité l'étude d'un dispositif agroforestier par l'UMR system ayant pour but la production de connaissance et l'évaluation de l'intérêt d'une mise en culture de pommiers en système agroforestier. Ce dispositif consiste en une parcelle agroforestière composée d'une strate herbacée (sainfoin) dominée par des noyers âgés de 24 ans en 2018, sous lesquels ont été plantés en 2016 des rangées de pommiers. Cette expérimentation est donc jeune (3ème année de croissance des pommiers) et la question qui se pose est celle de l'influence de la compétition des noyers sur la croissance végétative et la floraison/fructification des pommiers. Pour des questions de moyens et de temps, l'étude se focalise pour le moment sur les compétitions aériennes (pour la lumière) et la partie racinaire n'est pas traitée. Plus précisément, il est question de mieux appréhender la manière dont les différentes interactions aériennes entre noyers et pommiers influencent le développement foliaire et floral des pommiers en systèmes agroforestiers. Pour aborder cette question, trois hypothèses ont été formulées :

a. Le développement de la frondaison et des ramifications des pommiers est restreint en contexte de compétition avec les noyers
b. La phénologie des fleurs des pommiers est modifiée en contexte de compétition pour la lumière
c. La quantité d'eau transpirée par les pommiers est plus faible en système agroforestier.

Une approche dynamique de la mise en place des stades phénologiques des fleurs et de la croissance végétative des rameaux sera établie. La surface foliaire sera étudiée selon deux approches : les relations allométriques et le LAI. Enfin les résultats de ces thèmes seront croisés avec des données sur le flux de sève xylémien des pommiers, calculés dans le cadre du même projet.

4 Matériels et Méthodes

1- PRESENTATION DU DISPOSITIF

1.1 La parcelle d'étude et le matériel végétal :

La parcelle A1, sur laquelle se trouve l'expérimentation des pommiers en système agroforestier, est la seule du domaine qui ne soit pas cultivée par l'un des agriculteurs, ce qui a permis une plus grande liberté dans l'implantation du verger agroforestier. Elle se situe dans la pointe Sud du domaine au point de confluence du Lez et du Liron (ANNEXE 2). Cette parcelle d'une surface d'environ 0,6 Ha, contient des noyers âgés de 24 ans en 2018 (plantés en mars 1995). Les pommiers ont été plantés en mars 2016. La culture sous les pommiers varie. Une luzernière de cinq ans a été remplacée cette année par une autre légumineuse, le sainfoin. Cependant, les interactions pommier-culture ne sont pas étudiées dans le cadre de cette thèse.

L'expérimentation pommier en agroforesterie est répartie en deux blocs respectant les mêmes règles d'implantations (ANNEXE 2). Les Noyers sont espacés de quatre mètres les uns des autres au sein de chaque rang, orientés Est-Ouest, eux-mêmes espacés de treize mètres. Ces règles avaient été décidées lors de leur implantation en 1995 dans le but de permettre un double passage de moissonneuses batteuses entre deux rangées d'arbres. Depuis leur implantation, les noyers les plus vigoureux et intéressants sur le plan de la production de bois ont été sélectionnés, et la moitié d'entre eux ont été retirés en 2004. Aujourd'hui, 35 noyers au total sont encore en place sur huit rangs. Les rangs de pommiers quant à eux se situent à intervalle de six mètres cinquante, en alternant rang et inter-rang des noyers, et chaque pommier se trouve à un mètre trente du suivant. Cela crée deux modalités, réparties en deux blocs, en plus des témoins « vergers de pommiers classiques » comprenant les pommiers les plus écartés possible des noyers. Ces modalités sont notées AFR (AgroForestry Row) pour les pommiers situés sur les rangs de noyers, et AFIR (AgroForestry Inter Row) pour les pommiers situés dans les inter rangs des noyers. Les témoins sont notés AC (Agricultural Control). Les deux blocs comprennent respectivement 83 et 65 pommiers. Parmi eux, 45 arbres ont été choisis pour constituer l'échantillon de l'étude, soit 15 par modalité

(Tableau 2). Ces pommiers ont été sélectionnés en 2017 sur le critère d'un diamètre minimum du tronc à 70 cm de hauteur.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des modalités par bloc.

	Bloc 1			Bloc2		
Modalités	**AC**	**AFR**	**AFIR**	**AC**	**AFR**	**AFIR**
Nombre de pommiers	18	25	40	8	12	45
Nombre de pommiers suivis	10	11	6	5	4	9

Cependant, les arbres suivis dans chaque modalité n'ont pas strictment le même environnement. Les pommiers sont situés à des distances variables des noyers autour d'eux. Cette varation est due à la séléction effectuée sur les noyers depuis leur implantation. Ainsi, dans la modalité rang ou inter-rang, les pommiers peuvent se situer à des distances plus ou moins grandes de noyers (ANNEXE 2). Pour rendre compte de ces disparités dans l'environnement des pommiers un indice a été utilisé, le NCI, Neighbourhood Competitive Index, (voir IV.2.2). Cette variable continue permet de comparer non pas différentes modalités mais un gradient dans l'environnement des pommiers.

Le choix du cultivar s'est porté sur la Dalinette. Ce cultivar vigoureux est recommandé dans les vergers notamment pour sa résistance à la tavelure du pommier, maladie responsable de la plupart des traitements. Ce cultivar est associé au porte-greffe G202, un porte-greffe semi-nanisant. Il s'inscrit également dans la démarche d'une agriculture respectueuse de l'environnement, puisque sa résistance au feu bactérien et au phytophthora, ainsi qu'aux pucerons lanigères du pommier, problématique en climat chaud, permet de limiter les traitements. Les rangs de pommiers sont irrigués avec un double goutte à goutte de 1,6 litres par heure et par gouteur, soit environ 4,8L par pommier par heure (l'équivalent de l'évapotranspiration pendant une semaine selon les conseils du technicien du CETA Hérault-Vidourle). Avant le débourrement, les pommiers ont reçu 12g / arbre de chélate de fer. La seule intervention de conduite des arbres effectuée consiste en l'élagage des ramifications en dessous du premier fil (environ 70 cm de la surface du sol). L'enherbement dans les rangs des pommiers est contrôlé par l'application d'une couche de BRF (bois raméal fragmenté). Le suivi et l'entretien des pommiers obéissent aux spécifications techniques de l'agriculture biologique et aux conseils du CETA Hérault-Vidourle.

1.2 Le sol

Selon les différents agents interrogés sur la question (Alain Sellier, Benjamin Pitchers, Pierre Éric Lauri), la profondeur de sol de la parcelle suit un gradient important. Au nord de la parcelle la Roche mère est très proche de la surface, mais elle peut atteindre une profondeur de plus de 2m vers le Sud. Les différentes études précédemment effectuées sur la parcelle donnent accès à une analyse de sol détaillée comparant différentes profondeurs mais aussi différentes distances autour des Noyers. Il en résulte que la texture du sol varie avec la profondeur mais pas avec la distance à l'arbre. En allant de la surface vers les couches les plus profondes du sol, la texture passe de limono-argileuse à argilo-limoneuse, ce qui montre que les particules les plus fines (argiles) sont en plus

grande proportion en profondeur (ANNEXE 3). Cela s'explique par le lessivage des particules les plus fines. La texture limoneuse de ce sol suggère une capacité de rétention d'eau modérée mais une sensibilité importante à la compaction et à l'érosion hydrique. Il n'est cependant pas un obstacle à la croissance des racines (Moody et Cong 2008). Le pH du sol est compris entre 8.1 et 8.6, ce qui renvoie à un sol alcalin dominé par les carbonates de Na, Ca et Mg (Moody & Cong 2008). Des carences en micronutriments peuvent être présentes en raison d'une faible disponibilité en Zn, Fe et Mn en milieu à pH élevé. En revanche, la disponibilité en matière organique augmente (Moody et Cong 2008). Cette matière organique est par ailleurs plus élevée à côté des arbres, probablement grâce à la litière des feuilles et à la décomposition des racines. Mais, le pourcentage de matière organique étant très faible dans le sol (<1,5% entre 2m et 4 m de distance des noyers), elle n'est que moyenne (2,2%) autour des noyers (Meersmans et al., 2012)

1.3 Le climat

Situé au Nord de Montpellier, la parcelle est soumise à un climat méditerranéen frais sub-humide, avec 762 mm de pluie et 14,5°C de moyenne entre 1990 et 2016 (données INRA 2017). L'été y est chaud et sec (ANNEXE 4), et correspond au Code Csa selon la classification de Köppen. Le "C" signifie climat tempéré (avec une température moyenne entre 0 et 18 ° C) et la deuxième lettre renvoie au régime de précipitation, "s" indiquant des étés secs. La troisième lettre indique le degré de chaleur estivale avec "a" signifiant que la température moyenne du mois le plus chaud est supérieure à 22 °C et "b" inférieure à 22 °C. Outre cette période estivale relativement similaire d'année en année, les conditions climatiques du reste de l'année sont très changeantes. Des variations climatiques importantes sont observées entre les années, notamment concernant la pluviométrie. Une année très sèche (2017) a précédé cette année particulièrement pluvieuse en hiver et au début du printemps. L'équivalent des précipitations de l'année 2017 est tombé entre janvier et mars 2018, et à partir de juin 2018, c'est plus du double des précipitations de l'année entière de 2017 qui a été comptabilisé.

2- PRESENTATION DES PROTOCOLES

2.1 Mesure de la Surface foliaire

La surface foliaire des pommiers est abordée par des relations allométriques. Une définition du terme relation allométrique a été donnée par E. Lemoin (1969) : *« Considérons les individus d'une espèce donnée d'êtres vivants. Si X est la dimension du corps, ou d'un organe de référence, et Y la dimension d'un autre organe […] la relation de la forme : Y = aXh dite relation d'allométrie (du grec allos = autre et metron = mesure), est l'expression mathématique décrivant le mieux la loi de « disproportionnalité » existant entre Y et X ».* En arboriculture ou en foresterie, ces relations mettent souvent en lien des valeurs faciles à mesurer (hauteur de l'arbre, diamètre de branche ou de tronc), avec des valeurs plus complexes comme la biomasse, ou encore la surface foliaire (Willaume et al. 2004). Le but des relations utilisées ici est d'obtenir, de manière non destructive, la surface foliaire totale de 2018 à partir de la longueur des pousses de 2018.

Les échantillons permettant de constituer le modèle sont divisés en plusieurs catégories. Les pousses sont différenciées entre pousses de bourses (*bourse shoot* BS), pousses végétatives

(*vegetative shoot* VS) et bourses (B) afin d'affiner les allométries pour chaque type de pousses. Une différenciation est également effectuée entre les feuilles d'un arbre situé à l'ombre et les feuilles d'un arbre situé à la lumière (tableau 3). Les différentes allométries ainsi obtenues entre longueurs de pousses et surfaces foliaires rendent compte des variations potentielles dans la relation entre ces variables en fonction des conditions de croissance et d'exposition des pousses de pommiers. Pour chacun de ces types de pousses et dans ces deux conditions, les relevés portent sur le nombre de feuilles, la longueur de la pousse, et la surface foliaire réelle. Le rang de la feuille sur la pousse est également renseigné.

Le protocole est divisé en trois étapes.

⇨ La première étape, (appelée allométrie feuilles) a pour but d'obtenir la relation entre le produit de la longueur et de la largeur d'une feuille et sa surface réelle. Pour cela, 30 feuilles sont prélevées sur des pousses (sans distinction entre pousses de bourses et pousses végétatives). Elles sont ensuite scannées de manière à obtenir la surface, la longueur et la largeur de chaque feuille grâce au logiciel WinFolia. Une inférence permet d'obtenir une équation donnant la surface foliaire en fonction du produit longueur largeur d'une feuille.

⇨ La seconde étape consiste à obtenir la surface foliaire totale d'une pousse en fonction de sa longueur. Les longueurs de 30 pousses végétatives et 30 pousses de bourses sont mesurées. Sur ces pousses le nombre de feuilles, leur rang, leur largeur et leur longueur sont également mesurés. En utilisant la relation de l'étape 1 la surface foliaire de chaque feuille est obtenue. Cela permet d'inférer la longueur d'une pousse à partir de la somme des surfaces foliaires de ses feuilles pour obtenir la relation allométrique.

⇨ La dernière étape consiste à mesurer les longueurs de toutes les pousses de chaque pommier pour en inférer leur surface foliaire, puis d'en faire la somme pour obtenir la surface foliaire de chaque pommier. Ce protocole est répété pour les arbres à l'ombre et les arbres à la lumière (tableau 3).

Tableau 3 : Répartition du nombre de prélèvements/mesures par type de pousses et dans chaque condition d'exposition pour la construction des relations allométriques. (Rouge = prélèvement destructif ; Vert = mesure non destructive)

	Lumière		**Ombre**	
Allométrie surface VS	*Longueur*largeur*	*Longueur de pousse*	*Longueur*largeur*	*Longueur de pousse*
Pousses de bourse		30 pousses		30 pousses
Pousses végétatives		30 pousses		30 pousses
Aléatoires	30 feuilles		30 feuilles	

2.2 Calcul du LAI

Le Leaf Area Index (LAI) correspond à la demi-surface développée des éléments verts/feuilles rapportée à 1m² de sol horizontal (Weiss et al. 2008). Pour le calculer il existe plusieurs méthodes comme l'utilisation de l'appareil LAI2000 ou par méthode destructive (prélèvement et mesure des surface de feuilles). Dans le cas de pommier en système agroforestiers le choix a été fait d'utiliser la méthode par photos hémisphériques, qui, d'après la littérature, semble offrir le meilleur compromis entre fiabilité et simplicité de manipulation (Garrigues et al. 2008, Weiss et al. 2004, Jonckheere et al. 2004, Kabba et al. 2009, Paula et al. 2003). Cette méthode consiste à photographier l'arbre avec un appareil photo muni d'une lentille fish-eye à 180° (figure 12), puis de seuiller l'image pour isoler les pixels des feuilles de ceux correspondant au ciel. Cette méthode permet d'obtenir le gap fraction, la

fraction du trou dans la couverture foliaire sur l'image. Dans le cas de ce protocole l'étude porte sur les pommiers et seule le LAI du pommier n'est nécessaire. Les photos sont donc prises de manière à isoler les pommiers de leur environnement (à savoir les noyers). De plus, en utilisant la méthode du gap fraction il serait plus adapté de parler de PAI (Plant Area Index) plutôt que de LAI (Neumann et al., 1989), car les partie ligneuses (branches, troncs…) sont présentes sur l'image. Ici, la valeur de LAI souhaitée est celle des feuilles uniquement, en excluant la partie ligneuse. Il est donc nécessaire de soustraire la part de ces éléments dans la valeur du LAI. Deux séries de photos sont donc prises aux niveaux des 45 pommiers de l'échantillon, avant le débourrement et au maximum de la croissance foliaire.

Les photos hémisphériques ont été prises à environ 30 cm de hauteur, au niveau du premier fil sous des pommiers isolés de leur environnement. Une structure en tente (4 pieds) a été utilisée pour y tendre une toile de 10 mètres par 4 au-dessus de chaque pommier (figure 14). Cette toile a un double intérêt : (1) les arbres environnants n'apparaissent pas sur la photo, (2) la toile empêche l'arrivée de rayons incidents directs du soleil sur l'objectif de l'appareil (qui gênent l'analyse des photos) ce qui évite de devoir prendre les photos avant le lever du soleil ou sous une couverture nuageuse totale

.

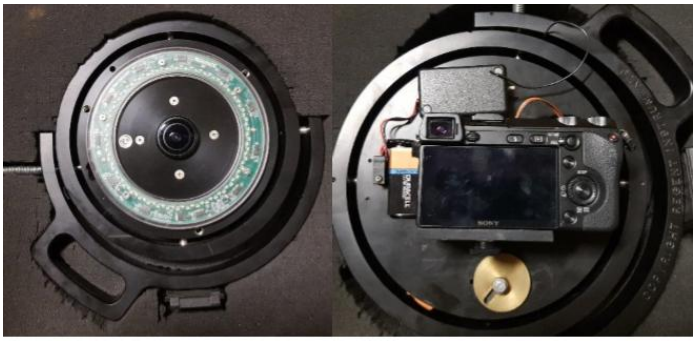


Figure 13 : lentille fisheye 180° (gauche) et appareil photo Sony (droite) utilisé pour les photos hémisphériques. (fournis et calibrés par Regent Instruments Inc.)

Figure 14 : mise en place de la tente au-dessus des pommier (trait vert : le pommier / trait rouge : angle de vue de la photo)

Les photos des pommiers et des noyers sont analysées avec les logiciels 'PiafPhotem' et 'PIAF light analyser' (ANNEXE 6). Les photos sont tout d'abord seuillées en noir (la partie « arbre ») et blanc (la partie « ciel »). La proportion de pixel blanc sur le total de pixel donne la valeur de gap fraction (fraction du trou). Cette valeur est ensuite pondérée par l'angle solide et l'angle azimutale selon deux modèles : Uniforme overcast sky (UOC) et standardized overcast sky (SOC). La différence entre ces deux modèles est la variation du flux de rayonnements diffus selon l'angle azimutal qui n'est considérée que dans le SOC. Le LAI est calculé à partir du Gap fraction. L'équation 1 donne le LAI en fonction de la fraction de lumière incidente sur le rayonnement total, ainsi que du coefficient d'extinction de la lumière, lié à l'inclinaison de la feuille, noté k. Une étude de Poblete-Echeverría et al (2015) montre qu'il est possible d'utiliser une valeur constante du coefficient d'extinction K, égale à 0,68 dans le cas des pommiers adulte en production.

Équation 1 (Qi = rayonnement sous la canopée ; Q0 = rayonnement total au-dessus de la canopée ; donc Qi/Q0 = Gap fraction ; selon Martens et al 1993)

$$LAI = \frac{-\ln\left(\frac{Qi}{Q_0}\right)}{k}$$

Les photos hémisphériques permettent également de calculer l'indice de compétition NCI (Neighbourhood Competitive Index). La photo est cette fois prise au-dessus des pommiers en direction des noyers. L'analyse de ces photos donne l'openness canopy OC (gap fraction corrigé par le sinus de l'élévation) au cours du temps sur une période déterminée. L'équation 1 donne le détail

Équation 2 : fomrule du NCI (OC = openness canopy ; DBH diamètre basale des noyers dans un rayon de 15 mètres)

$$NCI = \frac{1}{\sum_i^n OC} * \sum_i^n \frac{DBH}{di}$$

du calcul.

2.3. Arrêts de croissance :

Le choix de suivre la dynamique des arrêts de croissances est basé sur des résultats antérieurs obtenues sur le même dispositif. Il était ressorti de ces résultats qu'en phase de croissance les pommiers poussaient de la même manière quelle que soit leur modalité, mais ce qui les différenciait été les durées d'arrêt de croissance. Cette année le relevé des arrêts de croissance est donc reconduit et approfondi. Des relevés hebdomadaires de la croissance de toutes les pousses de 2018 (végétatives et de bourses) en position terminale ont été effectués sur les 45 pommiers. Les pousses terminales en arrêt de croissance sont notées 1 et celles en croissance sont notées 0.

2.4 Stades phénologiques :

Les stades phénologiques des fleurs des pommiers ont été relevés de début avril à début juin. Les codes servant de repères aux différents stades suivent la charte de Fleckinger du CTIFL (ANNEXE 5). Les stades phénologiques de toutes les fleurs des 45 pommiers étaient relevés trois fois par semaine. Une description plus détaillée fut effectuée en début de floraison pour indiquer le nombre de fleurs et de feuilles par inflorescence et plus tard le nombre de fleurs fécondées et de fruits arrivés à maturité.

2.5 Flux de sèves :

Dans le cadre de la thèse en cours les données de flux de sèves sont enregistrées afin d'approcher la transpiration des pommiers. En effet des études montrent que les flux de sèves sont un bon moyen d'estimer les dynamiques des réponses de la transpiration des arbres aux changement de l'environnement (Granier et al. 2000, Fiora and Cescatti 2006).

Le protocole utilisé est appelé méthode TTD (transient Thermal Dissipation). Le relevé et de traitement des données ont été mis en place par Frédérique Do et Benjamin Pitchers dans le cadre de la thèse. Contrairement à la méthode la plus courante (méthode CTD de Granier, Lu et al. 2017), la méthode présentée ici, développée par Frédérique Do (Do & Rocheteau, 2002), n'utilise qu'une seule sonde par arbre. Les premiers résultats de cette expérience sont présentés dans cette étude,

cependant le traitement des données tel qu'il a été effectué n'est pas définitif, et doit encore subir quelques améliorations. Par conséquent, les flux obtenus surestiment le flux réel et sont donc pour le moment traité de manière relative afin d'observer d'éventuels changements entre les arbres ou les modalités.

Le matériel utilisé pour relever ces données de flux de sèves se compose de sondes chauffantes montées sur les 45 pommiers. Elles sont constituées d'un filament chauffant, la thermistance, et d'un thermocouple qui mesure la température à l'endroit d'insertion de la sonde. Cette sonde est insérée dans l'arbre à environ 30 cm de hauteur de manière à être en contact avec le réseau de xylème (figure 15). Elles sont isolées par du Terostat, et protégées de l'humidité et du rayonnement par un chapeau déflecteur en aluminium Deux centrales d'acquisition CR1000 Campbell récupèrent les données des 45 sondes (figure 16).

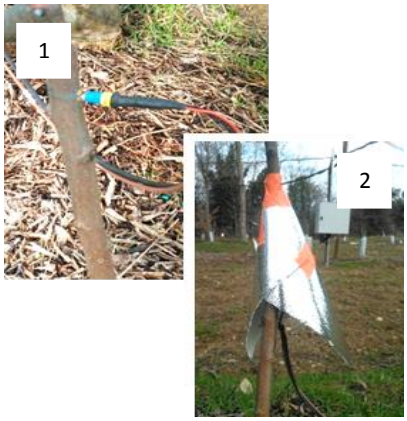


Figure 15 : photo de la sonde TTD insérée dans un pommier (1) et du déflecteur qui la recouvre (2)

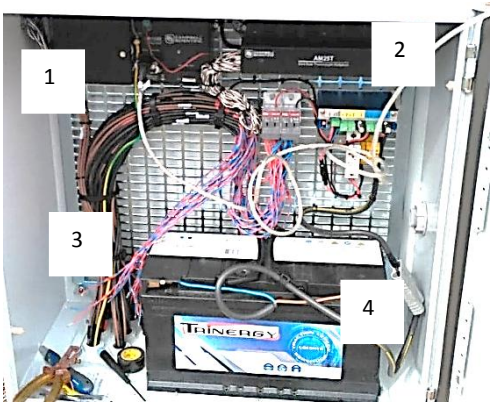


Figure 16 : photo de l'armoire contenant (1) la centrale d'acquisition CR1000, (2) un multiplexeur), (3) les câbles d'acquisition et de chauffage, et (4) la batterie.

La sonde chauffe toutes les 15 min pendant une minute à une puissance de 60 mW. Durant cette période, elle enregistre la température à 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 secondes. Un décrément de la température, appelée $\Delta T_{u,}$ est alors observé au cours de cette minute de chauffage induit par le flux de sève. Cette différence de température est inversement proportionnelle à l'intensité du flux de sève. En préalable, une étape de calibration (Annexe 7) permet d'obtenir cette différence de température à flux nul (ΔTmax), et maximum (ΔTmin). Un coefficient thermique K peut alors être calculé (équation 3). Lors de cette étape de calibration une relation linéaire entre K et J (flux de sèves) peut être déterminée (équation 4). Les données récoltées sur le dispositif permettent d'obtenir tout d'abord K à partir du ΔT_u puis d'en inférer le flux de sèves.

Équation 3 : coefficient K en fonction du ΔT_u

$$K = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_u}{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}$$

Équation 4 : relation entre le flux de sève Ju et K

$$J_u = a * K$$

2.6 Analyse des données :

L'analyse de la variance a été réalisée sur les données collectées, en testant au préalable la distribution normale et l'homoscédasticité des résidus. Lorsque ces deux étapes n'étaient pas confirmées (dans les cas de loi binomiale ou de Poisson pour les données de comptages par exemple) un test non paramétrique de Kruskal-wallis était utilisé.

Pour l'étude des stades phénologiques, l'utilisation de régression multinomiale ordonnée a permis d'analyser les décalages de phénologie date par date. L'utilisation de la fonction polR du

package MASS sur R studio a permis cette analyse. La valeur obtenue à la suite de cette analyse est appelée odd ratio, et compare les chances de passer d'un stade à l'autre pour chaque modalité par rapport à une modalité référence. Si l'odd ratio d'une modalité pour une date donnée est inférieur à 1 cela signifie alors que cette modalité a moins de chance de voir ces stades phénologiques passer au suivant que la modalité de référence. Elle est donc considérée en retard par rapport à cette référence. A l'inverse si l'odd ratio est supérieur à 1, la modalité est considérée en avance dans les stades phénologiques par rapport à la référence. Dans le cas des relations allométriques, des comparaisons de pentes entre les différentes courbes ont été réalisées grâce à la méthode du Standardized Major Axes (SMA) sur le logiciel SMATR. Le reste des analyses a été réalisé sur R studio, en utilisant un seuil de significativité p-value<0,05. L'effet block a été testé et n'a jamais montré de différences significatives.

5 Résultats

1. ENVIRONNEMENT DES POMMIERS :

1.1 Lumière incidente

L'analyse des photos hémisphériques prises au-dessus des pommiers révèle que chaque modalité présente une quantité moyenne de rayonnements incidents différente (figure 17). Les deux modèles (UOC et SOC) montrent des résultats très similaires. Les valeurs de UOC et SOC des témoins sont proches de 1, indiquant une couverture très faible. Les UOC et SOC des pommiers en inter rangs sont significativement plus faibles indiquant une couverture de ciel un peu plus dense, de l'ordre de 30%. Enfin les pommiers en AFR montrent les UOC et SOC les plus faibles, avec une couverture du ciel de l'ordre de 60%.

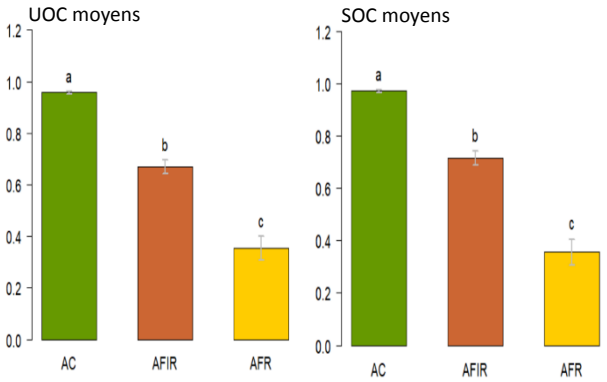


Figure 17 : Moyenne des valeurs de UOC (à gauche) et SOC (à droite) par modalité

La variabilité au sein de chaque modalité reste relativement faible mais elle est plus importante en agroforesterie rang qu'en témoin, où la variabilité est quasiment négligeable. Ces résultats ne sont pas surprenants, mais confirment l'intérêt de l'utilisation des trois modalités différentes. En revanche, la variabilité plus accentuée dans la modalité inter rang soulève le besoin d'analyser les pommiers non pas sous l'angle de modalité qualitative mais selon un gradient de compétition, le NCI.

1.2. NCI 2018

Les indices de compétition des pommiers rendent bien compte des modalités de manière générale (figure 18). Le NCI est significativement différent pour chaque modalité. En AC, les NCI montrent le minimum de variabilité. En AFIR, les valeurs de NCI sont intermédiaires. La variabilité est légèrement plus élevée qu'en AC mais bien moins grande que pour AFR qui montrent une grande diversité de NCI. Les modalités AC et AFR ne partagent pas de valeurs de NCI en commun en revanche toutes deux partagent des valeurs de NCI communes avec AFIR, notamment le pommier 115 qui présente une valeur extrême (figure 17) proche de la moyenne des AFR. Enfin, deux pommiers semblent tirer la moyenne des NCI AFR vers le haut (pommiers 39 et 129) avec des valeurs extrêmes de NCI très élevées dues à leur localisation entre deux noyers très proches sur le même rang.

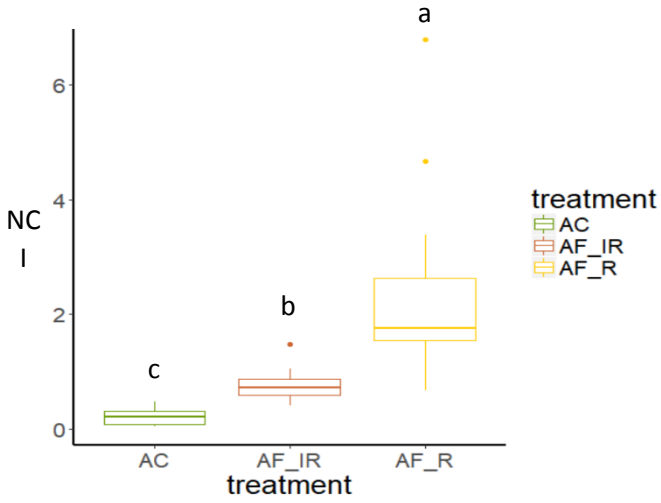


Figure 18 : Indice de compétition (NCI) par modalité

1.3 Précipitations et températures

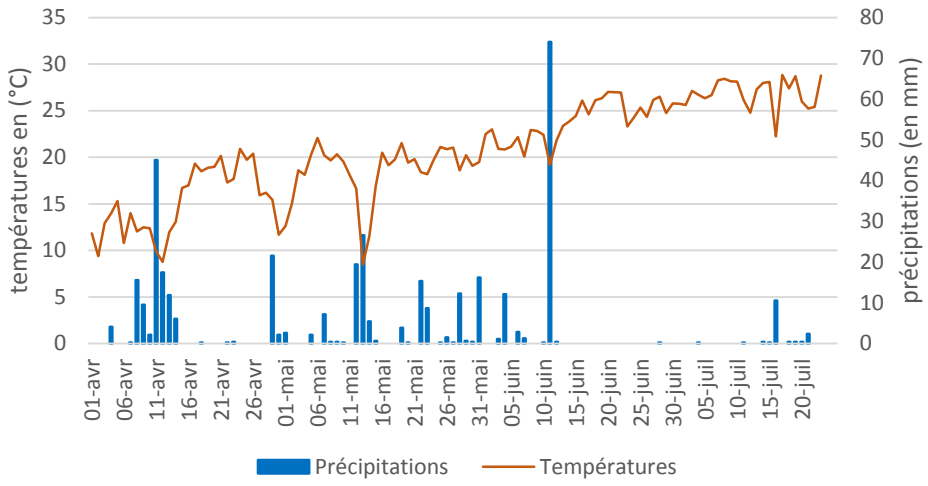


Figure 19 : Températures moyennes (en °C) de la journée (de 6h à 19h) et précipitations journalières (en mm) du 1er avril au 23 juillet 2018.

Les mois d'avril-mai et de juin-juillet montrent des différences en termes de climat (Figure 19). Les précipitations affiche une différence entre les mois d'avril-mai et de juin-juillet. Le printemps 2018 a été très pluvieux avec de nombreuses averses à plus de 15mm, relativement régulières jusqu'au 10 juin où la dernière averse de l'année a donné plus de 75mm d'eau. Les températures augmentent graduellement d'avril à juin mais avec quelques creux plus marqués. L'été en revanche a été beaucoup plus sec et chaud. Les averses sont rares et faibles (le maximum est inférieur à 10 mm) et les températures semblent plafonner à une moyenne journalière de 28°C environ. Si le printemps était marqué par des précipitations relativement importantes, les données enregistrées correspondent à un climat méditerranéen (Csa, cf. Méthodes $1-3).

2. ARCHITECTURE DES POMMIERS EN 2018

2.1 la ramification de 2017 :

Les pommiers étant dans leur 3ème année de croissance, certains effets des conditions d'expositions des différentes modalités ont déjà pu être observés dès le début de l'année 2018 sur la croissance réalisée en 2017. La ramification mise en place en 2017 met en lumière une certaine disparité entre les pommiers selon leur modalité. Le nombre moyen de ramification de 2017 est significativement plus élevé en témoin agricole (AC) qu'en agroforesterie rang (AFR). Le nombre moyen de ramification de 2017 pour l'agroforesterie inter rang est semblable aux deux autres modalités (figure 20). Cette tendance observée entre les modalités reste cependant relativement faible au regard de la variabilité au sein de chaque modalité. D'autre part, le NCI présente une corrélation négative significative avec le nombre de ramification, indiquant que la compétition avec les noyers à un effet négatif sur la mise en place de la ramification des pommiers (figure 21). Le R^2 faible de cette relation rend compte de la grande variabilité observée.

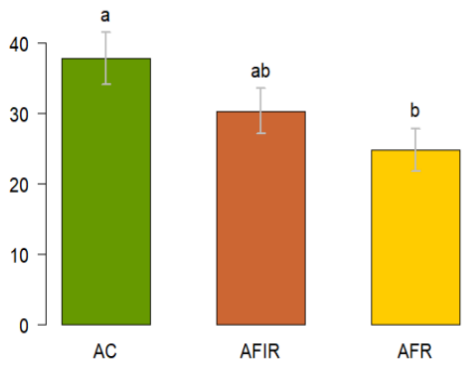


Figure 20: Nombre moyen de ramifications de 2017 par pommier pour chaque modalité

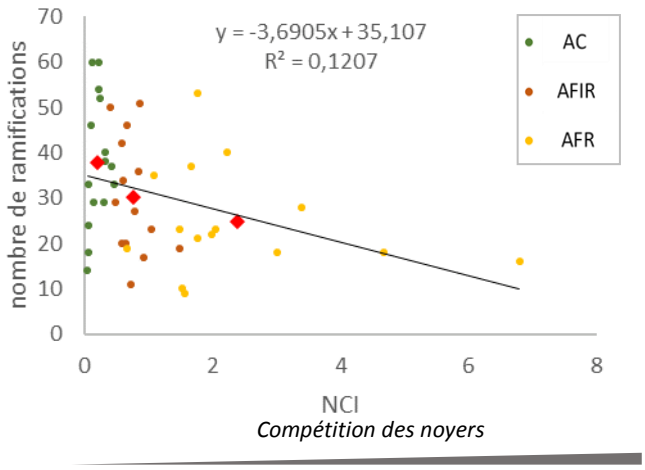


Figure 21 : Nombre de ramifications par arbre en fonction du NCI (losanges rouges = moyenne par modalité, cf fig 20). Corrélation de Pearson : p-value = 0 ,019

2.2. La surface foliaire de 2018 :

2.3.1. Déterminer les relations surface - longueur*largeur

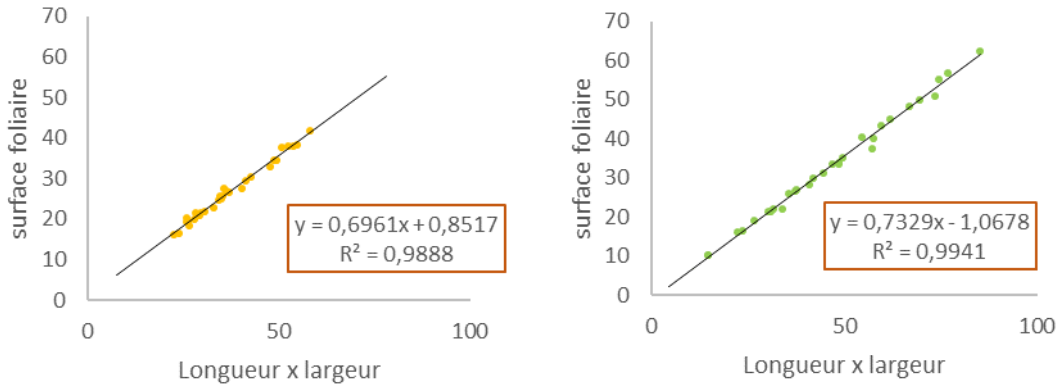


Figure 22 : Relation entre le produit de la longueur et de la largeur des feuilles (en cm²) et leur surface foliaire réelle (en cm²), pour des feuilles situées à la lumière (gauche) et à l'ombre (droite).

Les relations entre la surface foliaire mesurée et le produit de la longueur et de la largeur (figure 22) donnent des R^2 très élevés (0,98 et 0,99). Cela assure de pouvoir utiliser ces relations pour obtenir les surfaces foliaires de chaque feuille en mesurant uniquement leur longueur et largeur. Les deux contextes d'exposition à la lumière (ombre et lumière) affichent des relations similaires au regard de la SMA qui donne un p-value de 0,063 (> 0,05). Donc l'exposition à la lumière n'impacte pas la relation entre la surface foliaire et le produit de la longueur et de la largeur des feuilles de ces pommiers.

2.3.2 surfaces moyennes de feuilles

Les surfaces de feuilles obtenues après transformation des mesures de longueur et largeur sont en moyenne comprises entre 15 et 20 cm², et la variabilité est très faible (Figure 23). Une différence significative apparait entre les surfaces moyennes de feuilles de pousses de bourses et les feuilles de pousses végétatives. Cependant, les arbres à l'ombre et les arbres à la lumière montrent des moyennes de surface par feuilles similaires.

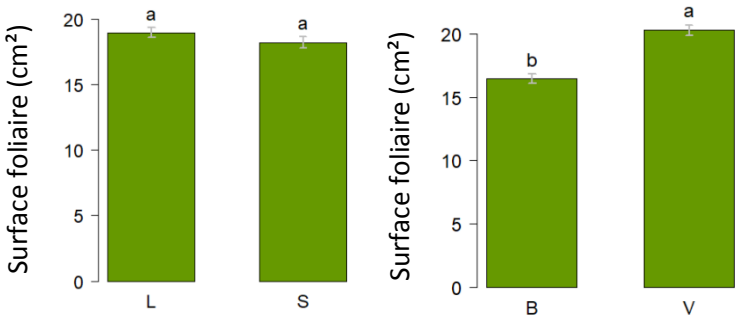


Figure 23 : Surfaces foliaires moyennes (LA en cm²) obtenues à partir des allométries précédentes et des mesures de longueur et largeur de feuilles sur les 120 pousses échantillonnées. Graphique de gauche = comparaison des surfaces moyennes entre les arbres à l'ombre et à la lumière (L= arbres à la lumière (light) ; S = arbres à l'ombre (shadow)). Graphique de droite = comparaison des surfaces moyennes entre les pousses de bourses et végétatives (B = pousses de bourses ; V = pousses végétatives).

2.3.3 Déterminer les relations surface - longueur de pousse

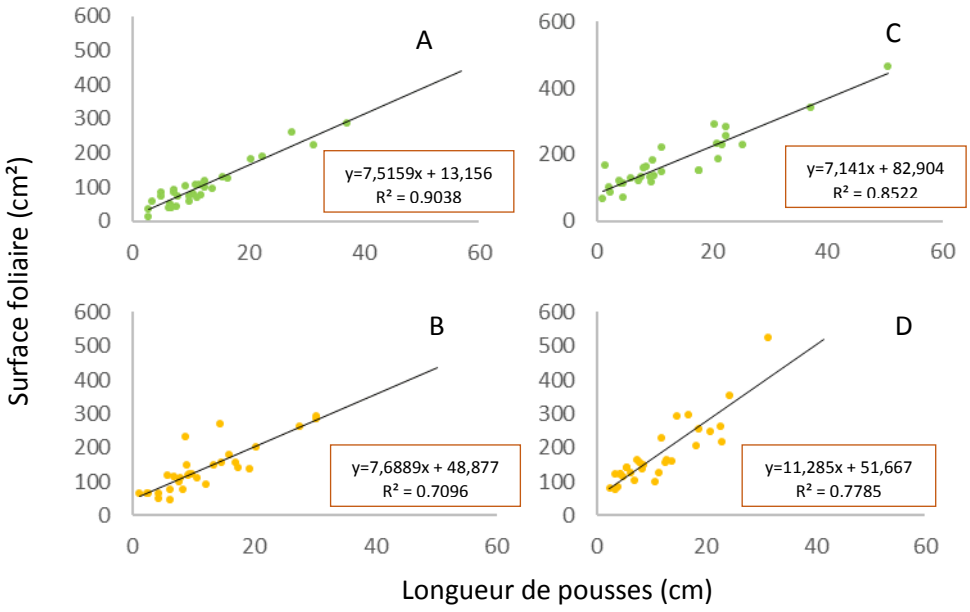


Figure 24 : Relation entre la longueur de la pousse en cm et la surface foliaire (en cm²) pour les pousses de bourses d'ombre (A) et de lumière (B), et les pousses végétatives d'ombre (C) et de lumière (D).

Les relations liant la surface foliaire à la longueur de pousse (figure 24) révèlent certaines différences. Les comparaisons de pentes réalisées grâce aux SMA affiche des différences significatives (> 0,05) pour les paires D-B (0,016) et D-C (0,001). En revanche, les paires A-B et A-C ne manifestent pas de différences de pentes significatives (0,225 et 0,823). Ce sont donc les pousses végétatives de lumière qui semblent sortir du lot avec une pente légèrement plus élevée que le reste des combinaisons testées. A l'ombre, la surface foliaire évolue en fonction de la longueur de pousse de la même manière sur pousses de bourse et sur pousses végétatives. Cette évolution n'est pas affectée par l'exposition à la lumière chez les pousses de bourses. En revanche, à la lumière la surface foliaire augmente plus rapidement avec la longueur de pousse pour les pousses végétatives que les pousses de bourses. Enfin, la surface foliaire des pousses végétatives augmente plus rapidement avec la longueur de pousses lorsque celles-ci sont situées à la lumière.

2.3.4 Déterminer les surfaces foliaires

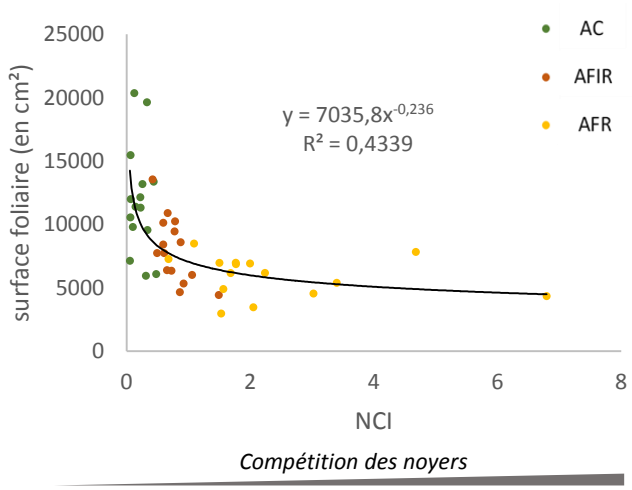


Figure 25 : surfaces foliaires (en cm²) calculées à partir des relations allométriques en fonction du NCI.

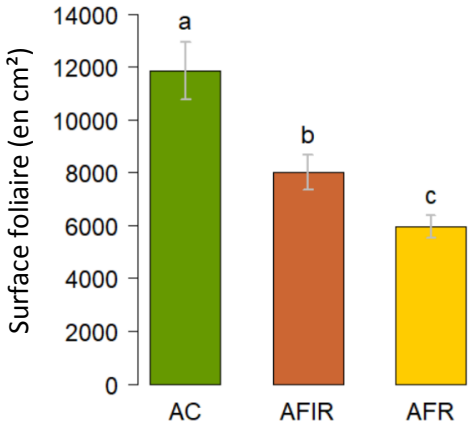


Figure 26 : surfaces foliaires (en cm²) calculées à partir des relations allométriques par modalités

Pour déterminer les surfaces foliaires des pommiers, les équations obtenues dans la partie précédente sont utilisées de la manière suivante : A et C pour les pommiers des modalités AFR et AFIR, B et D pour la modalité AC. (Bien qu'il n'y ait pas de différences statistiques entre les équations A, B et C, le choix a été fait de les utiliser séparément). Les surfaces obtenues pour chaque pousse ont été sommées au sein de chaque arbre pour obtenir une surface foliaire totale par arbre. Les surfaces totales des pommiers sont corrélées négativement au NCI qui leur est associé (figure 25). Cette analyse révèle que la compétition enjendrée par les noyers occasionne une diminution de la surface foliaire déployée par les pommiers. Les moyennes par modalité illustrent également cet impact de la compétition de noyers sur la surface foliaire (figure 26). La moyenne des AC est significativement plus élevée que AFIR qui elle-même significativement plus élevée que AFR. Ces écarts sont cohérents avec le constat fait sur le nombre de ramifications de 2017 ($2.1 ; figure 20), et soulignent que les différences observées en 2017 se creusent en 2018 (figure 26). Les surfaces foliaires les plus importantes se retrouvent donc sur les arbres qui se sont le plus développés entre 2017 et 2018.

Le diamètre de tronc des pommiers est une donnée qui témoigne de cet écart de développement (figure 27). La surface foliaire du pommier est corrélée positivement au diamètre de son tronc. Cette corrélation est relativement forte avec un R^2 de 0,63. D'autre part, ces diamètres de tronc sont impactés négativement par le NCI (figure 28). Une diminution de la compétition avec les noyers entraine donc un développement global plus important et une surface foliaire plus élevée

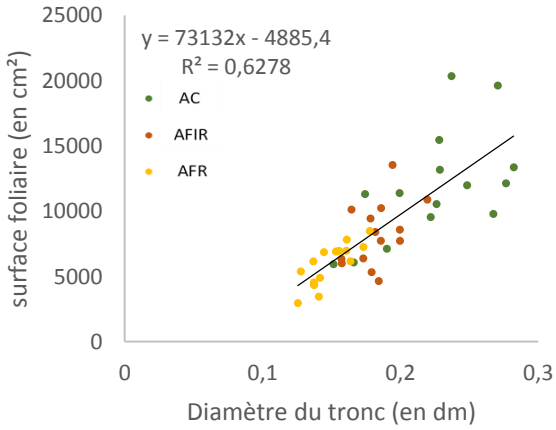


Figure 27 : Surface foliaire (en cm²) en fonction du diamètre du tronc (en dm). Corrélation de Pearson : p-value < 0,0001

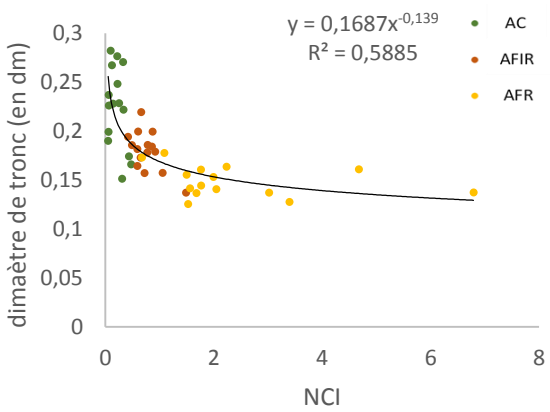
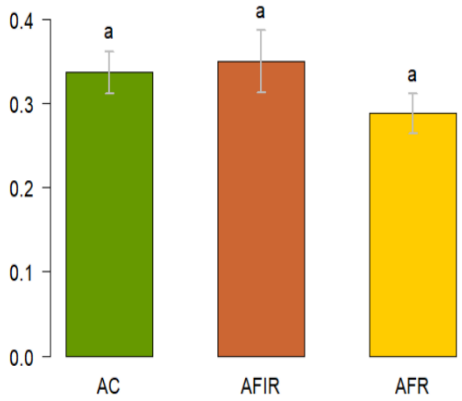
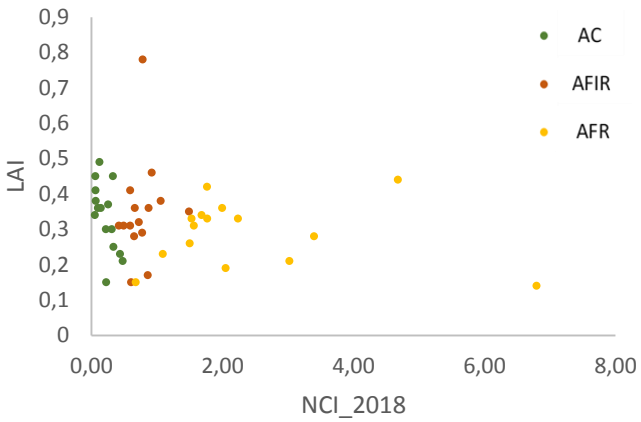


Figure 28 : diamètre de tronc (en dm) en fonction du NCI.

2.3.5. La surface foliaire par surface de sol

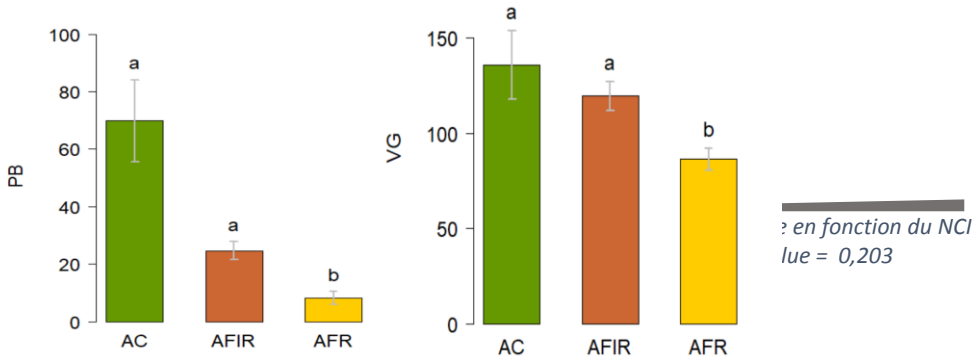




Compétition des noyers

Le LAI calculé à partir des photos hémisphériques est de moyennes générales similaires pour chaque modalité (figure 29) indiquant que la modalité n'a pas d'effet sur le LAI. Les valeurs moyennes de LAI sont comprises entre 0,28 et 0,35 mètre carré de surface foliaire par m² de sol. D'autre part, le NCI ne présente pas d'effet significatif sur le LAI des pommiers (figure 30). Cela indique que la différence de surface foliaire observée ($2.3.4.) ne s'explique pas par une différence de densité des feuilles mais par une densité de volume de la frondaison.

Figure 29 : l



e en fonction du NCI
lue = 0,203

Figure 31 : nombre moyen de ramifications de 2018 par modalité pour les pousses de bourses (à gauche) et végétatives (à droite)

Les surfaces foliaires globales par arbres sont portées par un nombre de pousses différentes selon les modalités (figure 31). AC et AFIR ont produit un nombre moyen de ramifications significativement plus élevés que AFR, mais ne montrent pas de différences significatives entre eux. Les pousses de bourses semblent montrer des écarts plus importants entre les modalités que les pousses végétatives.

2.3.6 Les surfaces foliaires par type de pousses

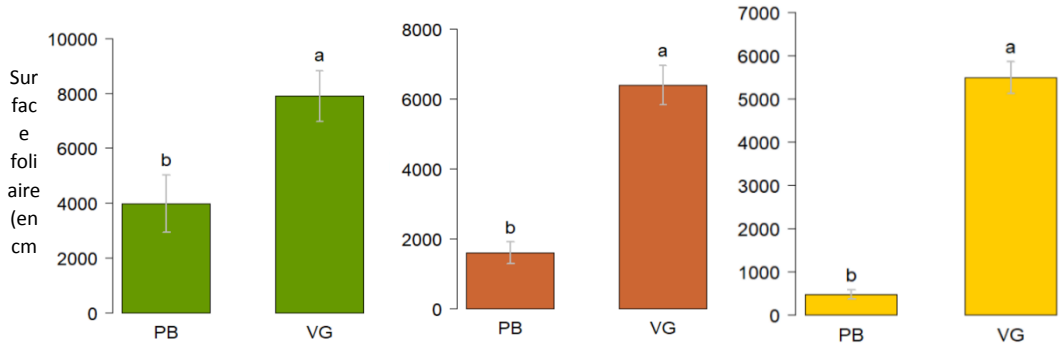


Figure 32 : Comparaisons des surfaces foliaires (LA en cm²) par modalités (vert = AC ; rouge = AFIR ; jaune = AFR) entre les types de pousses (PB = pousses de bourses ; VG= pousses végétatives).

Les pousses de 2018 présentent des surfaces foliaires significativement différentes selon la classe à laquelle elles appartiennent (végétatifs ou pousses de bourses). Pour chacune des trois

modalités, la majorité de la surface foliaire est développée par les pousses végétatives (figure 32). Cet écart de surface foliaire des pousses végétatives et des pousses de bourses semble s'accentuer légèrement en AFIR et plus fortement en AFR. La proportion de surface foliaire par catégorie de pousse varie en fonction du NCI (figure 33). La relation entre la proportion de surface foliaire développée par les pousses de bourses et le NCI est négative. Le R^2 reste cependant relativement faible, dû à une grande variabilité des résultats pour les pommiers ayant un NCI faible (inférieur à 2). Les comparaisons des moyennes par modalité rendent également compte de cette variabilité pour AC, ainsi que pour AFIR. Cette variabilité est cependant moins forte pour la modalité AFR (figure 34). En AC les pousses de bourses représentent 30% de la surface foliaire totale contre 20% en AFIR et 10% en AC. La comparaison de ces trois moyennes révèle des différences significatives entre AFR et les modalités AC et AFIR qui ne manifestent pas de différences significatives. La modalité AFR montre un taux de surface foliaire développée par les pousses de bourses plus faible que les deux autres modalités.

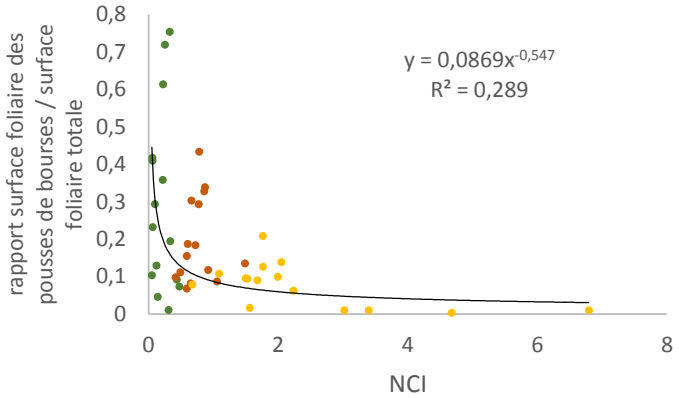


Figure 33 : proportion de la surface foliaire développée par des pousses de bourses en fonction du NCI.

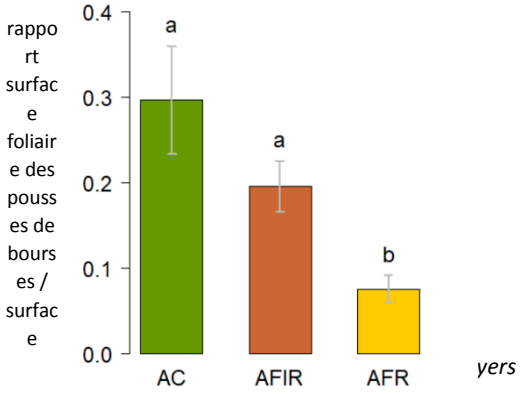


Figure 34 : Proportion de la surface foliaire des pousses de bourses par modalité

Ces résultats indiquent qu'en contexte de forte compétition avec les noyers, la surface foliaire de pommiers est en grande partie portée par des pousses végétatives. Ce constat est révélateur d'une différence en termes de nombre de fleurs et donc de pousses de bourses par arbre suivant la modalité.

2.3. Le nombre d'inflorescence de 2018 et leur structure

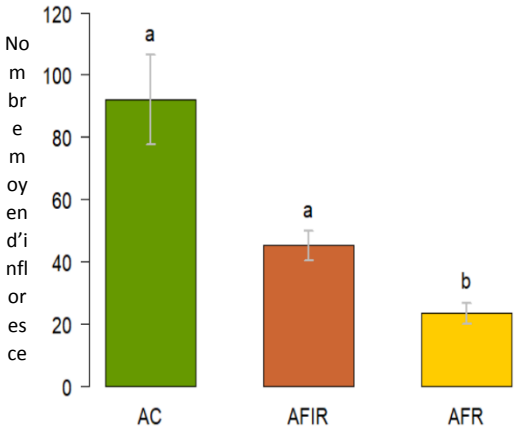


Figure 35 : nombre moyen d'inflorescences par arbre en fonction de la modalité.

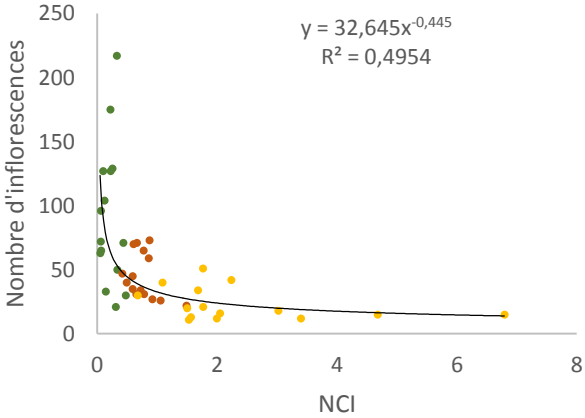


Figure 36 : Nombre d'inflorescences par arbre en fonction du NCI.

Le nombre de fleurs par arbre signale certaines différences en fonction des modalités (figure 35). Les pommiers en AC et en AFIR semblent porter un nombre moyen de fleur similaire (bien que la variabilité soit relativement élevée dans le cas des témoins). Les pommiers en AFR en revanche montrent un nombre moyen de fleurs significativement plus faible que les pommiers en AC ou AFIR. Ces différences se retrouvent de la même manière en fonction du NCI. L'effet de la compétition de noyers pour la lumière a un effet négatif, sur le nombre d'inflorescences par arbre (figure 36).

L'analyse de la structure des inflorescences révèle quelques différences sur le nombre de fleurs par inflorescence. AC présente des inflorescences contenant plus de fleurs que AFIR (figure 37) ce qui correspond aux attentes. Cependant AFR ne présente de différences sur ce point ni avec AC ni avec AFIR. D'autre part le nombre de feuilles par inflorescence est statistiquement similaire entre les trois modalités (figure 38), indiquant que les conditions d'exposition n'influencent pas la composition de la couronne de feuilles des bourses

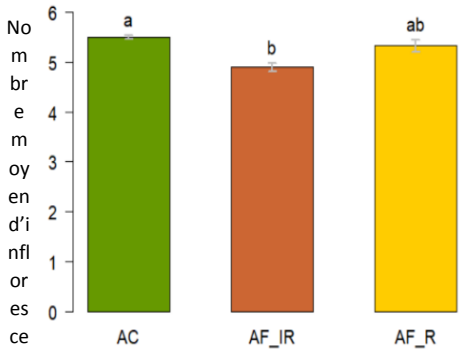


Figure 37 : nombre de fleurs par inflorescence et par modalité

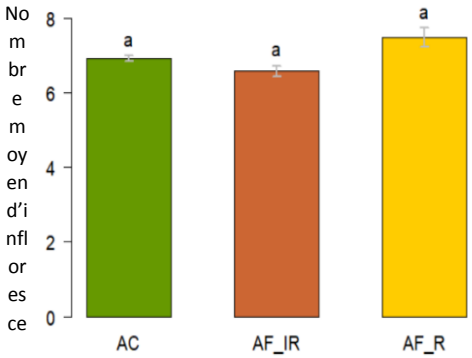


Figure 38 : nombre de feuilles par inflorescence et par modalité

3. LA PHENOLOGIE VEGETATIVE ET FLORAL D'AVRIL A JUILLET 2018 :

3.1 les arrêts de croissance

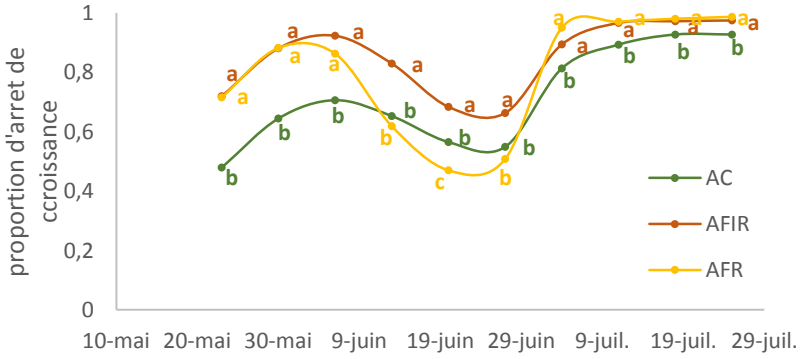


Figure 39 : Dynamique de la proportion moyenne des pousses terminales en arrêt de croissance par arbre dans chaque modalité entre mai et juillet 2018.

La comparaison date par date des proportions moyennes d'arrêts de croissance par modalité montre des différences significatives (figure 39). Les trois courbes des proportions d'arrêt de croissance des pousses terminales, correspondant aux trois modalités, suivent sensiblement la même allure. Un creux peut être observé entre le 13 et le 27 juin. Les proportions moyennes des pousses

terminales en arrêt de croissance sont de manière générale plus faibles en témoin agricole (AC) qu'en agroforesterie (rang AFR et inter-rang AFIR). La proportion d'arrêt de croissance en Agroforesterie inter-rang est toujours significativement supérieure à la proportion d'arrêt en témoin, ce qui semble cohérent avec les attentes. En revanche pour la modalité rang, la dynamique des arrêts de croissance est plus volatile, ce qui est plus surprenant. Lors du pic de croissance entre le 13 et le 27 juin la proportion d'arrêt en AFR passe du niveau de AFRI à celui de AC et même au-delà, ce qui indique qu'à cette période la reprise de la croissance a été plus importante en agroforesterie rang qu'en témoins et en inter-rang. Cependant, lors du pic d'arrêt de croissance du 4 juin, la proportion d'arrêt en AFR revient au niveau de AFIR.

Le creux d'arrêt de croissance observé dans les trois modalités peut être provoqué par la dernière averse du printemps, aux environs du 10 juin (figure 19 cf $1.3). L'apport d'engrais organiques mi-juin peut également avoir eu un effet. Une fois celui-ci minéralisé, les pommiers ont pu puiser les ressources nécessaires au redémarrage de la croissance. A la fin du mois de juin, un arrêt de l'irrigation a été nécessaire ce qui peut expliquer le pic d'arrêt de croissance observé dans les trois modalités.

3.2 La phénologie des fleurs :

De manière générale, il y a plus de différences significatives entre AC et les deux autres modalités qu'entre AFR et AFIR (figure 40). Les témoins et les arbres en systèmes affichent des décalages de phénologie.

Il est possible d'identifier trois périodes. Tout d'abord avant le 25/04, les odd ratio de AFR par rapport à AC sont supérieur à 1 ce qui indique une avance dans les stades phénologiques de AFR par rapport au témoin. De même AFR est en avance sur AFIR qui est retard par rapport à AC. Après le 25/04, la modalité AFIR devance les témoins et rejoint le même niveau que AFR dans les stades phénologiques. Jusqu'au 9/05 AFR et AFIR devance les témoins (et AFIR redépasse légèrement AFR). Puis c'est AC qui reprend de l'avance après le 9/05 sur AFR et AFIR, qui se retrouvent au même niveau dans les stades phénologiques.

Le plateau qu'atteignent les courbes AFIR-AC et AFR-AC à partir du 11/05 s'explique par l'arrivée à maturité des fleurs qui en témoin agricole ont donné beaucoup de fruits, alors qu'en agroforesterie (rang et inter rang) très peu de fleurs sont arrivées à maturité et sont donc restées bloquées au stade précédent. Cela explique l'inversion de l'avance de stades phénologiques entre le témoin et les modalités agroforestières à partir du mois de juin.

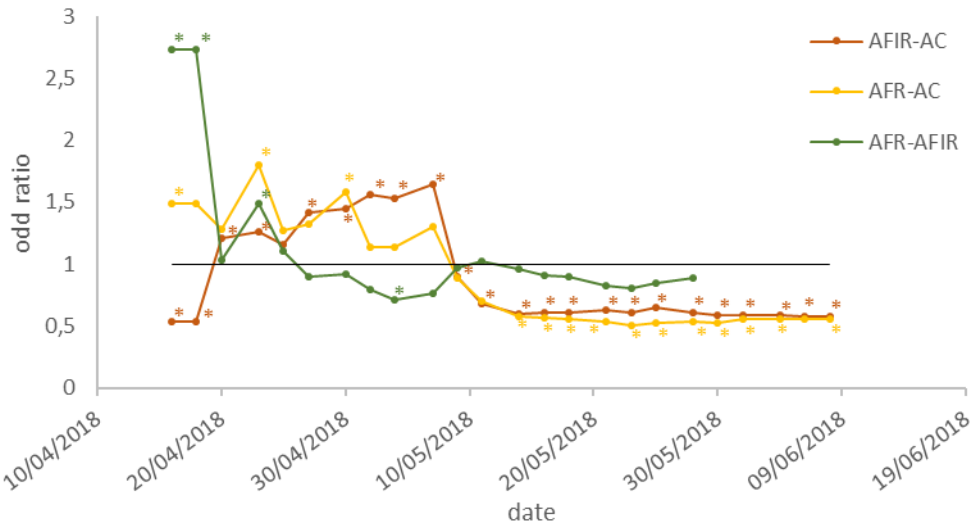


*Figure 40 : Comparaison date par date de l'avance/retard des stades phénologiques par paire de modalité, à travers l'évolution des odd ratios de ces paires. Les odd ratios supérieurs à 1 montrent une avance des stades phénologiques de la modalité considérée par rapport à la référence (deuxième terme de la paire). Rouge : comparaison de AFIR par rapport au témoin ; Jaune : comparaison de AFR par rapport au témoin ; Vert : comparaison de AFR par rapport à AFIR ; * = différence significative au seuil de 0,05, (ou valeur non proche de 1)*

4. FLUX DE SEVES

4.1. Quantité d'eau transpirée…

Dans un premier temps, les flux de sèves obtenus par la méthode TTD sont normalisés par la surface de la section des troncs au niveau de l'insertion de la sonde. Les valeurs de flux de sève horaires sont ensuite cumulées sur la période du 4 avril au 25 juillet. Ce cumule permet d'estimer et de comparer les volumes d'eau transpirée par les pommiers sur la période définie en fonction de la compétition des noyers. Ces quantités d'eau transpirée ne montrent pas de corrélation significative avec le NCI (figure 41). La comparaison des moyennes par modalité montre une variabilité relativement faible pour chaque modalité (figure 42). Ce résultat indique que la quantité d'eau transpirée par dm² de tronc est similaire pour chaque pommier du dispositif, quelles que soient les conditions de compétitions liées aux noyers.

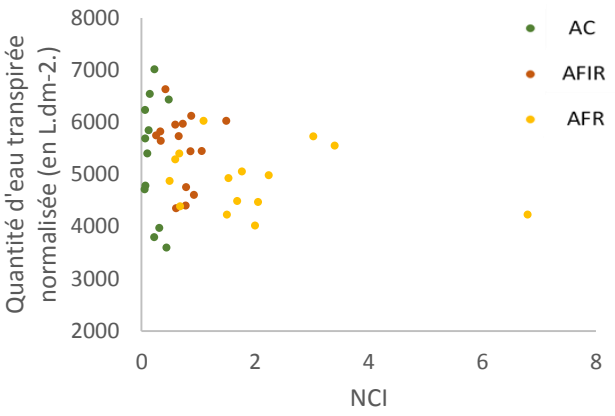


Figure 41 : Cumul des quantités d'eau transpirées par dm² (en L.dm^{-2}) entre le 04/05 et le 25/07 en fonction du NCI. Corrélation de Pearson : p-value = 0,107

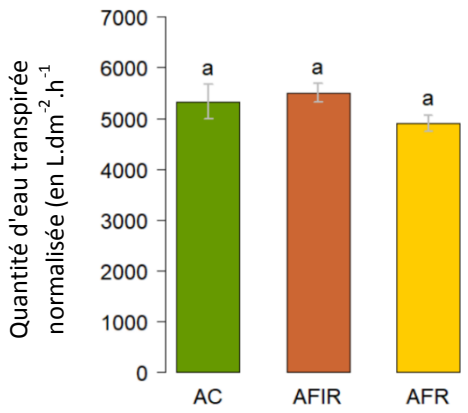
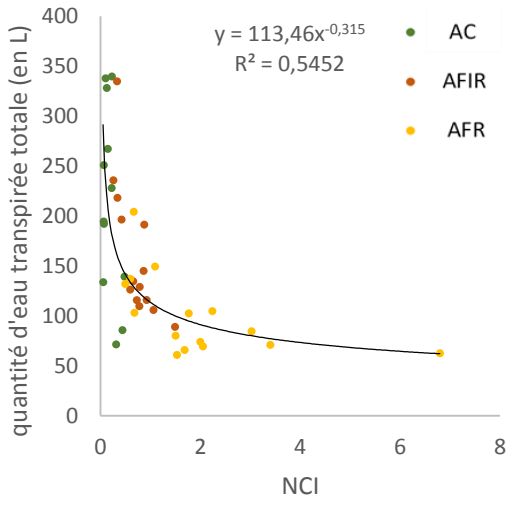
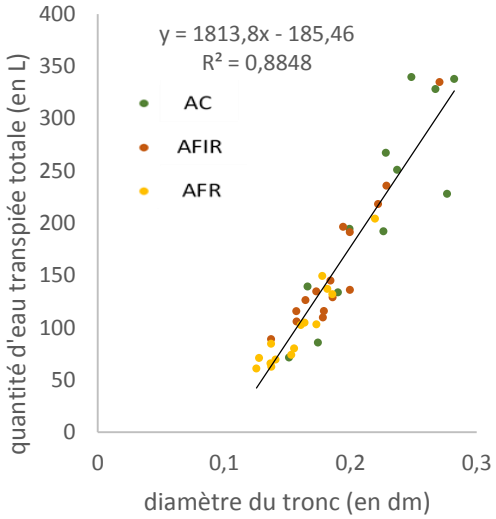


Figure 42 : Cumuls moyens des quantités d'eau transpirée par dm² (en L.dm^{-2}) enregistrés entre le 04/05 et le 25/07 par modalité.

Les quantités d'eau transpirée totale (sans prendre en compte la surface de section du tronc) sont, elles, en revanche, impacté négativement par le NCI (figure 43). D'autre part le R² est plus élevé, indiquant que le NCI explique une grande partie (54%) de la variation de quantité d'eau transpirée totale. La compétition de noyers entraine donc bien un effet négatif sur la quantité d'eau transpirée, et donc sur le flux de sève, qui est lié au diamètre du tronc. La relation entre diamètre de tronc et quantité d'eau transpirée totale souligne bien cette effet (figure 44). La corrélation est positive et significative au seuil de 5%. Le R² est élevé et indique que 88% de la variation de quantité d'eau transpirée totale entre les pommiers est expliquée par le diamètre de tronc.





4.2. … En liens avec l'architecture

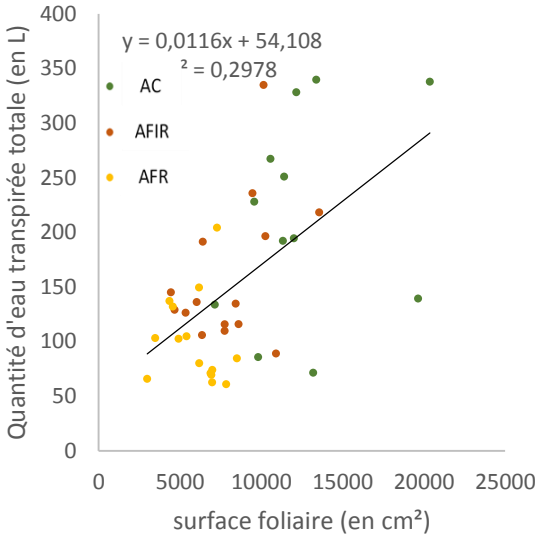


Figure 45 : Quantité d'eau transpirée totale (en L) en fonction de la Surface foliaire (en cm²) en fonction du diamètre de tronc (en dm).
Corrélation de Pearson : p-value < 0,0001

La quantité d'eau transpirée totale (figure 45) affiche une corrélation positive avec la surface foliaire, significative au seuil de 5%. Le R^2 est relativement faible témoigne d'une importante variabilité et que la surface foliaire n'explique qu'une faible part de la variabilité de quantité d'eau transpirée totale (30%). Quatre pommiers (pommiers 1, 50, 97 et 98) en témoins présentent des valeurs étonnamment basses Ces résultats montrent néanmoins

Figure 44 : quantité d'eau transpirée totale (en L) en fonction du diamètre du tronc (en dm). Corrélation de Pearson : p-value < 0,0001

que plus la surface foliaire est importante plus la quantité d'eau transpirée est élevée. D'autre part la surface foliaire est la plus élevée lorsque le NCI est le plus faible (cf $2.3.4. figure 25). Il existe donc un lien indirect entre NCI et quantité d'eau transpirée à travers la surface foliaire.

6 Discussion

1. L'IMPACT DE L'AGROFORESTERIE SUR LES POMMIERS :

1.1 Une architecture foliaire moins développée :

L'étude de l'architecture des pommiers met en lumière un développement plus faible des pommiers en système agroforestier en matière de surface foliaire et de ramification. Les pommiers cultivés en modalité agroforestière ont développé des surfaces foliaires moins importantes qu'en témoins, ce qui peut s'expliquer par plusieurs éléments.

Les arrêts de croissance plus fréquents pour les modalités agroforestières diminuent le développement des pommiers, et ce ralentissement de croissance s'accumule d'année en année. En effet ce retard avait déjà été constaté en 2017, et se confirme donc l'année suivante.

Par ailleurs les résultats de 2017 indiquaient un nombre de ramifications plus faibles en modalité agroforestière qu'en témoins. Cela a été observé de nouveau en 2018 ce qui confirme l'impact de cette conduite sur la croissance des pommiers.

Les relations allométriques longueur de pousses / surface foliaire sont un deuxième élément de réponse. Elles sont globalement identiques pour tous les types de pousses sauf pour les pousses végétatives de lumière. Un accroissement en longueur des pousses végétatives de lumière entraine une augmentation de la surface foliaire plus importante que les pousses à l'ombre. Les surfaces foliaires des pousses végétatives représentent la grande majorité des surfaces foliaires totales des pommiers. Donc pour les pommiers situés en témoins agricoles, mieux exposés à la lumière, cette différence entraine un accroissement de la surface foliaire plus important qu'en agroforesterie. Les surfaces moyennes des feuilles ne montrent pas de différence selon les conditions d'exposition. La différence de relation observée peut donc s'expliquer par la longueur des entre-nœuds entre les feuilles qui se réduit dans un contexte d'ensoleillement plus important.

Très peu d'études présentent les effets d'un tel ombrage sur le développement des pommiers. Les cas les plus similaires concernent les filets de protection (des ravageurs et/ou du rayonnement) qui montrent des résultats différents. Les études de Mumpabi et al. (2018) ou Wünsche et Alan (2000) indiquent que l'ombre générée par les filets sur les pommiers entraine une augmentation du LAI. Elles montrent également le lien entre LAI et rendements en fruits de pommiers, indiquant que l'ombre générée sur les pommiers dans le cas des filets d'ombrages occasionne une augmentation du rendement. Cette incohérence entre les résultats obtenus dans cette étude et la littérature peut s'expliquer par la différence de l'ombre considérée. Dans le premier cas, la couverture produite par l'environnement (les noyers) représente 30 à 70% d'ombre. La lumière devient alors un facteur limitant pour la croissance des pommiers. Dans le second cas, l'ombre engendrée par les filets de protection n'occasionne que 20% d'ombre (Mumpabi et al. 2018) et permet de lutter contre les brûlures de pommes (Chandel et al. 2018). Une étude plus ancienne (Barden 1977) montre qu'une couverture de 80% de jeunes pommiers entraine une diminution de 10% de la croissance des pousses ce qui correspond aux résultats de cette étude. Cependant, l'étude de Barden souligne également le fait que malgré cette différence, la surface foliaire globale n'était pas impactée, impliquant que les feuilles des pommiers à l'ombre ont une surface plus grande qu'au

soleil. Ce point contredit les résultats des surfaces foliaires observés. Les effets des compétitions sous-terraines qui ne sont pas pris en compte dans le cadre de cette étude peuvent expliquer cette divergence.

1.2. Une production d'inflorescence diminuée

Des différences très nettes ont été mises en lumière concernant le nombre d'inflorescences des pommiers en agroforesterie et en témoins. De manière générale, la culture de pommiers en agroforesterie révèle un effet négatif sur le nombre d'inflorescences produites. Cela indique que les compétitions des noyers ont eu un effet sur l'induction florale des pommiers au cours du printemps-été 2017. D'autre part, l'étude dynamique de la phénologie des fleurs révèle un décalage dans les stades phénologiques. Les pommiers en rang et inter-rang montrent une avance dans leur phénologie par rapport aux témoins.

Quelques études peuvent renseigner sur les mécanismes de l'induction florale pour comprendre les différences observées en termes de nombre de fleurs produites. Outre les effets inhibiteurs internes à la plante d'année en année (dus à la production de gibbérelline dans les graines des fruits de l'année n-1 (Trillot et al. 2002)), l'environnement a également un effet sur l'induction florale. Une température élevée peut favoriser la croissance végétative et en réduire l'induction florale (Wilkie et al. 2008). D'autre part, un ombrage important diminue également l'induction florale (Mehri et Crabbé 2002, Jackson & Palmer 1976). Wilkie et al. (2008) montrent qu'au-delà de 70% d'ombrage l'induction florale est en majorité inhibée (sur cultivar 'McIntosh'). Les pommiers en modalité AFR qui présentent le moins de fleurs sont en condition d'ombrage similaire ce qui peut expliquer le nombre de fleurs très faible. Le microclimat engendré par les noyers peut réduire l'accumulation de degrés-jour par les pommiers et donc impacter l'induction florale.

Concernant les décalages phénologiques observés, quelques études apportent des éléments de discussions. Ces études font ressortir le rôle de la température sur la phénologie florale, en perspective du réchauffement climatique, mais peu d'études évoquent le rayonnement (Yaacoubi et al. 2014, Legave et al. 2015). Elles mettent en avant l'impact positif d'une augmentation des températures sur l'avance dans la phénologie florale du pommier due à une accumulation de degrés jour plus rapide. Les résultats obtenus ici concernant la phénologie des fleurs sont donc contradictoires par rapport à la littérature. En effet, les pommiers montrant une avance dans la phénologie des fleurs sont en contexte agroforestier, susceptibles de bénéficier d'un microclimat diminuant la température et donc ralentissant l'accumulation de degrés-jours. Là encore des données sur le sol pourraient constituer une piste d'explication. Greer et al. (2006) montrent que la température du sol dans la zone racinaire impacte également la phénologie et qu'une température du sol plus élevée entraine une floraison plus précoce.

1.3. Une quantité d'eau transpirée plus faible.

L'analyse des premiers résultats de flux de sève a permis de mettre en lumière l'impact de la compétition des noyers sur la quantité d'eau transpirée. Cette quantité d'eau transpirée totale est corrélée à de nombreux éléments architecturaux du pommier. Cependant la quantité d'eau transpirée à diamètre de tronc égal est la même sur les 3 modalités. La compétition des noyers n'entraine donc pas de différence de débit (L d'eau /dm² de tronc) mais elle impacte le développement général de l'arbre ce qui se répercute sur la quantité d'eau transpirée totale.

La croissance secondaire de l'arbre entraine un accroissement du diamètre du tronc et donc du xylème, ce qui permet à une plus grande quantité d'eau d'être transpirée. Il a été observé que ce

diamètre est plus élevé en contexte de forte exposition (témoins) qu'à l'ombre des noyers. La compétition pour la lumière, engendrée par les noyers, retarde le développement des pommiers qui déploient des surfaces foliaires plus faibles, proportionnelles au diamètre de tronc. Les feuilles étant le lieu principal de la transpiration, leur impact sur la quantité d'eau transpirée est cohérent. L'effet combiné de la diminution de la surface foliaire et du diamètre de tronc explique donc la diminution de quantité d'eau transpirée en contexte de forte compétition pour la lumière.

Les effets de l'agroforesterie observés sur la surface foliaire, le diamètre de tronc et la quantité d'eau transpirée sont cohérents avec la bibliographie. Une étude récente (Petit et al. 2018) suggère que la surface foliaire et la surface de xylème augmentent en proportion égale au cours du développement de la plante. Cependant, les conditions atmosphériques et celles du sol peuvent influencer la transpiration des feuilles et le flux de sève dans le xylème. Dans des conditions climatiques différentes, les arbres ajustent leur croissance (ramification et développement foliaire) et leur production de xylème pour maintenir une conductance du xylème égale (Petit et al. 2018).

2. CRITIQUES DES RESULTATS :

Les résultats obtenus sont à interpréter en considérant certaines limites. Tout d'abord, l'analyse des surfaces foliaires présente plusieurs biais. Le prélèvement de feuilles pour les allométries longueur de rameaux – surface foliaire est intervenu à un moment où la quasi-totalité des feuilles de bourses (situées sous les inflorescences) avait déjà chuté. Cela a donc rendu impossible d'obtenir la surface foliaire associée aux bourses, et a donc contribué à sous-estimer la surface foliaire totale des arbres, la surface foliaire présentée ne représentant que la surface portée par des pousses (de bourses et végétatives). Une pression importante du puceron cendré en avril a grandement impacté certains arbres (le pommier 30 notamment). Ces arbres se sont retrouvés en partie défoliés, et la croissance des pousses impactées a également été diminuée. Ces dégâts peuvent avoir pour effet de sous-estimer la surface foliaire que ces arbres auraient développée sans la présence du puceron. Du plus, les LAI obtenus par photo hémisphérique présentent des valeurs qui semblent être sous-estimés par ces effets, au regard de la littérature (Stepan 2007, Palmer et al. 1992). Le clumping effect, désignant la superposition des feuilles entre elles, est probablement la cause principale de cette sous-estimation, car il n'a pas pu être calculé dans le cadre de ce protocole.

L'analyse de la phénologie des inflorescences présente également des limites. La progression dans les stades phrénologiques s'est arrêtée au stade H correspondant à la chute des derniers pétales. Dès ce moment, la majorité des fleurs est tombée. Les décalages phénologiques observés ne rendent donc pas compte des stades de nouaison et de formation des fruits. L'hypothèse d'une mauvaise pollinisation a été avancée. La présence d'un grand nombre d'insectes pollinisateurs laisse à penser que le problème proviendrait de la disponibilité en pollen. Les fleurs de pommiers sont fécondées par allogamie (une fleur ne peut pas se féconder elle-même). De plus, le pommier est un arbre auto-incompatible ayant besoin d'une autre variété pollinisatrice. Dans le cas de ce dispositif les pommiers pollinisateurs (de variété Story) ne sont que dans leur deuxième (voire première) année de croissance et n'ont pas donné de fleurs, rendant impossible la production de pollen à disposition des fleurs de Dalinette. Les quelques fruits produits par les pommiers ont pu recevoir du pollen de variétés sauvages présente dans le domaine de Restinclières.

Enfin, le dispositif a été de conçu dans l'objectif de faire de la lumière le seul facteur limitant. L'irrigation et la fertilisation (apport d'azote par la légumineuse de l'inter-rang et par engrais organique sur les rangs de pommiers) permettent de soutenir cette hypothèse. Les résultats de 2018

sur les arrêts de croissance soulignent toutefois un stress hydrique potentiel pour les pommiers situés dans le rang des noyers. En effet, la reprise de la croissance de AFR plus marquée au moment des fortes pluies de juin, ainsi que son arrêt au moment de l'arrêt de l'irrigation, suggèrent que l'eau est un facteur limitant pour ces pommiers, malgré l'irrigation.

3. PERSPECTIVES DE RECHERCHES :

3.1. Suivis de la croissance, flux de sèves et production de fruits

Les résultats concernant les arrêts de croissance confirment ceux de 2017 ce qui est très encourageant. Il faudrait donc reporter cette analyse en 2019, en approfondissant les relevés de données. Plutôt que d'échantillonner les pousses en attribuant une valeur à chaque pousse terminale par pommier, il serait judicieux de noter un nombre exhaustif de pousses en croissance par arbre. Ce nombre aurait besoin d'être pondéré par le nombre de ramifications total de 2018 pour comparer des arbres très différents entre eux en termes d'architecture.

D'autre part, les flux de sève n'ont été analysés ici qu'en relatif, à travers un cumul sur une période donnée. En se basant sur les conclusions de l'étude de Petit et al. (2018), il serait intéressant d'observer le comportement du flux de sève en fonction des conditions microclimatiques des modalités.

En 2019, la plupart des pommiers pollinisateurs seront dans leur troisième année de croissance, et devraient donc produire plus de fleurs que cette année. Ainsi, la pollinisation des fleurs sevrait plus complète et une étude de la production de fruits devrait être possible. Cela serait l'occasion de tester l'impact de la culture en système agroforestier sur le rendement en pommes, la qualité des fruits (couleurs, formes, compositions), ou encore la protection des brûlures dues au soleil.

3.2. Le NCI

L'indice de compétition calculé sur la base des diamètres des noyers et des gap fraction des canopées des noyers permet d'affiner les résultats donnés par les modalités. A travers lui, la compétition des noyers n'est plus considérée comme une simple modalité mais comme un gradient continu. Il est de manière générale bien représentatif des modalités qui ont été créées et des situations des pommiers au sein de chacune, mais la variabilité des NCI par modalité est inégale. Les corrélations entre NCI et les données d'architecture du pommier (surface foliaire, nombre d'inflorescence, diamètre de tronc) ne sont pas linéaires mais suivent une fonction de type puissance. Ce type de relation non linéaire montre que le NCI capture bien la variabilité observée dans un contexte de compétition élevé (proche des noyers), mais en diminuant cet effet des noyers, d'autres facteurs doivent impacter l'architecture des pommiers, et ne sont pas capturés par la NCI. La disponibilité en eau, le profile culturale du sol ou les effets de compétition avec la culture de l'inter rang pourraient être des pistes à explorer. Cette observation présente une piste de recherche autour du NCI et des potentielles améliorations à y apporter.

3.3. Améliorer le protocole LAI

Le protocole utilisé pour calculer le LAI a donné des résultats largement sous-estimés. Une amélioration de cette méthode serait donc judicieuse. De nombreux travaux ont approché le LAI à travers les photos hémisphériques grâce à d'autres logiciels comme Can-eye (Baret et al. 1993, Weiss

et al 2008, Jonckeere et al. 2004). L'étude de Weiss et al. (2008) présente un protocole de l'utilisation du logiciel Can-eye, et du traitement des données pour parvenir au LAI grâce à l'équation 5.

Équation 5 : LAI en fonction du GAP fraction (Weiss et al. 2008) :

$$P_0(\theta_V, \varphi_V) = e^{\frac{-\lambda_V . G(\theta_V, \varphi_V) . LAI}{cos\theta}}$$

$P_0(\theta v, \varphi v)$ *: fraction de trou bidirectionnelle /* θv *: directions zénithale /* φv *: direction azimutale*
La fraction de trou peut être monodirectionnelle et ne dépend donc plus que de l'angle zénithal de visée.
λ_v *: Paramètre d'agrégation des feuilles. (Les feuilles ne sont pas distribuées aléatoirement mais sont agrégées autour d'un même plan. Dans CANEYE, utilisation du modèle de distribution ellipsoïdale des inclinaisons foliaires caractérisé par un angle moyen d'inclinaison foliaire (ALA : Average Leaf Angle))*
$G(\theta v, \varphi v)$ *: fonction de projection des feuilles dans la direction* $(\theta v, \varphi v)$*. Utilisation d'une seule direction* $(\theta v=57.5°)$ *pour cette direction* $G \approx 0.5$ $(\theta v, \varphi v)$.

Des études plus récentes (Poblete et al 2015, Mora et al 2016) proposent des améliorations de l'équation utilisée (équation 1, $2.2, Matériel et Méthode) en y ajoutant un clumping index Ω permettant de diminuer l'effet de la superposition des feuilles (équation 6). La méthode utilisée dans ces études s'appuie sur l'analyse de photos rectangulaires quadrillées formant un ensemble de sous images.

Équation 6 : formule du LAI améliorée par le clumping index :

$$LAI = -fc\left(\frac{ln\phi}{k}\right).\Omega$$

Φ *: porosité de la couronne*

$$\phi = \frac{f_f}{f_c}$$

f_f *: foliage cover.* $f_f = gt / Tp$ / f_c *: crown cover.* $f_c = gL/Tp$
gt : Nombre total de pixel blanc. gL nombre de pixel de pixel blancs dans les sous-images où le ration pixel blanc/noir est supérieur à 0,75. TP nombre total de pixel (blanc et noir).
K *: coefficient d'extinction (0,68 pour les pommiers)*
Ω : *clumping index:*

$$\Omega = \frac{(1-\phi).\ln(1-f_f)}{ln\phi.f_f}$$

En plus de ces nouvelles méthodes d'approche du LAI, le LAI réel sera calculé en mesurant la surface des feuilles tombées des arbres (en septembre-octobre) par SLA (relation entre la masse sèche des feuilles et leur surface). Cette surface foliaire sera ramenée à la surface au sol correspondant à la projection du pommier pour obtenir une surface foliaire par m² de sol.

3.4. Observations du terrain

Certains problèmes liés aux goutteurs ont pu être remarqués et certains résultats suggèrent que l'eau est un facteur limitant pour la croissance des pommiers dans le rang des noyers. une hétérogénéité de débit des goutteurs pourrait en être la cause. Des travaux sont prévus pour irriguer les pommiers à partir d'une station d'épuration voisine. Cela pourrait être une occasion de réétudier les débits des goutteurs nécessaires et d'en contrôler leur état.

La forte pression exercée par les pucerons cendrés et verts a entrainé la défoliation partielle de certains arbres. En parallèle, une grande quantité d'auxiliaires a pu être observée (syrphes, araignées, staphylins, carabes). Une première notation sur la pression puceron a été réalisée mais ces points pourront être explorés dans le cadre du projet ALTO, porté par Sylvaine Simon de l'UERI Gotheron, dans lequel s'inclura le dispositif du projet GAFA.

4. PERSPECTIVES AGRONOMIQUES

Les résultats ont montré qu'une forte compétition pour la lumière (en modalité rang) entraine une baisse de développement chez les pommiers, suggérant un rendement qui s'annonce

faible. La modalité inter-rang en revanche montre des résultats intermédiaires entre témoins et agroforesterie rang. La ramification de 2017 (figure 20) et de 2018 (figure 31) la surface foliaire développée en 2018 (figure 26), le nombre d'inflorescences (figure 35) ou encore la quantité d'eau transpirée (figure 44) présentent des décalages faibles par rapport aux témoins, voire négligeables (nombre d'inflorescences, ramification sen 2017 et 2018). Cette similarité entre pommier témoins et d'inter rang indique que pour optimiser la croissance des pommiers en système agroforestier, une distance minimale par rapport aux noyers doit être respectée, privilégiant une valeur de NCI maximum de 2.

L'intérêt d'une telle association est multiple. Tout d'abord, les phénomènes de brûlures des fruits dues à de fortes expositions au rayonnement solaire représentent une problématique très importante en verger. Ces brûlures occasionnent une perte de qualité en termes de couleur, de composition ou d'aspect. Une étude montre que, dans l'Etat du Washington, ces dégradations peuvent représenter jusqu'à cent millions de dollars de perte par an (Chandel et al. 2018). Des filets de protection existent pour parer à ce genre de dégâts, en produisant un ombrage de 20% en moyenne (Mumpabi et al. 2018), mais cette installation a un coût important allant de 20 000 $ à 70 000 $ par hectare en moyenne, et pose des questions d'empreinte écologique dans l'analyse de cycle de vie de la pomme (Ridgen 2008). La modalité inter rang fournit un ombrage de l'ordre de 30% en moyenne, correspondant aux protections des filets. Dans un contexte de réchauffement climatique, un verger permettant de lutter contre des problématiques de brûlures des fruits pourrait représenter un levier agroécologique intéressant. Une étude économique serait nécessaire pour comparer les différences de bénéfices engendrés entre, d'une part, un verger traditionnel monospécifique équipé de filets, et, d'autre part, un verger agroforestier présentant une baisse de production de fruits mais s'affranchissant du coût des filets et permettant une diversité de revenu plus élevée.

Un verger agroforestier fourni des leviers intéressants dans la lutte contre les bio agresseurs. Les vergers de pommiers traditionnels font partie des cultures les plus consommatrices de pesticides. Des ravageurs comme le carpocapse, le puceron cendré ou la zeuzère peuvent être prédatés par des ennemis naturels (syrphes, staphylins, hyménoptères…) à condition de favoriser leur présence. Le projet ALTO, dans lequel s'inscrit le dispositif du projet GAFA depuis le premier avril 2018, a pour objectif de développer de nouveaux systèmes de production de fruits très bas intrants, en s'appuyant sur les services écosystémiques de régulation. La conception de système très innovant comme ce verger de pommiers agroforestier permettrait d'étudier l'impact réel de l'agroécosystème sur la lutte contre les bio agresseurs, et de capitaliser ces connaissances produites, afin de les partager avec les communautés scientifiques et professionnelles.

Enfin jusqu'ici l'étude n'a porté que sur les strates hautes du système (pommiers et noyer) mais l'inter-rang des pommiers constitue une ressource intéressante, sur les plans économiques et écosystémiques. L'objectif global du projet GAFA est de diversifier les agroécosystèmes pour s'appuyer sur les services écosystémiques dans la lutte contre les bio-agresseurs, pour rendre l'agroécosystème « Pest-suppressive ». Ce concept désigne la réduction d'un groupe de ravageurs par l'augmentation de la richesse de certaines familles particulières d'ennemis naturels (et non par l'utilisation de pesticides). (Cardinale2003). Le système de culture, élaboré jusqu'ici, est certes plus diversifié qu'un verger traditionnel mais l'inter-rang présente un espace intéressant à valoriser sur le plan de la diversité végétale. Des leviers comme les effets allopathiques, ou la perturbation spatiale et temporelle due à l'insertion de nouvelles espèces, pourraient être testés (Ratnadass et al. 2012). Le pâturage constitue une autre valorisation possible de l'inter-rang. L'espèce ovine Shropshire

semble adaptée au sylvopastoralisme en verger, et ne ravage pas les arbres fruitiers (Geddes et Khol 2009). Cette conduite des vergers de pommier est actuellement à l'étude dans le cadre du projet AGFORWARD (Pantera et al 2016).

Conclusion

Le projet GAFA apporte des premiers éléments de réponses sur le comportement des pommiers cultivés en système agroforestier. Dans les conditions de compétitions les plus extrêmes, les pommiers présentent des développements plus faibles en termes de surface foliaire, liés à des arrêts de croissance plus fréquents et plus longs, et à une ramification moins dense. La production d'inflorescences, constituant l'une des composantes du rendement, est également beaucoup plus faible (voire nulle). Enfin, une première analyse globale du flux de sève met en lumière une diminution de la quantité d'eau transpirée liée au ralentissement de développement. L'impact de la compétition pour la lumière sur ces éléments est toutefois à interpréter avec précaution car les effets souterrains (compétition racinaire pour l'eau ou l'azote par exemple) ne sont pas étudiés. Leur poids éventuel dans les résultats observés n'est donc pas connu.

Des données économiques ne sont pas encore disponibles car les pommiers sont jeunes, mais les résultats d'architecture laissent entrevoir que leur rendement s'annonce faible. Cependant, Il a été montré que ces effets de compétitions sont plus faibles, voire négligeables sur des pommiers soumis à une compétition plus modérée (modalité inter-rang, NCI intermédiaire). L'architecture de ces pommiers (surfaces foliaires, ramifications, inflorescences) présente des écarts de développement par rapport aux témoins moins importants que ceux décrits plus haut. Ces résultats permettent de formuler l'hypothèse que la culture de pommiers en agroforesterie pourrait se révéler intéressante sur le plan économique et écologique à partir d'une distance minimale des noyers, correspondant à des NCI maximum de 2.

Pour le confirmer, différentes pistes de recherches pourront être approfondies dans la suite de la thèse et du projet GAFA, à savoir l'architecture, le LAI, les flux de sève mais aussi la production de fruits qui n'a pas encore pu être abordée. Si la thématique de recherche de ce projet est pour le moment très physiologique, l'objectif final du projet est de produire des connaissances sur l'adaptation d'un verger de pommiers à un système agroforestier. Cela sous-entend donc une approche plus écosystémique et économique. D'autres sujets peuvent donc être explorés comme la régulation de la pression des ravageurs par la présence d'auxiliaires (grâce au projet ALTO), ou la qualité des fruits (brûlure du soleil, couleur, composition).

Pour que ce verger de pommiers puisse être considéré comme innovant, il doit pouvoir s'inscrire durablement dans une stratégie agronomique et économique. Des intérêts dans ces domaines peuvent déjà être imaginés mais demandent d'être étudiés. Un verger de pommier agroforestier assure une diversification de revenus regroupés sur une seule parcelle (Land equivalent ratio). Cela peut entrainer une meilleure résilience du système. Les services écosystémiques pourraient permettre de diminuer les charges en pesticides (grâce aux auxiliaires) et en protection (ombrage) et, de ce fait, l'impact environnemental. Dans la perspective d'un changement climatique, et d'un mouvement vers une agriculture plus durable, adapter ce système agroforestier à la production de pommes (et plus largement de fruits, très consommateurs de produits phytosanitaires) pourrait présenter un levier répondant aux enjeux environnementaux et sociétaux actuels.

Annexes

ANNEXE 1 :

Tableau 2 : Types d'interactions possibles entre deux espèces (Jose et al 2004).

Effet de l'Espèce 1 **Effet de l'Espèce** 2	=	+	-
-	Amensalisme	Prédation/parasitisme	Compétition
+	Commensalisme	Mutualisme	
=	Neutralisme		

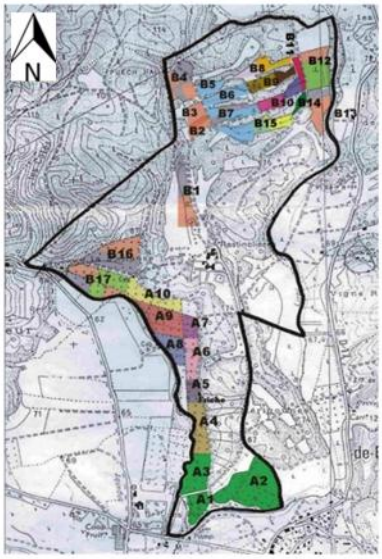


Figure 46 : carte des parcelles du domaine de Restinclières (source : Agroof)

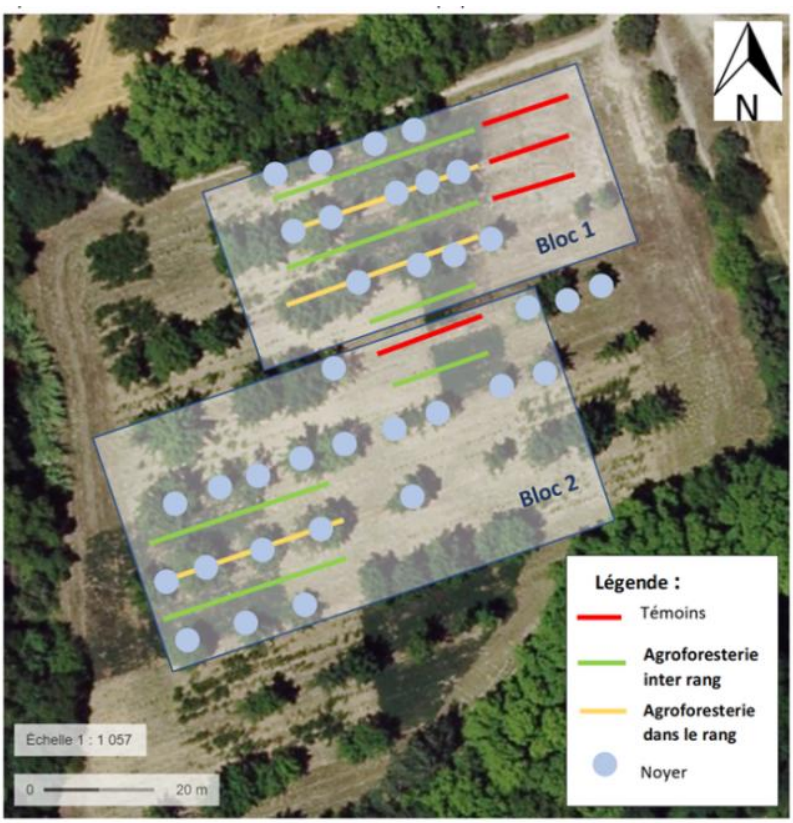


Figure 47 : dispositif sur la parcelle A1 répartition des rangs de pommiers par modalité, et localisation des noyers

ANNEXE 2

ANNEXE 3 :

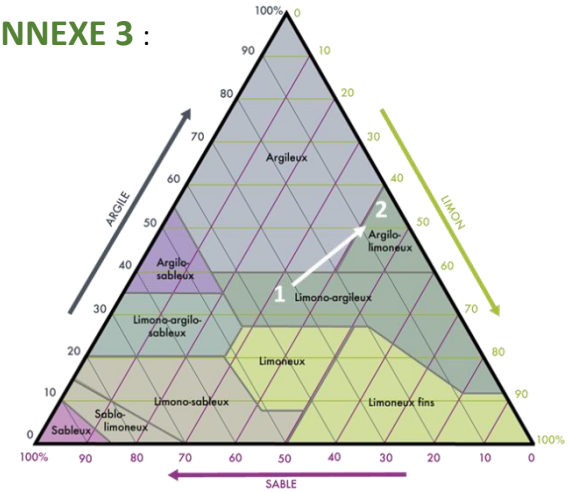


Figure 48 : type de sol de la parcelle A1 à deux profondeurs de sol situés sur le triangle de texture du sol

ANNEXE 4 :

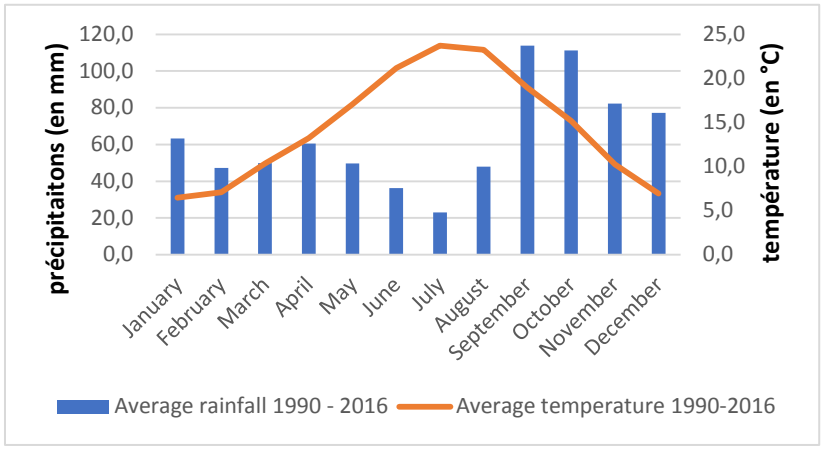


Figure 49 : Données Climatiques de Restinclières - moyennes des précipitations et températures entre 1990 et 2016 (source : donnée INRA parcelle A1)

ANNEXE 5 :

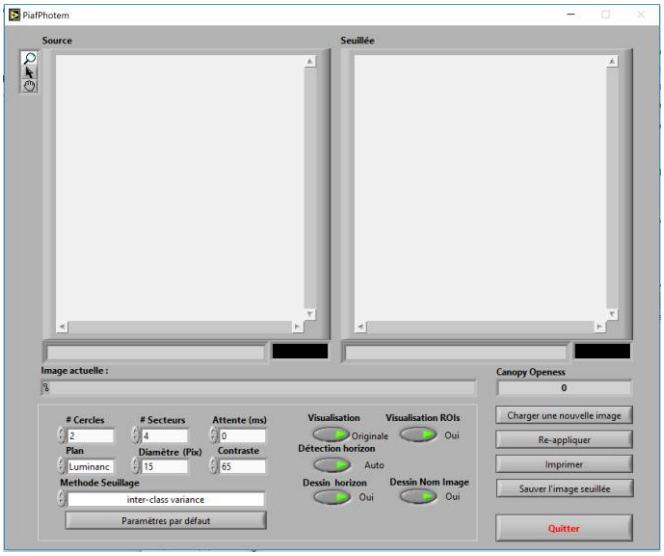
Figure 50 : Stades phénologiques du CTIFL (selon la Charte de Fleckinger)

ANNEXE 6 :

PiafPhotem :

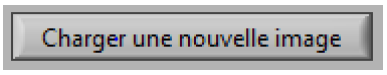
-L'objectif général du seuillage réalisé avec Piafphotem est de créer une image en noir et blanc. En blanc le ciel (qu'il soit nuageux ou non) et en noir tous les éléments du paysage entourant l'objet d'étude, sur les 360° d'azimut et les 180° d'élévation. Bien vérifier notamment que le seuillage n'élimine pas les branches fines (ex. branches de noyer au-dessus du pommier si ce dernier est l'objet d'étude).

Ouvrir PiafPhotem :

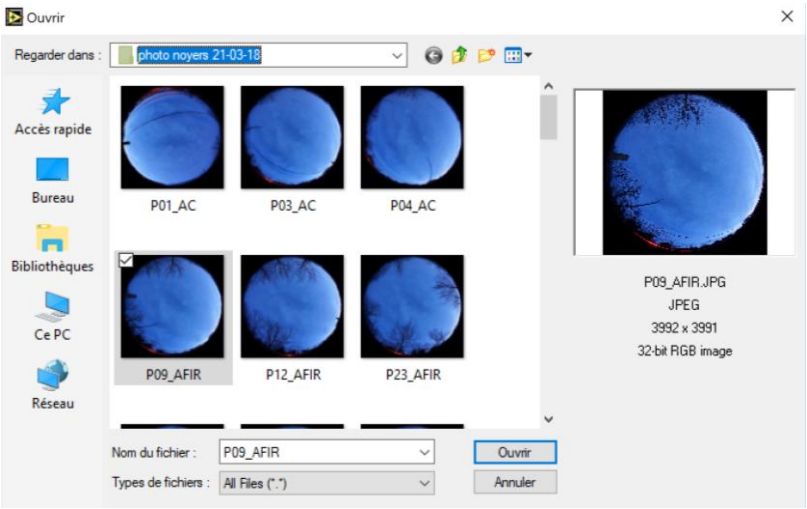


Pour ouvrir une image :

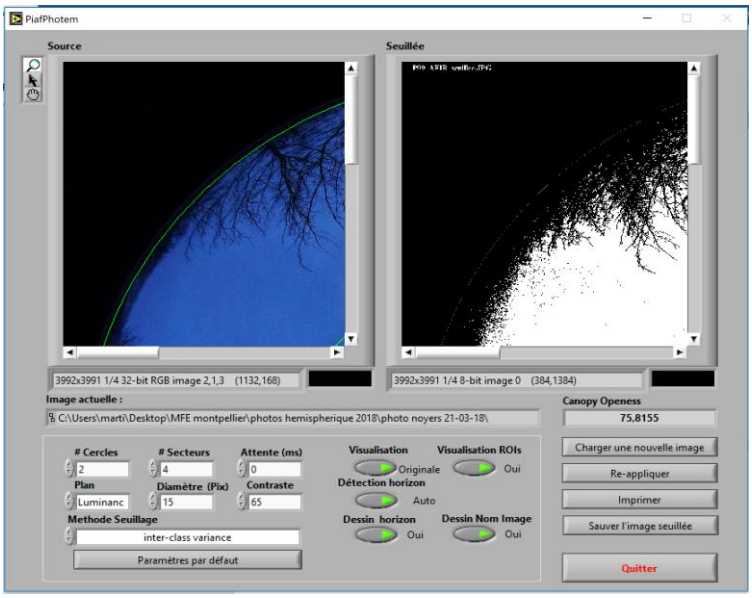
1- Vérifier que l'image à travailler a déjà une forme carrée, et s'assurer qu'elle est au format JPG

2- Cliquer sur 

(une page s'ouvre pour naviguer sur l'ordinateur)



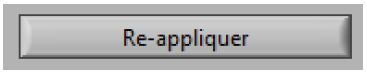
3- Une fois l'image sélectionnée, cliquer sur ouvrir.



4- 1. Pour zoomer en avant sur l'image sélectionner l'outil puis cliquer sur l'image à l'endroit désiré. Pour zoomer en arrière, utiliser le même outil et cliquer sur l'image en appuyant sur la touche majuscule du clavier.

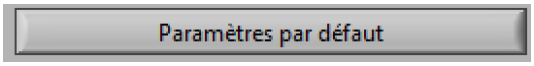
5- 2. Pour se déplacer sur l'image utiliser l'outil puis faire coulisser l'image pour atteindre la zone désirée.

6- 3. Ajuster les paramètres de **Plan**, **Diamètre (pix)**, et **Contraste** en cliquant sur les flèches haut et bas situées à gauche de chaque encadré ou utiliser le clavier pour rentrer la valeur souhaitée. Pour chaque changement effectué cliquer sur

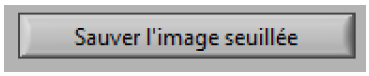


7- 4. Sélectionner la **méthode de seuillage** optimale

Les étapes 3 et 4 permettent d'affiner le seuillage de l'image pour ne garder que les éléments désirés.
Si besoin revenir aux paramètres par défaut en cliquant sur



8- 5. Une fois le seuillage désiré obtenu, enregistrer l'image seuillée en cliquant sur



ANNEXE 7

Complément d'informations sur le protocole flux de sèves :

Chauffage des sondes :

Les armoires contenant les centrales d'acquisitions et les batteries sont situées à des distances moyennes des pommiers différentes. La tension apportée pour chauffer les sondes à une puissance identique doit être adaptée. La puissance de chauffe doit être de 60mW.

P =U.I et U = R.I

La résistance de la sonde est de 11,5Ω. La résistance au sein des câbles dépend de leur longueur. Ces résistances ont été estimées à 2,5Ω pour les sondes reliées à la première armoire et 1,5Ω pour la seconde. L'intensité I est de 0,078A. on a donc une tension U1= 1,06 V et U2 = 1,01 V.

Obtenir ΔTmin et ΔTmax :

ΔTmax correspond au décrément de température au cours d'une minute de chauffage à flux nul. La quantité d'eau transpirée par les pommiers pendant la nuit considérée nulle pendant la nuit. Les mesures relevées pendant la nuit servent donc à déterminer les ΔTmax.

ΔTmin correspond au décrément de température au cours d'une minute de chauffage à flux maximum. Le flux maximum que peut atteindre un pommier a été estimé à 8 $L.dm^{-3}.h^{-1}$.

La différence entre les deux valeurs est de 0,52 °C

Donc

$$K = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_u}{0,52}$$

Obtenir la relation J = a* K

La calibration consiste à faire passer un flux d'eau connu à travers un fragment de bois (du même matériel végétal que les pommiers du dispositif), dans lequel est inséré une sonde TTD (schéma). Cette manipulation a pour objectif d'obtenir la valeur du décrément de température au niveau de la sonde pour des flux connus. Une pompe péristaltique envoie une Solution de KCl à 20 mM (évite le développement de champignons qui pourraient obstruer le xylème), colorée à la safranine, à un débit déterminé à travers un fragment de pommier (démunie de sève). L'eau ayant traversé le fragment est récoltée et pesée. Au bout de 10 minutes le poids de l'eau permet d'obtenir le débit réel ayant traversé le fragment. Une sonde TTD est également disposée sur le fragment et mesure la température toutes les 15 minutes. Le K peut être calculé en utilisant les valeurs de ΔTmin et ΔTmax obtenu. Cela permet de calculer la relation entre les flux déterminés pendant la manipulation et le K calculé (équation 5).

J=7.099*K

Équation 1 : relation entre le flux J et le coefficient thermique K

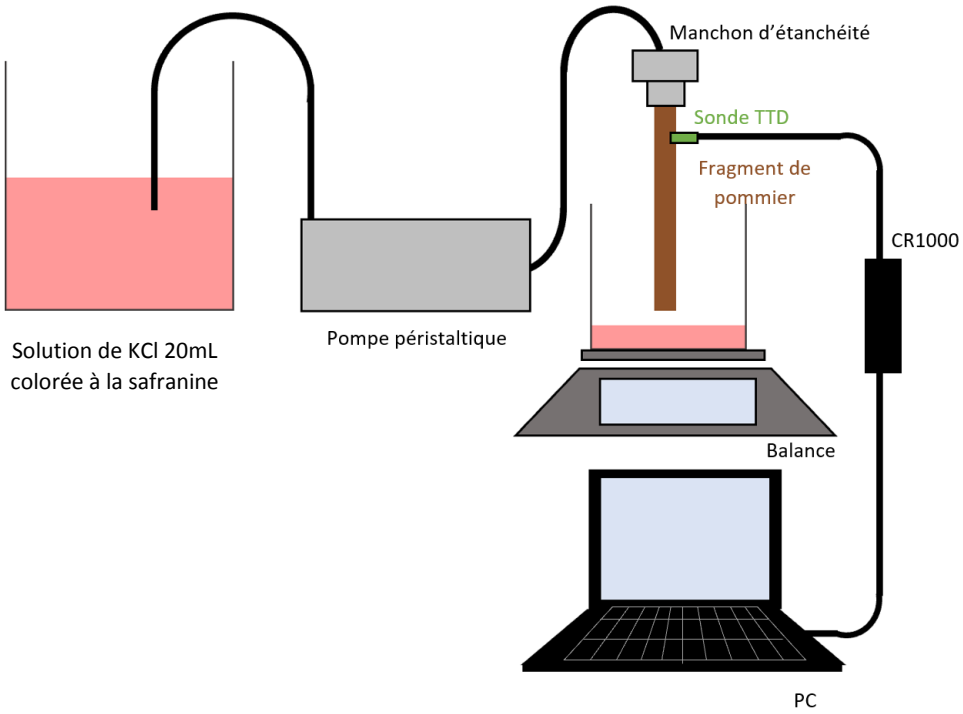


Figure 51 : schéma de la manipulation de calibration

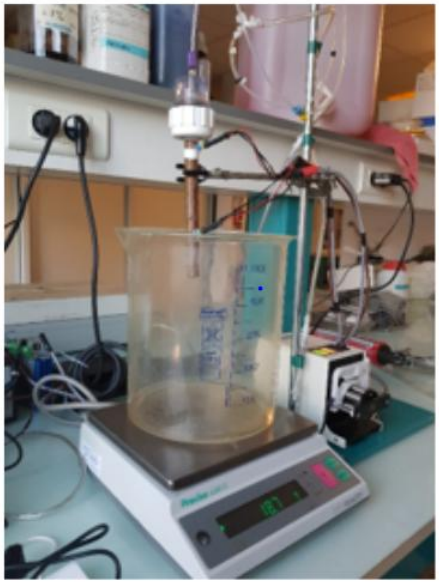


Figure 52 : photo du montage

Figure 53 : photo du manchon étanche et de la sonde

Table des figures

Figure 1 : organigramme de l'UMR System (source : INRA 2018) 4
Figure 2 : Illustration du Tacinium Sanitis : culture d'ail sous des arbres au moyen âge. (D'après Dupraz et Liagre 2008, et Daunay et al 2009) 5
Figure 3 : photo d'un champ de céréales en agroforesterie (d'après Dupraz et Liagre 2008) 6
Figure 4 : Dynamique du volume de biomasse produit par noyer (en m^3) par an selon des conduites classiques (ronds rouges) ou agroforestières (triangles verts). (Dupraz et Liagre 2008) 7
Figure 5 : Cycles complémentaires du blé dur et du noyer hybride (Talbot 2011) 7
Figure 6 : principe du LER (d'après Dupraz et al. 2011) 7
Figure 7 : Schéma récapitulatif des interactions aériennes et sous-terraines entre les arbres et la culture sous jacente dans un système agroforestier classique. (encadrés rouge : interactions négatives / encadrés verts : interactions positives) 9
Figure 8 : schéma d'une pousse de pommier (source : Fumey 2007) 11
Figure 9 : structure anatomique d'un bourgeon végétatif (haut) et inflorescentiel (bas) (source : Trillot et al. 2002) 11
Figure 10 : dessin d'une bourse et de sa pousse de bourse (source : Trillot et al. 2002). 11
Figure 11 : xylème (bleu) et phloème (marron) transportant la sève brute (flèche montante) et élaborée (flèche descendante) au sein d'une tige. 12
Figure 12 : schéma des longueurs d'ondes permettant l'activation ou l'inactivation des photorécepteurs (Kami et al 2010) 13
Figure 13 : lentille fisheye 180° (gauche) et appareil photo Sony (droite) utilisé pour les photos hémisphériques. (fournis et calibrés par Regent Instruments Inc.) 19
Figure 14 : mise en place de la tente au-dessus des pommier (trait vert : le pommier / trait rouge : angle de vue de la photo) 19
Figure 15 : photo de la sonde TTD insérée dans un pommier (1) et du déflecteur qui la recouvre (2) 21
Figure 16 : photo de l'armoire contenant (1) la centrale d'acquisition CR1000, (2) un multiplexeur), (3) les câbles d'acquisition et de chauffage, et (4) la batterie. 21
Figure 17 : Moyenne des valeurs de UOC (à gauche) et SOC (à droite) par modalité 22
Figure 18 : Indice de compétition (NCI) par modalité 23
Figure 19 : Températures moyennes (en °C) de la journée (de 6h à 19h) et précipitations journalières (en mm) du 1er avril au 23 juillet 2018. 23
Figure 20: Nombre moyen de ramifications de 2017 par pommier pour chaque modalité 24
Figure 21 : Nombre de ramifications par arbre en fonction du NCI (losanges rouges = moyenne par modalité, cf fig 20) p-value = 0 ,019 24
Figure 22 : Relation entre le produit de la longueur et de la largeur des feuilles (en cm^2) et leur surface foliaire réelle (en cm^2), pour des feuilles situées à la lumière (gauche) et à l'ombre (droite). 24
Figure 23 : Surfaces foliaires moyennes (LA en cm^2) obtenues à partir des allométries précédentes et des mesures de longueur et largeur de feuilles sur les 120 pousses échantillonnées. Graphique de gauche = comparaison des surfaces moyennes entre les arbres à l'ombre et à la lumière (L= arbres à la lumière (light) ; S = arbres à l'ombre (shadow)). Graphique de droite = comparaison des surfaces moyennes entre les pousses de bourses et végétatives (B = pousses de bourses ; V = pousses végétatives). 25
Figure 24 : Relation entre la longueur de la pousse en cm et la surface foliaire (en cm^2) pour les pousses de bourses d'ombre (A) et de lumière (B), et les pousses végétatives d'ombre (C) et de lumière (D). 26

Figure 25 : surfaces foliaires (en cm²) calculées à partir des relations allométriques en fonction du NCI. 26
Figure 26 : surfaces foliaires (en cm²) calculées à partir des relations allométriques par modalités ... 26
Figure 27 : Surface foliaire (en cm²) en fonction du diamètre du tronc (en dm). p-value < 0,0001 27
Figure 28 : diamètre de tronc (en dm) en fonction du NCI. 27
Figure 29 : LAI (en $m^2_{feuilles}/m^2_{sol}$) moyen par modalité 28
Figure 30 : LAI $m^2_{feuilles}/m^2_{sol}$ par arbre en fonction du NCI 28
Figure 31 : nombre moyen de ramifications de 2018 par modalité pour les pousses de bourses (à gauche) et végétatives (à droite) 28
Figure 32 : Comparaisons des surfaces foliaires (LA en cm²) par modalités (vert = AC ; rouge = AFIR ; jaune = AFR) entre les types de pousses (PB = pousses de bourses ; VG= pousses végétatives). 28
Figure 33 : proportion de la surface foliaire développée par des pousses de bourses en fonction du NCI. 29
Figure 34 : Proportion de la surface foliaire des pousses de bourses par modalité 29
Figure 35 : nombre moyen d'inflorescences par arbre en fonction de la modalité. 29
Figure 36 : Nombre d'inflorescences par arbre en fonction du NCI. 29
Figure 37 : nombre de fleurs par inflorescence et par modalité 30
Figure 38 : nombre de feuilles par inflorescence et par modalité 30
Figure 39 : Dynamique de la proportion moyenne des pousses terminales en arrêt de croissance par arbre dans chaque modalité entre mai et juillet 2018. 30
Figure 40 : Comparaison date par date de l'avance/retard des stades phénologiques par paire de modalité, à travers l'évolution des odd ratios de ces paires. Les odd ratios supérieurs à 1 montrent une avance des stades phénologiques de la modalité considérée par rapport à la référence (deuxième terme de la paire). Rouge : comparaison de AFIR par rapport au témoin ; Jaune : comparaison de AFR par rapport au témoin ; Vert : comparaison de AFR par rapport à AFIR ; * = différence significative au seuil de 0,05, (ou valeur non proche de 1) 31
Figure 41 : Cumul des quantités d'eau transpirées par dm² (en $L.dm^{-2}$) entre le 04/05 et le 25/07 en fonction du NCI. p-value = 0,107 32
Figure 42 : Cumuls moyens des quantités d'eau transpirée par dm² (en $L.dm^{-2}$) enregistrés entre le 04/05 et le 25/07 par modalité. 32
Figure 43 : Quantité d'eau transpirée totale sur la période du 04/05 au 25/07 en fonction du NCI. .. 33
Figure 44 : quantité d'eau transpirée totale (en L) en fonction du diamètre du tronc (en dm). p-value < 0,0001 33
Figure 45 : Quantité d'eau transpirée totale (en L) en fonction de la Surface foliaire (en cm²) en fonction du diamètre de tronc (en dm). (p-value < 0,0001) 33
Figure 46 : carte des parcelles du domaine de Restinclières (source : Agroof) 41
Figure 47 : dispositif sur la parcelle A1 répartition des rangs de pommiers par modalité, et localisation des noyers 41
Figure 48 : type de sol de la parcelle A1 à deux profondeurs de sol situés sur le triangle de texture du sol 42
Figure 49 : Données Climatiques de Restinclières - moyennes des précipitations et températures entre 1990 et 2016 (source : donnée INRA parcelle A1) 42
Figure 50 : Stades phénologiques du CTIFL (selon la Charte de Fleckinger) 42
Figure 51 : schéma de la manipulation de calibration 43
Figure 52 : photo du montage 43
Figure 53 : photo du manchon étanche et de la sonde 43

Table des tableaux

Tableau 1 : interactions aériennes entre les arbres et les cultures annuelles en système agroforestier (noir = non impacté, rouge = impacté négativement, vert = impacté positivement) Jose et al. 2004. .. 8
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des modalités par bloc. 16
Tableau 3 : Répartition du nombre de prélèvements/mesures par type de pousses et dans chaque condition d'exposition pour la construction des relations allométriques. (Rouge = prélèvement destructif ; Vert = mesure non destructive) 18

Bibliographie

Agreste Infos rapides – Fruits – Pomme – Novembre 2017 – n° 2017-171

Avelin C. 2017. La Pomme 2016-2017. Bilan de campagne. France Agrimer

Barden, J.A. 1977. Apple tree growth, net photosynthesis, dark respiration, and specific leaf weight as affected by continuous and intermittent shade. J. Am. Soc. Hortic. Sci. Journal Volume: 102:4

Baret F., Andrieu B., Folmer J.C., Hanocq J.F., Sarrouy C., 1993. Gap fraction mesurement from hemispherical infrared photography and its use to evaluate PAR interception efficiency. Crop structure and light microclimate – characterisation and applications, INRA, pp 359-372

Baumer M. 1997. L'Agroforesterie pour la production animale. Centre technique de coopération agricole et rurale, ICRAF.

Cardinale B.J., Harvey C.T., Gross K., Ives A.R. 2003. Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi-enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem. Ecology letters. Volume 6, Issue9. 857-865

Chandel A.K., Khot L.R., Osroosh Y., Peters T.R. 2018. Thermal-RGB imager derived in-field apple surface temperature estimates for sunburn management. Volumes 253–254, 1 May 2018, Pages 132-140

Claveirole C. 2016. La transition agroécologique : défis et enjeux. Journal Officiel De La République Française. CESE 13

Costes E., Lauri P. É, and Regnard J. L. 2006. Analyzing Fruit Tree Architecture: Implications for Tree Management and Fruit Production. Horticultural Reviews, Volume 32.

Cox G. W., Atkins, M. D. 1979. Agricultural ecology: an analysis of world food production systems pp.727.

Daunay M. C., Janick J., and Paris H. S.. 2009. Tacuinum Sanitatis: Horticulture and Health in the Late Middle Ages. Chronica horticulturae Volume 49 - Number 3. International Society for Horticultural Science

Dewailly A. 2014. Pomme : combiner différents leviers pour baisser les IFT. Trajectoire …vers des systèmes économes en produits phytosanitaires. Dephy Ecophyto. http://www.ecophytopic.fr/sites/default/files/ARBO_MIDIPY_DEWAILLY_TRAJ_2014_0.pdf

DO F. and Rocheteau A. 2002. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. Tree Physiology 22, 641–648 Heron Publishing.

DO F. and Rocheteau A. 2002. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system Tree Physiology 22, 641–648 Heron Publishing.

Dupraz C., Liagre F. 2008. Agroforesterie : des arbres et des cultures. Edition France Agricole.

Dupraz C., Liagre F., Querné A., Andrianarisoa S., Talbot G. 2011. L'agroforesterie peut-elle permettre de réduire les pollutions diffuses d'origine agricole ? Rapport de contrat de recherche n°2009 - 0009 avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée-Corse

Eichhorn M.P., Paris P., Herzog F., Incoll L.D., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Papanastasis V.P., Pilbeam D.J., Pisanelli A., Dupraz C. 2006. Silvoarable systems in Europe – past, present and future prospects.

El Yaacoubi A., Malagi G., Oukabli A., Hafidi M., Legave J.M. 2014. Global warming impact on floral phenology of fruit trees species in Mediterranean region. Scientia Horticulturae Volume 180, 17 Pages 243-253

Fiora A. and Cescatti A. 2006. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration. Tree Physiology, 26, Issue 9, 1, 1217–1225

Folta K.M. Maruhnich S.A. 2007. Green light: a signal to slow down or stop. Journal of Experimental Botany, Volume 58, Issue 12, 1, Pages 3099–3111,

Fumey D. 2007. Approche architecturale de la réponse du pommier a la taille : de l'expérimentation à l'élaboration d'un modèle réactif. Centre International d'études Supérieures en Sciences Agronomiques Montpellier Supagro.

Fuzeau V., Dubois G., Thérond O., Allaire G., 2012. Diversification des cultures dans l'agriculture française – état des lieux et dispositifs d'accompagnement. Collection Études et documents du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 67, 22 p.

Gao L, Xu H, Bi H, Xi W, Bao B, Wang X, et al. 2013 Intercropping Competition between Apple Trees and Crops in Agroforestry Systems on the Loess Plateau of China. PLoS ONE 8(7): e70739.

Garrigues S., Shabanov N.V., Swanson K., Morisette J.T., Baret F., Myneni R.B., 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of leaf area infex retrevals from LAI 2000, AccuPar, and Digital Hemispherical Photography over croplands. Agricultural and forest meteorology 148 1193–1209

Geddes P., Kohl R. 2009. Shropshire sheep control weeds in orchards. Pesticides News No.86 pp.3-4 ref.7

Gliessman S.R. 1990. Agroecology: Researching the Ecological Basis for Sustainable Agriculture. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 78. Springer, New York, NY

Greer D.H., Wünsche J.N., Norling C.L., Wiggins H.N. 2006. Root-zone temperatures affect phenology of bud break, flower cluster development, shoot extension growth and gas exchange of 'Braeburn' (Malus domestica) apple trees. Tree Physiology 26, 105–111.

Granier A, Biron P, Lemoine D (2000) Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. Agric For Meteorol 100: 291–308

Graves A.R., Burgess P.J., Palma J., Herzog F., Moreno G., Bertomeu M., Dupraz C., Liagre F., Keesman K., Van Der Werf W. 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. Ecological Engineering, 29, 434–449

Guitton J.-L., Dupraz C., Auclair D., De Montard F.-X. 1994. Quel projet agroforestier pour l'europe tempérée ? Rev. For. Fr. XLVI - n° sp.

Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.L., Boiffin J., Coudurier B., Jeuland F., Urruty N. 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Volume 2. Conception et évaluation de systèmes innovants en agriculture conventionnelle. Inra. 234 pages.

Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.L., Boiffin J., Coudurier B., Jeuland F., Urruty N. 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Volume 3. Evaluation des performances de pratiques innovantes en agriculture conventionnelle. Inra. 376 pages

Hackett W.P., Hartmann H.T. 1964. Inflorescence Formation in Olive as Influenced by Low Temperature, Photoperiod, and Leaf Area. Botanical Gazette 125, no. 1: 65-72.

Hanke M.V., Flachowsky H., Peil A., Hättasch C. 2007. No flower, no Fruits : Genetic Potentials to Trigger Flowering in Fruit Trees. Genes Genomes and Genomics. 1(1) 1-20 Global Science Book

Hänninen, H. & Kramer, K. 2007. A framework for modelling the annual cycle of trees in boreal and temperate regions. Silva Fennica 41(1): 167–205.

Harris S. A., Robinson J. P., and Juniper B. E. 2002. Genetic clues to the origin of the apple. Science Chronicle. TRENDS in Genetics Vol.18 No.8

Hüppe, J., 1990. Die Genese moderner Agrarlandschaften in vegetationskundlicher Sicht. Verh. Ges. Ökol. 19/2, 424–432.

Jackson J.E. 2003. Biology of Apples and Pears

Jackson J.E., and Palmer J.W. 1976. Effects of Shade on the Growth and Cropping of Apple Trees. II. Effects on Components of Yield Journal of Horticultural Science. Volume 52, 1977 - Issue 2, 253-266

Jonckheere I., Flecka S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology 121 19–35

Jose S., Gold M.A., Garrett H.E., 2018. Temperate Agroforestry in the United States: current trends and future directions. Temperate Agroforestry System 2nd edition. 50-71

Jose, S., Gillespie, A.R. & Pallardy, S.G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. Agroforestry Systems. pp. 237–255.

Kami, C. et al., 2010. Light-regulated plant growth and development. Current Topics in Developmental Biology, 91(C), pp.29–66.

Khabba, S., B. Duchemin, R. Hadria, S. Er-Raki and J. Ezzahar et al., 2009. Evaluation of digital hemispherical photography and plant canopy analyzer for measuring vegetation area index of orange orchards. J. Agron., 8: 67-72.

(Khabba S., Duchemin B., Lahrouni A., Boulet G., Hadria R., Er-Raki S. Evaluation de l'indice foliaire d'un couvert d'oranger. http://osr-cesbio.ups-tlse.fr/Irrimed/sudmed/documents/bibliotheque/posters/poster-GIRE3D_Khabba%20et%20al..pdf)

Lauri P.E. 2007. Architecture de l'arbre fruitier - de la morphologie des plantes à l'agronomie. Biologie végétale. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Lauri P.E. and Kelner J.J. 2001. Shoot type demography and dry matter partitioning: a morphometric approach in apple (Malus ×domestica) Can. J. Bot. Vol. 79

Lauri P.E., Mézière D., Dufour L., Gosme M., Simon S., Gary C., Jagoret P., Wery J., Dupraz C. 2016. Fruit-trees in agroforestry systems - review and prospects for the temperate and mediterranean zones.

Lauri P.E., Térouanne, E. 1995. Analyse de la croissance primaire de rameaux de pommier [Malus x domestica Borkh.) au cours d'une saison de végétation. Can. J. Bot. 73 : 1471-148

Legave J.M, Guédon Y., Malagi G., El Yaacoubi A. Bonhomme M. 2015. Differentiated Responses of Apple Tree Floral Phenology to Global Warming in Contrasting Climatic Regions. Frontiers in Plant science. Vol 6. Article 1054. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01054

Lemoin E. 1969. Le pin maritime dans les landes de Gascogne étude des relations d'allométrie, concernant le volume des peuplements, en liaison avec certaines caractéristiques de la station b. Ann. Sci. Forest, 445-473

Lu P., URBAN L. ZHAO P. 2004. Granier's thermal dissipation probes (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practise. Acta Botanica Sinica 46 (6): 631-646.

Luby J. 2003. Taxonomic classification and history. In: Ferree D., Warrington I., eds. Apples, botany, production and uses. Wallingford, UK: CABI Publishing, 1–14.

Nair R.P.K. 1993. An Introduction to Agroforestery. Klgwer Academic Publishers, in cooperation with ICRAF

Neumann H.H., Hartog G.D. and Shaw, R.H. 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. Agric. For. Meteorol., 45: 325-345.

Noordwijk M., Van Coe R., Sinclair F. 2016. Central hypotheses for the third agroforestry paradigm within a common definition. Working Paper no. 233. Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program.

Maillat D., Quévit., Senn L. 1993. Réseaux d'innovation et milieux innovateurs. GREMI / Editions de la Division économique et sociale.

Martens S.N., Ustin S.L., Rousseau R.A. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. Forest Ecology and Management 61 91-108. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Meersmans J., Martin M., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., et al. 2012. A high resolution map of French soil organic carbon. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 32 (4), pp.841-851.

Mehir H. and Crabbé J. 2002. Processus de développement génératif chez le pommier cv Golden Delicious. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2002 6 (1), 51–60

Moody, P.W. and Cong, P.T. 2008. Soil Constraints and Management Package (SCAMP): guidelines for sustainable management of tropical upland soils. ACIAR Monograph No. 130, 86pp.

Mupambi G., Anthony B.M., Layne D.R., Musacchia S., Serra S., Schmidt T., Kalcsits L.A. 2018. The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review. Scientia Horticulturae Volume 236, Pages 60-72

Paula J. Peper and E. Gregory McPherson. 2003. Evaluation of four methods for estimating leaf area of isolated trees. Urban For.Urban Green.2 :019–029

Petit G., Von Arx G., Kiorapostolou N., Lechthaler S., Prendin A.L, Anfodillo T., Caldeira M.C., Cochard H., Copini P., Crivellaro A., Delzon S., Gebauer R., Gricar J., Gronholm L., Holtt T., Jyske T., Lavric, Lintunen M.A., Lobo-do-Vale R., Peltoniemi M., Peters R.L., Robert E.M.R., Roig Juan S., Senfeldr M., Steppe K., Urban J., Van Camp V. and Sterck F.. 2018. Tree differences in primary and secondary growth drive convergent scaling in leaf area to sapwood area across Europe. New Phytologist 218 : 1383–1392

Pantera A., BurgessP.J., Corroyer N., Ferreiro-Domínguez N., Fernández Lorenzo J.L, González-Hernández P., Graves A., Malignier N., McAdam J., Moreno G., Mosquera Losada R., Rigueiro

Rodríguez A., Rosati A., Upson M., and Van Lerberghe P. 2016. Agroforestry for High Value Trees. Deliverable 3.7 (3.1): Synthesis of system descriptions AGFORWARD

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Rapport d'étude, INRA (France), p.454

Poblete-Echeverría C., Fuentes S., Ortega-Farias S., Gonzalez-Talice J. and Antonio Yuri J. 2015. Digital Cover Photography for Estimating Leaf Area Index (LAI) in Apple Trees Using a Variable Light Extinction Coefficient. Sensors, 15, 2860-2872

Quinlan J.D., Preston A.P. 1971. The Influence of Shoot Competition on Fruit Retention and Cropping of Apple Trees. Journal of Horticultural Science Volume 46 - Issue 4 Pages 525-534

Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., Habib R. 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. Agronomy for Sustainable Development Volume 32, Issue 1, 273–303

Ridgen P. 2008. To net or not to net. 3rd edition. Queensland the smart state. http://otcobirdnet.com.au/Orchard-Netting-Report.pdf

Rivry-Fournier C. ; 2005. L'agroforesterie peut-elle intéresser la bio?. In BIOFIL n°43, pp47-49

Robinson J.P., Harris S.A., Juniper B.E. 2001. Taxonomy of the genus *Malus* Mill. (*Rosaceae*) with emphasis on the cultivated apple *Malus domestica* Borkh. Plant system and evolution. 226:35-58.

Schroth G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. Agroforestry Systems 30: 125-143

Stoate C., Boatman N. D., Borralho R. J., Rio Carvalho C., de Snooand G. R., Eden P. 2001. Ecological impacts of arable intensification in Europe. Journal of Environmental Management. 63, 337–365

Talbot G. 2011. L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ? Ecosystèmes. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Toillier A., Devaux-Spartakis A., Faure G., Barret D., Marquié C. 2018. Comprendre la contribution de la recherche à l'innovation collective par l'exploration de mécanismes de renforcement de capacité. Cah. Agric. Volume 27, Numéro 1.

Trillot M., Masseron A., Mathieu V., Bergougnoux F., Hutin C., Lespinasse Y. 2002. Le pommier – Monographie. CTIFL

Stephan J. 2007. Architecture 3d et microclimat lumineux de l'arbre comparaison de cultivars de pommiers soumis a des manipulations de conduite. Ecole doctorale des sciences de la vie et de la sante N° d'ordre 459. Universite blaise pascal universite d'auvergne N° D.U. 1754.

Stoate C., Boatman N. D., Borralho R. J., Rio Carvalho C., de Snoo G. R. and Eden P. 2001 Ecological impacts of arable intensification in Europe. Journal of Environmental Management 63, 337–365

Van Elsen T. 2000. Species diversity as a task for organic agriculture in Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment. Volume 77, Issues 1–2, Pages 101-109

Van Lerberghe P. 2015. Les systèmes agroforestiers : diversité des pratiques, intérêts économiques et environnementaux. Forêt-entreprise - N° 225 http://www.agroforesterie.fr/actualites/2015/documents/Foret-entreprise-num-225-agroforesterie-Introduction-dossier-Philippe-Van-Lerberghe.pdf

Weiss M., Baret F., Smith G.J., Jonckheere I., Coppin P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. Agricultural and Forest Meteorology 121 37–53

Weiss M., Baret F., De Solan B., Demarez V., Bertrand N. 2008. CAN-EYE, logiciel de traitement d'images pour l'estimation de l'indice foliaire. Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge. Numéro spécial

Willaume M. Lauri P.E. Sinoquet H. 2004. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation. Springer-Verlag.

Wilkie J.D., Sedgley M., Olesen T. 2008. Regulation of floral initiation in horticultural trees. Journal of Experimental Botany, Volume 59, Issue 12, 1, Pages 3215–3228

Wünsche J.N., Alan N.L. 2000. The Relationship Between Leaf Area and Light Interception by Spur and Extension Shoot Leaves and Apple Orchard Productivity. HortScience vol. 35 no. 7 1202-1206

Young A. 1995. L'Agroforesterie pour la conservation des sols. Centre technique de coopération agricole et rurale, ICRAF.

Résumé

La diversification des systèmes agricoles est un enjeu majeur dans le contexte actuel de réduction des produits phytosanitaires. De nombreux travaux de conception d'agroécosystèmes plurispécifiques tentent de substituer les services écosystémiques aux intrants chimiques. La culture de la pomme, détenteur du record de nombre de traitements, doit faire face à ces enjeux. Le projet GAFA, mis en place par l'équipe ressource de l'UMR System de Montpellier, aborde ce problème en proposant un concept de verger agroforestier à trois strates : Des noyers hybrides (23ème année), des pommiers de variété Dalinette (3ème année) et une culture de légumineuse dans l'inter-rang. L'objectif du projet est d'étudier le comportement des pommiers dans différents contextes de compétition pour la lumière. Les pommiers sont cultivés selon trois modalités caractérisées par leur position relative aux noyers : rang, inter-rang et témoins (verger traditionnel sans noyers). Cette étude se concentre sur le développement de l'architecture, la phénologie du pommier ainsi que les flux de sève. Par allométries, les surfaces foliaires ont été déterminées et des dynamiques de la croissance et des stades phénologiques ont été réalisées. Les résultats révèlent qu'une forte compétition (modalité rang) pour la lumière engendre un retard de développement des pommiers qui présentent des surfaces foliaires plus faibles, des ramifications moins nombreuses, et également moins d'inflorescences. Les arrêts de croissance sont plus long et plus fréquents. Ces retards de développement sont corrélés à une intensité de flux de sève plus faible. Les pommiers situés en conditions d'expositions intermédiaires (inter-rang) présentent cependant un retard de développement sur les témoins moins important que les pommiers des rangs de noyers, voire négligeable.

Mots clés : Pommier, Agroforesterie, Architecture, Phénologie, Allométries.

Abstract

Diversification of agricultural system has become a major stake in the current movement for the decrease of pesticides use. Various works on multispecies agroecosystem conception try to substitute ecosystemic services to chemical inputs. Apple tree orchards, holder of highest number of treatment record, must face these stakes. GAFA project, set up by the resource team of the UMR System of Montpellier, tackles this issue through the conception of an agroforestry orchard composed with three layers: hybrid walnut trees (23rd years), Dalinette apple trees (3rd year), and a leguminous crop in the inter row. The aim of this project is to study the behaviour of apple trees in various light competition contexts. These apple trees are classed in three modalities characterized by their position relative to the walnut trees: row, inter-row and control (traditional orchard without walnut). This study focuses on the development of apple trees architecture, phenology and sap flow. Using allometric relationships, the leaf areas were determined and a dynamic of growth and phenological stages were realized. The results reveal that a strong competition (modality "row") for the light causes a delay in the development of the apple trees which present smaller leaf areas, fewer ramifications, and less inflorescences. Stunting is longer and more frequent. These developmental delays are correlated with a lower sap flow intensity. However, apple trees in intermediate exposure conditions (inter-row) have a developmental delay on the control that is much smaller than the row-apple trees, or even negligible.

Key-words: Apple trees, Agroforestry, Architecture, Phenology, Allometry