



HAL
open science

Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier

Pierre Dul, Benjamin Pitchers, Pierre-Éric Lauri

► To cite this version:

Pierre Dul, Benjamin Pitchers, Pierre-Éric Lauri. Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier. [Stage] INRAE. 2019, 69 p. hal-03030304

HAL Id: hal-03030304

<https://hal.inrae.fr/hal-03030304v1>

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.

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes



<p>Année universitaire : 2018-2019</p> <p>Master Biologie, Agrosociences</p> <p>Parcours Amélioration, Production, Valorisation du végétal</p> <p>Option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes (FGA)</p>	<p>Rapport de stage</p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier

Par : Pierre DUL



Soutenu à Rennes

le 26/06/2019

Devant le jury composé de :

Président : Edith Lecadre

Maître de stage : Pierre-Eric Lauri suppléé par B. Pitchers

Enseignant référent : Matthieu Carof

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Hervé Nicolas (rapporteur)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celles d'AGROCAMPUS OUEST et l'université de Rennes 1

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation

« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »

disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

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

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ :
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

2/7/2019

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

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ Nom Prénom Du Pierre

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

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

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

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

Date et signature de l'auteur :

le 2.07.2019.

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

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

Oui Non

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

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement(4)

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

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

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

Dépôt numérique de mémoire

ATTESTATION DE CONFORMITE DE LA VERSION NUMERIQUE

Je, soussigné(e),

Nom : DILL

Prénom : Pierre

Ci-après désigné « l'Auteur »

Atteste que la version numérique de mon mémoire de fin d'études dans sa version définitive (incluant les corrections demandées par le jury de soutenance),

Intitulé :

Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier

correspond à la version imprimée du document, déposé à la bibliothèque générale d'AGROCAMPUS OUEST (CFR de référence).

A Montpellier le 3.10.7/2019

Signature

Dépôt numérique de mémoire

CONTRAT DE DIFFUSION NUMERIQUE DE MEMOIRE

Entre

AGROCAMPUS OUEST, Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage dont le siège est basé 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 RENNES, représenté par son Directeur Général, Grégoire THOMAS

et

L'auteur du mémoire DILL Pierre

Nom : DILL

Prénom : Pierre

Adresse personnelle : 1 Rue Florian 92160 Antony

Intitulé du mémoire :

Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier

Ci-après désigné auteur,

Article 1

Le présent contrat ne concerne que les mémoires de fin d'études des cursus de formation d'AGROCAMPUS OUEST, déposés suite à la soutenance dans leur version validée par le jury. La diffusion de ces mémoires est conditionnée au visa du responsable de spécialisation/ option, garantissant la prise en compte de l'avis du jury.

Article 2

L'auteur autorise AGROCAMPUS OUEST à diffuser le mémoire sur le site Internet de l'établissement ou sur les plateformes choisies par AGROCAMPUS OUEST en conformité avec la fiche de diffusion correspondante. Le présent contrat a pour objet de permettre à AGROCAMPUS OUEST de diffuser le mémoire dans le respect des droits de propriété intellectuelle de son auteur.

Le présent contrat n'implique pas l'obligation pour AGROCAMPUS OUEST de faire usage de l'autorisation qui lui est donnée. La diffusion effective, tout comme son éventuelle suppression, n'implique en aucun cas une appréciation au bénéfice de l'auteur ou des tiers et n'est pas source de responsabilité à l'égard des tiers.

Article 3

L'auteur demeure responsable du contenu de son œuvre. L'auteur garantit à AGROCAMPUS OUEST qu'il détient tous les droits nécessaires à la diffusion de son œuvre, en particulier les autorisations écrites des titulaires des droits sur les œuvres reproduites, partiellement ou intégralement. En cas de non respect de cette clause, AGROCAMPUS OUEST se réserve le droit de refuser, suspendre ou arrêter la diffusion des parties du mémoire intégrant des documents ou parties de documents pour lesquels les droits de reproduction et de représentation n'auraient pas été acquis.

AGROCAMPUS OUEST ne pourra être tenu responsable de représentations illégales de documents, pour lesquels l'auteur n'aurait pas signalé qu'il n'en avait pas acquis les droits.

Article 4

L'auteur pourra à tout moment retirer l'autorisation de diffusion qu'il accorde par le présent contrat. Pour cela, il devra en aviser formellement AGROCAMPUS OUEST par lettre recommandée avec accusé de réception. AGROCAMPUS OUEST aura alors l'obligation de retirer l'œuvre lors de la plus prochaine actualisation du site de l'établissement et du portail documentaire.

Article 5

L'auteur autorise AGROCAMPUS OUEST à procéder, le cas échéant, au reformatage de son mémoire en vue de l'archivage, de la diffusion ou de la communication dans le respect des autorisations de diffusion définies par lui précédemment.

Article 6

Les autorisations de diffusion données à AGROCAMPUS OUEST n'ont aucun caractère exclusif et l'auteur conserve toutes les autres possibilités de diffusion de son mémoire.

Article 7

L'auteur autorise, à titre gracieux, la cession des droits de diffusion, concernant le mémoire qui lui appartient. Cette autorisation, dans la durée maximale définie par le droit patrimonial, est strictement réservée à la diffusion du mémoire à des fins pédagogiques et de recherche.

Fait à Montpellier le 3/07/2019

Pour AGROCAMPUS OUEST

L'auteur,



Pour Le Directeur Général

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe d'accueil de l'UMR SYSTEM et encadrante à commencer par Pierre-Eric Lauri pour ses précieuses remarques et conseils (toujours dans la bonne humeur !) qui m'ont permis d'avancer dans ma réflexion par le partage de son expérience. Je tiens aussi à remercier l'équipe co-encadrante d'AMAP : Jean Dauzat pour ses rayonnantes explications, Rémi Vézy pour le partage de son expérience sous R, François Grand (sans qui le modèle n'aurait sûrement pas tourné à temps) et Philippe Verley pour m'avoir aidé à résoudre certains problèmes informatiques.

Je remercie également le GIS FRUITS pour le soutien financier de ce stage.

Je n'oublie pas bien sûr Benjamin Pitchers pour sa compagnie pendant les relevés de terrain, ainsi que les discussions pendant les journées le terrain m'ayant permis d'alimenter ma réflexion.

Je n'oublie pas non plus tous les stagiaires, doctorants, CDD, techniciens et chercheurs (que je ne cite pas par peur d'en oublier) qui ont contribué à créer une ambiance conviviale et amicale !!

Liste des Illustrations :

Tableau 1.Liste et description des interactions entre deux espèces communément référencées dans la littérature

Figure 1 Compromis entre production et résilience, biodiversité et complexité écologique

Figure 2 Schéma d'un axe feuillé et des différentes entités le constituant

Figure 3 Représentation des caractéristiques de ramification

Figure 4 Charte de Fleckinger représentant les stades phénologiques chez le pommier

Figure 5 Nombre de publication scientifiques sur les fruitiers et sur les fruitiers en contexte agroforestier de 2006 à 2015

Figure 6 Parcelle du dispositif GAFAM: répartition des rangs de pommiers, leur modalité et localisation des noyers

Figure 7. Photo de la parcelle d'expérimentation GAFAM

Figure 8 Visualisation du nuage de points LIDAR-T représentant les éléments de la scène (RisCan Pro)

Figure 9 Scène voxelisée par AMAPVox (à une résolution de 0,2m) avec représentation du Plant Area Density (m² plante/voxel)

Figure 10 Schéma montrant les différentes composantes d'un bilan radiatif d'un couvert végétal

Figure 11. Schéma présentant le trajet d'un rayon à une direction donné traversant l'espace voxel

Figure 12 Représentation 3D de l'interception moyenne quotidienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 1 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

Figure 13 Représentation 3D de l'interception moyenne quotidienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 2 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

Figure 14 Quantités moyennes quotidienne d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

Figure 15 Quantités moyennes matinales d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

Figure 16 Quantités moyennes post-méridiennes d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

Figure 17 Plant Area simulé en fonction de la surface foliaire mesurée

Figure 18 Neighborhood Competition Index (NCI) en fonction de la quantité d'énergie lumineuse moyenne quotidienne pour chaque pommier suivi

Figure 19 Nombre de bourgeons (floraux et végétatifs) préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée

Figure 20 Nombre de bourgeons floraux préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée

Figure 21 Trunk Cross Sectionnal Area 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse quotidienne par pommier simulée

Figure 22 Longueur de croissance cumulée en 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée

Figure 23 Quantité d'eau transpirée en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée (sur la période simulée)

Figure 24 Comparaison date à date de relevés des avances/retards de stades phénologiques en 2019 en fonction des 3 modalités

Figure 25 Nombre de mises à fruits pour les inflorescences suivies par modalité en 2019

Figure 26 Nombre de chutes physiologiques pour les inflorescences suivies par modalité en 2019

Liste des annexes :

Annexe I : Quantité d'énergie lumineuse interceptée spatialisée par pommier suivi le matin et l'après-midi.

Annexe II : Graphiques présentant les modèles linéaires entre variables écophysiologicals mesurées et l'interception lumineuse des pommiers le matin

Annexe III : Graphiques présentant les modèles linéaires entre variables écophysiologicals mesurées et l'interception lumineuse des pommiers l'après-midi

Liste des abréviations :

AC Agricultural Control

AFIR AgoForestry Inter-Rows

AFR AgroForestry in Rows

GAFAM Growing AgoForestry systems with Apple-Montpellier

LAD Leaf Area Density (en m^2 feuille/ m^3)

LIDAR-T Light Detection And Ranging - Terrestrial

PAD Plant Area Density (en m^2 plante/ m^3)

TCSA Trunk Cross Sectional Area = Section transversale de tronc (en dm^2)

WAD Wood Area Density (en m^2 bois/ m^3)

Sommaire

I. Introduction	1
A. <u>Le pommier en Agroforesterie, un système agro-écologique ancien en regain d'intérêt</u>	1
1. L'agroforesterie : historique, intérêts et enjeux	1
2. Historique et production de pommes (<i>Malus Domestica</i>)	2
B. <u>Physiologie du pommier : développement, morphologie et flux de sève</u>	3
1. Architecture, morphologie et croissance végétative du pommier	3
2. Phénologie du pommier et cycle de développement	3
3. Flux xylémien et transpiration végétale	4
C. <u>Effet des conditions environnementales sur le développement et la production du pommier</u>	5
1. Facteurs climatiques limitants la production	5
2. Effet de l'ombrage sur le pommier en système agroforestier	5
D. <u>Problématique</u>	6
II. Matériel et Méthodes	7
A. <u>Matériel biologique et plan expérimental : Le dispositif GAFAM (Growing Agroforestry with apples-Montpellier) du domaine départemental de Restinclières</u>	7
1. Le dispositif GAFAM	7
2. Le matériel végétal et conduite de la parcelle	7
B. <u>Réalisation d'un bilan radiatif spatialisé : Acquisition et traitement de données Lidar-T, programmation et simulations</u>	8
1. Les données Lidar-T : une base de donnée pour la réalisation d'un bilan radiatif	8
2. Etapes de l'établissement du modèle radiatif	9
3. Calcul du NCI 2019	11
C. <u>Mesures architecturales et écophysiologiques du pommier</u>	11
1. Suivi phénologique des bourgeons floraux en 2019	11
2. Flux xylémiens et transpiration foliaire de 2018	11
3. Décompte des bourgeons mis en place en 2018	12
4. Croissance totale de 2018 et dynamique de croissance de 2019	12
D. <u>Analyse statistique des données</u>	12
III. Résultats	13
A. <u>Analyse de l'interception lumineuse des pommiers par modélisation</u>	13
1. Interception lumineuse des pommiers suivis dans un espace voxelisé	13
2. Bilan radiatif : Quantité d'énergie lumineuse interceptée par pommier	14
3. Exploration des pistes de biais du bilan radiatif pour l'estimation de la compétition lumineuse	15
B. <u>Influence du climat lumineux sur le développement des pommiers 2018 et 2019</u>	15
1. Préformation des bourgeons en été 2018 (période de simulation du bilan radiatif)	15
2. Croissance du pommier en 2018	16
3. Flux de sève de l'été 2018	16
4. Phénologie de 2019	16
IV. Discussion	19
A. <u>Limites et pistes d'améliorations du modèle radiatif</u>	17
1. Estimation du PAD et LAD (Leaf Area Density)	17
2. Amélioration de la discrétisation des positions des différents pommiers suivis	18
3. Validation par mesure de la quantité de lumière interceptée par pommier et analyse de sensibilité des paramètres	18
4. Corrélation entre le NCI (Neighborhood Competition Index) et le bilan radiatif	19
B. <u>Influence du système agroforestier sur le développement des pommiers</u>	19
1. Préformation des bourgeons en 2018	19
2. Croissance des pommiers en 2018	19
3. Flux de sève de l'été 2018	19
4. Phénologie de ...2019	20
C. <u>Perspectives de recherches futures</u>	20
1. Utilisation du modèle pour quantifier un stress radiatif	20
2. Allélopathie du noyer	21
3. Complexification du modèle : ajout de module, implémentation de paramètres optionnels d'entrées	21
V. Conclusion	21
Bibliographie	23
Annexes	25

Tableau 1: Liste et description des interactions entre deux espèces communément référencées dans la littérature

Type of interaction	Effect of the interaction ¹		Nature of the interaction	Agroforestry example
	Species 1	Species 2		
Amensalism	-	0	One species is inhibited and the other unaffected	Allelopathy; black walnut inhibiting growth of tomato
Commensalism	+	0	One species is benefited and the other one is unaffected	Improved fallows
Competition	-	-	Both species are negatively affected as a result of each other's use of growth resources	Poorly managed alley cropping or silvopasture
Mutualism (or synergism)	+	+	Both species are positively affected	Mycorrhizae, <i>Rhizobium</i> in leguminous plants
Neutralism	0	0	Neither species affects the other	Scattered trees; winter wheat in a temperate deciduous tree alley cropping
Predation and Parasitism	+	-	One species benefits at the expense of another. Predators tend to take large bites and parasites small bites. Parasites frequently invade the body of their hosts and eat from within; predators eat from outside	Pests and diseases

¹0 = no effect; + = positive; - = negative.
Source: Modified from Perry, 1994.

I. Introduction

A. Le pommier en Agroforesterie, un système agro-écologique ancien en regain d'intérêt

1. L'agroforesterie : Historique, intérêts et enjeux

Étymologiquement, le terme agroforesterie, regroupe deux termes de gestion des terres, l'agriculture et la foresterie (*forestry*, en anglais), et est donc un mélange d'espèce(s) d'arbre(s) et de culture(s) agricole(s) (Dupraz et Liagre, 2008).

D'après Nair, dans son livre *An Introduction to Agroforestry* (1993), une définition scientifique de l'agroforesterie, se voulant assez générale pour englober la totalité des systèmes agroforestiers, regroupe donc ses deux principales caractéristiques communes et pourrait être formulée de la manière suivante :

« Sur une même unité de surface cultivée, la culture délibérée de plantes pérennes ligneuses (arbres, arbustes...) en **association** avec une/des culture(s) agricole(s) et/ou des animaux sous une forme ou séquence spatiale. Les composantes pérennes et agricoles étant en **interaction** significative, de nature écologique et/ou économique. » C'est à peu de chose près la définition assez large donnée par l'ICRAF.

L'agroforesterie correspond effectivement à un système de culture ancestral largement représenté à travers le monde avant les années 1950. On en retrouve des traces aussi bien en Europe, qu'en Asie, en Afrique et en Amérique. En Europe, les systèmes agroforestiers sur abattis-brûlis étaient courant jusqu'au moyen-âge (Nair, 1993). En Asie, les indigènes Hanunoo pratiquaient un type complexe d'agroforesterie, en brûlant en partie des parties de forêt à des fins agricoles tout en laissant certains arbres afin de profiter d'un ombrage préventif du riz en fin de culture (Conklin, 1957). En Amérique tropicale persistent encore des systèmes traditionnels pluri-spécifiques agroforestiers. (Nair, 1993)

Cependant, l'agroforesterie a largement été remis en cause durant les années 1950-90, étant notamment considéré comme un « frein » à la simplification des pratiques agricoles durant cette période, laissant place (principalement) à des cultures monospécifiques, avec abatage des arbres présents (Dupraz et Liagre, 2008).

Depuis les années 2000, la production agricole connaît un changement de paradigme. Il s'agit maintenant de produire non plus « contre » la nature (utilisation de pesticides et autres intrants) mais « avec » la nature en se basant sur l'écologie des systèmes.

Aujourd'hui, l'agroforesterie est un levier pour une transition agro-écologique : il est nécessaire d'étudier les effets (positifs et négatifs) de la diversification des systèmes de culture par l'introduction d'arbres au sein des cultures.

Cette diversification des systèmes de cultures par l'association d'espèces sur une surface induit nombre d'interactions dynamiques (compétition, facilitation, ammensalisme etc.) (Tableau 1) (Lovell *et al*, 2018)

L'étude de ces interactions a pour but, dans un premier temps, de les caractériser pour favoriser les interactions positives (facilitation pour l'eau et les nutriments par complémentarité des systèmes racinaires et phénomène d'ascenseur hydraulique, des sources d'azote utilisées : introduction de légumineuse) et limiter les négatives (compétition pour l'eau et les nutriments, ammensalisme pour la lumière, allélopathie), afin de limiter les intrants et de maintenir un certain niveau de production (meilleure efficacité des ressources) (Jose *et al*, 2004). Cependant, cette capacité productive n'est possible que si les interactions interspécifiques aériennes et souterraines sont globalement favorables aux espèces cultivées (cultures et arbres), d'où l'importance du choix des espèces associées et de leur arrangement dans l'espace. (Lauri et Simon, 2019)

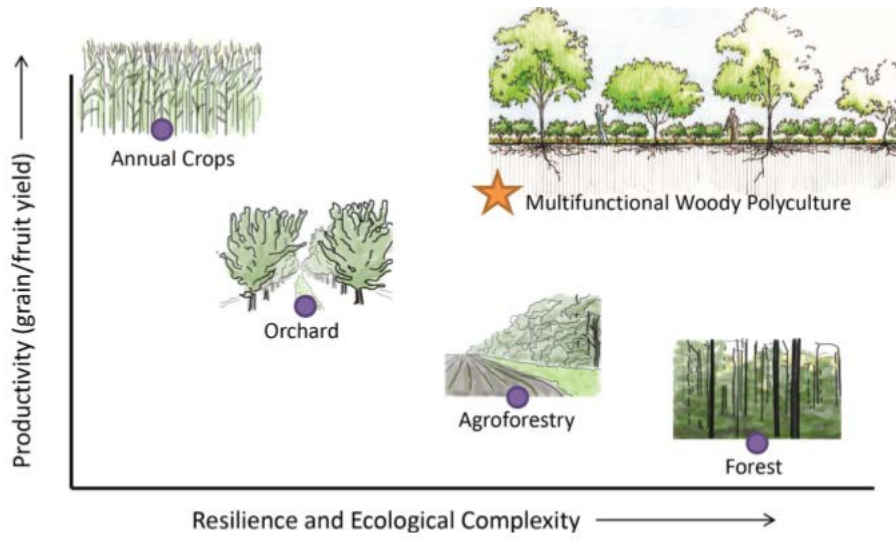


Figure 1. Compromis entre production et résilience, biodiversité et complexité écologique (Lovell et al, 2018)

De plus, la diversification d'espèces cultivées au sein de la même parcelle permet une diversification des revenus pour l'agriculteur et un échelonnage des travaux si le système est bien raisonné (conversation personnelle avec Jean Dauzat). Dans le cas de l'agroforesterie, les revenus liés à l'exploitation arboricole est un revenu différé (par rapport à l'investissement) et à long terme du fait de sa nature pérenne et de l'exploitation du bois, par rapport à des productions annuelles, rapportant à court terme. (Dupraz et Liagre, 2008)

D'un point de vue écologique, l'agroforesterie apporte de nombreux services écosystémiques intéressants pour répondre aux enjeux actuels et futurs, à savoir la réduction d'intrant, baisse de pollution environnementale, lutte contre l'érosion (Jose *et al*, 2004) Ces services écosystémiques, fournis par les arbres et répondant à ces enjeux, sont notamment : stockage de carbone, structuration du sol, absorption racinaire profonde, meilleure absorption et recyclage des nutriments de manière générale, ombrage, protection de la biodiversité, atténuation des conditions climatiques intenses (forte grêle, pluie, pic de chaleur estival...). Leur favorisation au sein de l'agrosystème permet par exemple la substitution d'intrant exogène. Exemple : le service de recyclage des nutriments permet d'apport moins de fertilisant, le service de régulation de graine d'adventice se substitue à l'apport d'herbicide etc. (INRA, 2017)

Les systèmes agroforestiers ont aussi pour avantage d'avoir une résilience accrue par rapport aux systèmes monospécifiques (Lovell *et al*, 2018). Nous verrons par la suite (voir Matériels et Méthodes) que dans notre contexte d'étude, nous pouvons considérer que l'on se rapproche d'un système plus complexe MWP (Multifonctionnel Woody Polycultures) par l'ajout de strates en agroforesterie dans un système noyer (strate haute)-pommier (strate intermédiaire)-sainfoin (strate herbacée), à opposer à des systèmes presque exclusivement à deux strates en milieu tempéré. (Figure 1)

C'est pourquoi l'agroforesterie est de plus en plus adoptée et réintégrée dans les systèmes culture, dans le but de rendre les agroécosystèmes plus durables. Cette réintroduction passe par l'adaptation de l'agroforesterie aux pratiques et techniques agricoles (notamment à la mécanisation). (Dupraz et Liagre, 2008)

2. Historique et production de pommes (*Malus Domestica*)

Le centre d'origine du genre *Malus* (auquel appartient la pomme d'aujourd'hui) est une région entre l'Asie mineure et la Chine de l'Ouest. L'apparition en Europe de l'Ouest du genre *Malus* semble suivre la route de la soie entre le néolithique et l'âge de bronze. (Jackson, 2003).

Les pommes, d'abord consommées à l'état sauvage ont ensuite été cultivées. On retrouve des traces de vergers datant de -2000 av. JC en Palestine et en Egypte aux alentours de -1200av.JC. (Jackson, 2003)

Aujourd'hui la pomme (*Malus Domestica*) est un des fruits les plus consommés dans le monde.

La France est le 7^e producteur mondial de pommes et le 3^e producteur européen derrière la Pologne et l'Italie, avec 1,8 millions de tonnes produites annuellement (FAOstat entre 1994 et 2017).

De manière plus locale, la région Occitanie est la 2^e région productrice de pommes (à couteau) derrière la région PACA et devant la Nouvelle Aquitaine, le Pays de la Loire, et représente 23% de la production française en 2017 (Agreste).

La production de pommes est aussi celle qui détient le record d'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) en France avec 39,2 traitements en moyenne par an en 2011 (Insee statistiques, Agreste, 2014). L'activation de leviers agroécologiques est donc un des moyens pour diminuer ces traitements phytosanitaires.

La production de pommes se fait encore aujourd'hui principalement en verger monospécifique, dont les objectifs durant les années 1970-2000, ont surtout été concentrés sur l'optimisation de l'architecture du pommier (par opérations et modes de conduite culturale) afin de densifier les vergers (nombre de pommiers/ha) et la production de pommes par arbres (régularité, quantité, qualité...)(Lauri *et al*, 2016) dans des conditions de culture optimales (fertilisation, irrigation, traitements phytosanitaires...) (Fumey, 2007)

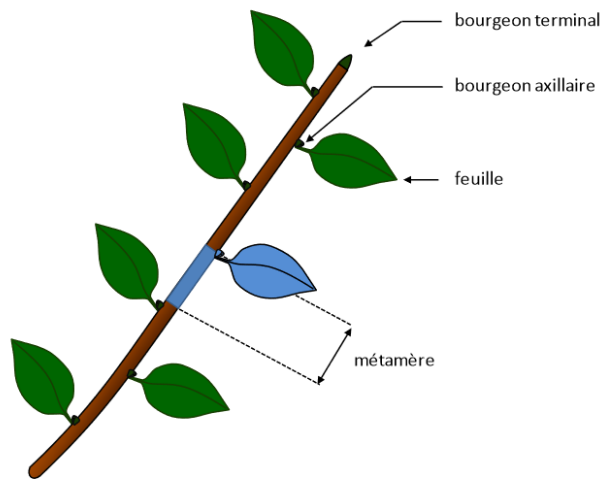


Figure 2. Schéma d'un axe feuillé et des différentes entités le constituant (Fumey, 2007)

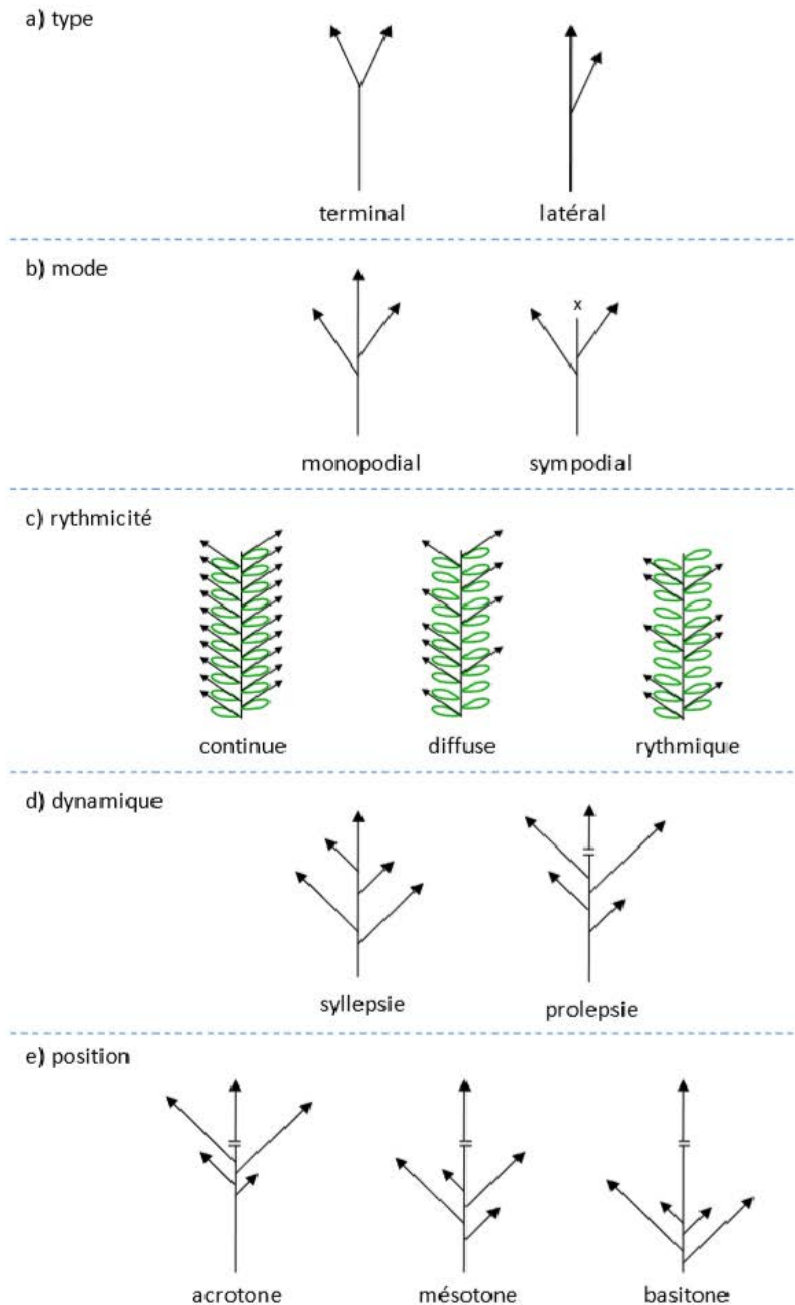


Figure 3. Représentation des caractéristiques de ramification (d'après Caraglio et Barthélémy, 1997)

B. Physiologie du pommier : développement, morphologie et flux de sève

1. Architecture, morphologie et croissance végétative du pommier

De nos jours, les pommiers cultivés sont composés d'un porte-greffe (partie végétative de support) auquel on a greffé un scion (partie reproductive). Ce système de greffage permet d'éviter la phase juvénile (pouvant durer de 4 à 8 ans en semis) et atteindre la phase reproductive (et donc productive) plus rapidement, mais a aussi d'autres nombreux avantages: mieux contrôler la vigueur, favoriser l'initiation des bourgeons floraux et la précocité d'entrée en production, augmenter la résistance aux maladies telluriques, améliorer la qualité des fruits, augmenter l'adaptation aux conditions pédo-climatiques (Ferree and Warrington 2003, Hanke *et al*, 2007).

L'organisation de « construction » (des organes/tissus les uns par rapport aux autres) du pommier est appelée architecture et a beaucoup été étudiée (Costes *et al*, 2006).

La croissance en volume et en complexité, donnant lieu à une certaine architecture, peut se diviser en plusieurs catégories :

L'allongement des rameaux feuillés en croissance primaire est la résultante de deux processus : l'histogenèse et l'organogenèse, suivis de la croissance des organes et tissus néoformés (prolifération et augmentation volumique cellulaire). (Lauri et Terrouane, 1995, Fumey, 2007)

L'unité morphologique mise en place de manière périodique (plastochrone) est appelée métamère. Le métamère est constitué d'un nœud, de ses feuilles, des bourgeons axillaires à l'aisselle de la feuille et de l'entre-nœud (Figure 3). Suivant sa place au sein de l'arbre, chaque métamère aura un développement différent (Costes *et al*, 2006)

La croissance secondaire, qui est l'épaississement de l'axe, est le fait de l'activité des méristèmes secondaires (le cambium et le phellogène) (Fumey, 2007). Grossièrement, l'activité cambiale permet de générer des tissus de conduction (xylème et phloème secondaire) et de réserve (cellules parenchymateuses), alors que l'activité phellogène génère des tissus de protection. L'activité cambiale s'arrête dès le début de la dormance.

La ramification est une étape primordiale à l'origine de la complexité architecturale que prendra le pommier. Elle se définit selon Bugnon (1980) comme « la croissance d'une ou de plusieurs unités morphologiques nouvelles et semblables à l'unité génératrice ».

Toute ramification, induite par la préformation d'un bourgeon l'année n-1, se développe donc à partir d'un axe déjà formé. Un bourgeon apical permettra la croissance terminale d'un axe alors qu'un bourgeon axillaire donnera une ramification latérale (Fumey, 2007) (Figure 2)

La ramification peut être caractérisée par son type (terminale, latérale), mode (monopodial, sympodial), sa rythmicité (continue, diffuse ou rythmique), sa dynamique (syllepsie=immédiate, prolepsie=différée) et sa position (acrotone, mésotone, basitone). (Figure 3)

2. Phénologie du pommier et cycle de développement

Une des caractéristiques des arbres fruitiers tels que le pommier est que la floraison d'une année N résulte du développement (végétatif, fructifère, initiation florale) de l'année N-1. Le rendement d'une année donnée est donc en grande partie expliquée par les conditions de croissance de l'année précédente. Des facteurs tels que la charge en fruit (crop load) et l'ombrage au sein de l'arbre influencent la formation des bourgeons floraux qui donneront la production de l'année suivante (Jackson, 2003). Le cycle de développement du pommier est annuel et s'étale du débourrement à la chute des feuilles et le repos hivernal (Fumey, 2007), et est constitué des étapes suivantes : débourrement, floraison, croissance des pousses, pollinisation, mise à fruit et développement de ceux-ci, formation de bourgeons floraux, abscission foliaire et dormance hivernale.

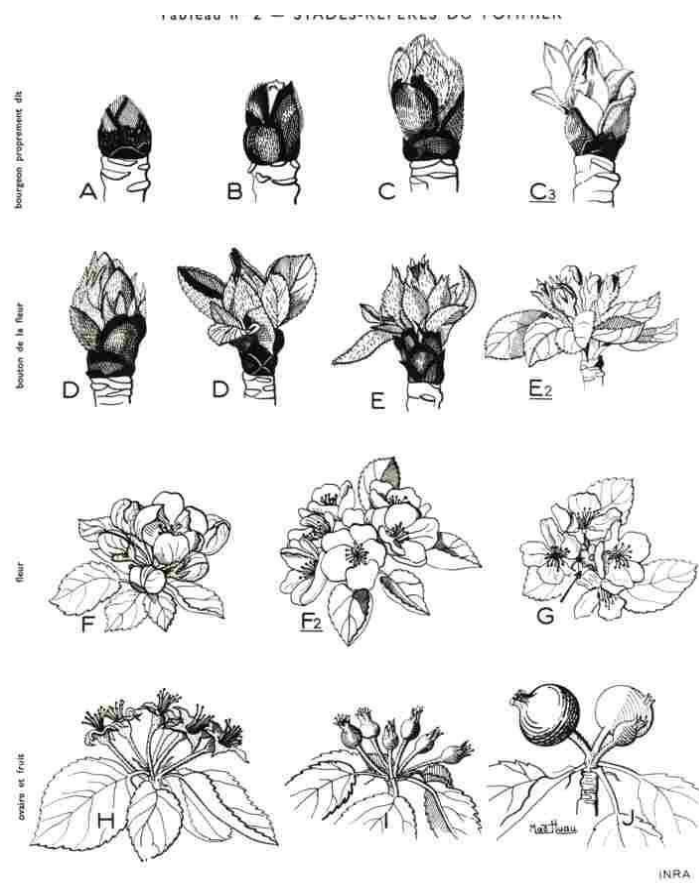


Figure 4. Charte de Fleckinger représentant les stades phénologiques chez le pommier (Fleckinger, 1948)

Les stades phénologiques largement décrits, notamment par Fleckinger (1948), et le développement du pommier dépendent du contexte climatique dans lesquels il se développe (Jackson 2003). (Figure 4)

Après la préformation des bourgeons, lors de l'année n-1, les bourgeons se mettent en dormance lors de l'hiver, durant lequel ils subissent une étape de vernalisation.

Au début du printemps, aux alentours de début avril dans la région Occitanie (PE Lauri, communication personnelle), le débourrement des pommiers a lieu, c'est à dire l'éclosion des bourgeons, une fois que la somme des degrés-jours est suffisante et la vernalisation subie.

La vernalisation est une période de froid subie nécessaire pour l'initiation de la phase reproductive (floraison).

Trois types de bourgeons peuvent se mettre en place : des bourgeons inflorescentiels, qui pourront donner successivement des fleurs puis des fruits, des bourgeons végétatifs : ne formant pas de fleurs ou encore des bourgeons latents, ne s'exprimant pas (Lauri, 2016), en position terminale ou axillaire (Fumey, 2007).

Au moment du débourrement, les bourgeons grossissent (stade B) puis éclosent (stade C-C3), formant ainsi des primordias foliaires au sein d'une rosette feuillée (stade D3), puis des fleurs (stade E2) pour les bourgeons floraux. D'avril/mai à l'été, les pousses formées à partir des bourgeons (pousses de bourse pour les inflorescences et pousses végétatives pour les bourgeons végétatifs) croissent jusqu'à la préformation de bourgeons pour l'année n+1.

La pollinisation des fleurs chez le pommier est entomophile et allogame, et est réalisée principalement par l'abeille commune (Ramirez et Davenport, 2013), qui permettra la fructification. Le début du développement du fruit est appelé nouaison (stade I), et a lieu après la pollinisation, au printemps.

Durant le printemps et l'été, trois processus « co-habitent » donc, celui du développement des fruits (après fécondation des fleurs), celui de la croissance de pousses, et celui de préformation des bourgeons pour l'année suivante, ce qui induit une compétition de ressources au sein même de l'arbre (Hanke *et al*, 2007).

C'est notamment de cet équilibre entre ressources allouées aux différents mécanismes dont dépendra la croissance végétative des rameaux, le potentiel de bourgeons floraux pour l'année suivante et le développement des fruits de l'année de culture.

Un processus d'abscission de certains fruits va alors intervenir afin d'allouer plus de ressources à certains fruits et aux autres processus cités plus haut. La plupart des abscissions de fruit interviennent lors de la phase de chute physiologique en mai/juin, après 6 à 8 semaines de croissance (Ferree & Warrington, 2003)

En automne, la chute des feuilles est principalement contrôlée par la température (Jackson 2003). La baisse de durée du jour a un effet sur les conditions radiatives, la baisse des températures de nuit induit l'abscission foliaire. Dans le cas de nuits relativement chaudes, durant lesquels les températures ne descendent pas assez, la chute de feuilles peut être ralentie (Jackson 2003, Ferree and Warrington, 2003).

3. Flux xylémien et transpiration végétale

La sève brute est transportée au sein du xylème pour 99 %, du système racinaire où l'eau et les nutriments sont absorbés jusqu'aux tissus aériens de la plante (Fichot, 2010).

Le trajet de la sève brute est donc principalement ascendant, et est « tirée » vers le haut par des différences de potentiels hydriques au sein du xylème, qui sont notamment dus à la transpiration de la plante. La transpiration est en effet le « moteur » du flux xylémien, par la création d'un gradient de potentiel hydrique, qui induit la remontée par capillarité de la sève brute. Ainsi, la valeur du gradient de potentiel hydrique définit donc l'intensité du flux xylémien. La quantité d'eau transpirée peut donc être estimée en mesurant les différences de potentiels correspondant à l'intensité des flux xylémiens. (Granier *et al*, 2000)

La transpiration est pour 90 à 95 % stomatique, et pour 5 à 10 % cuticulaire (Fichot, 2010)

La régulation de la transpiration est donc majoritairement induite par le mécanisme d'ouverture et de fermeture des stomates. Les conditions environnementales (température, humidité de l'air, luminosité, humidité du sol, vitesse du vent...) sont des facteurs régulant cette activité stomatique.

C. Effet des conditions environnementales sur le développement et la production du pommier

1. Facteurs climatiques limitants la production

Les principales contraintes climatiques sur la production que l'on peut trouver sont le gel hivernal, le manque de froid hivernal (absence de vernalisation), et un stress de chaleur en été (Jackson 2003) :

- Un gel hivernal impacte les bourgeons en dormance préformés en été
- Le manque de froid hivernal quant à lui limite la levée de la dormance des bourgeons et donc réduit le nombre de bourgeons végétatifs et reproducteurs qui vont débousser au printemps (cas en Egypte par exemple).
- Des rayonnements (température, lumière) excessifs reçus en été provoquent des dommages importants de nature physiologique sur fruit (sunburn) et sur feuilles (dommage photo-oxydatifs) qui peut compromettre/réduire le fonctionnement photosynthétique (Lauri et Simon, 2019) ainsi que la valeur marchande/qualité du fruit. (Retig et Kedar, 1967)

Dans un contexte de réchauffement climatique et dans la région occitane, les épisodes d'été avec de fortes températures et rayonnement incident peuvent en effet causer de nombreux dommages sur fruit. L'introduction de systèmes de vergers agroforestiers (pour permettre un ombrage) peut permettre de résoudre ces problèmes de stress radiatif.

2. Effet de l'ombrage sur le pommier en système agroforestier

L'effet de l'ombrage sur pommier et fruitier de manière générale a surtout été étudié avec des dispositifs de filets d'ombrage photo-sélectifs ou non. (Mupambi *et al*, 2018, Lopez *et al*, 2018) Ces filets influencent dans un premier temps leur environnement. Ce sont d'abord des protections physiques (insectes, vent, rayonnement excessif) qui affectent aussi le micro-climat (baisse la quantité de lumière, qualité de la lumière, température) et augmentent la proportion de rayonnement diffus (Stamps, 2009).

D'après la review de Mupambi *et al* (2018), l'effet de l'ombrage semble variable sur la croissance végétative, la floraison et les composantes du rendement en fruit selon les différentes études menées. L'auteur explique que cela dépend de la quantité d'intensité lumineuse qui peut être suffisante ou non selon les études pour stimuler l'initiation florale et le développement des fruits.

Quand l'ombrage fait baisser la quantité de lumière en dessous des conditions de saturation lumineuse des pommiers, cela fait baisser le taux photosynthétique des pommiers (Mupambi *et al*, 2018) et donc la biomasse globale produite (baisse de la taille de fruits, de la vigueur des pommiers...)

De manière générale, les filets d'ombrage permettent surtout de prévenir les dégâts de brûlures sur sur fruit dues à un rayonnement excessif et de réduire leur incidence d'environ 12 % (Do Amarante *et al*, 2011).

L'ombrage des pommiers peut donc avoir un effet positif notamment lorsque les conditions climatiques présentent des hautes intensités lumineuses (évitant le stress sans pour autant limiter la croissance et la production). Mais il peut aussi être limitant lorsque l'environnement ne permet pas un ombrage trop important pour maintenir les besoins physiologiques du pommier, et affecter de manière significative la croissance, la floraison et le développement des fruits.

L'ombrage chez les plantes modifie le climat lumineux et notamment la qualité de la lumière, en effet les plantes de la canopée haute absorbent (pour leur photosynthèse) de manière différentielle les différentes longueurs d'ondes de la lumière. Par exemple, le bleu est beaucoup absorbé tandis que le vert et les infra-rouges (FR : Far Red) restent particulièrement peu absorbés.

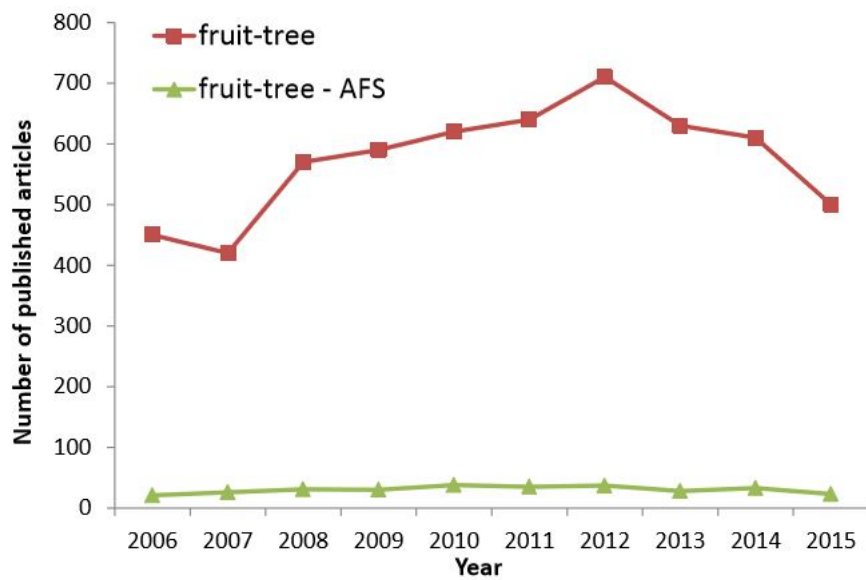


Figure 5. Nombre de publication scientifiques sur les fruitiers et sur les fruitiers en contexte agroforestier de 2006 à 2015 (Lauri et al, 2016)

Le bleu est donc moins disponible pour les strates basses alors que le vert et FR le sont plus. De manière générale, l'activité des différents photorécepteurs, modulant de nombreux processus physiologiques, sont sensibles à ces différentes longueurs d'ondes. La dégradation de la qualité de la lumière a donc un impact sur l'activité de ces photorécepteurs et donc sur la modulation différentielle des processus dépendant et pouvant avoir des conséquences sur la croissance végétative : plus longues tiges, accroissement de la surface foliaire, modification de l'angle foliaire, tendance à l'héliotropisme ... (Kami *et al*, 2010)

Par la modification de ces facteurs environnementaux en agroforesterie, on peut s'attendre à avoir une transpiration et des flux xylémiens moindres des pommiers (du fait de la baisse de température, augmentation de l'humidité de l'air etc...), et donc des pertes d'eau amoindries (Monteith *et al*, 1991).

D. Problématique

Les pommiers en verger traditionnel ont beaucoup été étudiés, et leur fonctionnement physiologique, leur développement et les mécanismes sous-jacents dans ce contexte sont plutôt bien connus. L'effet de l'ombrage sur le développement du pommier a aussi été étudié (cf. I.4.b).

Cependant, peu d'études ont été réalisées en contexte agroforestier (Figure 5). Le comportement des pommiers et les interactions y ayant lieu sont donc peu connues. (Lauri *et al*, 2016)

L'introduction de pommiers en agroforesterie est donc une méthode de diversification agro-écologique permettant l'ombrage des pommiers, qui a été étudié et utilisé via la mise en place de bâches. A la différence de bâches souvent mises en place à des périodes de stress radiatif potentiel, l'ombrage subi par les pommiers en agroforesterie est présent sur tout le cycle de développement du pommier et varie dans le temps et dans l'espace.

C'est fort de ce constat que l'UMR SYSTEM a mis en place un dispositif expérimental de pommier associés à des noyers afin d'en étudier ces interactions, et à quantifier les effets sur la mise en culture de pommiers en agroforesterie.

La principale question qui se pose, et qui sera étudiée durant ce stage est l'influence du climat lumineux en pleine feuillaison des noyers et pommiers (à un ombrage maximal) en été 2018 sur :

- la préformation des bourgeons en 2018
- Le développement végétatif du pommier : longueur des rameaux et section de section transversale du tronc
- La phénologie, la floraison et la nouaison/fructification du pommier en 2019.

Il est à noter que le climat lumineux sera étudié à partir d'un modèle spatialisé codé et développé durant ce stage, de manière quantitative (e.g en quantité de d'énergie lumineuse interceptée), à partir de l'intégration de données Lidar-T (Light Detection And Ranging - Terrestrial) en pleine période de feuillaison des noyers et pommiers durant l'année 2018.

Pour aborder cette étude, différentes hypothèses ont été formulées :

a. Les données Lidar-T sont utilisées sur l'ensemble de la période de simulation du bilan radiatif (8 semaines : 4 avant l'acquisition des données et 4 après). On suppose que la couverture feuillée des noyers et pommiers n'évolue pas durant cette période.

b. Que le modèle radiatif programmé et développé durant le stage permettra d'obtenir des sorties de simulations pertinentes lors de la feuillaison 2018 qui aura une influence sur le développement végétatif étudié en 2018 et végétatif et reproducteur observé en 2019.

c. Le climat lumineux en été 2018 reste à une constante près le même que celui de 2018 lors de la majeure partie de la croissance végétative (printemps 2018).

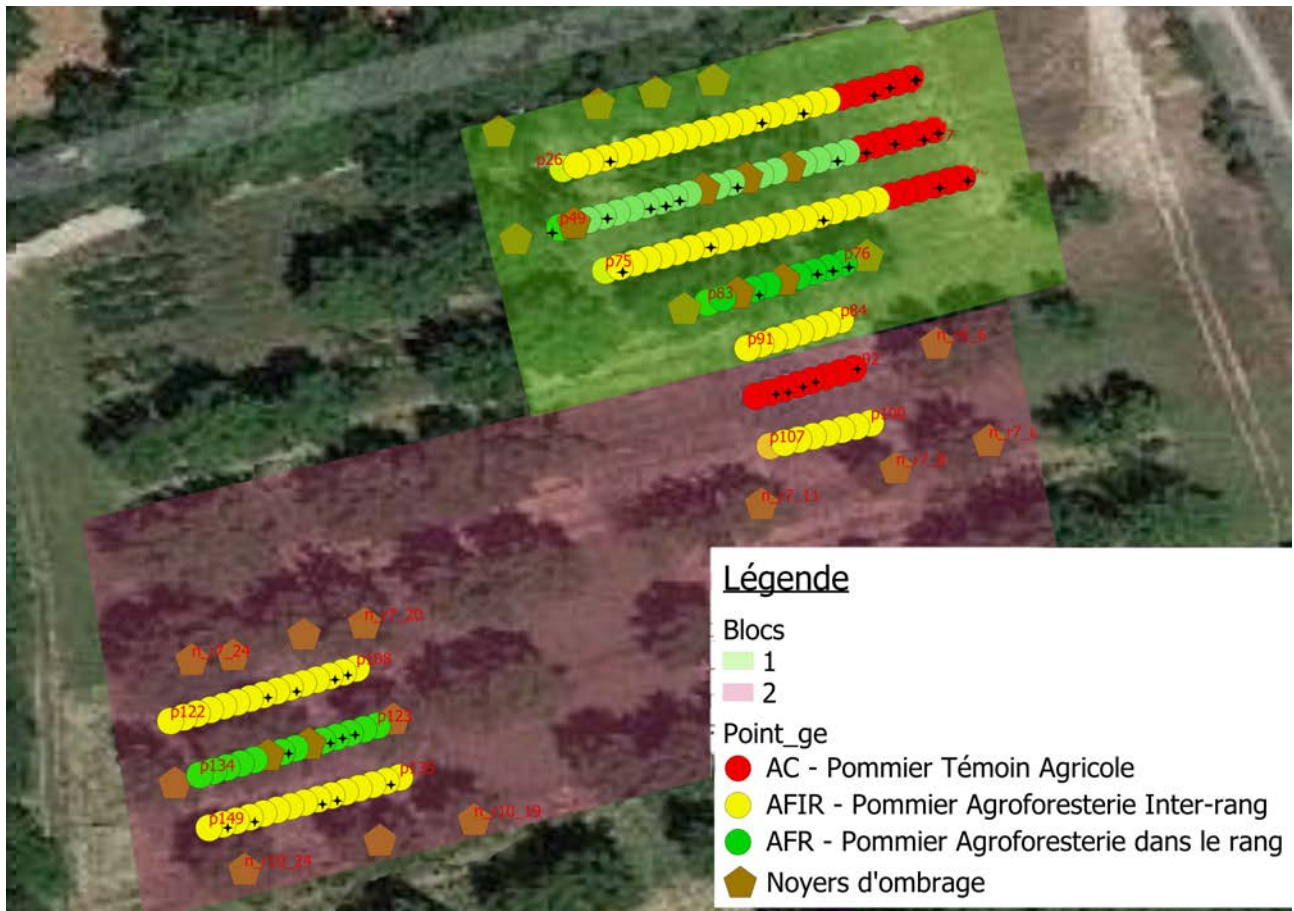


Figure 6. Parcelle du dispositif GAFAM: répartition des rangs de pommiers, leur modalité et localisation des noyers



Figure 7. Photo de la parcelle d'expérimentation GAFAM

II. Matériel et méthodes

A. Matériel biologique et plan expérimental : Le dispositif GAFAM (Growing Agroforestry with apples-Montpellier) du domaine départemental de Restinclières

1. Le dispositif GAFAM

Le site expérimental de notre étude est le dispositif GAFAM (Growing Agroforestry systems with Apple Montpellier) situé au domaine départemental de Restinclières (Prades-le-Lez, 34730) qui est un site expérimental en agroforesterie depuis 1995, date de plantation des premiers noyers (25e année après plantation en 2019). La parcelle (Figure 6), d'environ 0,6ha, est composée de trois strates végétales (Figure 7):

- des arbres forestiers : noyers hybrides (*Juglans regia x Juglans nigra*) (Strate haute)
- les pommiers (Strate intermédiaire)
- le sainfoin présent dans l'inter-rang et le TCR : Taillis Courte Rotation présent en dehors des rangs de noyers et pommiers (strate herbacée)

Le plan expérimental est décomposé en deux blocs ayant chacun trois modalités testées (Figure 6):

- Agricultural Control (AC), correspondant à système de verger en rang non agroforestier, servant de témoin
- Agroforestry Inter-Rows (AFIR), pommiers dans l'inter-rang ombragé par les noyers du rang
- Agroforestry in rows (AFR), pommiers dans le même rang que le noyer : alternance Noyer-pommier (x4-5)-Noyer

Au sein d'une même modalité (AFR et AFIR notamment), la distance entre les pommiers et noyers varie selon un gradient, ce qui impacte la compétition, notamment l'ombrage porté, et donc la quantité de rayonnement solaire disponible (énergie en Joules) pour les pommiers que nous nous efforcerons de quantifier durant ce stage.

Dans le cadre de notre étude, des pommiers Dalinette en 4e année de pousse ont été plantés en 2016. Nous nous focaliserons sur 45 des 149 pommiers de la parcelle, suivis et étudiés dans le cadre la thèse de B.Pitchers portant sur l'architecture des pommiers en contexte agroforestier. Ces pommiers ont été implantés en rangs et sont espacés d'environ 1,3m dans le rang, et l'espace inter-rang est d'environ 6,5m.

2.Le matériel végétal étudié et conduite de la parcelle

Deux variétés de pommiers sont présentes :

- une étudiée : la variété dalinette (ou chouquette), greffée sur porte-greffe G202
- une variété pollinisatrice : la variété story.

Le porte-greffe G202 est semi-nain (croisé Malling 27 et Robusta 5), avec une forte capacité d'enracinement. Il est aussi résistant à des maladies touchant le pommier telles que le chancre du pommier (*Phytophthora cactorum*) et le feu bactérien (*Erwinia amylovora*), qui peuvent causer des dégâts importants. Le choix de ce porte-greffe résistant à des pathogènes a pour objectif de limiter l'utilisation de pesticides (PE Lauri, communication personnelle).

La variété dalinette est une variété vigoureuse, très productive et dont le rendement est stable (peu d'alternance) (Chambre d'agriculture Occitanie, 2018).

La parcelle expérimentale est conduite en agriculture biologique (AB) et tente de se rapprocher au mieux d'une gestion agro-écologique (choix de porte-greffe résistant, fertilisation

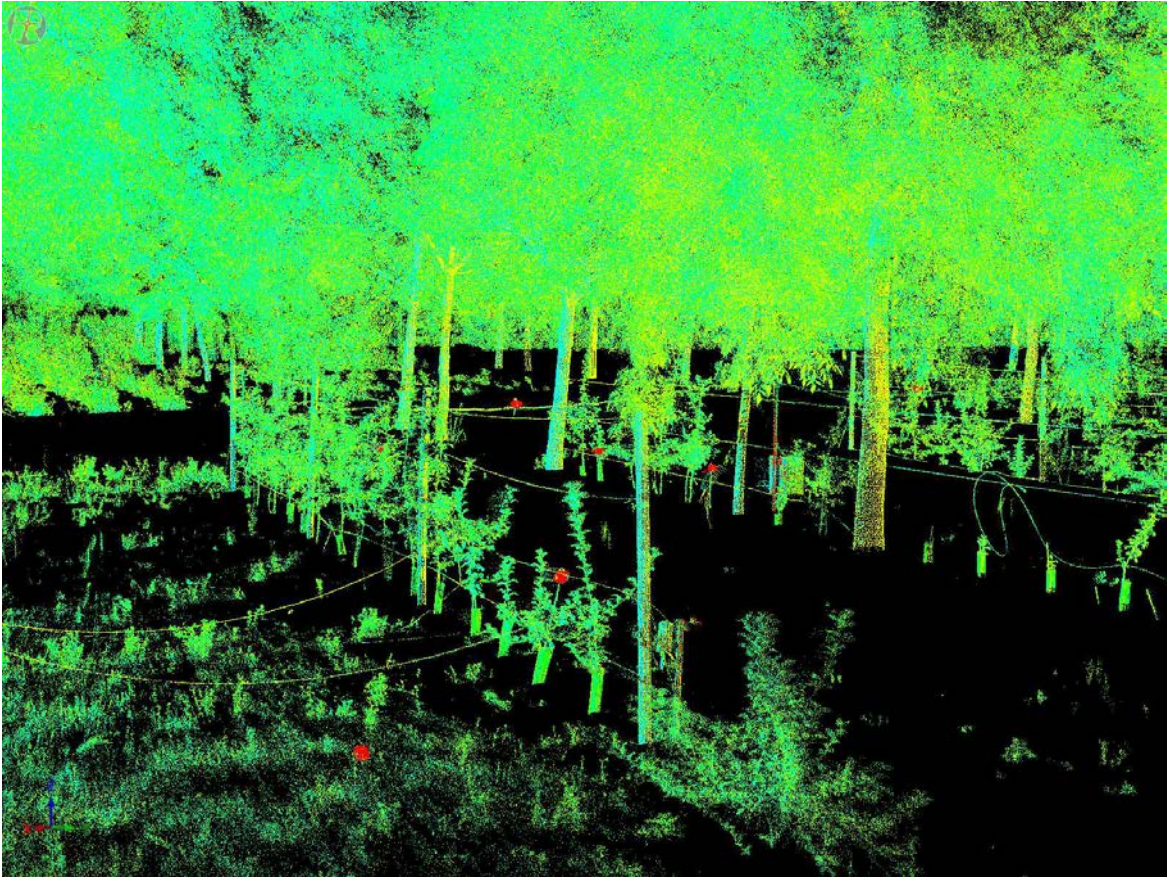


Figure 8. Visualisation du nuage de points LIDAR-T représentant les éléments de la scène (RisCan Pro)

organique, introduction de légumineuse : le sainfoin, apport de BRF, désherbage manuel, limitation du nombre de traitements phytosanitaires...)

La parcelle a aussi été conduite de manière à réduire les facteurs limitants (autres que la lumière) et les mêmes règles de décision de gestion ont été appliquées pour les années 2018 et 2019 (à savoir):

- Fertilisation organique en 2 apports : Keraphos 6-4-4 (0,250kg/pommier), du chélate de fer (10g/pommier) et du bois raméal fragmenté (BRF) dans le rang des pommiers
- Désherbage manuel dans les rangs aux même moment que la fertilisation
- Irrigation goutte à goutte les jours de mesure, déclenchée à partir de fin mars
- Apport de branches fleuries Granny (uniquement pour 2019) les 28 mars et 11 avril. Les pommiers pollinisateurs ayant été plantés en 2017 (un an après les autres)
- Éclaircissage des fruits début juin.
- Mise en place de protection des troncs en 2018.

B. Réalisation d'un bilan radiatif spatialisé : Acquisition et traitement de données Lidar-T, programmation et simulations

1. Les données Lidar-T : une base de donnée pour la réalisation d'un bilan radiatif

Il existe plusieurs approches pour quantifier la lumière disponible sous couvert végétal : une approche directe à base de capteurs photosensibles permettant de mesurer la transmission de la lumière sous la canopée en un point donné, et une méthode indirecte (utilisée ici) qui, à partir d'une reconstitution spatiale de la canopée (données Lidar-T) permet la simulation de la transmission du rayonnement à travers les différentes strates, et d'en déduire l'interception lumineuse de la strate d'intérêt, c'est-à-dire celle des pommiers dans notre cas.

Le Lidar-T présente de nombreux avantages, c'est une méthode de mesure non destructive, permettant de représenter rapidement la structure de la canopée de manière précise en un nuage de points sur la totalité de la scène (Dassot *et al*, 2011). (Figure 8)

Le Lidar-T contrairement au Lidar aéroporté, nécessite plusieurs acquisitions Lidar-T à différentes positions du sol, permettant de multiplier les points de vue et donc de minimiser les parties cachées (par des éléments de la scène), et d'être précis (de l'ordre du cm). Le Lidar aéroporté quant à lui ne nécessite qu'une acquisition de donnée, qui est mobile mais moins précise (de l'ordre de 50cm de précision) (conversation personnelle avec Jean Dauzat)

En revanche, c'est une technologie dont la mesure reste statique (dans le temps) et onéreuse, notamment du fait de l'utilisation de laser et de capteurs, mais aussi d'un traitement des données qui est assez long et nécessite des logiciels d'analyse complexe.

a.Acquisition des données de terrain Lidar-T

Pour notre étude, 72 scans de Lidar-T ont été réalisés les 26 et 27 août 2018 par Benjamin Pitchers, en pleine feuillaison des pommiers et noyers afin de décrire la structure 3D des constituants de la scène, en calculer les surfaces foliaire pour, in fine, quantifier une quantité de rayonnement intercepté lorsque l'ombrage porté sur les pommiers est maximal. Ces relevés ont été effectués à une résolution de 0,04° avec un Lidar terrestre V-Line 3D RIEGL VZ-400. 36 positions de la parcelle ont été scannées par Lidar-T, en effet 2 scans par position sont nécessaires: un horizontal et un vertical, dit « basculé » afin de couvrir l'intégralité de la scène dans toutes les directions.

Le traitement des données Lidar-T a été fait sur deux scènes distinctes, une scène étant définie comme une représentation graphique en 3D d'un espace déterminé :

- Scène 1 : Bloc 1 plus une rangée de pommiers AC du bloc 2 (5 pommiers AC blocs 2 suivis)
- Scène 2 : Bloc 2 moins la rangée AC de la scène 1.

Le rayonnement (total et diffus), est acquis sur la parcelle voisine, grâce à un pyranomètre BF5 Sunshine Sensor (Delta-T Devices Ltd) et une centrale de mesures et de contrôle CR1000.

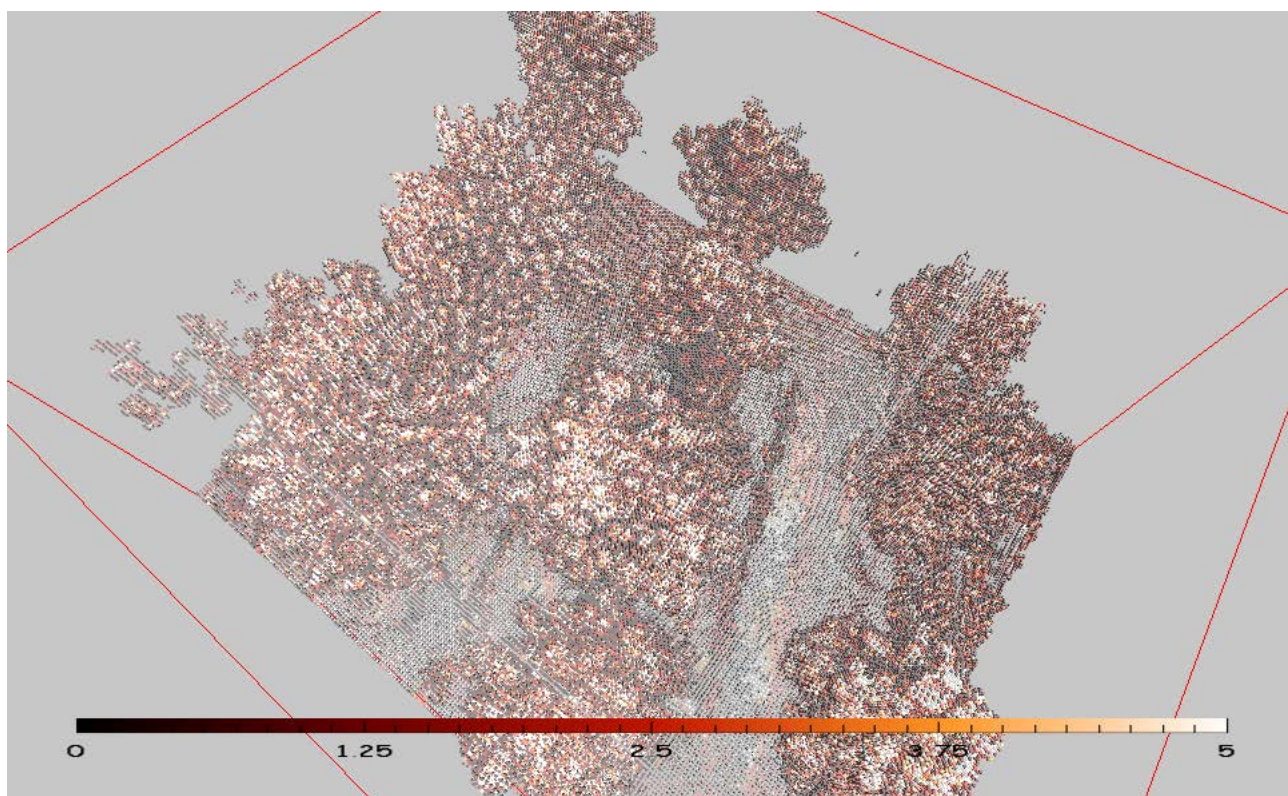


Figure 9. Scène voxelisée par AMAPVox (à une résolution de 0,2m) avec représentation du Plant Area Density (m^2 plante/voxel)

b. Principes et hypothèses du bilan radiatif

La programmation du bilan radiatif a été réalisée via le logiciel R puis a été converti en Java afin de simuler le modèle radiatif. R a ensuite permis d'extraire et d'analyser les données simulées. Nous nous intéresserons à quantifier le rayonnement transmis et intercepté aux pommiers sur la période du 30 juillet au 23 septembre 2018 (8 semaines).

Lors de la réalisation du bilan radiatif, nous faisons l'hypothèse que l'interception du rayonnement est la différence entre le rayonnement incident et le rayonnement transmis. Nous négligeons donc, comme beaucoup de modèles de bilan radiatif, le rayonnement transmis réfléchi par le sol, et le rayonnement réfléchi par la canopée (Varlet-Grancher *et al*, 1989).

L'influence des longueurs d'ondes absorbées et transmises (qualité de la lumière) sur le développement du pommier ne sera pas étudiée (limites du modèle utilisé).

Les calculs de trajets optiques des rayons lumineux, de la transmittance et de l'interception du rayonnement de chaque voxel de l'espace sont réalisés en fonction du Plant Area Density (PAD) exprimé en m² de surface foliaire par unité de volume m³. La différenciation entre feuilles et partie ligneuse n'a pas été effectuée.

L'approche utilisée est une approche « milieu diffusant » (« turbid medium »), supposé homogène et continu, consistant à calculer l'atténuation du rayonnement incident au cours de sa traversée du milieu et de l'interception par le couvert par la loi de Beer-Lambert ($I=I_0 * e^{-\text{CoefG} * \text{PAD} * \text{Path length}}$) (Monsi et Saeki, 1953, Leroy 2006)

Une option dite de toricité a aussi été appliquée, c'est à dire que le rayonnement sortant de la scène est réintégré de l'autre côté de la scène, comme si la scène était répétée à l'infini afin de satisfaire une hypothèse d'uniformité de la scène et de ne pas avoir d'« effet bordure ».

2. Etapes de l'établissement du modèle radiatif

Le traitement des données et la programmation aboutissant à un bilan radiatif est composé des différentes étapes traitées dans les sous-parties suivantes (Orn, 2016).

a. Prétraitement données Lidar-T

La coregistration – Cette première opération consiste à repositionner les différents scanners Lidar-T effectués les uns par rapport aux autres dans un espace unique, par rapport à des cibles réfléchissantes de référence placées sur la parcelle lors de l'acquisition. Elle est effectuée avec le logiciel RiScanPRO (Riegl) qui permet un prétraitement des données Lidar-T, notamment la visualisation du nuage de points (Figure 8), la coregistration et des fonctions d'analyse de la scène étudiée (=parcelle).

Le positionnement GPS consiste à positionner la scène globale dans un référentiel GPS unique. Pour cela, les positions des pommiers en bouts des rangs et quelques noyers ont été relevées par positionnement GPS.

Les points géoréférencés ont été extraits et implémentés par pointages sur riScanPro, via l'outil de « Registration » du logiciel, ce qui permet d'analyser la scène de manière géoréférencée, et d'extraire les coordonnées des troncs de pommiers, de noyers et des poteaux de palissage.

Enfin, cet espace est voxelisé c'est-à-dire que chaque élément de la scène est intégré dans un espace à 3 dimensions, dont l'unité est le « voxel ». Chaque voxel correspond à un parallélépipède rectangle, la plupart du temps cubique. Cet espace est défini par ses coordonnées (x,y,z). Les voxels sont caractérisés par des données attributaires comme la densité d'éléments de plante (PAD), ...

La voxelisation se fait sur le logiciel AMAPVox v1.1.5, développé par l'UMR AMAP (botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes) en intégrant les scanners Lidar-T coregistrés des deux scènes. Le logiciel AMAPVox permet effectivement de générer et visualiser l'espace voxel à partir de données Lidar aériennes (ALS : Aerial Lidar System) ou terrestres (TLS : Terrestrial Lidar

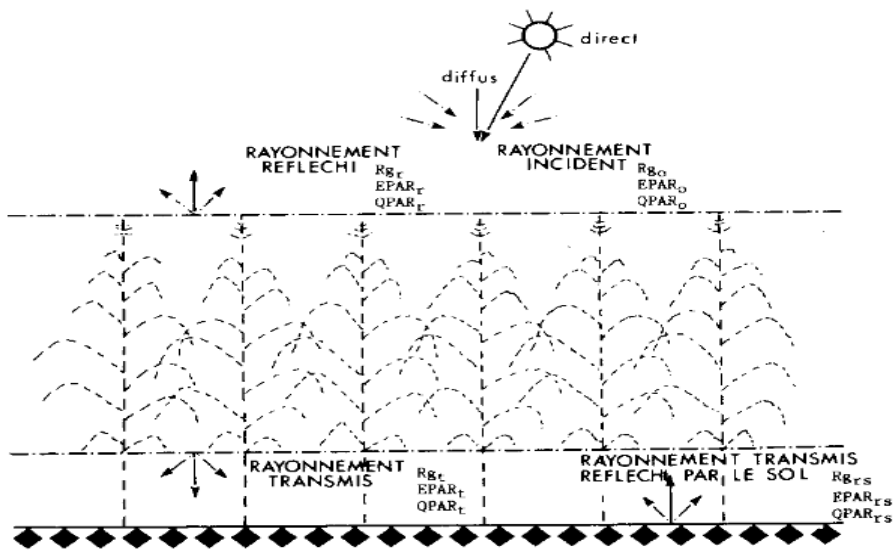


Figure 10. Schéma montrant les différentes composantes d'un bilan radiatif d'un couvert végétal (Varlet-Granchet et al, 1989)

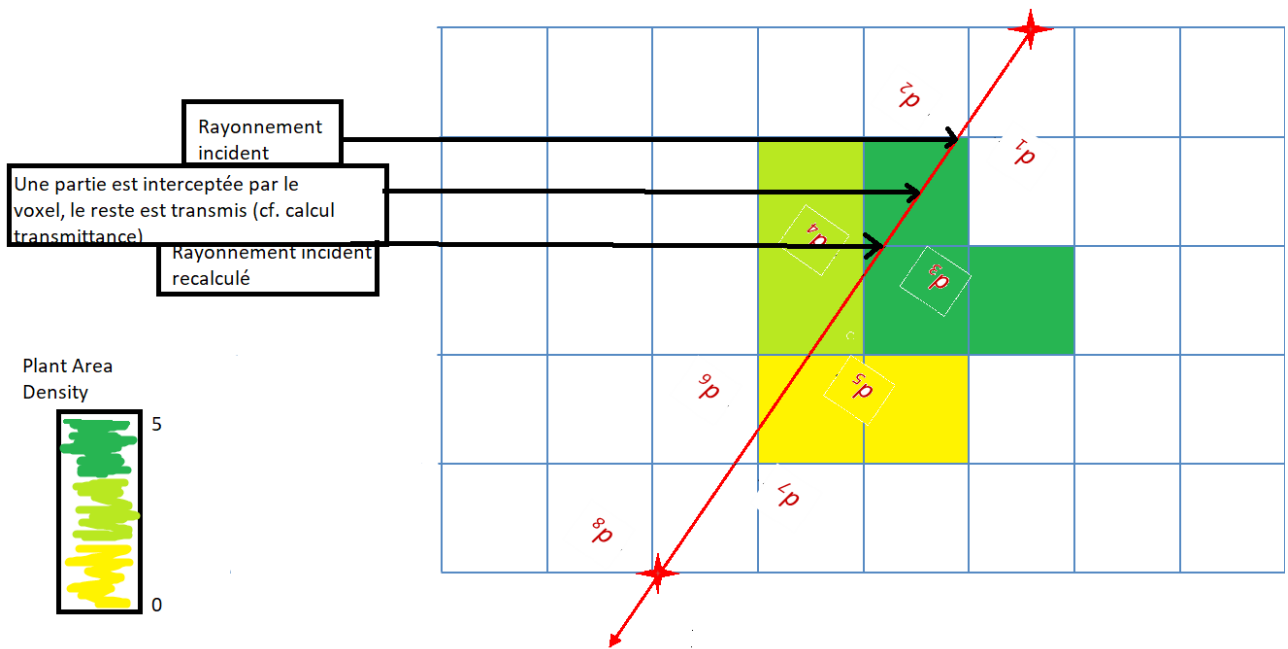


Figure 11. Schéma présentant le trajet d'un rayon à une direction donné traversant l'espace voxel

System), ainsi que le calcul de certaines données attributaires à l'échelle du voxel : la transmittance et le PAD (Plant Area Density), qui permettront de le calcul d'interception lumineuse dans le modèle radiatif (eq. (1)) (Figure 9)

Plusieurs voxelisations à des résolutions différentes ont été faites : 1m³ (1*1*1), 0,343m³ (0,7*0,7*0,7), 0,125m³ (0,5*0,5*0,5) et 0,008m³ (0,2*0,2*0,2).

$$PAD = \min(\log(\text{Transmittance}) / \text{CoefG} ; PAD_{\max} = 5) \quad (1)$$

b. Modélisation de la discrétisation de l'hémisphère céleste

Les directions que peuvent prendre les rayons du soleil sont simulés selon un certain nombre de directions « discrètes » de la lumière avec le modèle « turtle » de Den Dulk (Den Dulk, 1989). L'hémisphère céleste est donc divisé en 1, 6, 16, 46, 136 ou 406 secteurs (selon la résolution souhaitée), cela correspond donc au nombre de directions que prend le rayonnement simulé, calculé à partir des angles d'élévation et azimutal.

c. Modélisation du lancer de rayon : trajet optique des rayons dans un certain nombre de directions

Le trajet (optique) d'un rayon, pour une direction donnée, a été simulé : partant du haut de l'espace voxel (plus haute valeur de l'axe Z) et atteignant les voxels voisins de proche en proche jusqu'à atteindre le sol. Cette simulation du trajet d'un rayon a été appliquée pour un certain nombre de rayons ayant différentes directions (cf. II.B.1.b)

Pour chacun des rayons simulés, la quantité de rayonnement par rayon a été calculée à partir de la proportion de rayonnement direct et diffus, de l'indice de clarté, de la course du soleil (selon la période et la latitude considérée), du nombre de directions et de rayons et de la quantité de rayonnement globale.

Indice de clarté = Rayonnement global (W/m²) / Rayonnement extra-terrestre (W/m²) (2)
avec R_g : mesuré sur la parcelle et le Rayonnement extraterrestre simulé

d. Modélisation de l'interception de la lumière par l'arbre

Durant le stage, nous avons simulé l'interception du rayonnement comme ce qui n'était pas transmis (eq. (3)). (Figure 10 et 11)

Rayonnement intercepté = Rayonnement incident - (Transmittance * Rayonnement Incident) (3)
sachant que la quantité de rayonnement incident est recalculé au cours de son trajet au sein de l'espace voxel lors d'une interception par le couvert

$$\text{Transmittance} = e^{-\text{CoefG} * \text{PAD} * d} \quad (4)$$

avec CoefG : le coefficient d'extinction traduisant la disposition des éléments foliaires, supposée comme étant sphérique : CoefG=0,5 (Vincent *et al*, 2016)

le PAD : Plant Area Density correspond à la densité de surface de plante contenue dans un voxel

d : distance parcourue par un rayon au sein d'un voxel

e. Simulation du bilan radiatif

Le bilan radiatif a été simulé à partir de scènes voxelisées à 0,2m de résolution, avec les paramètres suivants :

- période de simulation : 30 juillet au 23 septembre 2018
- nombre de rayons : 30
- nombre de directions : 46
- altitude : 61m (altitude du dispositif GAFAM)
- latitude : 43,703° (latitude du dispositif GAFAM)

f. Extraction des positions des pommiers étudiés et intégration de la quantité d'énergie lumineuse interceptée sur une période donnée

L'extraction des voxels propres à chaque pommier a été simulée sur R à partir de la position des troncs (considérée comme le milieu de la couronne des pommiers), de la hauteur des différents pommiers et du rayon des couronnes (=1m). Ces données ont été extraites de la scène coregistrée sur RiscanPro avec les outils de géo-référencement. Deux formes de couronnes ont été testées, une parallélépipédique et une autre cylindrique. La création de ces sous-espaces voxels a permis l'extraction de la quantité de lumière reçue pour chaque pommier (en excluant la strate herbacée et les noyers) pour chaque pas de temps.

La position des poteaux de palissage et des centrales d'acquisition TTD (Transient Thermal Dissipation) ont été relevées, car ceux-ci pouvaient induire une surestimation du PAD lorsqu'ils étaient inclus dans la couronne des pommiers (pommiers proches des poteaux ou des centrales). Ces positions ont été extraites dans RisCanPro et enlevées des couronnes de pommier.

La quantité de lumière reçue pour chaque positions correspondant à un pommier donné ont été sommées afin d'obtenir une quantité de lumière interceptée par pommier pour chaque pas de temps simulé. Afin d'étudier l'effet de la variabilité temporelle de l'ombrage au cours d'une journée, la quantité de lumière interceptée par pommier a été ramenée à :

- une quantité interceptée moyenne par jour et par pommier
- une quantité interceptée moyenne par matin et par pommier
- une quantité interceptée moyenne par après-midi et par pommier

3. Calcul du NCI 2019

Jusqu'alors, la compétition entre chacun des 45 pommiers étudiés et les noyers présents dans un rayon de 15 mètres était évaluée par un indice de compétition agroforestier calculé, le Neighborhood Competition Index (NCI) :

$$NCI = 1 / \sum OC * \sum DHP/di \quad (5)$$

avec OC: Openess Canopy déduit des photos hémisphériques de 2018

DHP: Diamètre à hauteur de poitrine (des noyers) qui sont à moins de 15m des pommiers

di : distance au noyer-pommier

Un test de corrélation sera effectué entre le NCI et la quantité interceptée moyenne par pommier pour une comparaison méthodologique de l'expression de la compétition pour la lumière.

C. Mesures architecturales et écophysologiques du pommier

Les bourgeons végétatifs et floraux préformés durant la fin de l'été 2018, et devraient donner lieu respectivement à une croissance végétative et reproductrice en 2019.

L'acquisition des données de terrain est un ensemble de mesures de différentes variables sur les 45 pommiers étudiés dans le cadre de la thèse de B.Pitchers :

-variables dynamiques : stades phénologiques 2019 (lundi, mercredi, vendredi), croissance de pousse (lundi, vendredi) et du diamètre des troncs 2019, flux de sève (en continu, acquisition toutes les 15min passée à 30min en 2019) 2018 et 2019

-variables statiques: décompte des bourgeons initiés en 2018, diamètre de tronc 2018

1. Suivi phénologique des bourgeons floraux en 2019

Le suivi phénologique des bourgeons floraux a comment au moment du débourrement des pommiers, c'est à dire le 25 mars 2019 sur un échantillon de 10 bourgeons floraux par pommier.

Dans certains cas cela n'a pas été possible (certains pommiers suivis ayant moins de 10 bourgeons floraux). Afin de suivre autant de bourgeons par modalité, plus de 10 bourgeons ont été suivis sur d'autres arbres de la même modalité afin de « compenser » les pommiers AFR et AFIR ayant moins de 10 bourgeons floraux à suivre. Le nombre de feuilles, de fleur par inflorescence, de fruits mis en place, de fruits ayant noués et ayant subis une chute physiologique ont aussi été comptés.

2. Flux xylémiens et transpiration foliaire de 2018

La mesure de flux xylémien est un bon moyen d'estimer la transpiration foliaire des pommiers (Fiora and Cescatti, 2006). Les flux xylémiens ont été mesurés via le système TTD-SP (Transient Thermal Dissipation – Single Probes), développé par Frédéric Do (Do et Rocheteau, 2002). Ce système de mesure est une adaptation de la méthode CTD (Constant Thermal Dissipation) de Granier (1985, 1987) (Do *et al*, 2011) utilisée habituellement pour ce type de mesure dont le principe est un chauffage continu des sondes, tandis que le TTD est une méthode non continue de chauffage. Le système CTD a cependant ses limites, il est en effet sensible aux gradients de température naturels au sein du tronc de l'arbre, ce qui n'est pas le cas du système TTD-SP (Do et Rocheteau, 2002).

Les sondes TTD-SP sont mises en place à environ 30cm de hauteur des troncs des pommiers de manière à être en contact avec le réseau xylémien, et sont protégées par des protections réfléchissantes. Elles sont chauffées toutes les 10min pendant 1min à 60mW.

Ces mesures nécessitent une étape de calibration, afin d'estimer les flux zéro.

La sonde du pommier n°34 ayant été cassée, elle n'enregistre plus aucune donnée et sera donc exclue de l'analyse.

Les données sont stockées sur les centrales d'acquisition mises en place sur la parcelle et sont récoltées.

3. Décompte des bourgeons mis en place en 2018

Le nombre de bourgeons (végétatifs et floraux) se développant en 2019 (hors latents), et leur type ont été dénombrés début juin lorsque la totalité des inflorescences avaient ou non nouées.

4. Croissance totale de 2018 et dynamique de croissance de 2019

a. Croissance totale des ramifications de 2018

La croissance 2018 de l'ensemble des ramifications de chaque arbre a été mesurée fin août 2018, et a été cumulée par arbre afin d'avoir une mesure de la croissance globale totale annuelle.

b. Dynamique de croissance de 2019

A partir de fin avril 2019, lorsque la totalité des bourgeons ont débouffés, la dynamique de croissance de 5 bourgeons terminaux floraux et végétatifs par pommier a été suivie.

Cette sélection n'étant pas toujours possibles (pommiers ayant moins de 5 bourgeons terminaux floraux et/ou végétatifs), une compensation par un suivi de plus de 5 bourgeons pour un autre pommier de la même modalité (AC, AFIR, AFR) a été entreprise.

Les données de 2019 ne seront pas analysées, ni présentées dans les résultats du fait que leur croissance annuelle n'est pas terminée et qu'aucune acquisition LIDAR-T n'a été réalisée durant le printemps 2019.

D. Analyse statistique des données

Des modèles linéaires prédictifs des variables écophysologiques de 2018 (variables expliquées) ont été construits.

Trois variables explicatives ont été testées (la quantité moyenne d'énergie lumineuse journalière, matinale et post-méridienne par pommier) par variable expliquée, afin de voir s'il y a une influence de la temporalité de l'interception du rayonnement sur les variables écophysologiques.

L'analyse statistique de variance a été réalisée sous R, sur les données de terrain et simulées, en testant au préalable les conditions de validité de test de corrélation : distribution normale (Shapiro-Wilk : shapiro.test sous R) et homoscedasticité des résidus (var.test sous R).

Si ces conditions étaient remplies, alors un test paramétrique de corrélation de « Pearson » (cor.test sous R) a été effectué, sinon un test non-paramétrique de corrélation de « Spearman » était utilisé (cas des données de comptage de bourgeons, de quantité d'eau transpirée et de TCSA)

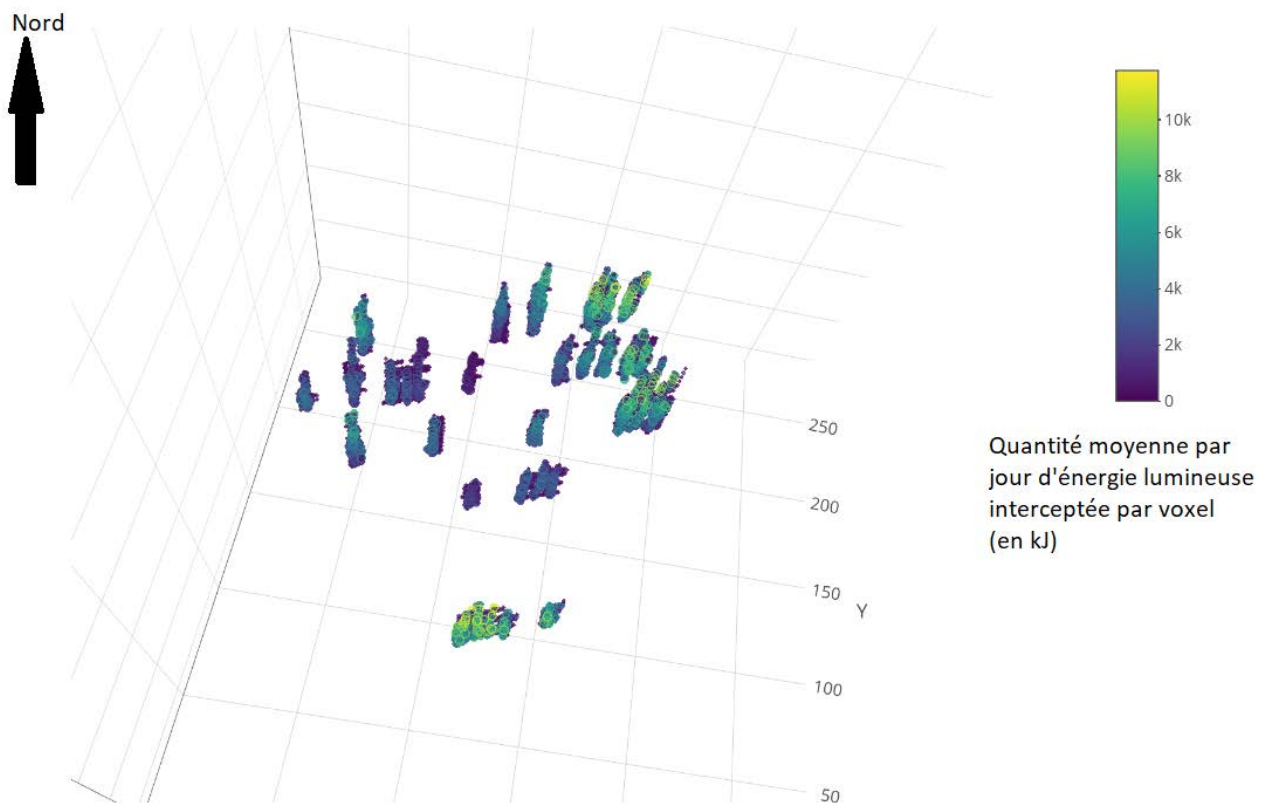


Figure 12. Représentation 3D de l'interception moyenne quotidienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 1 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

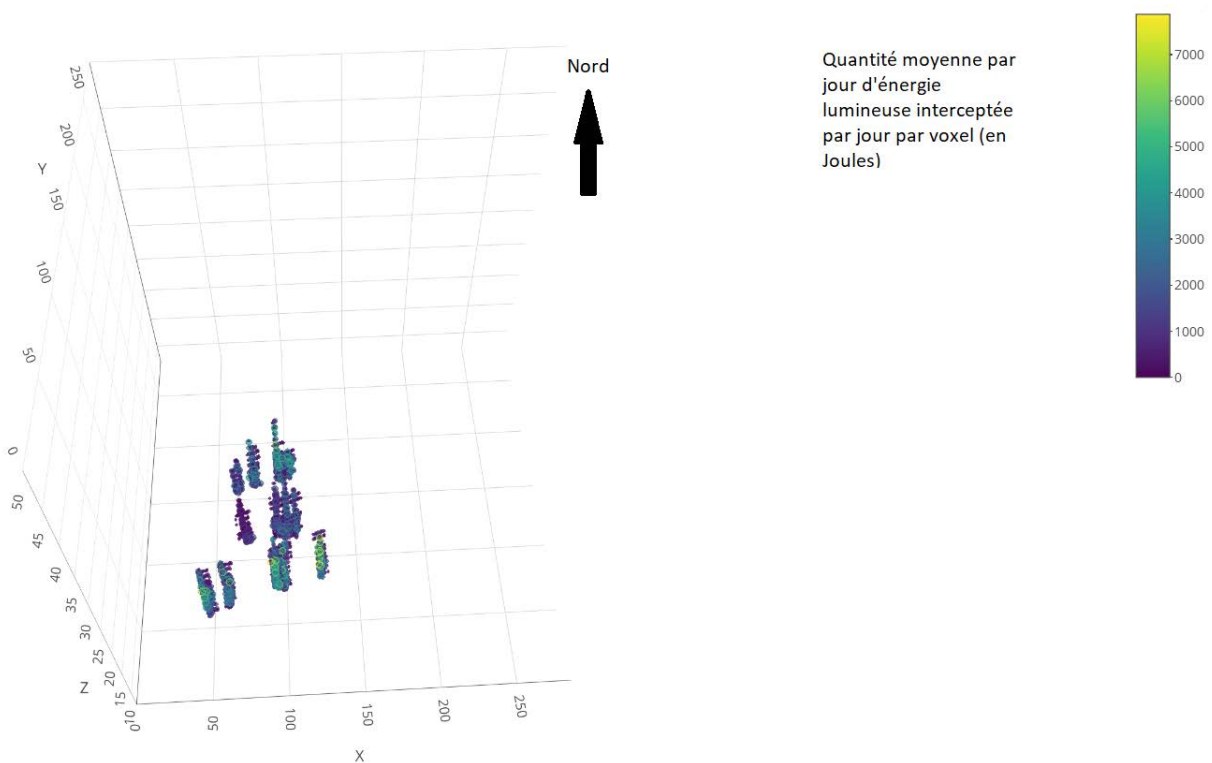


Figure 13. Représentation 3D de l'interception moyenne quotidienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 2 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

Le coefficient de détermination R^2 a systématiquement été calculé lors de la construction de ces modèles.

Pour l'étude des stades phénologiques, la régression multinomiale ordonnée, via la fonction `polR` sous R (package MASS), a permis d'étudier date à date (de relevé) les décalages phénologiques.

III. Résultats

NB : Les graphique spatialisés 3D représentant l'interception des pommiers suivis le matin et l'après-midi sont en Annexe I. Quant à ceux présentant les modèles linéaires et résultats de test de corrélation avec les valeurs d'interception matinales et post-méridiennes (comme variable explicative) sont respectivement en Annexe II et III

A. Analyse de l'interception lumineuse des pommiers par modélisation

1. Interception lumineuse des pommiers suivis dans un espace voxelisé

Sur les figures 12, 13 et Annexe I, on peut observer la quantité d'énergie interceptée moyenne par jour, matinée et après-midi pour les 45 pommiers suivis, respectivement des scènes 1 (bloc 1 + témoin agricole du bloc 2) et 2 (bloc 2 sans la modalité témoin agricole) en 3D (selon les axes x,y,z). Ces quantités sont les valeurs compilées de sortie du modèle d'interception radiative développé et codé durant ce stage.

Les graphiques 3D sont orientés vers le nord (de la même manière que le schéma du dispositif GAFAM partie II).

Scène 1 (Figures 12, Annexe I.1 et 2)

On remarque que les pommiers témoin agricole AC (à droite du graphique pour les pommiers du bloc 1, et en bas pour ceux du bloc 2) interceptent quotidiennement plus de rayonnement que la majorité de ceux en AFIR ou en AFR par voxel et du fait de leur nombre de voxels d'interception (dont le $PAD > 0$) plus important. En effet, les voxels des pommier de la modalité AC interceptent globalement de 6000J à plus de 10000J.

Les pommiers en AFR nord (rang 2 en partant du Nord, sur la gauche) ont une très faible interception comparée à ceux des modalités AFIR et AC. Ils semblent être assez homogène au niveau de leur interception globale de lumière vis à vis des pommiers AFR n° 76,77,78 et 81, mis à part le n°39 qui a l'air d'être le pommier suivi qui intercepte le moins de lumière (moins de 1000J/voxel). Les pommiers en AFR de manière générale sur cette scène interceptent entre 0 et 4000J/voxel quotidiennement.

De manière générale, les pommiers AFIR (rang 1 et 3 en partant du haut, côté gauche) interceptent entre 4000 et 8000J/voxel quotidiennement.

Cependant certains pommiers AFIR tels que le n°9 (rang le plus au nord, 4° pommier en partant de la droite) semblent intercepter beaucoup plus d'énergie lumineuse que d'autres pommiers de la même modalité, avec plus de voxels intercepteurs et une interception/voxel autour de 6000-8000J quotidienne.

D'après notre modèle, certains pommiers en AFIR interceptent plus de rayonnement que ceux de la modalité AC, comme le pommier n°9.

On observe aussi des différences d'interception lumineuse entre le matin et l'après-midi, qui varient fortement selon les individus. De manière globale, les pommiers interceptent environs 40 % de l'énergie lumineuse le matin et 60 % l'après-midi pour les témoins AC d'après les simulations du modèle.

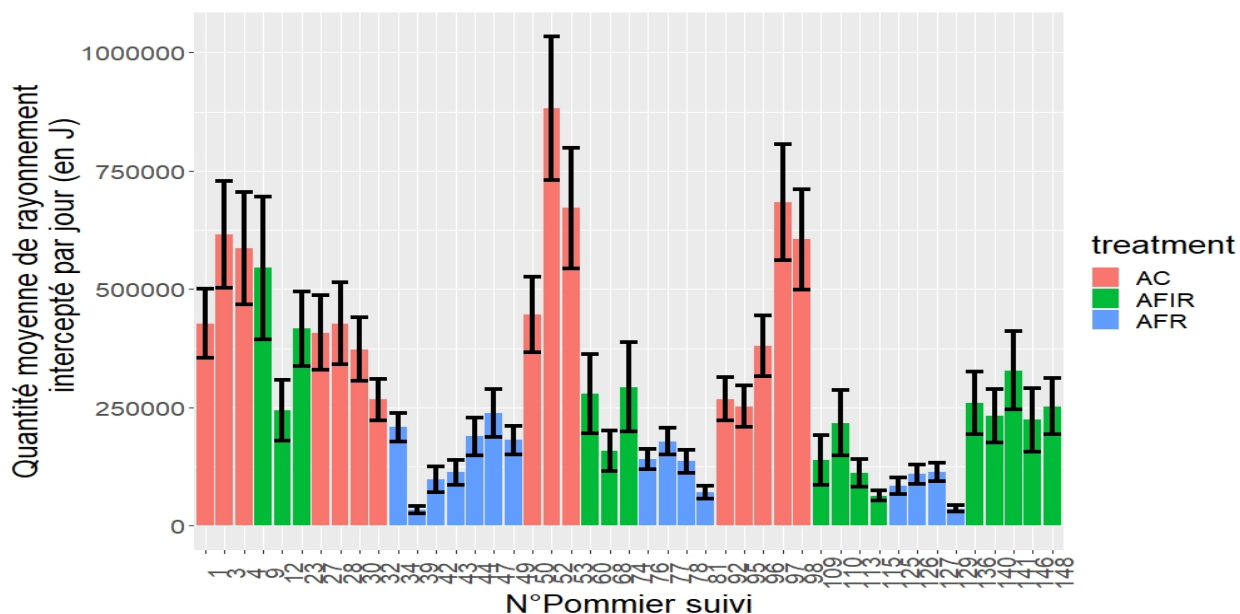


Figure 14. Quantités moyennes quotidiennes d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

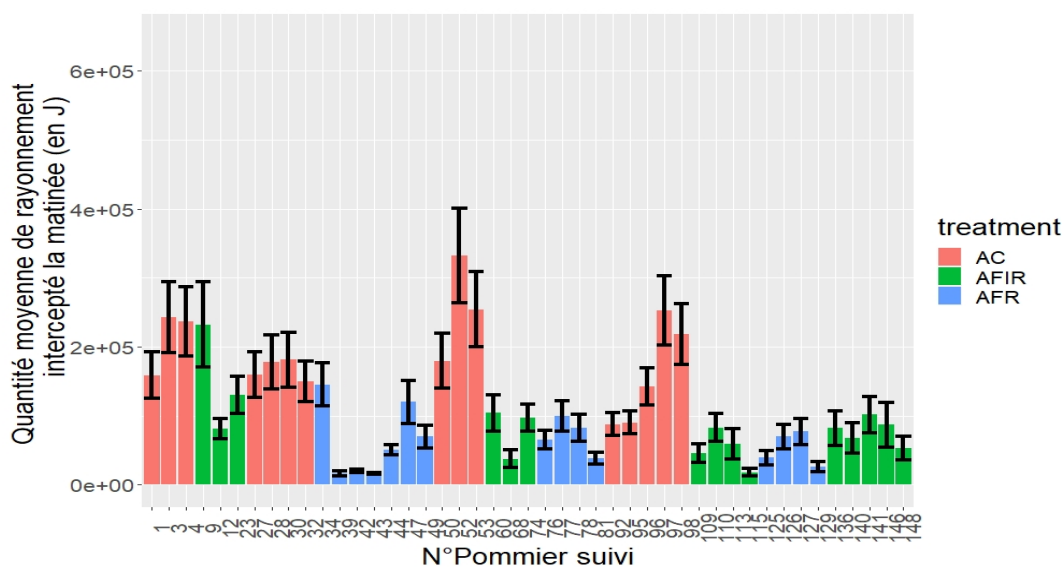


Figure 15. Quantités moyennes matinales d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

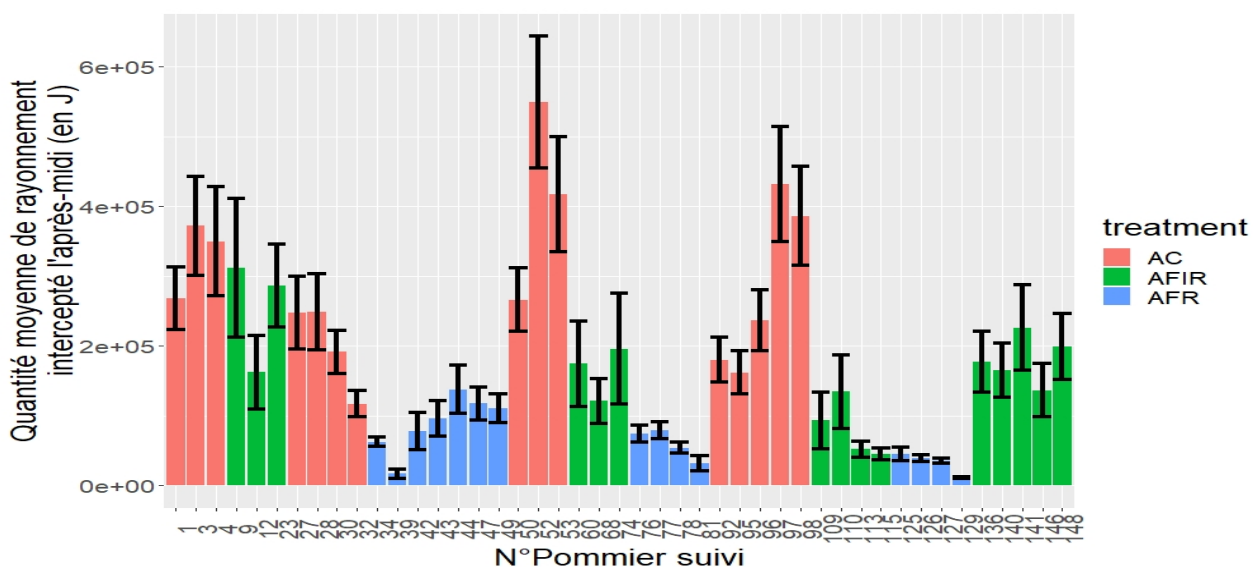


Figure 16. Quantités moyennes post-méridiennes d'énergie lumineuse interceptées par les différents pommiers suivis simulés par le modèle radiatif

Certains pommiers semblent intercepter plus de leur lumière le matin que l'après-midi pour cette scène. C'est le cas du pommier de modalité AFR n°34 (rang 2 au nord de la scène) interceptent environ 3000 à 4000J par voxel le matin, alors que l'après-midi, l'interception par voxel est inférieure à 2000J. On peut voir que pour les pommiers en AFR au sud (rang 4), cette tendance est aussi suivie.

Inversement, d'autres pommiers tel que le n°68 (rang 4, au milieu) interceptent nettement plus de lumière l'après-midi (environ 4000J par voxel) que le matin (environ 1000J par voxel).

Scène 2 (Figures 13 et Annexe I.2 et 3)

On remarque que les pommiers suivis en AFR (rang du milieu, de droite à gauche : n°125,126, 127 et 129) reçoivent globalement moins d'énergie que les pommiers suivis en inter-rang (AFIR), avec respectivement environ 2000J par voxel quotidien pour les AFR et 3000 à 7000J par voxel pour les AFIR. Le pommier n°129 qui semble être le plus ombragé (avec moins de 1000J par voxel intercepté). On peut aussi noter une différence importante d'ombrage entre le matin et l'après-midi, les pommiers semblent plus ombragés l'après-midi que le matin (notamment pour les pommiers 126, 127 et 129).

Les pommier AFIR les plus au nord (de droite à gauche : n°109,110, 113 et 115) reçoivent globalement moins de rayonnement que ceux au sud de la scène. Ils sont assez hétérogènes au niveau de leur développement avec les pommiers n°109 et 115 qui sont les plus petits que ceux du milieu : les n°110 et 113 (ces derniers ayant donc une surface d'interception potentielle plus importante).

Le pommier n°115 (à gauche) semble subir un ombrage assez important tout au long de la journée, alors que le n°113 assez proche a tendance à intercepter la part la plus importante de lumière le matin, et être ombragé l'après-midi.

Les pommiers AFIR au sud (de droite à gauche : n°136, 140, 141, 146 et 148) interceptent de manière globale journalière plus de lumière que les autres de la scène, notamment dû à leur interception importante l'après-midi contrairement aux autres pommiers de la scène qui globalement, ont tendance à recevoir une part moindre l'après-midi.

2. Quantité d'énergie lumineuse interceptée par pommier

Sur ce graphique (figure 14), on peut observer la quantité d'énergie lumineuse interceptée moyenne par jour (en Joules) simulée par le modèle radiatif pour chaque pommier pour la période du 30 juillet au 23 septembre 2018. On remarque qu'elle varie fortement au sein de chaque modalité.

Pour les pommiers « témoins agricoles » (AC), l'interception moyenne va de 250 000J/jour pour le pommier n°32 à 880 000 J/jour pour le pommier n°52.

Pour les pommiers en inter-rang (AFIR), le pommier interceptant le moins d'énergie lumineuse est le n°115 avec 63 650J/jour interceptés et le plus est le n°9 avec 544 000 J/jour.

Pour les pommiers dans le rang (AFR), les interceptions sont les plus faibles et s'étendent de 36 784J/jour pour le pommier n°129 à 208 204J/jour pour le n° 34.

L'écart-type représente la variation inter-journalière d'énergie interceptée par pommier. Le PAD par pommier et noyer étant stable dans le modèle, cette variation est due à la variation de la quantité incidente et de la trajectoire des rayons qui varient quotidiennement.

On remarque que les modalités définies lors de la mise en place du dispositif expérimental censées rendre compte d'un gradient de compétition lumineux est discutable. En effet, beaucoup de pommiers de la modalité AFIR (censés être plus ombragés que les pommiers de la modalité AC) interceptent plus de rayonnement que les pommiers AC interceptant le moins de lumière. Par exemple, les pommiers n°9, 23 et 141 (AFIR) interceptent quotidiennement plus que les pommiers AC n°32, 92 et 95.

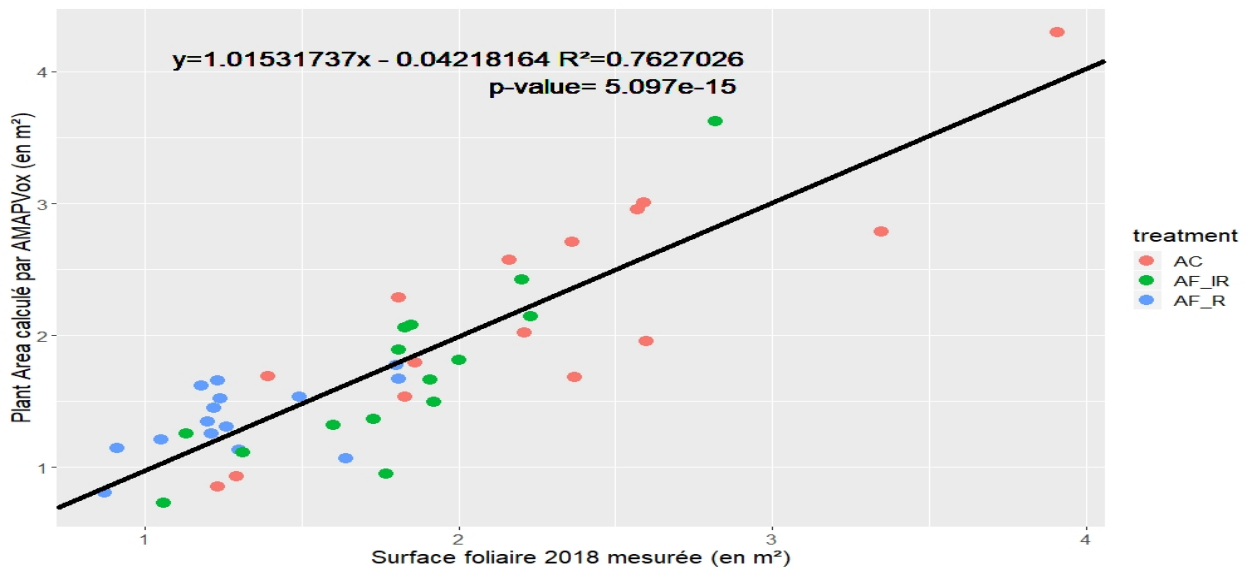


Figure 17. Plant Area simulé en fonction de la surface foliaire mesurée

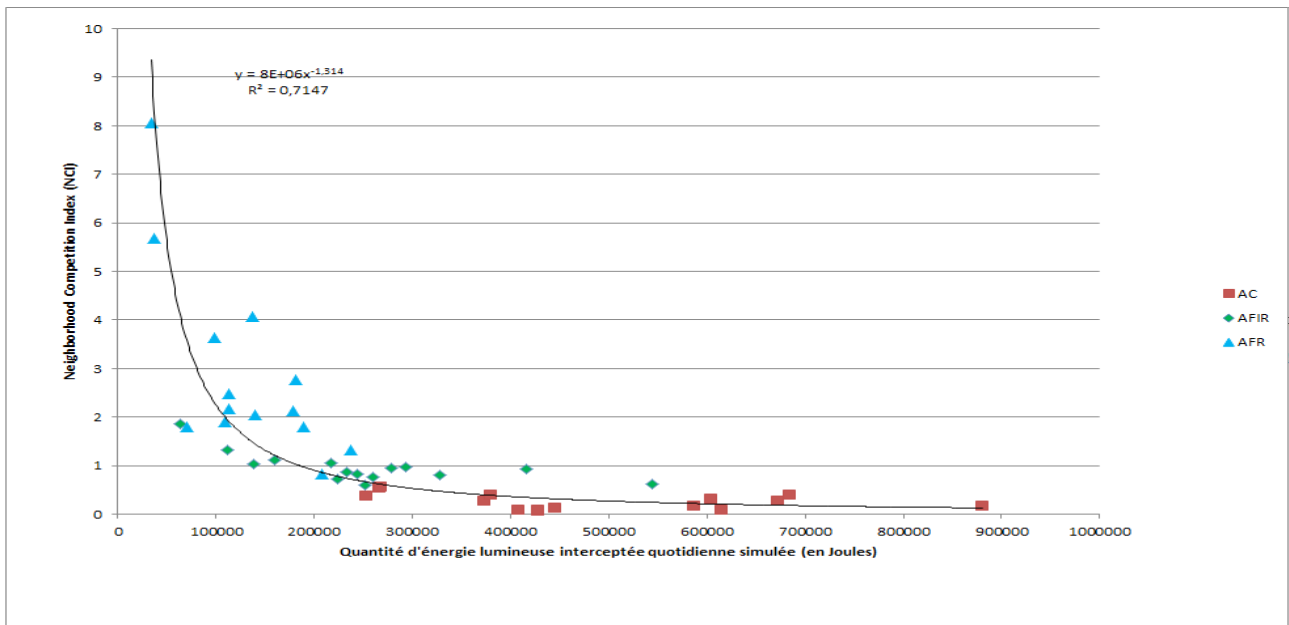


Figure 18. Neighborhood Competition Index (NCI) en fonction de la quantité d'énergie lumineuse moyenne quotidienne paour chaque pommier suivi

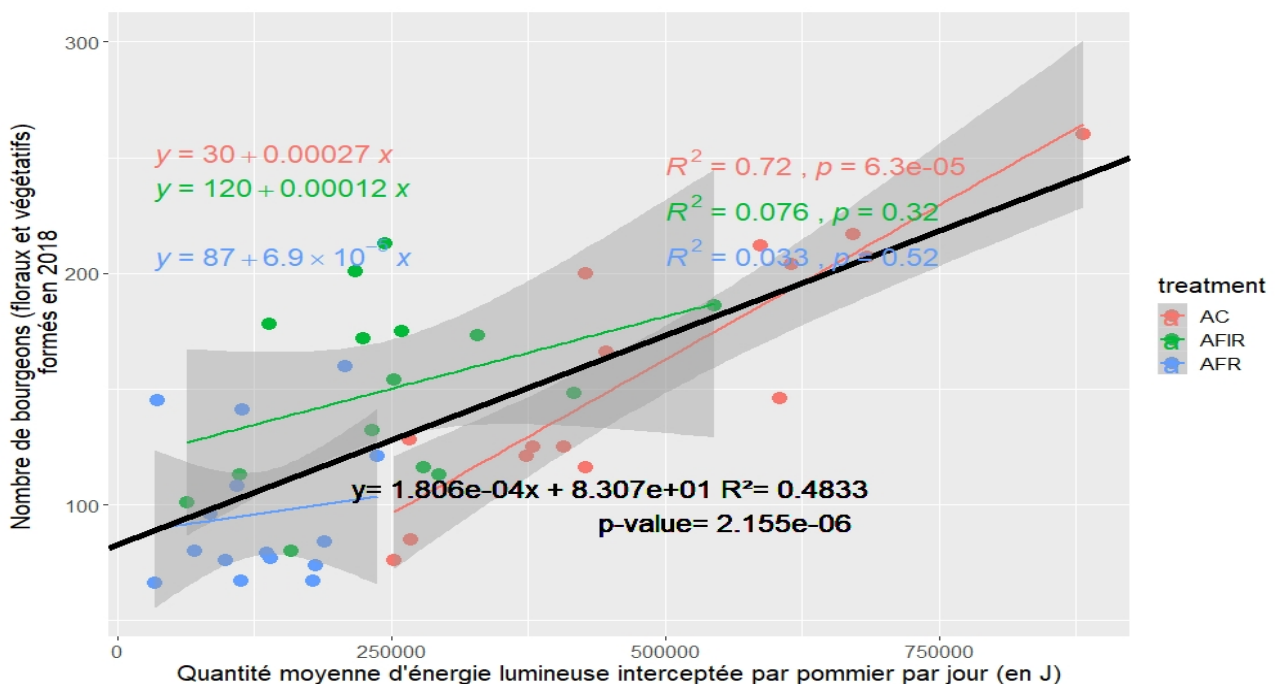


Figure 19. Nombre de bourgeons (floraux et végétatifs) préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée

3. Exploration des pistes de biais du bilan radiatif pour l'estimation de la compétition lumineuse

La surface de plante (surface foliaire et de bois) simulée (cm²) a été corrélée avec la surface foliaire obtenue par allométrie en 2018 afin de voir l'influence de la voxelisation (à une résolution donnée : 0,2m) de la scène durant laquelle le PAD (Plant Area) est simulé et de l'isolement des sous-espaces correspondants aux pommiers.

On peut remarquer sur la figure 17 que la valeur simulée de surface de plante et mesurée de surface foliaire sont très bien corrélées (p-value= $5,097 \cdot 10^{-15}$). De plus, le coefficient de la droite est de 1,01 et l'ordonnée à l'origine est faible (-0,04).

On aurait pu s'attendre à une ordonnées à l'origine positive, étant donné que la surface simulée contient du la partie de bois du pommier, et qu'en l'absence de feuilles, il reste la partie ligneuse.

Le coefficient de la droite, très proche de 1, nous indique cependant une très bonne estimation de la surface d'interception pour le bilan radiatif, mais on aurait pu s'attendre à une surestimation plus importante du fait de l'absence de discrétisation des surfaces foliaires et ligneuses.

La comparaison avec le Neighborhood Competition Index (NCI), jusqu'alors utilisé pour estimer la compétition, a été réalisée (Figure 18) afin de voir s'il existait des différences notables sur certains pommiers suivis qui pourraient expliquer une mauvaise prise en compte de la compétition par une des deux méthodes. La corrélation entre la moyenne d'interception journalière et le NCI est fortement significative, et ne présente qu'assez peu de différences, si ce n'est que les pommiers avec un faible NCI varient relativement plus en quantité d'énergie interceptée (du fait de la relation puissance).

B. Influence du climat lumineux de l'été 2018 sur le développement des pommiers 2018 et 2019

1. Préformation des bourgeons en été 2018 (période de simulation du bilan radiatif)

a. Préformation des bourgeons floraux et végétatifs

La corrélation entre le nombre de bourgeons floraux plus végétatifs et la quantité de lumière interceptée quotidiennement (Figure 19) est significative (p-value= $2,155 \cdot 10^{-6}$) avec un $R^2=0,4833$.

Cette relation de corrélation est significative au sein des modalités AFR et AC, mais pas AFIR qui présente de gros écarts entre nombre de bourgeons formés pour des quantités d'énergie interceptées similaires.

Cette corrélation reste significative le matin et l'après-midi au sein de la modalité AC, mais pas pour les deux autres. (Annexe II et III)

Le R^2 au sein de la modalité AC est très bon ($R^2=0,78$) pour la relation avec la quantité d'interception matinale, et meilleur que pour la quantité quotidienne et post-méridienne.

On observe aussi une inversion de courbe au sein de la modalité AFR entre le matin et l'après-midi, c'est à dire que pour une quantité plus importante d'énergie interceptée le matin le nombre de bourgeons floraux et végétatifs formés va augmenter, alors que c'est l'inverse pour l'après-midi.

b. Initiation florale (préformation des bourgeons floraux)

On peut voir une corrélation significative (p-value= $6,067 \cdot 10^{-12}$) entre la quantité d'énergie interceptée quotidienne et le nombre de bourgeons floraux initiés lors de la fin de l'été 2018, avec un coefficient de détermination $R^2=0,7017$ (Figure 20)

La corrélation est aussi significative au sein des modalités pour les pommiers AC et AFIR (respectivement p-value= $1,1 \cdot 10^{-5}$ et 0,013).

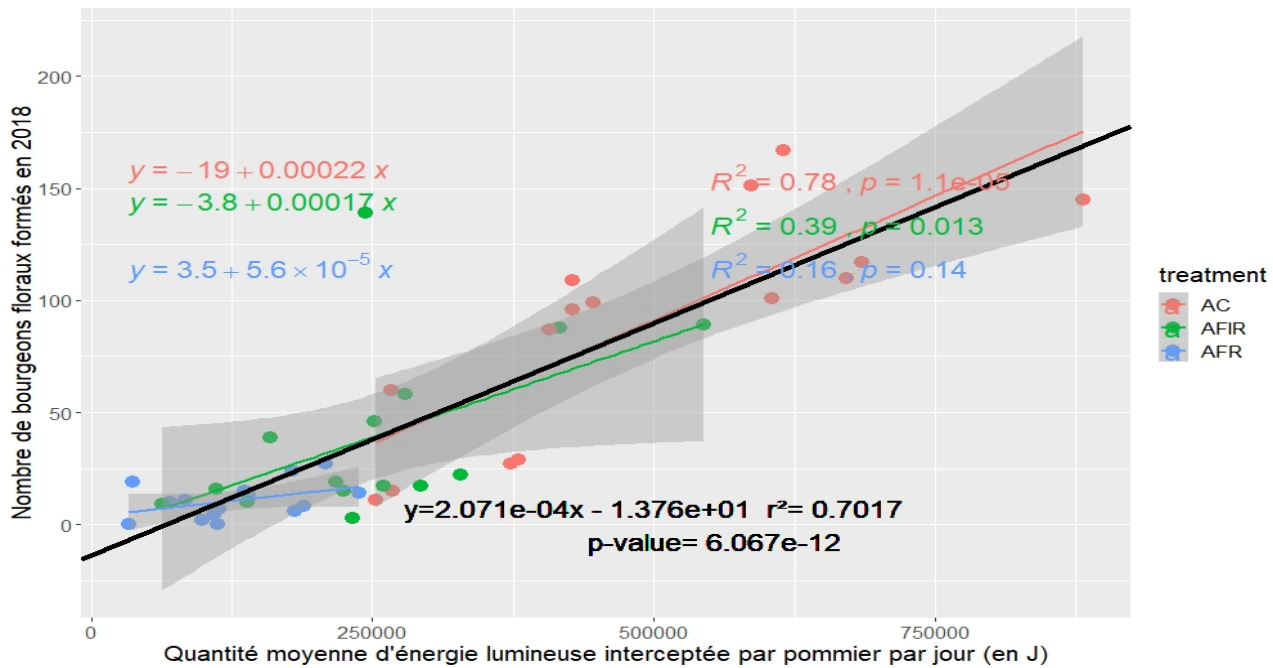


Figure 20. Nombre de bourgeons floraux préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidiennement par pommier simulé

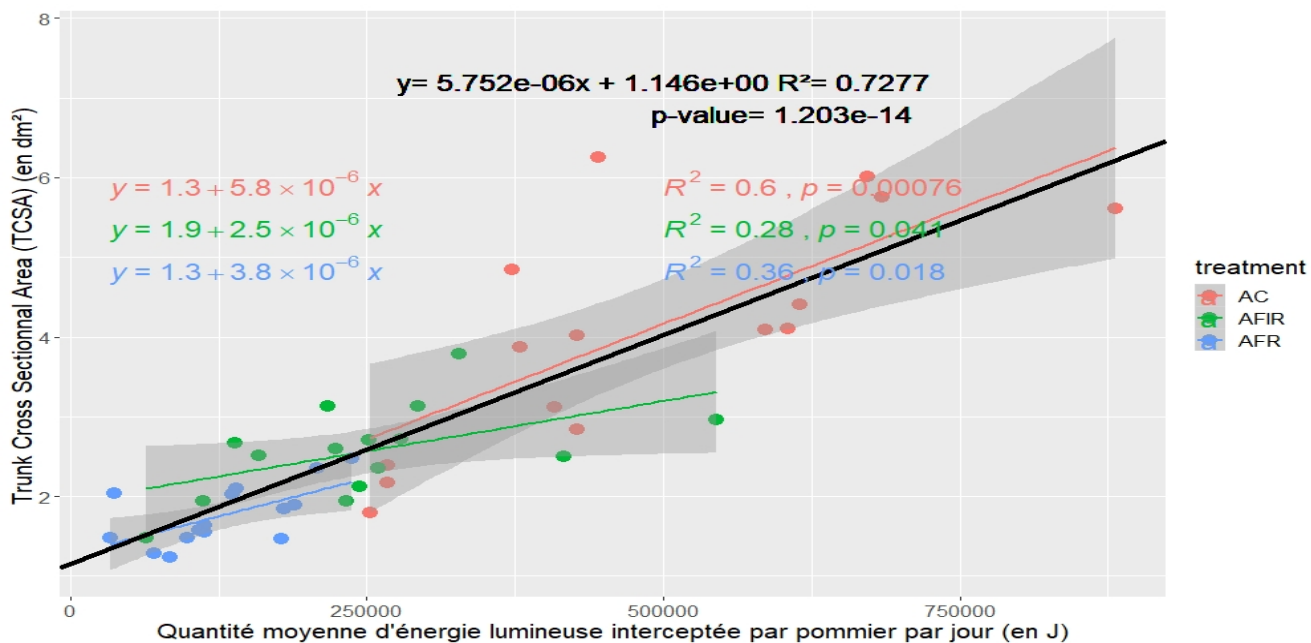


Figure 21. Trunk Cross Sectional Area 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse quotidiennement par pommier simulé

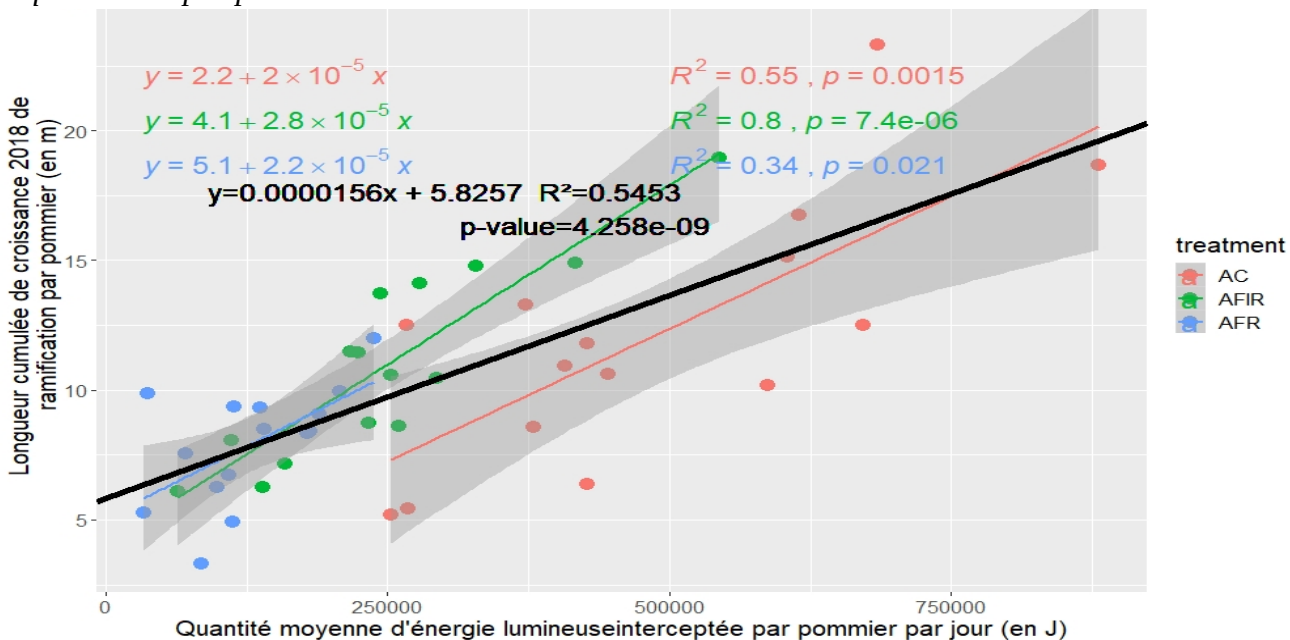


Figure 22. Longueur de croissance cumulée en 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidiennement par pommier simulé

Dans la modalité AFIR, un point semble aberrant : le pommier n°12 initie 139 bourgeons floraux, ce qui est largement au dessus des 50 bourgeons environs initiés par les pommiers interceptant la même quantité moyenne de lumière.

Les 3 pommiers AC ayant la plus importante quantité d'énergie interceptée ont toujours leur nombre de bourgeons floraux en dessous de la courbe de corrélation.

La corrélation est significative pour le traitement AFR corrélée avec la quantité moyenne interceptée le matin (p-value=0,007), alors qu'elle ne l'est plus du tout avec la quantité interceptée l'après-midi (p-value=0,98). (Annexe II et III)

2. Croissance du pommier en 2018

a. Trunk Cross Sectional Area (TSCA)

La mesure de Trunk Cross Section Area est bien corrélée avec la moyenne journalière d'énergie interceptée, avec une p-value de $1,203 \cdot 10^{-14}$ et un bon coefficient de détermination $R^2=0,7277$. (Figure 21)

Les corrélations entre la quantité moyenne matinale ou post-méridienne et le TSCA ne semblent pas être plus fortes (p-value et R^2 inférieures) que la corrélation avec des données journalières. (Annexe II et III)

On observe que les droites pour les modalités AFR et AFIR ont des coefficients directeurs dont les valeurs sont proches ($2,5 \cdot 10^{-6}$ et $3,8 \cdot 10^{-6}$ pour la valeur journalière, $3,5 \cdot 10^{-6}$ et $4,1 \cdot 10^{-6}$ pour la valeur post-méridienne), qui se distingue de celui de la modalité AC toujours supérieur (respectivement $5,8 \cdot 10^{-6}$ et $8,4 \cdot 10^{-6}$), et ce quelque soit le moment de la journée.

b. Longueur de ramification de 2018

De manière globale, la longueur de ramification est bien corrélée avec la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidiennement (p-value= $4,258 \cdot 10^{-9}$) (Figure 22). On observe cependant une absence de corrélation au sein de la modalité AFR l'après-midi (p-value= 0,35) et une meilleure corrélation pour les 3 modalités le matin que l'après-midi (Annexe II et III).

La croissance primaire des pommiers AFR est comprise entre 2,5m et 12,5m (avec une majorité comprise entre 5 et 10m); celle des pommiers AFIR va de 6 à 18m (avec une majorité comprise entre 7,5 et 15m) et celle des pommiers AC s'étend de 5 à 25m (avec des valeurs plus dispersées au sein de la modalité).

De plus, le coefficient directeur de la régression pour la modalité AFIR est, quelque soit le moment de la journée, toujours plus grand que celui de la modalité AC (et AFR, qui a de manière générale le coefficient le plus faible). Donc pour une même quantité d'énergie interceptée, les pommiers AFIR utilisent plus cette énergie pour la croissance primaire (allongement des rameaux) par rapport aux témoins AC.

3. Flux de sève de l'été 2018

La densité de flux de sève ($L \cdot dm^{-2} \cdot h^{-1}$) a été convertie en quantité d'eau transpirée en multipliant la densité de flux par le TCSA en dm^2 et en sommant par pas de temps égaux ces flux sur une journée (Figure 23, Annexe II et III)

On a donc corrélée une quantité de sève moyenne par jour qui fluctue qui permet d'approcher la quantité transpirée par le pommier.

4. Phénologie de 2019

Un odd ratio > 1 signifie qu'il y existe une avance phénologique entre la modalité testée par rapport à la témoin. Sur notre figure 24, le témoin est cité en second dans le nom de la paire (ie. dans le couple « AFIR_AC », AFIR est la modalité testée et AC le témoin). A l'inverse, un odd ratio < 1 signifie qu'il existe un retard phénologique entre modalité testée et témoin.

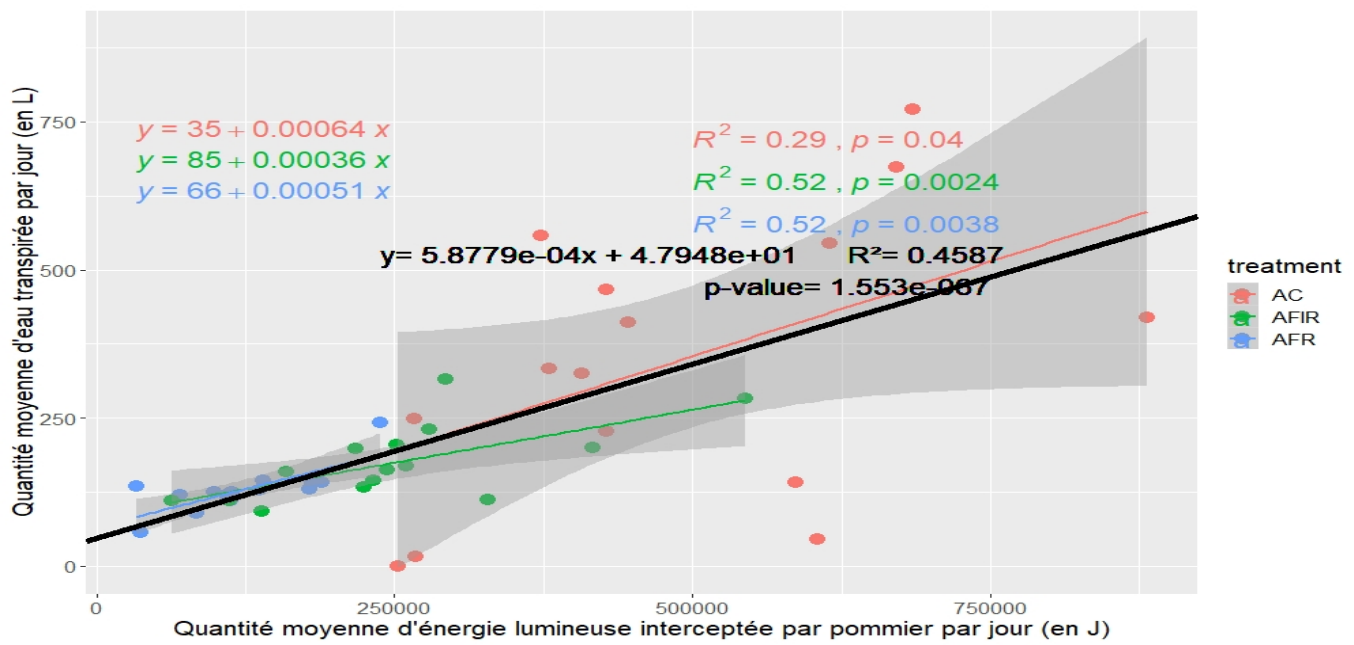


Figure 23. Quantité d'eau transpirée en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée quotidienne par pommier simulée (sur la période simulée)

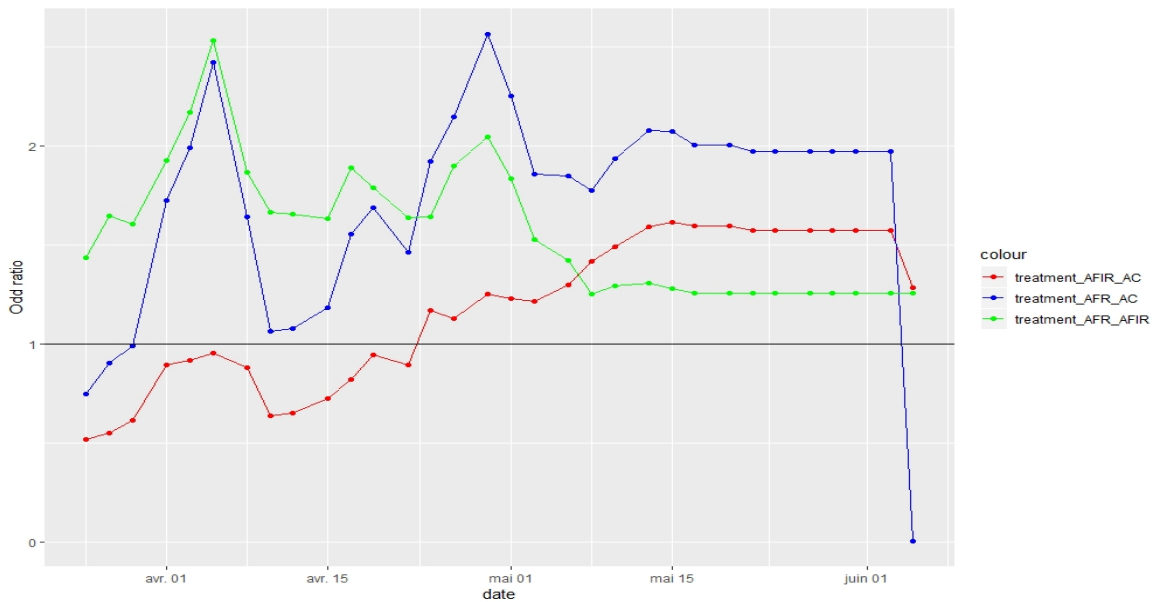


Figure 24. Comparaison date à date de relevés des avances/retards de stades phénologiques en 2019 en fonction des 3 modalités

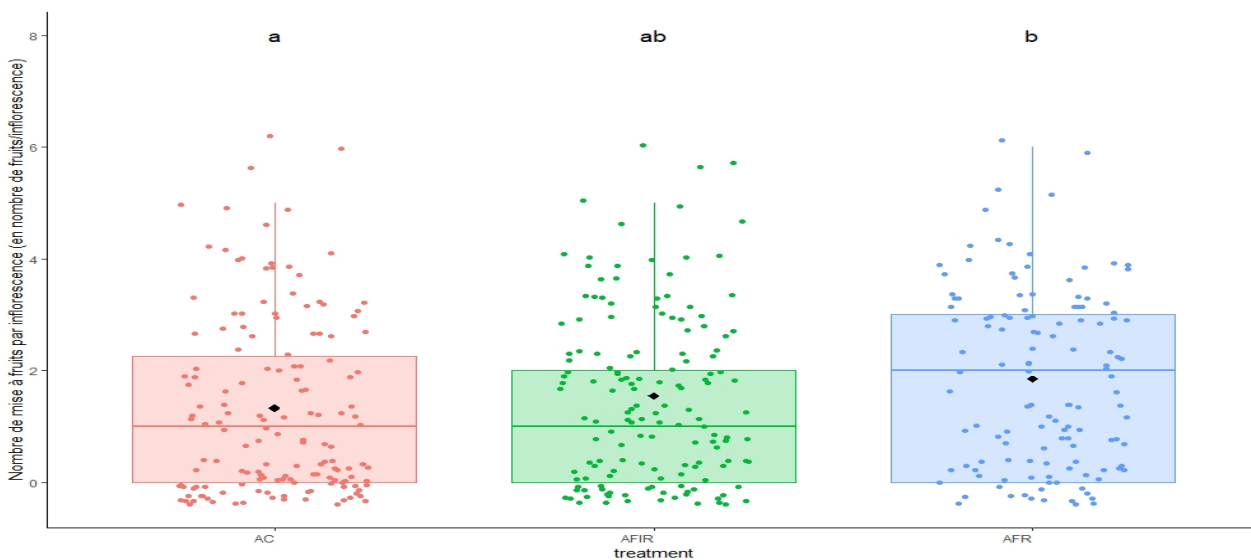


Figure 25. Nombre de mises à fruits pour les inflorescences suivies par modalité en 2019

Au début de la période de mesure (ie. Au moment du débourrement des pommiers, fin mars 2019), les pommiers AFIR par rapport aux AC sont en retard (odd ratio=0.5). A partir du 24 avril, le retard des pommiers AFIR par rapport à AC est rattrapé, et jusqu'à la fin de la période de mesure, l'avance d'AFIR sur les stades phénologiques des pommiers AC sera conservée.

Les bourgeons AFR commencent avec un retard par rapport à la modalité AC, avec un odd ratio de 0,8 du début de la période de mesure ; jusqu'à rattraper la modalité AC au bout de la 4^e journée de relevé, le 1er avril 2019, où l'odd ratio devient supérieur à 1, et donc les bourgeons AFR sont en avance par rapport aux bourgeons AC.

Les bourgeons AFR sont quant à eux en avance par rapport à la modalité AFIR avec un odd ratio toujours supérieur à 1, sur la totalité de la période de relevé de la phénologie.

On peut noter une baisse importante des courbes entre le 7 et 10 avril, durant laquelle l'avance prise par AFR sur AFIR et AC sont réduites, et le retard d'AFIR sur AC ré-augmente. On peut aussi remarquer durant la période du 12 avril au 29 avril, une forte augmentation de 2 courbes : l'odd ratio AFIR_AC passant de 0,65 à 1,25 ; l'odd ratio AFR_AC passant de 1,08 à 2,56 (Figure 24).

A partir du 15 mai 2019, les courbes se stabilisent, les pommiers ne changeant plus de stade phénologique une fois le stade J de remplissage des fruits atteint.

D'après la figure 25, le nombre d'inflorescences ont noué pour la modalité AFR que pour les deux autres modalités, la mise à fruits a donc été plus importante. Un nombre important d'inflorescences des pommiers AC et AFIR n'ont pas noué contrairement à la modalité AFR, qui a fait moins d'inflorescences mais qui ont plus nouées.

Le nombre de chutes physiologiques est aussi significativement différent entre la modalité AFR et les deux autres modalités. (Figure 26).

Ces retards et avances phénologiques ne sont cependant pas toujours significatifs.

IV. Discussion

A. Limites et pistes d'améliorations du modèle radiatif

1. Estimation du PAD et LAD (Leaf Area Density)

Nous obtenons une très bonne corrélation entre notre Plant Area simulé et la surface foliaire 2018 obtenue par relation allométrique, avec une ordonnée à l'origine très faible (-0,04) et un coefficient directeur très proche de 1 (1,01). Cela permet donc de dire que la surface d'interception semble être très bien simulée par AMAPVox, et ne sera pas une source de biais dans les calculs d'interception lumineuse par le bilan radiatif.

On peut voir un écart important de PAD entre les individus (allant de 90m².m⁻³ à 547m².m⁻³) qui traduit notamment du retard de croissance accumulé depuis la plantation des pommiers. La surestimation attendue du Plant Area (prenant en compte la partie de bois du pommier) ne semble pas avoir eu lieu a priori.

Cependant, l'ordonnée à l'origine négative n'est elle aussi pas logique. Cela signifierait que pour une surface foliaire mesurée nulle, le plant area simulé serait négatif, or ce dernier inclut le bois du pommier, donc pour une surface foliaire nulle il devrait rester la portion de bois des pommiers qui ne peut être négative. On s'efforce donc à penser que cette bonne simulation relève plus d'un effet mathématique de compensation entre l'effet de la discrétisation du PAD en partie foliaire (Leaf Area Density : LAD) et ligneuse (Wood Area Density : WAD), de la résolution de voxelisation et de la méthode d'isolement des pommiers.

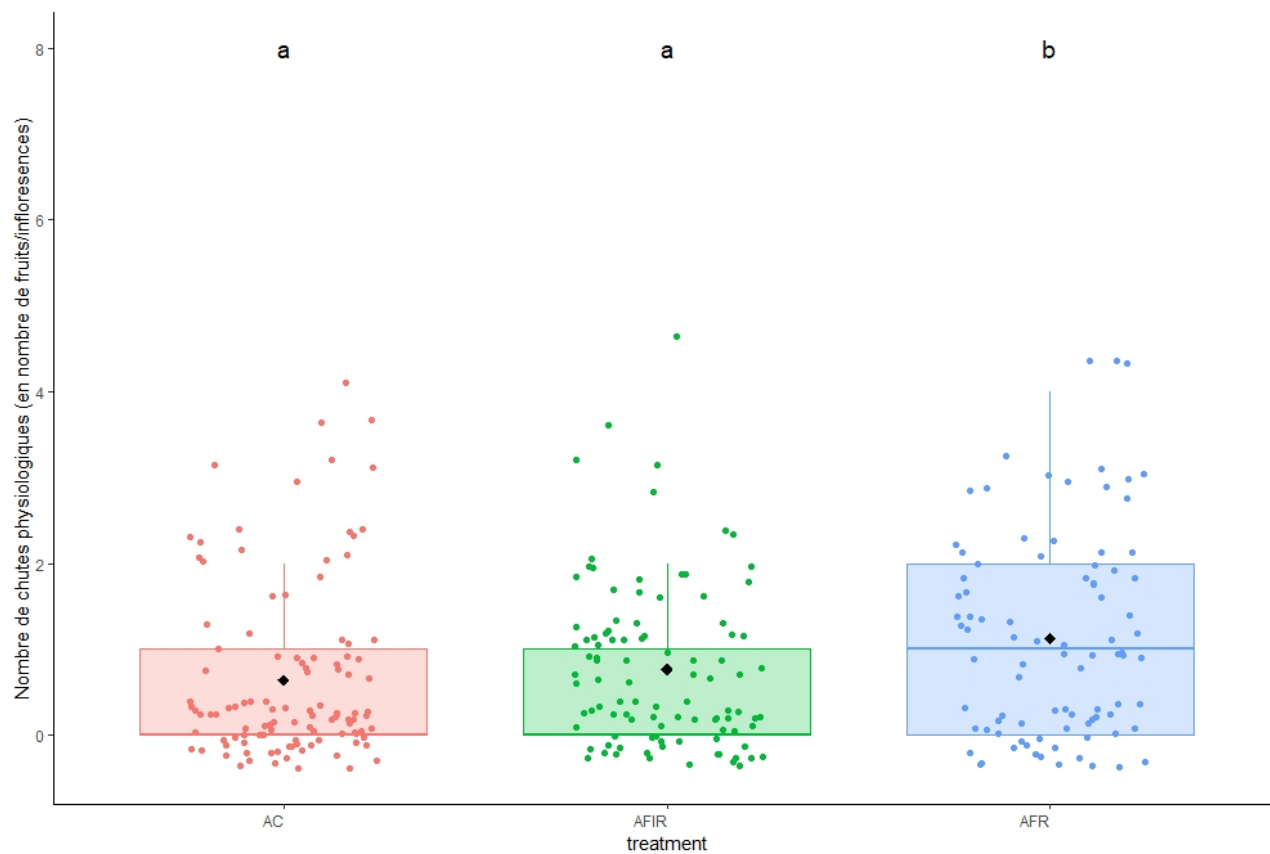


Figure 26. Nombre de chutes physiologiques pour les inflorescences suivies par modalité en 2019

sous-estimation du PAD qui vient compenser l'absence de discrétisation du PAD en Leaf Area Density (LAD) et Wood Area Density (WAD).

a. Discrétisation entre le Leaf Area Density et le Wood Area Density

La discrétisation du Plant Area Density, utilisé dans le calcul d'interception de la lumière dans notre bilan radiatif, en ses deux composantes LAD et WAD est une étape possible, qui permettrait d'estimer uniquement la surface foliaire interceptant le rayonnement.

b. Influence de la résolution de la voxelisation sur l'estimation du PAD

De manière générale, plus la taille des voxels est petite, plus l'estimation du PAD sera juste. A contrario, plus les voxels sont gros, plus ils intégreront de vide et donc estimeront plus approximativement (en sous-estimant) le PAD.

Cependant cette règle générale a une limite pour des taille de voxels de très petite taille. En effet, plus les voxels sont petits plus la valeur du PAD aura tendance à être binarisée (les voxels étant soit « plein », soit « vide » avec une valeur de PAD se rapprochant souvent du PADmax fixé ou de 0). (Delor, 2017)

Nous n'avons pas eu le temps durant ce stage de comparer l'influence de différentes résolutions de voxelisation sur le calcul du PAD, afin de voir comment variait le PAD à différentes résolutions de voxels.

Deux hypothèses s'offrent donc à nous pour expliquer cette absence de surestimation du PAD:

-Soit la discrétisation entre Wood Area Density et Leaf Area Density n'a que peu d'effet chez le pommier. En effet, cela peut s'expliquer par le fait que la partie ligneuse est souvent entourée de feuilles et la partie du tronc au dessous des premières branches n'a pas été intégrées aux sous-ensembles de voxels des pommiers suivis (lors de l'isolement des sous-espaces de pommiers) ou que ces parties aient été plafonnées à un PADmax.

-Soit la voxelisation à une haute résolution ($0,2m^3$) a sous-estimé le PAD et cette sous-estimation a compensé la sur-estimation attendue.

2. Amélioration de la discrétisation des positions des différents pommiers suivis

L'algorithme codé et utilisé durant ce stage pour isoler des sous-ensembles de voxels correspondant à chaque pommier pourrait être amélioré. En effet, l'attribution par la distance la plus courte au tronc des voxels de la partie des couronnes s'intercroisant peut être source de biais, les pommiers très développés ayant une tendance à l'héliotropisme pouvant notamment surestimer la couronne d'un voisin peu développé.

La sélection manuelle des voxels au sein d'une projection graphique en 3D correspondant à chaque arbre pourrait être plus juste, mais plus long.

Les fils constituant le palissage des pommiers peuvent aussi être source de biais, même si sur les représentation graphiques 3D, ils ne semblent pas surestimer le PAD.

La superposition de maquette numériques de terrain (MNT) pourraient permettre un ajustement des surfaces foliaires individuelles.

3. Validation par mesure de la quantité de lumière interceptée par pommier et analyse de sensibilité des paramètres

Comme tout modèle, une étape de validation est nécessaire afin, dans un premier temps, d'estimer la qualité du modèle et dans un second temps d'identifier les pistes de biais, qui pourrait mener à une l'identification de pistes d'amélioration du modèle radiatif. Cette validation nécessiterait la mise en place de capteurs à différents niveaux.

Une analyse de sensibilité des paramètres pourrait aussi être effectuée, afin d'estimer l'influence des paramètres (nombre de rayons, de directions, de coefficient d'atténuation du rayonnement, de la taille de voxels etc...) sur les sorties du modèle du et leur gamme de validité.

4. Corrélation entre le NCI et le bilan radiatif

Le NCI et les sorties moyennées du modèle radiatif sont bien corrélées.

Les pommiers en AFR ont cependant presque tous leur NCI sur-estimé par rapport à la régression. Cela peut s'expliquer par le fait que les noyers sont plus proches voir plus nombreux dans un rayon de 15m que pour les autres modalités, et donc augmente l'indice de compétition calculé par rapport à la quantité de lumière intercepté, qui ne prend pas cette distance en compte.

Cette corrélation entre méthodes de quantification de la compétition permet aussi de comparer les résultats entre les corrélations faites avec le NCI les années précédentes.

B. Influence du système agroforestier sur le développement des pommiers

Il ressort des résultats une hétérogénéité importante entre individus au niveau du développement déjà mis en place par les pommiers et de leur capacité d'interception lumineuse (fonction du développement : PAD et du climat radiatif).

1. Préformation des bourgeons en 2018

La quantité moyenne de bourgeons préformés lors de l'été 2018 est corrélée de manière positive et significative avec la quantité de lumière interceptée simulée sur la période de formation des bourgeons.

Le climat lumineux d'un été donné (comme c'est le cas pour nos valeurs simulées) n'est pas le seul facteur explicatif de l'initiation florale.

L'éclaircissage des fruits (des années précédentes) a un effet de stimulation de la formation de bourgeons floraux (Tromp, 2000), et a certainement favorisé cette formation pour les pommiers ayant reçu assez d'énergie lumineuse. En effet, la présence de fruits, du fait des gibbérellines contenues dans les pépins du pommier, inhibent l'initiation florale au moment de l'été. Une importante charge de fruit l'année n a donc souvent des conséquences sur la production de l'année n+1.

De plus, l'accumulation du retard de développement des pommiers peu développés par rapport aux pommiers bien développés joue aussi certainement un rôle dans l'initiation florale. En effet, lors de ces premières années de développement, les pommiers ont tendance à favoriser leur croissance végétative.

La capacité d'interception de ressource lumineuse des pommiers en forte compétition étant assez faible, il est possible d'expliquer la très faible voire l'absence d'initiation florale par une quantité insuffisante de ressources à allouer à l'initiation florale.

2. Croissance des pommiers en 2018

Le modèle radiatif intégrant la quantité de plante d'un pommier via la variable du PAD (une fois ce dernier isolé) pour effectuer le calcul d'interception, on peut se demander s'il n'y pas d'abord un effet d'auto-corrélation entre le PAD simulé (permettant le calcul d'interception) par arbre et la longueur de ramification et le TCSA.

La croissance secondaire des pommiers se faisant principalement d'avril à fin juin, il aurait été intéressant d'avoir des données LIDAR-T avant ou pendant le débourrement des noyers afin de pouvoir lancer une simulation radiative sur cette période afin de corrélérer ces valeurs avec la longueur de ramification qui méthodologiquement serait plus juste.

De manière globale, on voit que les pommiers les plus ombragés ont accumulé un retard de croissance non négligeable que l'on voit bien au niveau de la mesure de TCSA qui est un bon indice de la vigueur générale allant de 1dm² à 6dm².

3. Flux de sève de l'été 2018

La corrélation énergie lumineuse interceptée et quantité transpirée n'est pas significative et ne permet pas de prédire la quantité transpirée par pommier.

Dynamiquement, la transpiration des pommiers peut avoir lieu en fin de nuit avant que le soleil se lève, donc en l'absence de rayonnement. Le rayonnement ne peut donc pas être le seul facteur de cause directe de la transpiration.

D'autres causes peuvent expliquer des valeurs aberrantes ou pouvant créer des écarts entre mesures :

- les valeurs de flux de sèves utilisées contiennent beaucoup de valeurs non renseignées, dues à une calibration impossible, à des sondes endommagées sur le terrain ou encore à une batterie déchargée.

- les pommiers n°92 et 95 ayant les plus faibles valeurs de quantité transpirées (proches de 0) ont par exemple peut être été endommagées et contiennent un nombre important de valeurs non renseignées.

Une analyse avec une étape de tri de ces données pourrait permettre de mieux expliquer les flux de sève.

4. Phénologie de 2019

On observe une légère avance phénologique des pommiers de la modalité AC au moment du débourrement des pommiers, qui ont tendance à débourrer quelques jours avant les pommiers AFIR et AFR.

Cette avance peut être due à une accumulation de degrés-jours plus importante pour les pommiers AC que pour les AFIR et AFR.

Le retard/l'avance phénologique d'une modalité à l'autre qui peut s'accumuler, de manière biaisée, au cours de la saison est dû à deux phénomènes identifiés :

- certaines inflorescences suivies ne nouent pas et restent donc au stade H après la période de pollinisation (dû au taux de fructification). Le taux de fructification différentiel entre modalité « confortable » donc cet écart

- l'extinction ou la casse de certains bourgeons, dont la notation du stade est donc figé au dernier stade marqué

Afin d'éviter, cet écart dû au taux de fructification, il doit être possible de ne pas prendre en compte ces bourgeons dans l'analyse statistique. Cependant, la régression utilisée a besoin d'au moins 3 valeurs à comparer. Or après la nouaison, il ne reste que des inflorescences à deux stades distinct I ou J, ce qui n'est pas suffisant.

L'effet d'avance conservée est donc plus due au défaut de nouaison des pommiers AC et AFIR par rapport à AFR.

Pour la différence des taux de fructification, un des facteurs limitant a peut être été la pollinisation par l'apport exogène de branches pollinisatrices qui a pu profiter à certains pommiers plus qu'à d'autres, du fait notamment de la période de pollinisation efficace qui est de courte durée : de 2 à 9 jours selon les cultivars (Ramirez et Davenport, 2013)

De plus, des attaques de pucerons verts et cendrés ont été observées faisant des dégâts (étudié dans le cadre d'un autre stage) qui peut expliquer un maintien de certains fruits par l'effet des pucerons, dont la sécrétion de miellat inhibe la chute physiologique (discussion personnelle avec B. Pitchers).

C. Perspectives de recherches futures

1. Utilisation du modèle pour quantifier un stress radiatif

L'extraction de valeurs ponctuelles maximum (dans le temps et dans l'espace) d'irradiance (en Watt) ou d'irradiance ramenée au Plant Area (W/m^2) pourraient permettre de quantifier un potentiel stress photo-oxydatif sur feuille et un impact potentiel sur les fruits.

Cette étape n'a pas eu lieu d'être dans notre étude, les fruits étant éclaircis afin de favoriser le développement végétatif des pommiers dans leurs premières années de croissance. Des études ont montré que le seuil d'environ 800 W/m² l'après-midi était dépassé, la température de surface des fruits augmentait en conséquence et des dégâts de sunburn étaient observés (Schrader *et al*, 2003)

2. Allélopathie du noyer

Les pommiers AC du bloc 2 n°92 et 96 ont été plantés à l'endroit où se trouvaient d'anciens noyers. Ces derniers comparés à leurs voisins directs semblent avoir accumulé un retard de croissance. D'après la littérature, le pommier est sensible au pouvoir allélopathique du noyer (Joy and Hudelson, 2010), notamment du fait de la molécule sécrétée par ce dernier, la juglone. La concentration de cette dernière décroît de manière importante en fonction de la distance au noyer : de moitié à 2m, de 2/3 à 3m (Jose *et al*, 1998). Une des hypothèses est que du fait de la rémanence de la juglone dans le sol à ces endroits très locaux, les pommiers aient eu du mal à se développer aux dépens de ses voisins.

Aucune étude n'a été trouvée sur l'allélopathie de noyers hybrides, mais concerne le noyer noir (*Juglans nigra*), d'où l'intérêt d'étudier cette allélopathie.

Cette allélopathie des noyers n'est pas un facteur étudié sur le dispositif GAFAM, qui potentiellement est une interaction négative vis à vis des pommiers. Les noyers n'auraient pas qu'un effet d'ombrage, mais aussi un effet allélopathique (dépendant de la forte proximité) plus ou moins important dû fait de la distance entre pommiers et noyers.

3. Complexification du modèle : ajout de module, implémentation de paramètres optionnels d'entrées

a. Ajout de module et couplage avec des modèles écophysologiques

Le bilan radiatif codé et utilisé est un simple modèle d'interception dans un milieu turbide, et ne prend pas en compte la rediffusion par les éléments constitutifs de l'environnement physique (plante, animaux, rochers, eau ...) ni par le sol. Ces phénomènes pourraient être intégrés moyennant des recalculs d'une part du rayonnement réfléchi, et de la rediffusion de ce rayonnement dans l'espace voxel.

Ce modèle pourrait aussi être couplé avec un modèle écophysologique de croissance de plante afin de pouvoir simuler sur des périodes longues le climat radiatif sans faire l'hypothèse que la canopée reste stable.

b. Implémentation de paramètres optionnels d'entrée

Le ratio rayonnement direct et rayonnement diffus est, pour l'instant ce ratio calculé par le modèle, mais si la donnée est mesurée (comme c'est le cas à Restinclières), cette part de rayonnement direct et diffus pourraient facilement être intégrée dans le fichier d'entrée contenant les données météorologiques (date, heure début, heure fin, indice de clarté) afin de prendre ces mesures non pas comme des valeurs calculées, mais comme des données d'entrées.

V. Conclusion

Le projet GAFAM permet d'apporter les premiers éléments sur le développement de jeunes pommiers dans un système agroforestier. Au bout de la 4^e année, les pommiers en conditions de compétition radiative les plus extrêmes accumulent déjà un retard de développement (longueur des axes, section de tronc, surface foliaire, hauteur...) important par rapport à des pommiers ne subissant

pas ou peu de compétition. De plus, la très faible voire l'absence d'initiation florale sur les pommiers les plus en compétition tendent à penser que le rendement futur potentiel de ces pommiers sera faible.

Durant ce stage, il a été possible de développer un modèle radiatif intégrant des données LIDAR-T acquises durant la 3^e année de croissance des pommiers afin de simuler l'interception lumineuse des pommiers lors de la période août-septembre 2018, et de rendre compte à la fois du retard de croissance accumulé depuis la plantation (différence de plant area density entre les arbres) et de son implication sur la capacité d'interception lumineuse des pommiers. Durant cette période simulée de compétition maximale, la quantité d'énergie lumineuse interceptée varie beaucoup selon la compétition subie ou non par certains pommiers, qui tend à expliquer la faible ou l'absence de production fructifère, les pommiers n'étant peut être pas encore capable d'intercepter assez d'énergie pour initier la floraison.

Le projet ALTO, dans lequel s'inscrit un stage en cours permettra d'apporter des éléments de réponse quant à la caractérisation et la pression des ravageurs, la présence d'auxiliaires de cultures et d'habitats potentiels pour ces auxiliaires de culture.

Dans la perspective d'adoption de systèmes de verger de pommier en agroforesterie en agriculture biologique, il faut que ce système soit innovant et s'inscrive dans une démarche de durabilité et de répondre aux enjeux se posant à l'agroécologie en contexte de changement climatique : régulation d'intrant, limitation du stress radiatif tout en maintenant un certain de niveau de production. Dans cette optique, il serait intéressant, une fois la mise à fruit des pommiers suffisante, de calculer un Land Equivalent Ratio (LER) afin de voir la production globale de la parcelle : strate herbacée, pommes et bois (des noyers). Une première analyse de l'impact du climat radiatif sur la qualité des fruits sera aussi étudié pour la production 2019.

Bibliographie

Agreste (http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2018_131inforapfruits-pomme.pdf)

Conklin, H.C. 1957. *Hanundo Agriculture*. FAO, Rome, Italy.

Costes, E., P. é. Lauri, and J. L. Regnard, 2010, Analyzing Fruit Tree Architecture: Implications for Tree Management and Fruit Production. *In Horticultural Reviews*. Jules Janick, ed. Pp. 1–61. Oxford, UK: John Wiley & Sons, Inc. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470767986.ch1>

Dassot, Mathieu, Thiéry Constant, and Meriem Fournier, 2011. The Use of Terrestrial LiDAR Technology in Forest Science: Application Fields, Benefits and Challenges. *Annals of Forest Science* 68(5): 959–974.

Do, F. C., S. Isarangkool Na Ayutthaya, and A. Rocheteau, 2011. Transient Thermal Dissipation Method for Xylem Sap Flow Measurement: Implementation with a Single Probe. *Tree Physiology* 31(4): 369–380.

Do, F., and A. Rocheteau, 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(9): 641–648.

Dulk, Jan Arie van, 1989. *The interpretation of remote sensing, a feasibility study*. Wageningen.

Dupraz et Liagre, 2008. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*

FAOstats (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>)

Ferree, David Curtis, and Ian J. Warrington, eds. 2003. *Apples: Botany, Production, and Uses*. Wallingford: CABI Publ.

Fleckinger, J., 1948. Les stades végétatifs des arbres fruitiers, en rapport avec les raiements. *Pomologie Française (Suppl.)*, 81–9

Fumey, Damien, 2007. *Approche Architecturale de La Réponse Du Pommier à La Taille: De l'expérimentation à l'élaboration d'un Modèle Réactif*. Université de Montpellier.

Granier, A. 1987. Evaluation of Transpiration in a Douglas-Fir Stand by Means of Sap Flow Measurements. *Tree Physiology* 3(4): 309–320.

INRA 2017, « Évaluer les services rendus par les écosystèmes agricoles pour mieux les gérer » <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/EFESE-services-ecosystemiques-rendus-par-les-ecosystemes-agricoles#>

Isarangkool Na Ayutthaya, S., F.C. Do, K. Pannengetch, et al. 2010. Transient Thermal Dissipation Method of Xylem Sap Flow Measurement: Multi-Species Calibration and Field Evaluation. *Tree Physiology* 30(1): 139–148.

Jose, S, A R Gillespie, and S G Pallardy, 2004. Interspecific Interactions in Temperate Agroforestry: 19.

Jose, Shibu 2002. Black Walnut Allelopathy: Current State of the Science. *In Chemical Ecology of Plants: Allelopathy in Aquatic and Terrestrial Ecosystems*. Azim U. Mallik and Inderjit, eds. Pp. 149–172. Basel: Birkhäuser Basel. http://link.springer.com/10.1007/978-3-0348-8109-8_10.

Jose, Shibu, 2009. Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview. *Agroforestry Systems* 76(1): 1–10.

Jose, Shibu, and Andrew R Gillespie, 19998a. Allelopathy in Black Walnut (*Juglans Nigra* L.) Alley Cropping. I. Spatio-Temporal Variation in Soil Juglone in a Black Walnut–corn (*Zea Mays* L.) Alley Cropping System in the Midwestern USA: 7.

Shibu Jose. 1998B Allelopathy in Black Walnut (*Juglans Nigra* L.) Alley Cropping. II. Effects of Juglone on Hydroponically Grown Corn (*Zea Mays* L.) and Soybean (*Glycine Max* L. Merr.) Growth and Physiology: 7.

Joy and Hudelson (2010), Black Walnut toxicity. University of Wisconsin-Madison <https://hort.extension.wisc.edu/articles/black-walnut-toxicity/> (consulté le 10/06/2019)

Kami, Chitose, Séverine Lorrain, Patricia Hornitschek, and Christian Fankhauser, 2010. Light-Regulated Plant Growth and Development. *In Current Topics in Developmental Biology* Pp. 29–66. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0070215310910028>

Lauri, Pierre-Éric, Delphine Mézière, Lydie Dufour, et al. 2016. FRUIT-TREES IN AGROFORESTRY SYSTEMS - REVIEW AND PROSPECTS FOR THE TEMPERATE AND MEDITERRANEAN ZONES(33): 4.

Lauri, Pierre-Éric, and Sylvaine Simon, 2019 Advances and Challenges in Sustainable Apple Cultivation: 28.

Lovell, Sarah Taylor, Christian Dupraz, Michael Gold, et al. 2018 Temperate Agroforestry Research: Considering Multifunctional Woody Polycultures and the Design of Long-Term Field Trials. *Agroforestry Systems* 92(5): 1397–1415.

Miller, S S 2015 Shade Effects on Growth, Flowering and Fruit of Apple: 5.

Monsi, M., Saeki, T., 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.* 14, 22–52.

Morandi, Brunella, Marco Zibordi, Pasquale Losciale, et al. 2011. Shading Decreases the Growth Rate of Young Apple Fruit by Reducing Their Phloem Import. *Scientia Horticulturae* 127(3): 347–352.

Mupambi, Giverson, Brendon M. Anthony, Desmond R. Layne, et al. 2018. The Influence of Protective Netting on Tree Physiology and Fruit Quality of Apple: A Review. *Scientia Horticulturae* 236: 60–72.

Nair, P. K. 1993 *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ.

Örn, Samuel, 2006 Estimating Light Interception of Orchard Trees Using LiDAR and Solar Models: 75.

Stamps, Robert H. 2009 Use of Colored Shade Netting in Horticulture. *HortScience* 44(2): 239–241.

Varlet-Grancher, C., G. Gosse, M. Chartier, et al. 1989. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 9(5): 419–439.

Annexe I. Quantité d'énergie lumineuse interceptée spatialisée par pommier suivi le matin et l'après-midi

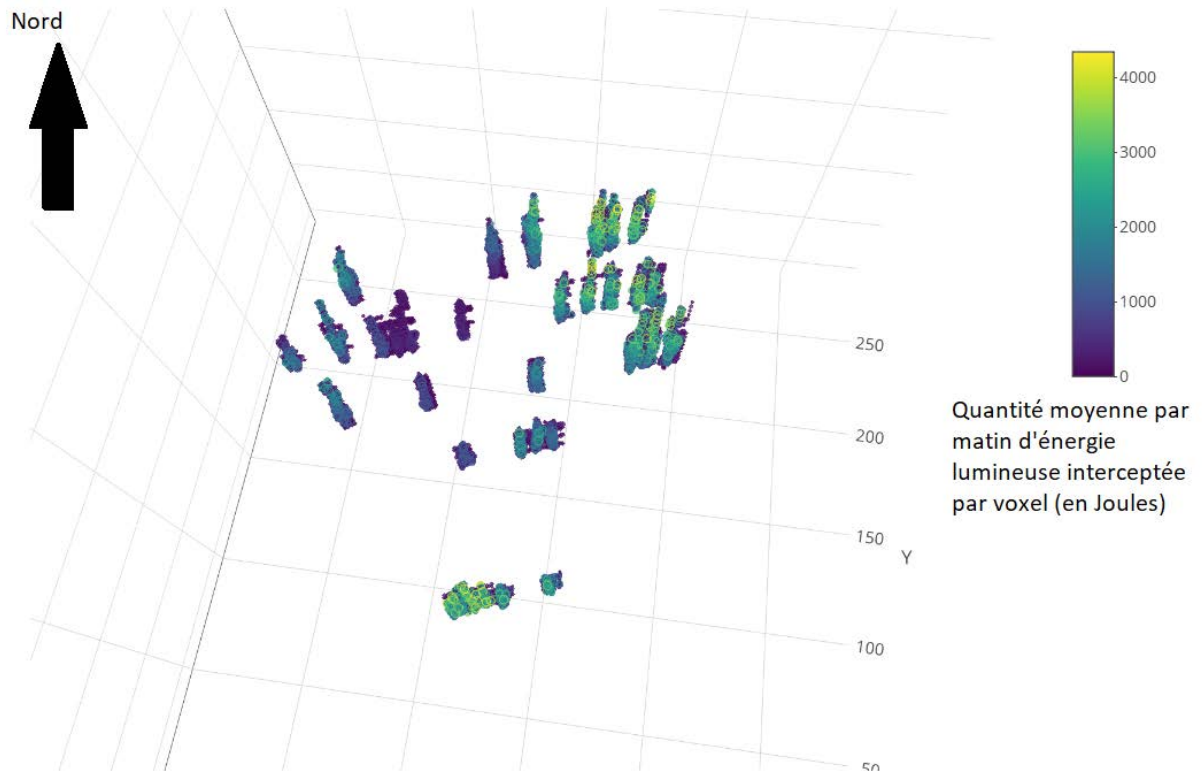


Figure 25. Représentation 3D de l'interception moyenne matinale simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 1 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

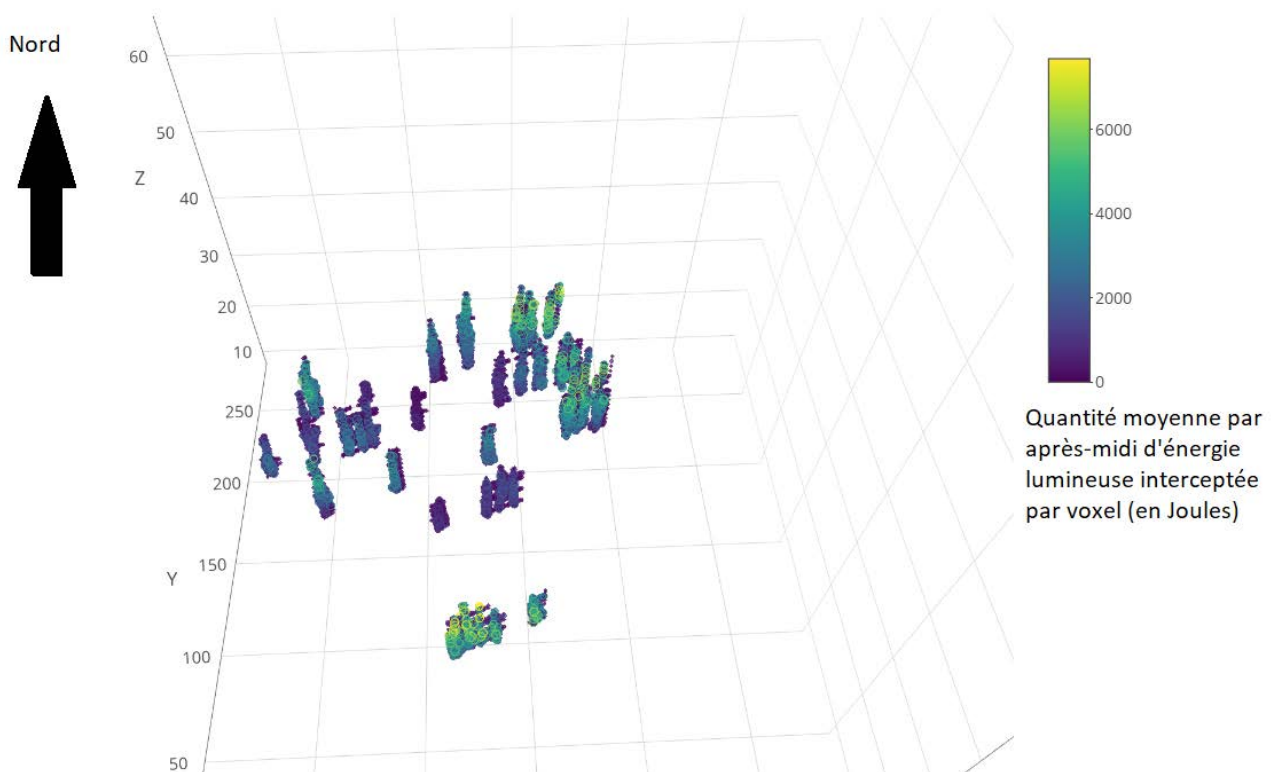


Figure 26. Représentation 3D de l'interception moyenne post-méridienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 1 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

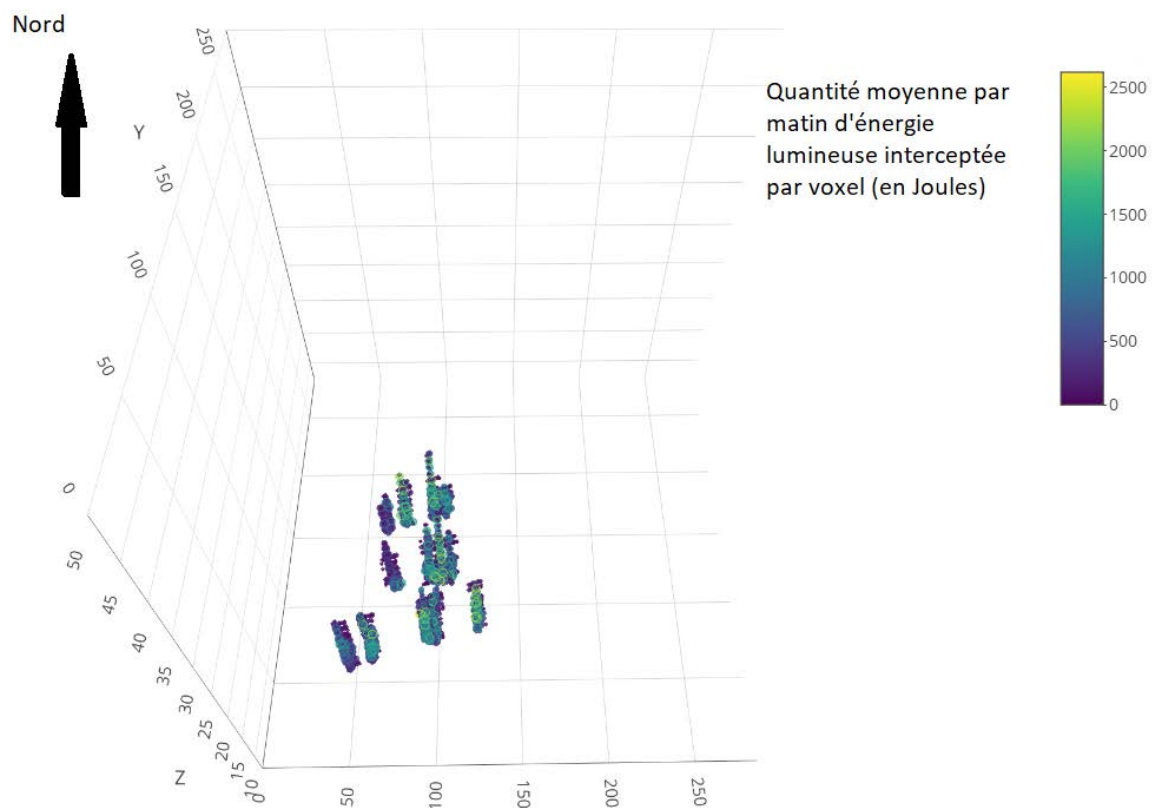


Figure 27. Représentation 3D de l'interception moyenne matinale simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 2 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

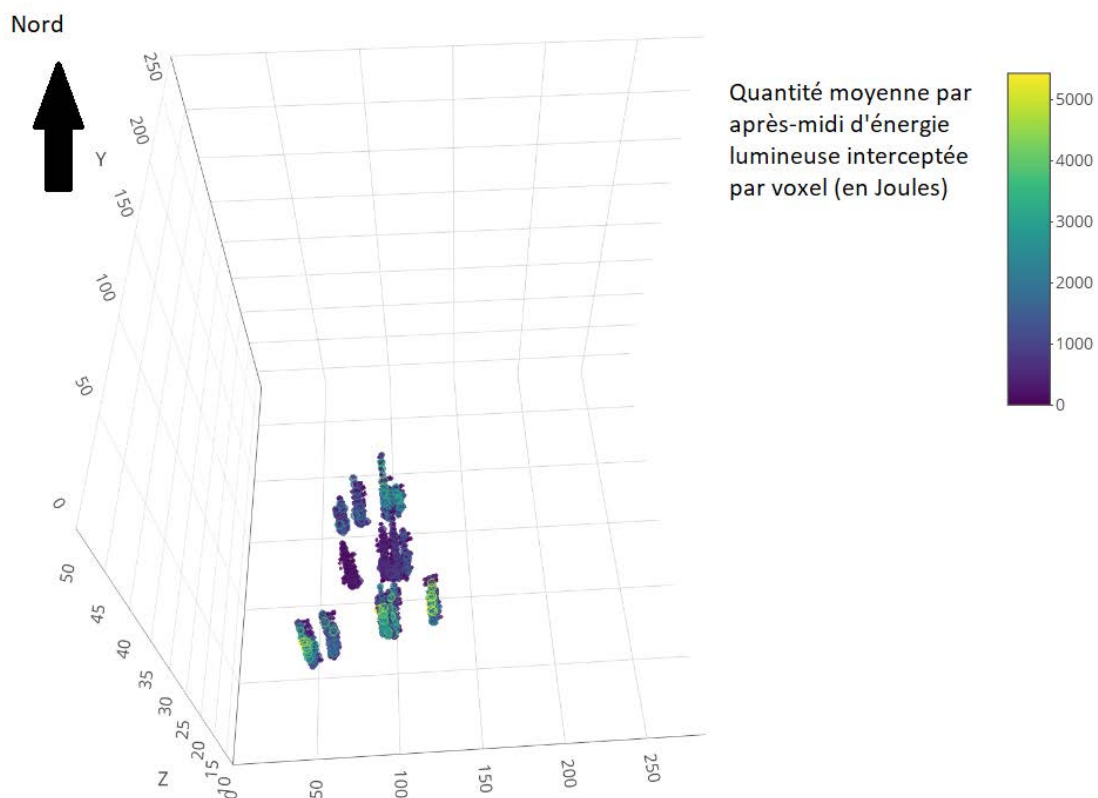


Figure 28. Représentation 3D de l'interception moyenne post-méridienne simulée des voxels des pommiers suivis de la scène 2 sur la période simulée (30 juillet au 23 septembre 2018)

Annexe II. Graphiques présentant les modèles linéaires expliquant les variables écophysiologicals de 2018 en fonction de la quantité moyenne de rayonnement interceptée le matin par pommier

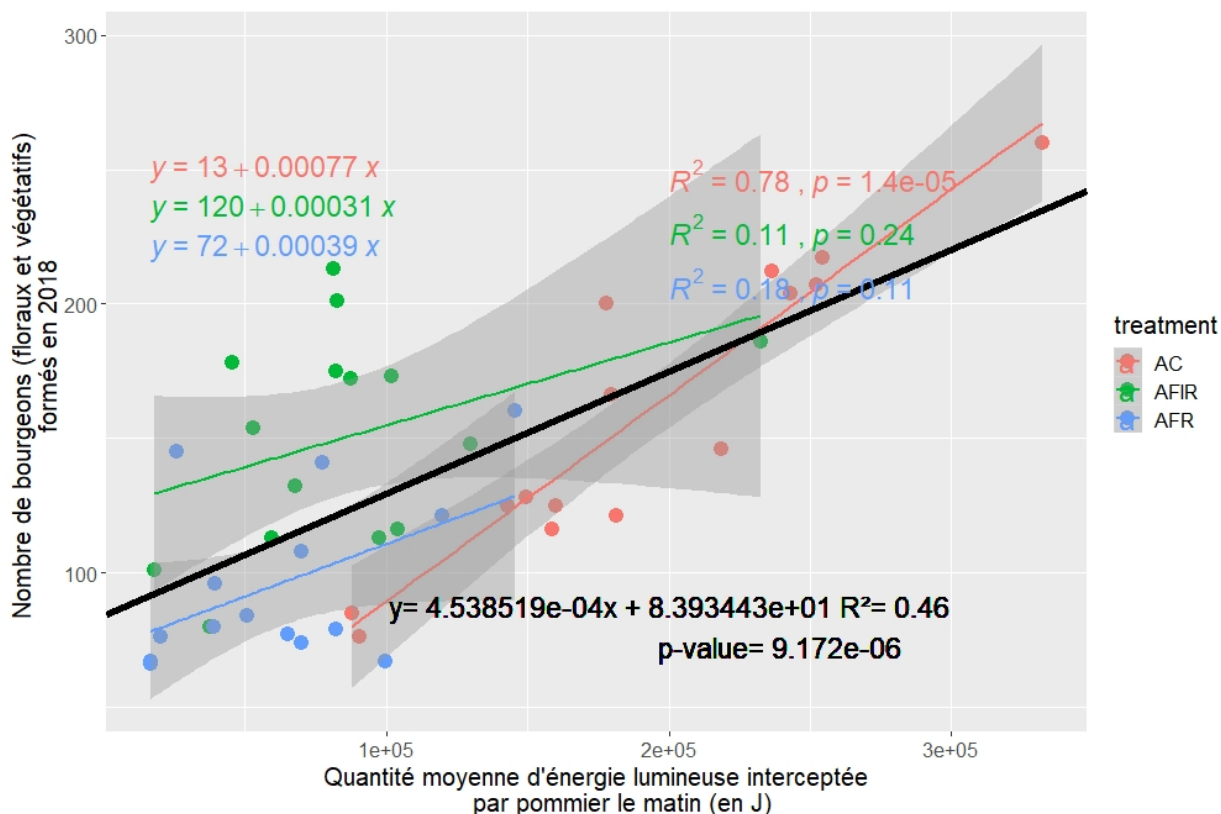


Figure 29. Nombre de bourgeons (floraux et végétatifs) préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée matinale par pommier simulée

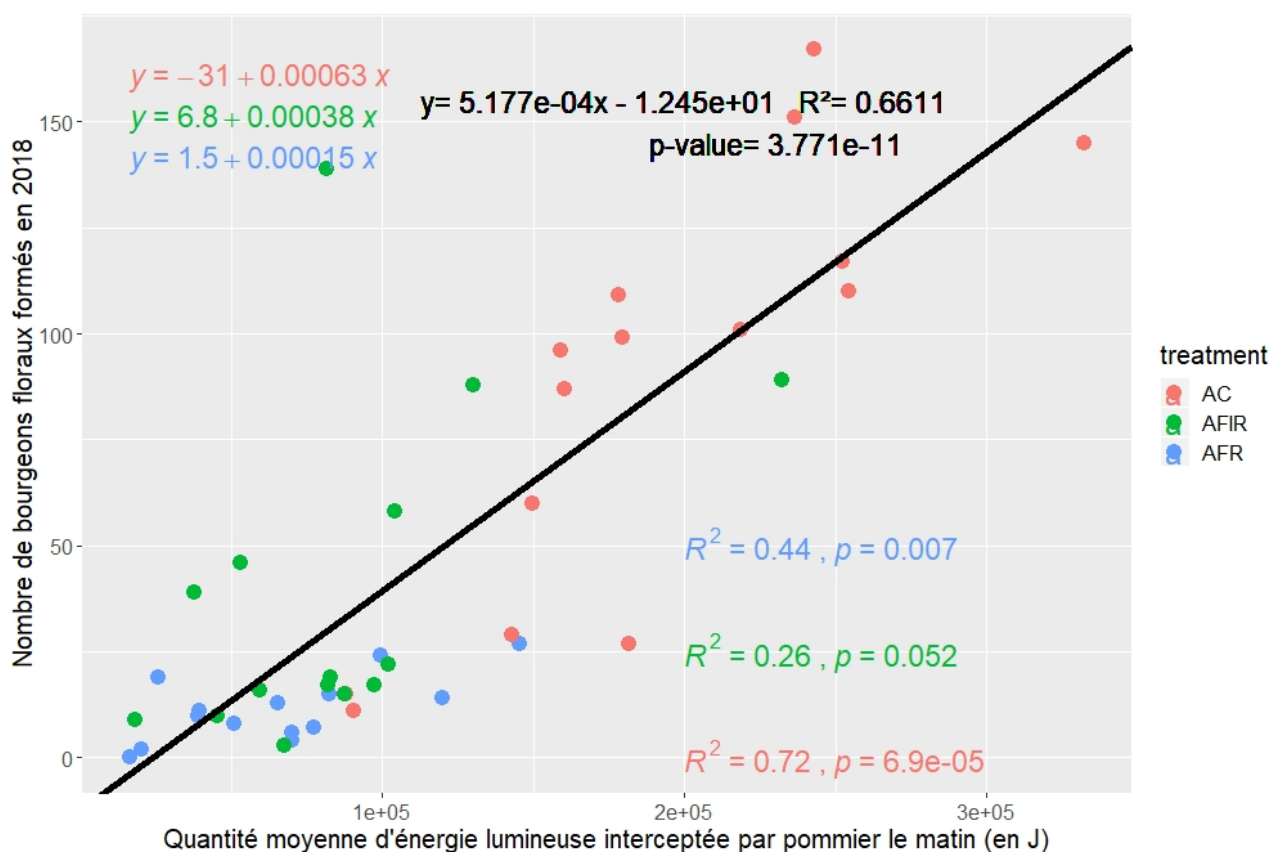


Figure 30. Nombre de bourgeons floraux préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée matinale par pommier simulée

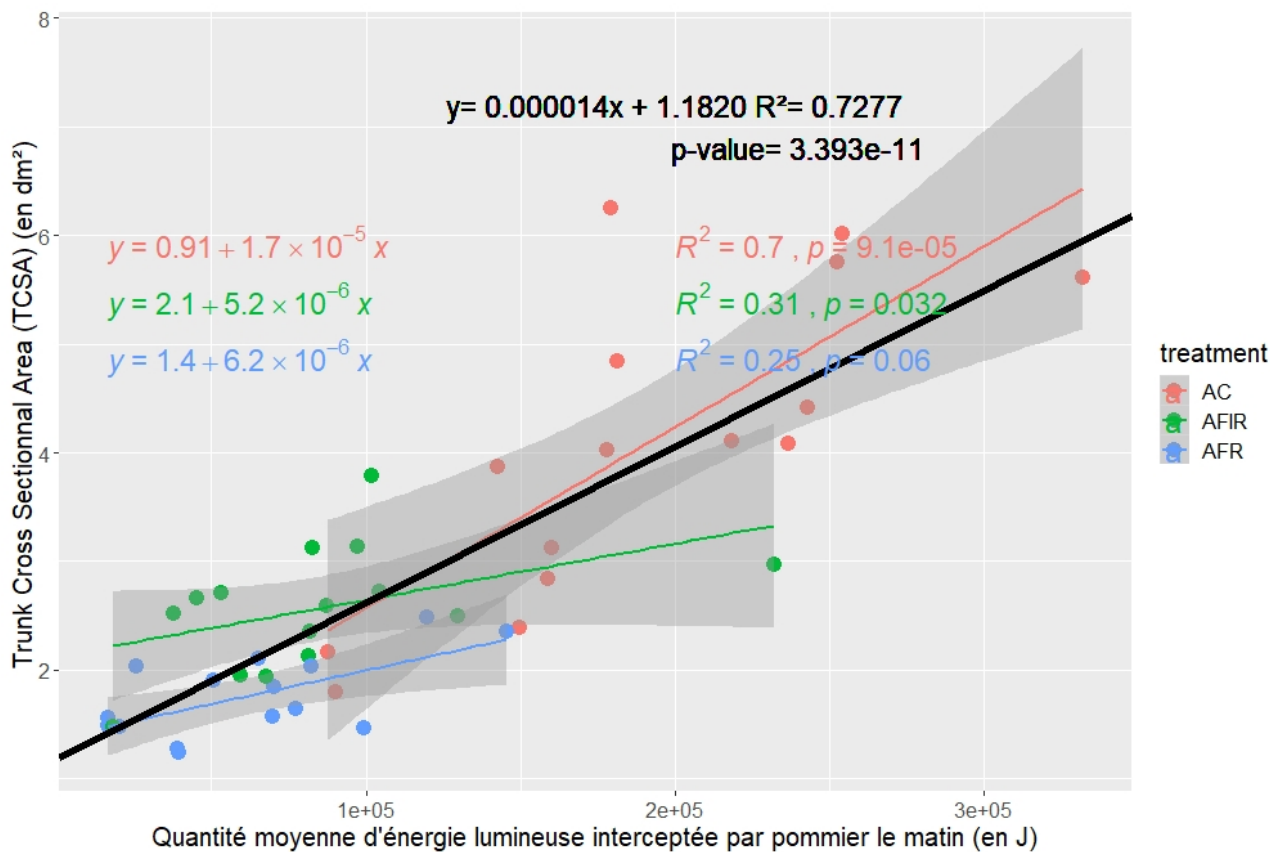


Figure 31. Trunk Cross Sectional Area 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse matinale par pommier simulée

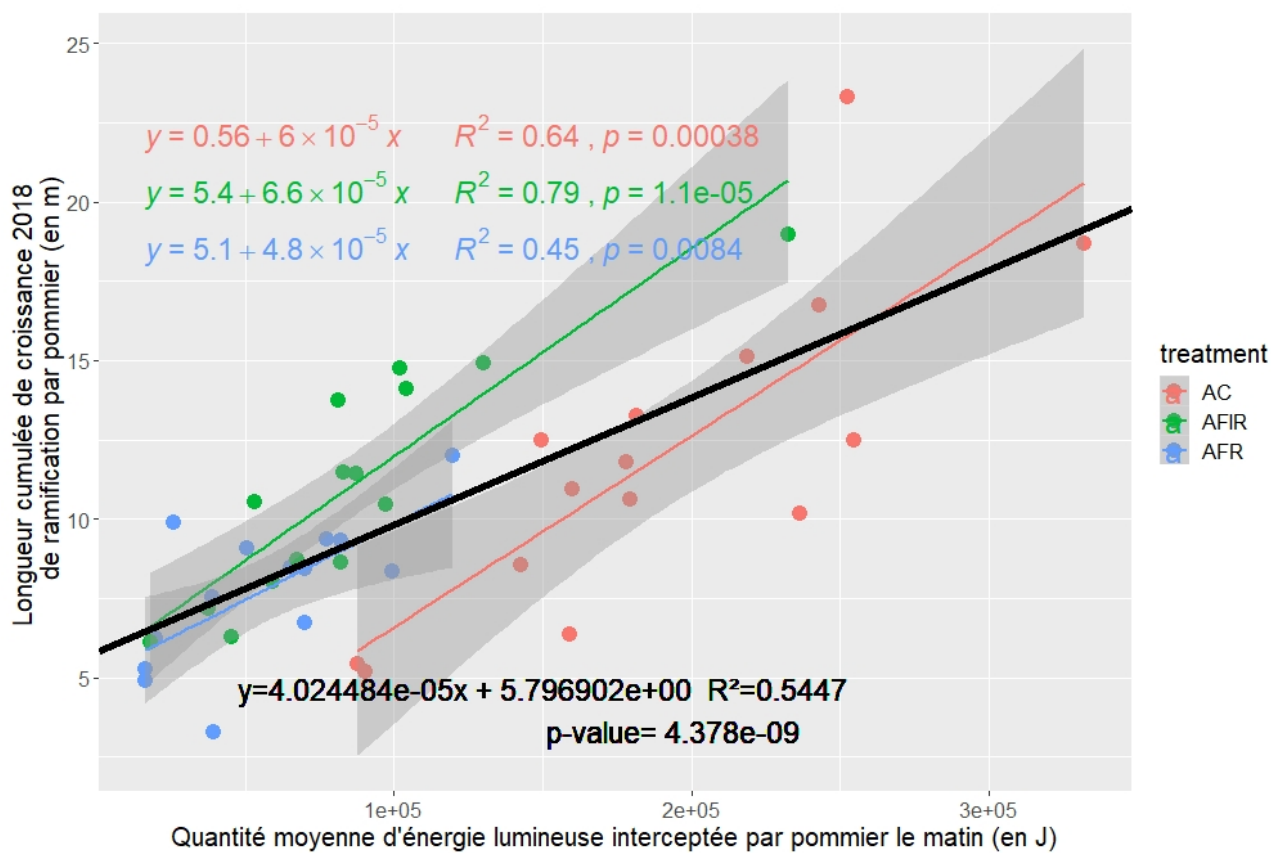


Figure 32. Longueur de croissance cumulée en 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée matinale par pommier simulée

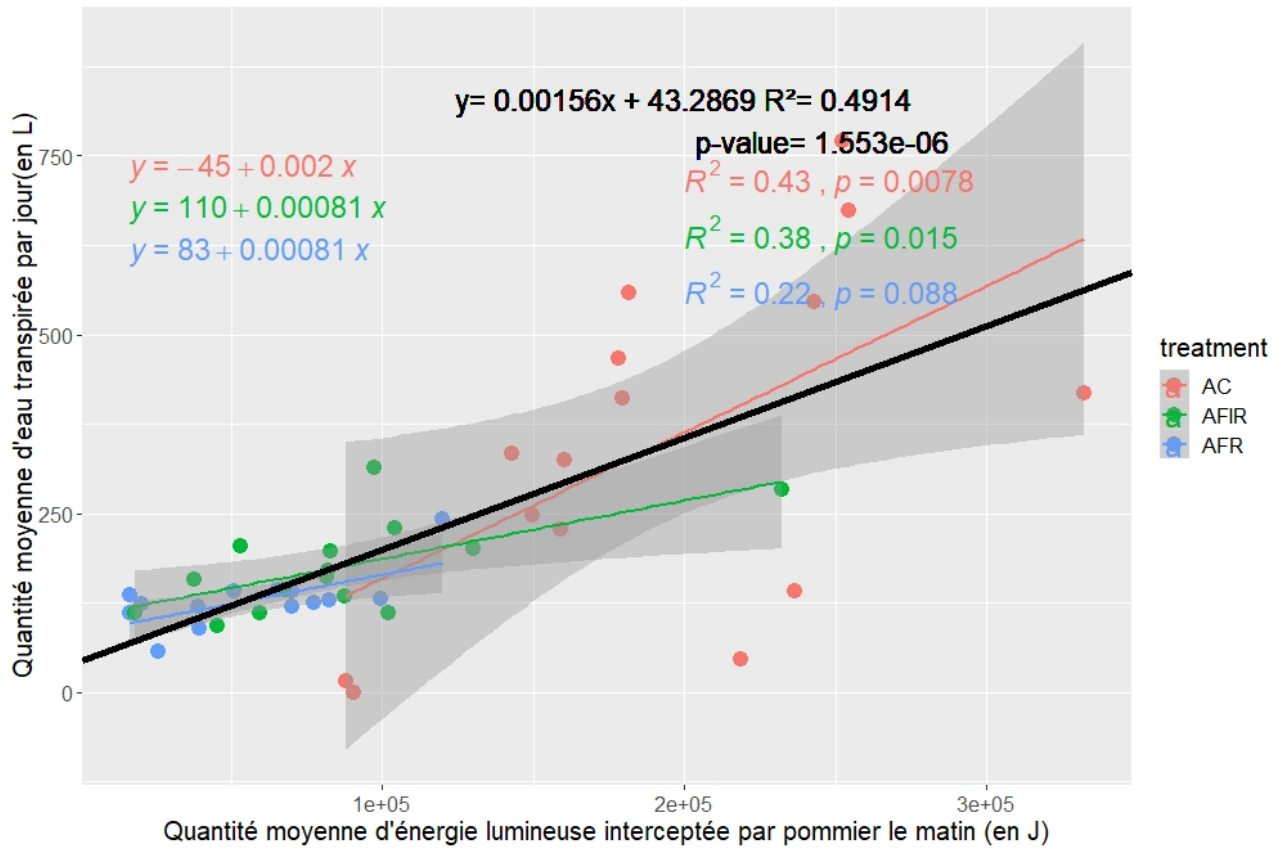


Figure 33. Quantité d'eau transpirée en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée matinale par pommier simulée (sur la période simulée)

Annexe III. Graphiques présentant les modèles linéaires expliquant les variables écophysiologicals de 2018 en fonction de la quantité moyenne de rayonnement interceptée l'après-midi par pommier

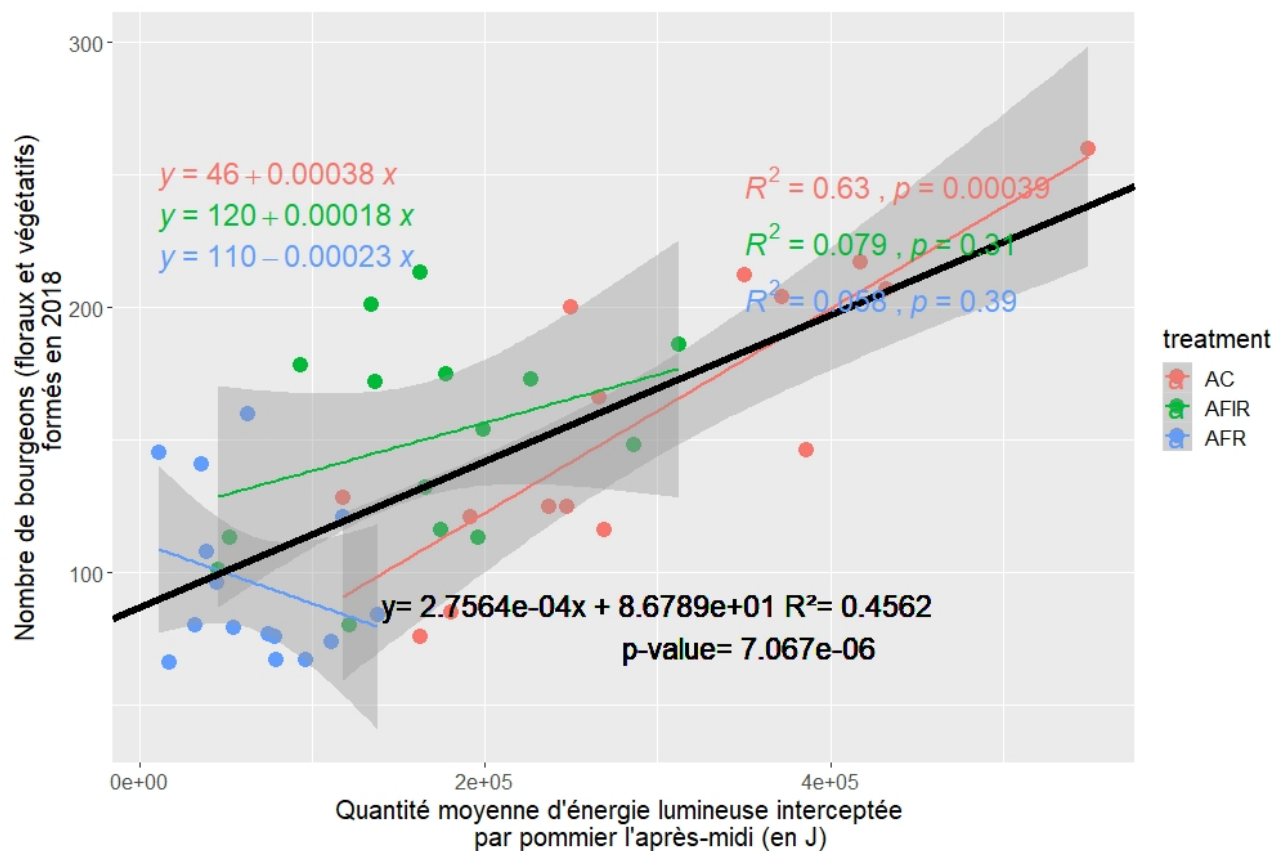


Figure 34. Nombre de bourgeons (floraux et végétatifs) préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée post-méridienne par pommier simulée

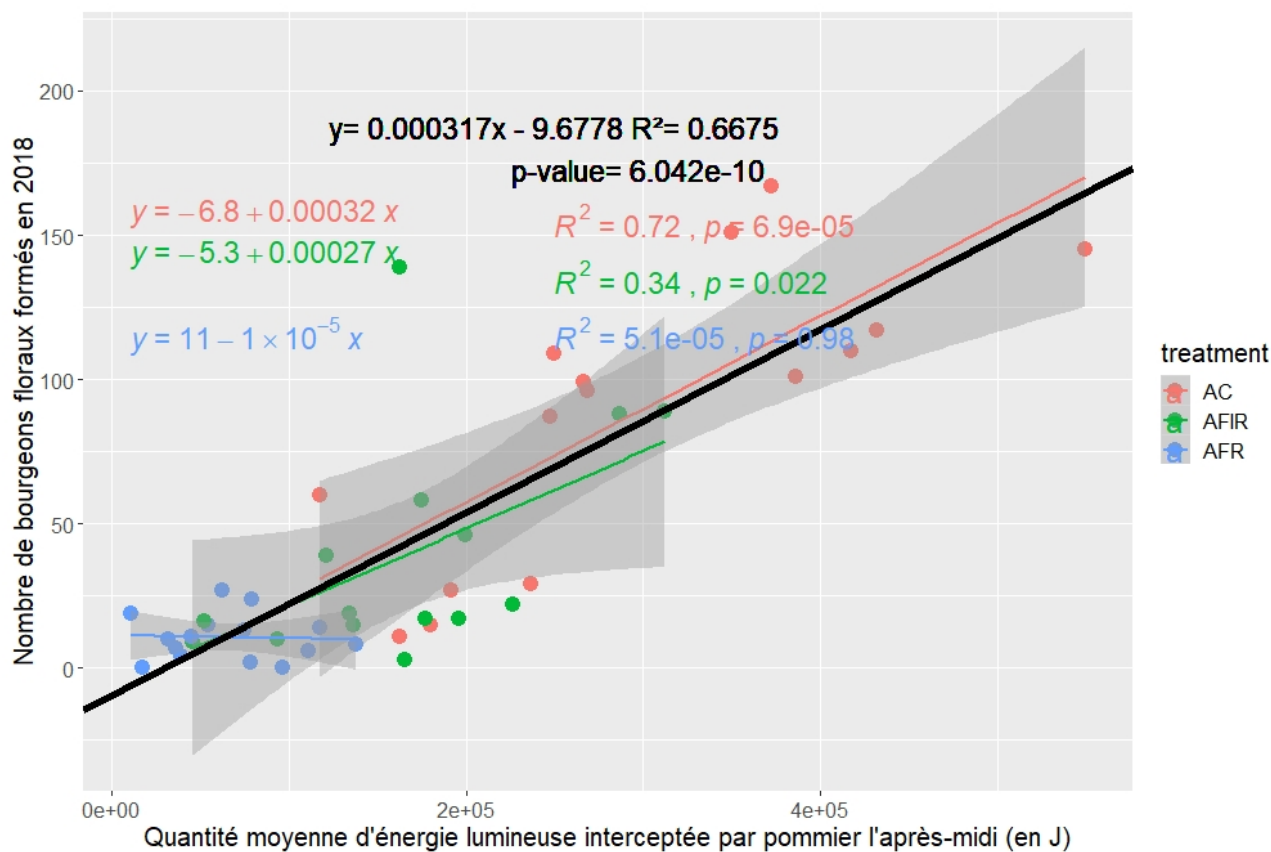


Figure 35. Nombre de bourgeons floraux préformés en été 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée post-méridienne par pommier simulée

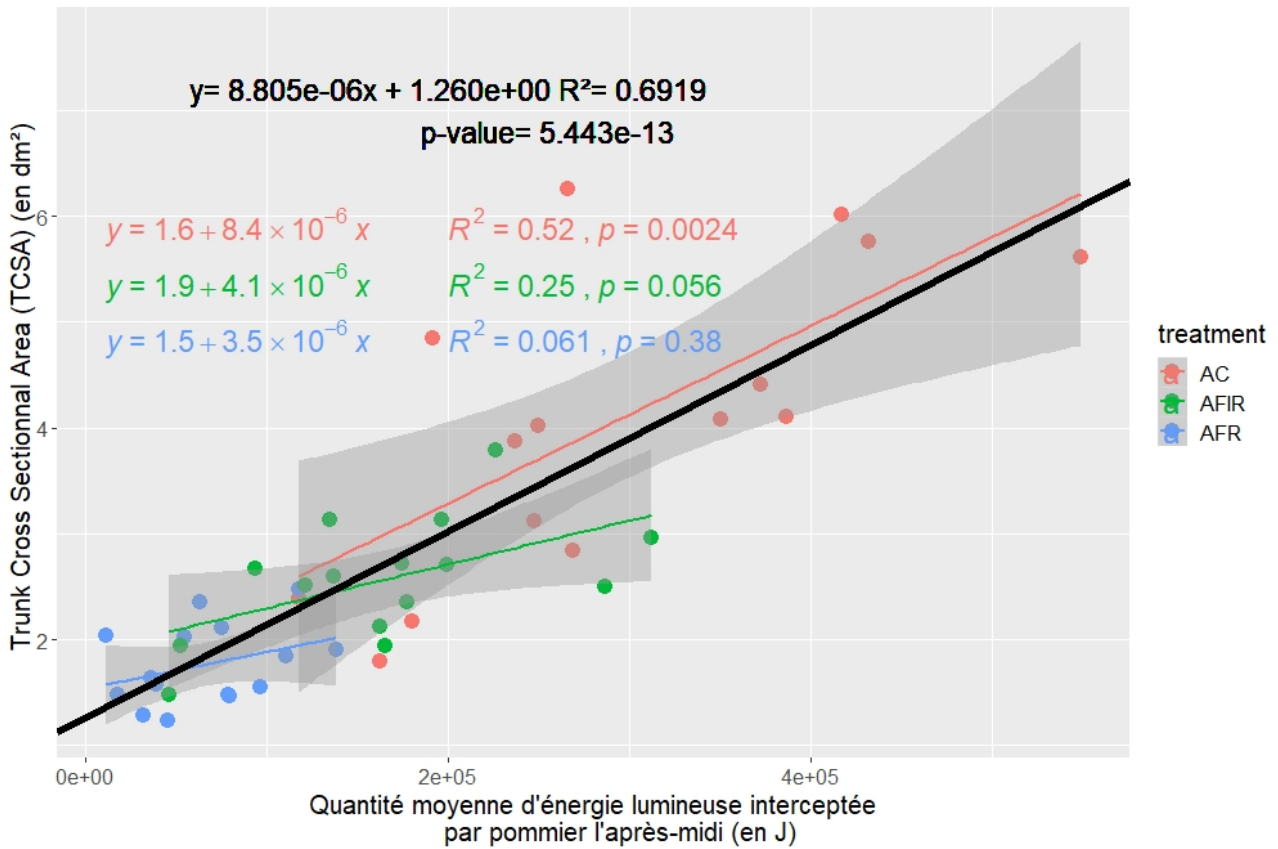


Figure 36. Trunk Cross Sectional Area 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse post-méridienne par pommier simulée

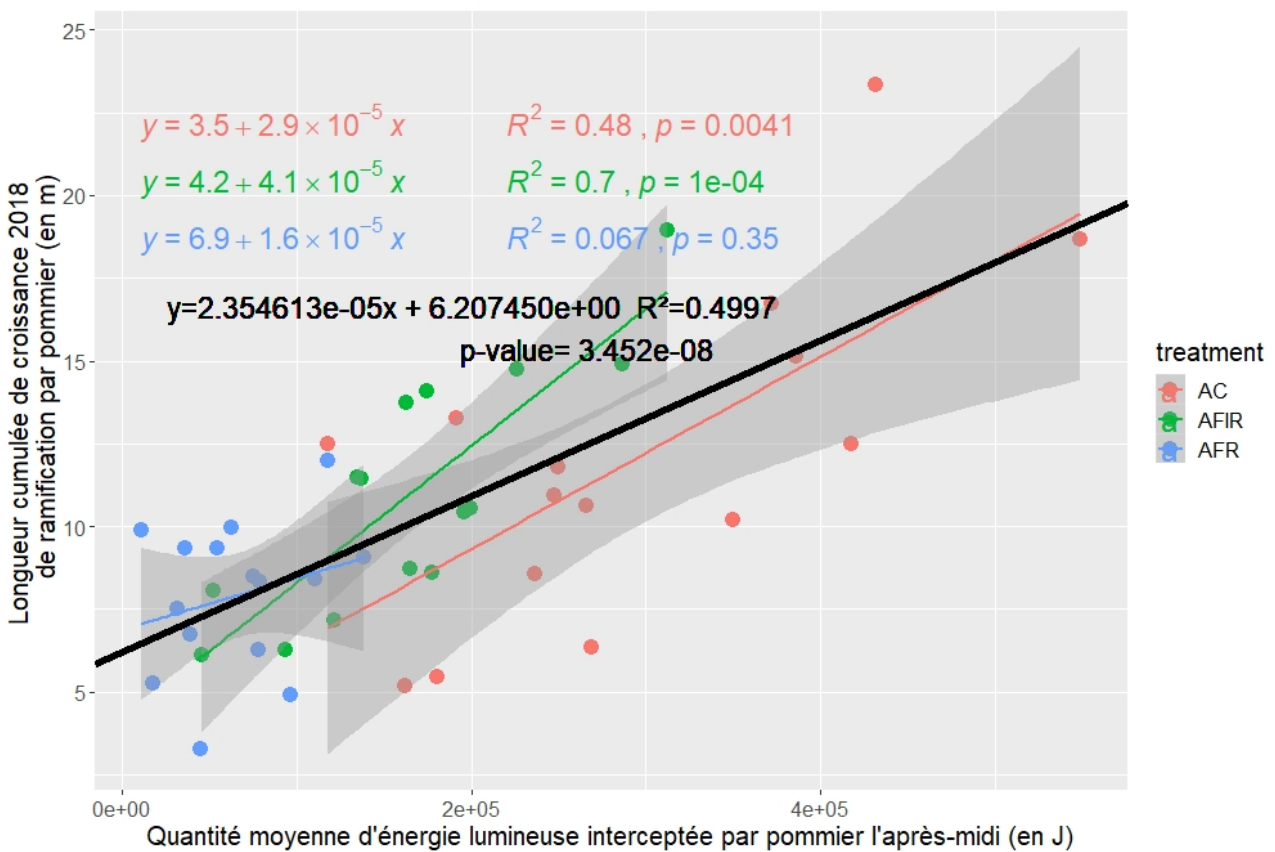


Figure 37. Longueur de croissance cumulée en 2018 en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée post-méridienne par pommier simulée

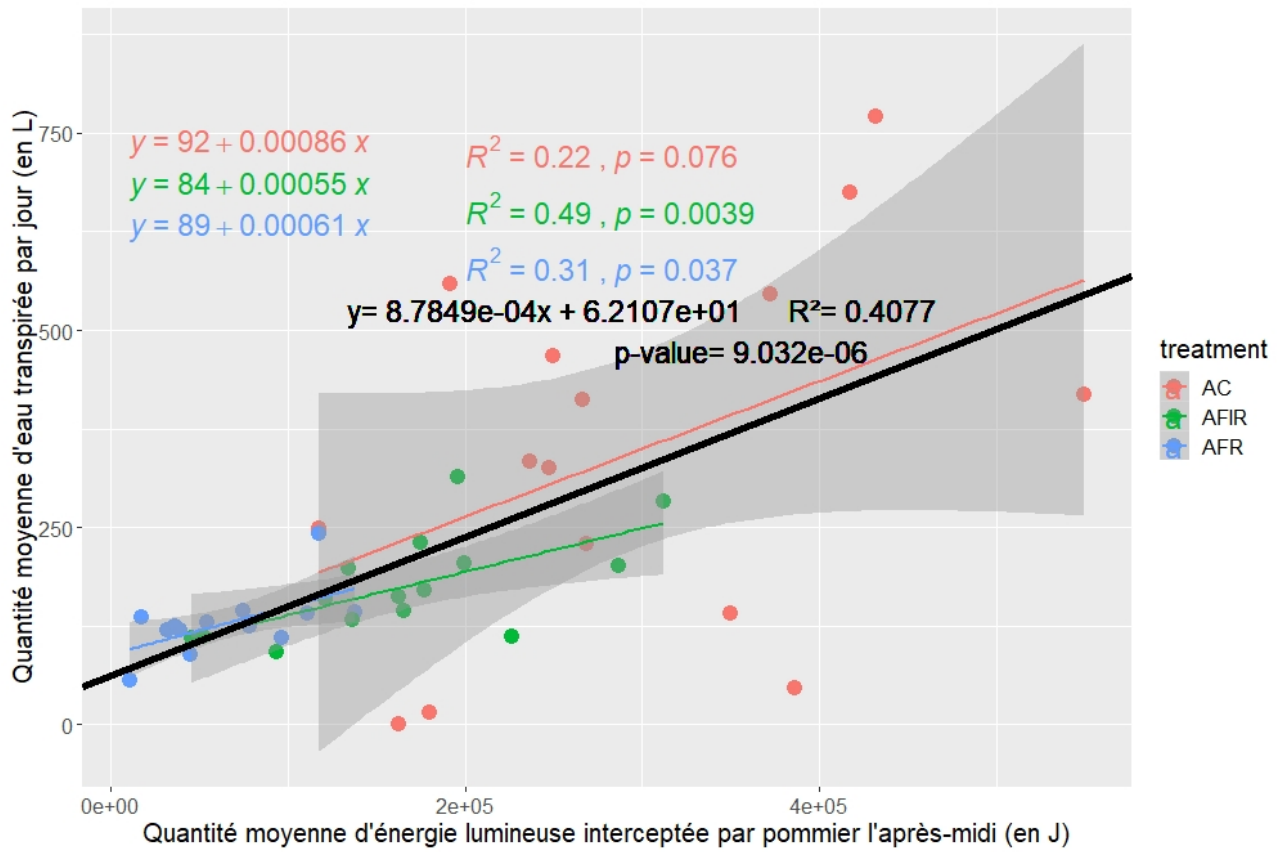


Figure 38. Quantité d'eau transpirée en fonction de la quantité d'énergie lumineuse interceptée post-méridienne par pommier simulée (sur la période simulée)



Diplôme et Mention : Master Biologie, Agrosociétés

Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal

Option : **Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes (FGA)**

Responsable d'option : Matthieu Carof

Auteur(s) : Pierre Dul

Organisme d'accueil : UMR SYSTEM - Inra

Adresse : Montpellier Sup'Agro

Date de naissance* : 26/04/1995

2 place Viala

Nb pages :

Annexe(s) :

Bât. 27

Année de soutenance : 2019

34000 Montpellier

Maître de stage : Pierre-Eric Lauri

Titre français : Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier

Titre anglais : Apple trees in agroforestry systems, analyze of the radiative climate based on Lidar-T scena and relation with the apple's development

Résumé (1600 caractères maximum) :

La diversification des systèmes de culture est un levier majeur pour répondre aux enjeux de production agroécologique, notamment la réduction d'intrants par leur substitution aux services écosystémiques (régulation des ravageurs, biodiversité, cycle biogéochimique). La production de pommes étant la production la plus consommatrice de pesticides, elle doit répondre à ces enjeux.

Le projet GAFAM permet d'aborder cette problématique par l'introduction de pommier dans un système agroforestier en association avec des noyers plantés en 1995 et une strate herbacée de sainfoin dans l'inter-rang.

Le sujet de stage s'intéresse au développement et à l'utilisation d'un modèle radiatif d'interception à partir de données LIDAR-T, et à l'utilisation des simulations pour tenter d'expliquer l'effet du climat radiatif sur le développement des pommiers jeunes en contexte agroforestier.

Pour la caractérisation du développement, de nombreuses variables écophysiological ont été mesurées : longueur de ramification, section de tronc, nombre de bourgeons, de fruits mis en place, surface foliaire...

Les résultats révèlent qu'une forte disparité de développement accumulée au cours du cycle de développement des pommiers existe entre les pommiers subissant une forte compétition lumineuse et ceux n'en subissant pas. Ces retards de développement impliquent une forte hétérogénéité des sorties de simulation d'interception des pommiers.

La faible capacité d'interception des pommiers les plus en compétition a des conséquences importantes sur l'initiation florale et la production potentielle future de fruits.

Abstract (1600 caractères maximum) :

Diversification of cropping systems is a major lever to respond to agroecological production issues, particularly the reduction of inputs by substituting for ecosystem services (pest regulation, biodiversity, biogeochemical cycle). As apple production is the most consuming of pesticides, it must respond to these challenges.

The GAFAM project tackles this problem by introducing apple trees into an agroforestry system in association with walnut trees planted in 1995 and a herbaceous sainfoin layer in the inter-row.

The internship topic focuses on the development and use of a radiative interception model from LIDAR-T data, and the use of simulation to try to explain the effect of the radiative climate on the development of young apple trees in agroforestry context.

For the characterization of the development, many ecophysiological variables were measured: length of branching, section of trunk, number of buds, fruits set up, leaf area...

The results reveal that there is a large developmental disparity accumulated during the apple development cycle between apples subject to strong light competition and those that do not. These development delays imply a strong heterogeneity of interception simulation outputs of apple trees. The low interception capacity of the most shady apple trees suggests that this will have important implications for flower initiation and potential future fruit production.

Mots-clés : Pommier, développement, agroforesterie, modèle radiatif, LIDAR-T

Key Words: Apple tree, development, agroforestry, radiative model, LIDAR-T