

MASTER II BIOLOGIE VEGETALE
« PLANT PLASTICITY IN CHANGING ENVIRONMENT »

2023-2024

INTERNSHIP REPORT PRESENTED BY:

Mathieu TEYSSIER

SUBJECT:

**ANALYSE DE L'INTERCEPTION DE LA LUMIÈRE PAR DES COUVERTS DE
POMMIERS.**

**ETUDE DE L'EFFET DE LA STRUCTURE DU COUVERT ET DE LA
STRUCTURATION DU VERGER.**

Intership supervisor: Marc SAUDREAU

Tutor: Jean-louis JULIEN



REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage.

En premier lieu, je remercie vivement Marc SAUDREAU, mon tuteur de stage, pour son encadrement, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de cette expérience. Son expertise et sa disponibilité ont été essentielles à la réalisation de mes missions.

Je remercie également Pascal WALSER, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler sur ce projet. Son aide et sa collaboration ont été d'une grande valeur.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Jean-Louis JULIEN, mon référent de stage, pour ses conseils éclairés qui ont grandement enrichi la rédaction de ce rapport.

Je n'oublie pas de remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées et avec qui j'ai partagé des moments enrichissants. Leur accueil chaleureux et leur bienveillance ont contribué à rendre cette expérience encore plus agréable et formatrice.

Enfin, un grand merci à l'équipe des stagiaires. Nous étions nombreux et c'est grâce à notre entraide et notre esprit d'équipe que ce stage a été une expérience si positive et enrichissante.

RESUME

La croissance démographique mondiale, projetée à 9,8 milliards d'habitants d'ici 2050, met en évidence l'impératif d'optimiser la production alimentaire. Dans ce contexte, l'arboriculture, et notamment la culture des pommiers, joue un rôle crucial. Les récentes avancées en amélioration des cultivars et des techniques de greffage ont conduit à l'émergence de vergers bidimensionnels, visant à maximiser l'interception lumineuse, un facteur clé de production. Ce rapport analyse l'impact de ces vergers sur le microclimat, en se focalisant sur l'interception de la lumière par des structures d'arbres BiAxe et MonoAxe. En utilisant le logiciel "VegeSTAR4", l'étude explore comment la configuration du couvert du verger influence l'interception lumineuse. Les objectifs incluent la reconstruction tridimensionnelle des pommiers et des surfaces foliaires via des relations allométriques. La validation du modèle compare les valeurs d'interception de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) mesurées sur le terrain avec celles simulées par des capteurs virtuels dans VegeSTAR4. De plus, une analyse de la sensibilité de l'interception lumineuse selon diverses caractéristiques structurelles du verger est réalisée. Seuls les deux premiers objectifs seront présentés. En conclusion, bien que la reproduction du verger dans le modèle ait été réussie, la validation reste incomplète en raison de différences locales, attribuables à la méthode de reconstruction de la surface foliaire. Néanmoins, malgré cette validation partielle, le dernier objectif sera tout de même poursuivi.

Mots-clés : Arboriculture, Verger Bidimensionnel, PAR, Modélisation, Interception de la lumière

ABSTRACT

The projected global population growth to 9.8 billion by 2050 underscores the imperative to optimize food production. In this context, arboriculture, particularly apple cultivation, plays a crucial role. Recent advances in cultivar improvement and grafting techniques have led to the emergence of two-dimensional orchards aimed at maximizing light interception, a key factor in production. This report analyzes the impact of these orchards on the microclimate, focusing on light interception by Bi-Axis and Mono-Axis tree structures. Using the "VegeSTAR4" modeling software, the study explores how orchard canopy configuration influences light interception. The objectives include the three-dimensional reconstruction of apple trees and leaf surfaces using allometric relationships. Model validation compares measured on-field photosynthetically active radiation (PAR) interception values with those simulated by virtual sensors in VegeSTAR4. Additionally, a sensitivity analysis of light interception based on various orchard structural characteristics is conducted. Only the first two objectives will be presented. In conclusion, while the reproduction of the orchard in the model was successful, validation remains incomplete due to local differences attributable to the method of reconstructing leaf surfaces. Nevertheless, despite this partial validation, the final objective will still be pursued.

Keywords: Arboriculture, Two-Dimensional Orchard, PAR, Modeling, Light Interception

LISTE DES ABREVIATIONS

PAR : Photosynthetically Active Radiation

TABLE DES MATIERES

I	- CONTEXTE	1
II	- BIBLIOGRAPHIE	2
	1 – CONCEPTION D’UN VERGER	2
	A – DU POMMIER AU VERGER	2
	B - COMPOSANTS FONDAMENTAUX DANS LA CONCEPTION D’UN VERGER	3
	2 – INTERCEPTION DE LA LUMIERE DANS LES VERGERS DE POMMIER	6
	A – RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT SUR LES COUVERTS VEGETAUX	7
	B - CROISSANCE ET RENDEMENT : IMPACT DE L’INTERCEPTION LUMINEUSE	7
	3 – ETUDES DE NOUVEAUX VERGERS BIDIMENSIONNELS	9
	A – RENAISSANCE DE SYSTEMES PALISSEES	9
	B – VERGERS BIDIMENSIONNELS	10
	4 – EMERGENCE DE NOUVEAUX OUTILS : MODELISATION	12
	5 – OBJECTIFS	13
III	- MATERIEL & METHODES	14
	1 – RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE DES POMMIERS	14
	A – VEGESTAR4	14
	B – DIGITALISATION	16
	C – RELATION ALLOMETRIQUE ENTRE POUSSE ET FEUILLES	16
	D - RECONSTITUTION DE LA DISPOSITION SPATIALE DU VERGER	17
	D.1 - OBTENTION DES DISTANCES INTRARANG	18
	D.2 – ORIENTATION DES ARBRES	18
	D.3	–
	RECONSTRUCTION DU VERGER	18
	2 – CONVERSION DES SORTIES VEGESTAR4 EN RAYONNEMENT PAR	20
	A – CONFIGURATION DES CAPTEURS VIRTUELS DANS VEGESTAR4	20
	B – CONVERSION DES DONNEES DE SURFACE EN FLUX LUMINEUX	20
	B.1 – CONVERSION DE LA SURFACE PROVENANT DE L’ECLAIREMENT DIRECT	21
	B.2	–
	CONVERSION DE LA SURFACE PROVENANT DE L’ECLAIREMENT DIFFUS	22
	- RESULTATS	23
	1 – RECONSTRUCTION DU VERGER	23
	2 – VALIDATION DU MODELE	24
	A – COMPARAISON DONNEES CAPTEURS TERRAIN	24
	B - EXPLORATION DES PARAMETRES SENSIBLES DANS VEGESTAR4	25
	C – AJUSTEMENT DES PARAMETRES SENSIBLES DE VEGESTAR4	31
V	- DISCUSSION	32
	1 - IMPACT DES FLUCTUATIONS LOCALES ET VALIDATION DE VEGESTAR4	32
	2 - BIAIS ENVIRONNEMENTAUX ET TECHNOLOGIQUES	34
	A - VENT	34
	B - CAPTEURS	34
VI	- CONCLUSION	36

I - CONTEXTE

Les Nations Unies prévoient que la population mondiale atteindra 9,8 milliards d'habitants d'ici 2050. Cette augmentation rend primordiale la question de l'approvisionnement alimentaire. Il devient impératif de trouver des solutions pour éviter une crise alimentaire mondiale, nourrir une population croissante étant un défi majeur.

Pour répondre à cette demande croissante, tous les secteurs de production alimentaire, comme l'élevage et les grandes cultures, doivent développer des solutions adaptées. La filière arboricole joue un rôle important dans l'économie agricole française et mondiale. En 2016, la France a produit 2 817 026 tonnes de fruits, générant 3,19 milliards d'euros, se plaçant comme le troisième producteur en Europe après l'Italie et l'Espagne (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2017).

Les cultures fruitières sont essentielles pour une alimentation mondiale diversifiée et nutritive. En tant que produits à forte valeur ajoutée, elles offrent aussi des opportunités lucratives. Il est donc crucial d'améliorer la productivité des vergers pour augmenter leur rentabilité et les rendre compétitifs face à d'autres investissements industriels.

Améliorer la productivité nécessite des solutions adaptées pour garantir une durabilité environnementale, sociale et économique. Les tendances actuelles mettent l'accent sur l'optimisation des systèmes de production des vergers. Les innovations et améliorations constantes sont indispensables pour répondre aux exigences changeantes et maximiser la production fruitière. Cependant, ces innovations doivent être mises en œuvre de manière à ne pas exacerber les problèmes actuels, tels que la gestion des ressources naturelles, en particulier la gestion de l'eau, devenue de plus en plus préoccupante en raison de la sécheresse accrue constatée ces dernières années en période estivale

Parmi les cultures arboricoles, la pomme se distingue particulièrement. Elle est l'un des fruits les plus consommés mondialement et en France, avec une consommation annuelle moyenne de 13 kg par foyer français. La récolte annuelle de pommes en France atteint environ 1,5 à 2 millions de tonnes, avec les variétés Golden, Gala et Granny Smith en tête. Cela souligne l'importance de développer des pratiques innovantes et durables pour soutenir cette production.

II – BIBLIOGRAPHIE

1 – CONCEPTION D'UN VERGER

Le *Malus Domestica*, communément appelé pommier, de la famille des Rosacées, se distingue par sa structure botanique fascinante, avec un tronc solide et un houppier largement étalé. En milieu sauvage, ces arbres, initialement de forme ovoïde dans leur jeunesse, peuvent atteindre une hauteur de 6 à 15 mètres. La diversité des variétés de pommiers induit des variations dans leur apparence, adoptant différentes postures avec l'âge. L'écorce, grise ou marron, confère à l'arbre une apparence distinctive, tandis que les feuilles, caduques et alternées, présentent des bords lisses ou dentelés (Rieger, 2006). L'inflorescence, en corymbe avec une floraison centrifuge, comprend des fleurs pentamères avec cinq sépales, cinq pétales, vingt étamines et un gynécée fusionné à cinq styles (Pratt, 1988). Le fruit, ellipsoïdal à obovoïde, offre une variété de teintes, de rouge à jaune, avec une chair comestible entourant un noyau composé de cinq carpelles fusionnés, chacun contenant généralement deux graines (Rieger, 2006, Jackson, 2004). La fécondation, allogame, dépend fortement des pollinisateurs tels que les abeilles mellifères et solitaires, ainsi que diverses espèces de bourdons, qui jouent un rôle crucial dans le transfert efficace du pollen entre les fleurs, favorisant la reproduction du pommier (Bernard *et al.*, 1978).

A – DU POMMIER AU VERGER

La mise en place d'une production intensive de pommes nécessite la planification méticuleuse d'un verger spécifiquement adapté. Ce terme désigne une surface plantée d'arbres fruitiers, organisée de manière méthodique pour une production à grande échelle. Dans un verger de production, chaque pommier se compose de deux parties distinctes : le cultivar, choisi pour ses caractéristiques spécifiques de fruit telles que la couleur, le goût et la date de maturité, et le porte-greffe sélectionné pour la qualité de son système racinaire. Le choix du porte-greffe est crucial car il influe sur la vigueur de la croissance, la tolérance aux conditions du sol, la résistance aux maladies, et d'autres caractéristiques essentielles du pommier résultant (Trillot *et al.*, 2002).

L'objectif principal du producteur lors de la conception du verger est d'optimiser l'utilisation de l'espace et des ressources disponibles, tout en minimisant la compétition entre les arbres et en maximisant l'interception de la lumière. Une attention particulière est accordée à la recherche d'un système nécessitant un temps et une charge de travail modérés. L'efficacité opérationnelle est cruciale pour assurer la durabilité à long terme du système. Un verger bien conçu doit maximiser la productivité tout en minimisant la complexité des opérations,

permettant à l'agriculteur de maintenir un équilibre entre le rendement attendu et les ressources disponibles en termes de temps et d'effort, garantissant ainsi une gestion viable sur le long terme.

B - COMPOSANTS FONDAMENTAUX DANS LA CONCEPTION D'UN VERGER

La conception d'un verger repose sur plusieurs composants essentiels : le choix du porte-greffe, la densité des arbres, le système de formation et la disposition globale du verger (Kousar Javaid *et al.*, 2017 ; Costes *et al.*, 2006). Ces éléments visent à optimiser l'efficacité de la production fruitière en favorisant l'interception de la lumière à travers différentes pratiques.

B.1 – PORTE-GREFFE

Le choix du porte-greffe est une étape cruciale lors de l'établissement d'un verger, influençant la taille des arbres en fonction de la densité souhaitée (Fallahi *et al.*, 2002). Les porte-greffes, classés en nains, semi-nains, ultra-nains ou vigoureux, jouent un rôle déterminant dans l'orchestration de la densité du verger (Kousar Javaid *et al.*, 2017).

La greffe de scions sur différents porte-greffes permet d'optimiser la densité du verger et d'accroître la productivité des arbres, notamment avec les porte-greffes nains favorisant une floraison plus précoce (Larsen *et al.*, 1992; Barritt *et al.*, 1995). La taille de l'arbre est fortement influencée par le choix du porte-greffe, tout comme la variété spécifique greffée, évitant ainsi des problèmes de croissance inadéquate. Le porte-greffe impacte également des aspects tels que la date de floraison, la résistance hivernale et la résistance aux maladies (T.G. Beckman et W.R. Okie, 1992; Shuttleworth *et al.*, 2023).

B.2 – DENSITE DES ARBRES

La gestion efficiente d'un verger inclut la densité d'arbres, mesurée en termes du nombre d'arbres par acre (1 acre = 0.4047 hectare) ou hectare, qui influence significativement la productivité (Robinson, 2007). Les vergers à haute densité, avec plus de 500 arbres par acre, optimisent la productivité et minimisent la perte de terres agricoles.

Des études, comme celles de Robinson (2007) et Barrit (2000), ont démontré cette productivité accrue. L'étude de Barrit a comparé différents systèmes de densité et a trouvé que les rendements étaient plus élevés dans les vergers à haute densité pour deux cultivars (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Comparaison du rendement entre les systèmes de formation en axe vertical et en axe central à différentes densités d'arbres avec des variétés 'Fuji' et 'Braeburn' greffées sur porte-greffe M.26 (Barrit, 2000).

System/rootstock	Tree density (no./ha)	Yield, mean of years 7-10 (MT/ha)	Canopy volume/ha, mean of years 7-9 (m ³ /ha)
Fuji			
Vertical axis/M.26	1,502	31.4	11,471
Central leader/M.26	1,111	22.4 (23.2)*	9,088 (8,489)*
Braeburn			
Vertical axis/M.26	1,502	35.1	5,514
Central leader/M.26	1,111	24.9 (22.8)*	3,149 (4,080)*

*In brackets, the expected value for central leader system compared with the vertical axis system based on reduced tree density (.74 times vertical axis).

Cependant, déterminer la densité optimale reste complexe en raison de la variabilité des avis sur la plantation et la variété de pommier pour maximiser la rentabilité. Certaines études préconisent une densité de 3000 à 6000 arbres/ha, tandis que d'autres suggèrent 725 arbres/ha comme optimal (Badiu *et al.*, 2015 ; Weber, 2001). Augmenter le nombre d'arbres par unité de surface peut être bénéfique pour le rendement initial des jeunes vergers, mais devenir contre-productif à long terme chez les arbres matures, entraînant surpopulation, ombrage excessif, modifications du microclimat, problèmes sanitaires, infestations nuisibles, et diminution du rendement et de la qualité des fruits (Lindell *et al.*, 2023).

B.3 – SYSTEME DE CONDUITE

Les systèmes de conduite sont cruciaux pour gérer la croissance des arbres, optimiser la production de fruits et assurer leur qualité. Ils impliquent des supports stratégiques et des techniques de taille spécifiques. Le choix du système de formation influence la morphologie, la croissance et le rendement des arbres. Ces systèmes ont évolué grâce aux efforts des arboriculteurs sur les 80 dernières années (Richard P. Marini, 2020). L'objectif principal est d'établir une charpente robuste pour favoriser la production de fruits de qualité. Une mauvaise formation entraîne souvent des ruptures des branches sous le poids des fruits, affectant la productivité et la durée de vie de l'arbre. Une taille et une formation appropriées permettent une production efficace de fruits de haute qualité tout en prolongeant la durabilité des arbres. Une variété de systèmes de culture est utilisée actuellement, chacun avec ses avantages et inconvénients (Kousar Javaid *et al.*, 2017 ; Robinson *et al.*, 2011 ; Kolmanič *et al.*, 2021 ; Richard P. Marini, 2020 ; Kumawat *et al.*, 2020). L'objectif de cette présentation n'est pas d'entrer dans les détails de chaque système de culture, mais plutôt de mettre en lumière les principaux d'entre eux.

Actuellement, le "Slender Spindle System" et le "Tall Spindle System" sont parmi les systèmes les plus largement adoptés pour la culture des vergers. Le premier est considéré comme un système à haute densité, conçu pour maximiser l'utilisation de l'espace tout en simplifiant la récolte et l'entretien des arbres. Chaque arbre est taillé de manière à adopter une structure conique étroite, favorisant une répartition uniforme de la lumière et permettant des opérations de verger mécanisées. Les arbres cultivés selon ce système atteignent rapidement la maturité de production, facilitant ainsi les opérations de taille et de récolte. D'autre part, le "Tall Spindle System" intègre des éléments de plusieurs systèmes, dont le "Slender Spindle", le "Vertical Axis", le "Solaxe" et le "Super Spindle". Cette approche vise à atteindre des objectifs variés, notamment une production précoce, des rendements élevés de manière régulière et une bonne qualité de fruits (Kousar Javaid *et al.*, 2017). Grâce à une densité d'arbres optimale et à une gestion simplifiée, ce système maximise la rentabilité tout en nécessitant un investissement financier modéré. Outre le "Slender Spindle System" et le "Tall Spindle System", de nombreux autres systèmes sont utilisés dans la culture des vergers, tels que le V-Treillis, le BiAxe, le Solaxe, l'Open Center, et bien d'autres. Chaque système offre ses propres avantages, permettant aux producteurs de choisir celui qui correspond le mieux à leurs besoins.

B.4 - DISPOSITION GLOBAL DU VERGER

Dans l'aménagement d'un verger, l'organisation spatiale revêt une importance cruciale pour les producteurs. Cette disposition méticuleuse des arbres fruitiers vise à maximiser leur croissance tout en répondant aux contraintes de densité et d'efficacité de production. Deux grandes catégories de schémas de plantation prédominent : les modèles en rangées verticales et en rangées alternées (Kousar Javaid *et al.*, 2017, Centurion University, 2020).

Les modèles en rangées verticales incluent les systèmes carrés et rectangulaires, où les arbres sont disposés de manière perpendiculaire les uns aux autres. Le système carré, par exemple, subdivise la parcelle en carrés avec des arbres plantés à chaque coin. Cela simplifie la gestion de l'eau et la mobilité au sein du verger grâce à des canaux d'irrigation et des allées rectilignes. Cependant, cette disposition limite le nombre d'arbres par unité de surface, ce qui peut restreindre la productivité du verger. Le système rectangulaire, similaire au système carré, subdivise la parcelle en rectangles, permettant d'accueillir plus de plantes dans chaque rangée tout en laissant davantage d'espace entre les rangées. Cette disposition facilite également la gestion, mais présente les mêmes limitations en termes de densité de plantation et de perte d'espace au centre des groupes de quatre arbres.

Les modèles en rangées alternées comprennent le quinconce, le triangle et l'hexagone. Le système en quinconce, ou méthode diagonale, augmente significativement le nombre d'arbres par acre par rapport au système carré en ajoutant un arbre supplémentaire au centre de chaque carré de quatre arbres adjacents. Cette configuration permet une utilisation optimale de l'espace et offre un potentiel de rendement accru, bien que les opérations culturales puissent être plus complexes. Le système en triangle dispose les arbres en formant un motif triangulaire équilatéral, permettant une densité de plantation élevée tout en maintenant des distances uniformes entre les arbres. Cette disposition peut augmenter le nombre d'arbres plantés et le potentiel de rendement, mais rend les opérations interculturelles plus difficiles. Enfin, le système hexagonal forme un hexagone où chaque côté est délimité par un arbre avec un arbre supplémentaire au centre. Ce schéma accueille 15 % de plants supplémentaires par rapport au système carré conventionnel, offrant une flexibilité accrue dans la gestion du verger et la possibilité de gérer le verger selon trois axes différents.

Chaque schéma de plantation présente ses propres avantages et inconvénients, offrant aux producteurs une gamme d'options pour optimiser la gestion et la productivité de leur verger en fonction de leurs besoins spécifiques.

2 – INTERCEPTION DE LA LUMIERE DANS LES VERGERS DE POMMIER

La lumière est vitale pour les plantes, jouant un rôle central dans divers processus physiologiques et de développement. Elle est indispensable à la photosynthèse, qui convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique pour le fonctionnement des plantes. De plus, la lumière régule le phototropisme, orientant la croissance vers la lumière, et la photomorphogénèse, influençant le développement en réponse aux signaux lumineux. Elle contrôle également les cycles de floraison et de dormance, synchronisant ces phases avec les saisons. Pour les pommiers, une exposition adéquate à la lumière est cruciale pour la formation des fruits, la qualité des récoltes et la santé globale de l'arbre.

La photosynthèse chez les pommiers se déroule dans les feuilles, où le parenchyme palissadique riche en chloroplastes capte l'énergie lumineuse, et le parenchyme lacuneux favorise les échanges gazeux. Les chloroplastes contiennent des thylakoïdes formant des grana, abritant des pigments photosynthétiques comme la chlorophylle a et b, et les caroténoïdes. La phase claire de la photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour produire de l'ATP et du NADPH, tandis que la phase sombre, ou cycle de Calvin-Benson, utilise ces produits pour fixer le CO₂ et synthétiser des glucides essentiels pour la croissance de la plante (Taiz *et al.*, 2014).

A – RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT SUR LES COUVERTS VEGETAUX

Le rayonnement solaire, est constitué d'une composante directe provenant du soleil selon une trajectoire précise dictée par sa position dans le ciel, et d'une composante diffuse résultant de la dispersion des rayons dans l'atmosphère. La somme de ces deux composantes forme le rayonnement solaire global couvrant une plage de longueurs d'onde de 100 à 3000 nm. Seule une fraction de ce rayonnement, le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) entre 400 et 700 nm, est utilisée par les plantes pour la photosynthèse (McCree, 1973). Lorsque ce rayonnement atteint un couvert végétal, une partie est réfléchi vers l'atmosphère, une autre est transmise au sol et renvoyée vers la végétation (Varlet-Granchet *et al.*, 1989 ; Gosse *et al.*, 1986), le reste est absorbé par le couvert. Le PAR absorbé par les plantes est calculé en soustrayant l'énergie réfléchi et transmise de l'énergie incidente.

L'absorption de la lumière par un houppier est un phénomène complexe à caractériser à cause de la diversité et du nombre important de feuilles présentes. Toutefois, elle peut être calculée via une approche globale en estimant une efficacité d'interception (ϵ_i). Celle-ci peut être directement liée à l'indice foliaire (IF) via une formule exponentielle dérivée de la loi de Beer-Lambert: $\epsilon_i = \epsilon_{i_{\max}}(1 - e^{-K \times IF})$ où $\epsilon_{i_{\max}}$ représente la valeur maximale d'interception (0,95), IF correspond à l'indice foliaire et K est le coefficient d'extinction du couvert, mesurant sa capacité à absorber la lumière incidente (Gosse *et al.*, 1986),.

B - CROISSANCE ET RENDEMENT : IMPACT DE L'INTERCEPTION LUMINEUSE

L'impact crucial du rayonnement solaire sur le rendement des cultures, en particulier dans la plage du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), est bien établi dans la littérature scientifique. Dans des conditions environnementales optimales, où les stress hydriques, les variations de température et les carences minérales sont absents, le rayonnement solaire devient le moteur essentiel du fonctionnement des plantes. Les pratiques de gestion des vergers, telles que le système de conduite, la densité et la disposition des arbres, sont conçues pour maximiser le processus de photosynthèse en augmentant l'exposition des feuilles au PAR. Plusieurs études, dont celles menées par Varlet-Granchet et Palmer *et al.* (1989), Ghislain Gosse *et al.* (1986), Flore et Lakso (1989) et Palmer *et al.* (2002), ont clairement établi une corrélation significative entre la production de matière sèche des cultures et la quantité de lumière PAR interceptée.

Concernant les vergers, et notamment le pommier, une étude remarquable a été réalisée par Robinson et Lakso en 1991. Ils ont focalisé leur recherche sur la comparaison de quatre méthodes de gestion de vergers, en évaluant les variétés de pommes 'Empire' et

'Delicious' en tant que cultivars de test, en se basant sur la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif interceptée. Les quatre systèmes étaient les suivants : « Slender spindle » sur porte-greffe M.9 (SS/M.9) avec des densités de 1957 et 1495 arbres/ha pour 'Empire' et 'Delicious', respectivement ; « Y-trellis » sur porte-greffe M.26 (Y/M.26) avec des densités de 1283 et 961 arbres/ha ; « Central Leader » sur un interstade M.9 et un porte-greffe MM.111 (CL/9/111) avec des densités de 961 et 598 arbres/ha ; et « Central Leader » sur porte-greffe M.7a (CL/M.7) avec des densités de 450 et 348 arbres/ha (**Figure 1**).

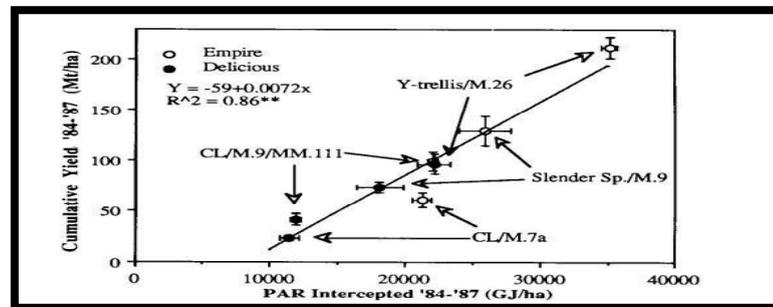


Figure 1 : Corrélation entre le rendement cumulé et le PAR interceptée pour les pommiers « Empire » et « Delicious » dans quatre systèmes de vergers différents (Robinson et Lakso, 1991)

Les résultats mettent en évidence une corrélation significative entre la quantité cumulée de lumière photosynthétiquement active (PAR) interceptée, le rendement global sur la période de quatre ans examinée et la conduite du verger. Ces résultats suggèrent une influence notable de l'absorption de PAR sur la productivité, soulignant ainsi l'importance cruciale de la lumière dans le processus de rendement.

D'autres auteurs ont également exploré la capacité maximale d'interception lumineuse qu'un système de plantation peut atteindre. Une étude menée par J.W Palmer *et al.* (2002) a examiné et quantifié le pourcentage de lumière intercepté par trois cultivars distincts sur une période de 270 jours, à partir de la septième année de culture et pour des densités allant de 1190 à 2198 arbres par hectare. Les résultats ont révélé une interception lumineuse caractérisée par une augmentation rapide jusqu'à atteindre un plateau maximal de 45 à 60 %, dépendant du cultivar, après l'épanouissement des feuilles au printemps (**Figure 2.1**). Ensuite, la valeur reste relativement constante pendant la majeure partie de la saison de croissance. Les chercheurs ont poussé l'analyse en extrapolant la relation entre l'interception lumineuse et le rendement, avançant l'idée d'une production théorique pouvant atteindre jusqu'à 169 tonnes par hectare en cas d'interception lumineuse de l'ordre de 90 % (**Figure 2.2**).

Les résultats présentés révèlent une corrélation significative entre la quantité de lumière interceptée et le rendement en fruits, ce qui concorde avec les conclusions des études précédemment abordées.

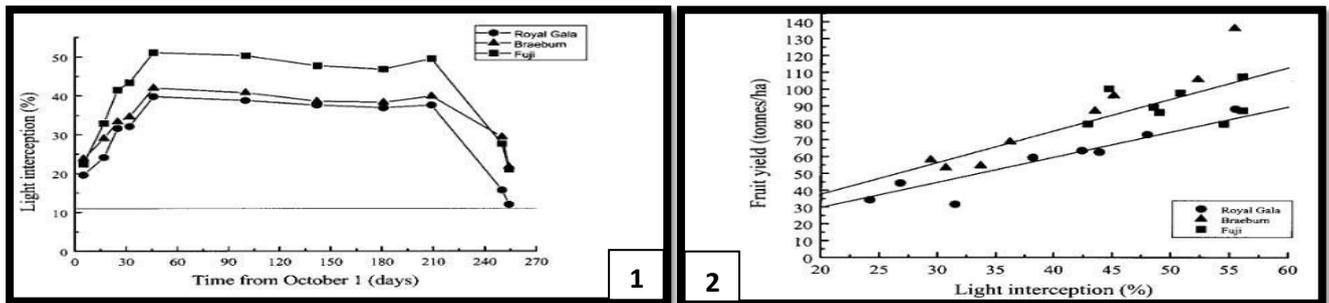


Figure 2 : (1) Moyenne de l'interception lumineuse sur trois cultivars greffés sur porte-greffe M.9 pendant 270 jours. (2) Relation entre le rendement en fruits récoltés et l'interception lumineuse en milieu de saison pour trois cultivars greffés sur porte-greffe M.9. La première ligne de régression représente la variété 'Royal Gala', tandis que la deuxième ligne représente les variétés 'Braeburn' et 'Fuji' (J.W Palmer *et al.*, 2002).

La synthèse de ces études dévoile des implications de premier plan pour la gestion des vergers de pommiers. Ces résultats suggèrent que la maximisation de l'interception lumineuse constitue une stratégie clé en vue d'optimiser la productivité des cultures fruitières. En ajustant, et en améliorant les pratiques de conduite et de plantation pour favoriser une distribution lumineuse plus homogène au sein du feuillage, on pourrait stimuler une activité photosynthétique accrue et, par conséquent, améliorer la production de matière sèche. Cette approche pourrait conduire à des rendements plus élevés. Cependant, dans le cadre de la gestion de la lumière dans les vergers, il est crucial de prendre en compte la photoinhibition. Ce phénomène survient lorsque l'excès de lumière diminue l'efficacité de la photosynthèse, soulignant ainsi l'importance de réguler soigneusement l'exposition des cultures à la lumière.

3 – ETUDES DE NOUVEAUX VERGERS BIDIMENSIONNELS

A – RENAISSANCE DE SYSTEMES PALISSEES

Dans la recherche constante d'amélioration des rendements agricoles, l'attention s'est portée ces dernières années sur les formes palissées ou murs fruitiers. Bien que vantées pour leurs avantages par Alain Masseron en 2002 sur une gestion facilitée et autrefois adoptées par certains producteurs, ces formations impliquaient des inconvénients, notamment un processus de formation s'étalant sur plusieurs années, nécessitant la supervision attentive

d'arboriculteurs spécialisés. Peu à peu, ces pratiques ont été délaissées au profit de méthodes plus rentables.

Cependant, une reconsidération des pratiques traditionnelles émerge, avec un intérêt renouvelé pour ces formes palissées. L'amélioration de la qualité des plants et les avancées dans la gestion des vergers, notamment avec les techniques de greffage, permettant de greffer deux greffons sur un même porte-greffe avec Ypsilon® de Gradilis, ont permis de résoudre les défis associés à ces systèmes. Les formes palissées, notamment avec le double axe, regagnent en popularité en Italie sous la marque "Bibaum®", déposée en 2007 (Laurent Roche, 2016).

B – VERGERS BIDIMENSIONNELS

Au cours des années, les recherches se sont intensifiées, notamment avec une étude néo-zélandaise qui débute en 2013 (Tustin *et al.*, 2018). Leur objectif était d'améliorer l'efficacité des productions arboricoles, en se concentrant sur les structures palissées. Leur approche novatrice a donné naissance à des systèmes "bidimensionnels" ou "cordons plats". Dans ce système, chaque arbre présente deux cordons opposés, soutenant cinq tiges fruitières verticales espacées de 30 cm, s'étendant jusqu'à 3 à 3,5 mètres de hauteur (**Figure 3.1**). Les arbres sont plantés à 3 mètres les uns des autres, créant ainsi un mur vertical étroit de moins de 50 cm de large. Cette approche novatrice remplace la densité traditionnelle d'arbres par hectare par celle de tiges par hectare, réduisant ainsi les densités de plantation tout en améliorant l'efficacité du travail et en réduisant les coûts de main-d'œuvre.

La première phase de leur étude a été dédiée à l'évaluation de l'interception lumineuse de deux systèmes en cordon, plantés à différentes distances entre les rangées (1,5 m et 2 m), comparativement à un système témoin de type « Tall Spindle » pour la variété 'Gala'. Cette évaluation a été entreprise à partir de la troisième année après la plantation.

Dans la continuité de leur recherche sur l'interception lumineuse, les chercheurs ont entrepris une seconde phase d'expérimentation. Les chercheurs ont lancé une seconde expérience visant à développer un deuxième prototype de cordons plats. L'objectif de ce nouveau prototype était de créer une orientation en forme de "V", avec des cordons inclinés d'environ 10 à 15 degrés par rapport à l'horizontale, ce qui a entraîné une augmentation du nombre total de rameaux fructifères par plante, passant de 10 à 12. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que cette configuration en "V", combinée à une augmentation du nombre de

rameaux fructifères, augmenterait l'interception potentielle de la lumière par rapport au premier prototype.

Dans cette seconde phase, l'objectif était de comparer l'interception lumineuse entre le premier prototype de cordons plats et le nouveau prototype, tout en incluant un système témoin de type « Tall Spindle ». Pour cette expérience, la variété 'Scifresh', greffée sur le porte-greffe 'M.9', a été utilisée et l'analyse a été réalisée pendant la deuxième année de culture.

Les résultats (**Figure 3.2**) ont révélé une interception lumineuse maximale de 45 % à la fin de l'automne dans les rangées d'allées à 1,5 m d'espacement. À cette distance, aucune différence d'interception lumineuse n'a été observée entre les configurations verticales (noté Vt) et en forme de V (noté Ve) pour les systèmes de plantation de "Scifresh". Cependant, l'interception de la lumière était significativement plus élevée à 1,5 m qu'à 2 m à partir de fin novembre. Dans les rangées avec un espacement de 2 m, la configuration en V présentait une interception lumineuse significativement supérieure à la configuration verticale à la fin de l'automne. En comparaison, le système « Tall Spindle » avait une interception lumineuse de 31 % à la fin de l'automne de la deuxième année après la plantation, démontrant une performance inférieure aux systèmes de plantation bidimensionnels.

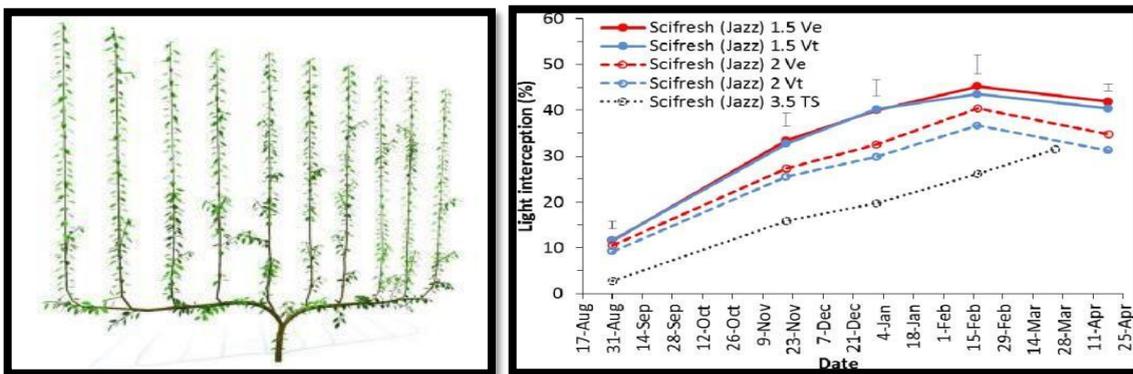


Figure 3 : (1) Schéma d'arbre fruitier à cordon plat, avec deux cordons opposés de 1,5 mètre. Chaque cordon porte cinq tiges fruitières verticales, espacées de 30 cm, s'étendant jusqu'à 3-3,5 mètres de hauteur. (2) Représentation des modèles saisonniers d'interception lumineuse de la canopée pour les pommiers 'Scifresh' sur porte-greffe 'M9' au cours de la deuxième année après la plantation. Les arbres étaient formés en configurations verticales (Vt) ou en V (Ve) plantés à des espacements d'allées de 1,5 m ou 2 m, et comparés à un système témoin « Tall Spindle » (TS) planté à 3,5 m entre les rangées et 1,5 m entre les arbres (S. Tustin *et al.*, 2018).

En conclusion, ce projet de recherche dévoile des résultats prometteurs pour les nouveaux systèmes de plantation bidimensionnels dédiés aux pommiers. Bien qu'il soit actuellement prématuré de tirer des conclusions définitives sur leur potentiel à long terme, les premières observations au cours des premières années du verger suggèrent des performances qui pourraient rivaliser, voire dépasser, celles des systèmes de plantation intensifs établis depuis plus longtemps.

4 – EMERGENCE DE NOUVEAUX OUTILS : MODELISATION

La modélisation en biologie, en complément des méthodes expérimentales, permet d'identifier les paramètres essentiels des systèmes biologiques et d'anticiper leur évolution, offrant ainsi une perspective unificatrice dans divers domaines. Les modèles de simulation agricole sont devenus incontournables pour leur capacité à appréhender la complexité des problèmes, en grande partie grâce à l'amélioration des capacités informatiques (Oriade et Dillon, 1997). Cette approche offre une alternative précieuse aux expérimentations physiques coûteuses, permettant d'anticiper les changements futurs, d'évaluer des stratégies et d'optimiser les résultats dans des conditions virtuelles contrôlées, offrant ainsi des perspectives précieuses pour la prise de décision dans divers domaines biologiques.

Dans le domaine de la gestion des vergers de pommiers, les modèles de simulation jouent un rôle crucial en évaluant les impacts sur le rendement et la rentabilité des systèmes alternatifs, nécessitant une intégration des aspects biologiques et économiques pour des simulations significatives. Les études architecturales en arboriculture, notamment celles de Lauri (2002) et Costes *et al.* (2006), ont souligné l'importance de l'architecture des arbres fruitiers dans la distribution du feuillage et l'interception de la lumière. Parallèlement, les modèles biomécaniques, comme ceux étudiés par Ancelin *et al.* (2004) et Taylor-Hell (2005), ont approfondi notre compréhension de la dynamique de la structure de l'arbre, offrant des perspectives pour une gestion efficace des vergers.

Au fil des années, les avancées dans le domaine de la modélisation ont permis une simulation exhaustive du développement des arbres fruitiers, notamment des pommiers, grâce à des modèles innovants comme MAppleT (Costes *et al.*, 2008). Ces modèles intègrent la topologie et la géométrie des pommiers à travers divers systèmes, générant des maquettes 3D illustrant l'évolution de leur forme au fil du temps. Parallèlement, des modèles sophistiqués en lien avec la lumière comme VegeSTAR (INRAE, 2009) et CARIBU (Chelle *et al.*, 2004) ont été développés pour étudier respectivement les interactions lumineuses et le transfert radiatif de la lumière à travers le feuillage des plantes. L'utilisation de ces modèles permet une

exploration détaillée de la variabilité spatiale de la lumière dans les houppiers, enrichissant notre compréhension et fournissant des données précieuses pour la recherche et la gestion des cultures.

5 – OBJECTIFS

La mise en place d'un verger en "2D" représenterait une approche innovante pour améliorer la production, la rentabilité et réduire la charge de travail. Afin de vérifier la pertinence d'un verger en deux dimensions, un projet a été initié en 2021 par le GRCETA de Basse Durance, le CITFL de Lanxade, le site de la Morinière et l'UMR PIAF de Clermont-Ferrand. Ce projet se divise en quatre actions : la conception et la gestion du verger en 2D, l'évaluation de l'impact social sur la main-d'œuvre, la mesure des incidences sur le climat, et l'évaluation environnementale, notamment en termes de réduction des intrants pour la protection et l'éclaircissage du verger. Ce travail s'inscrit dans l'action trois, axée sur l'évaluation de l'impact du verger 2D sur le microclimat, avec un intérêt particulier pour l'interception lumineuse. À cette fin, une analyse à travers le logiciel de modélisation "VegeSTAR4" a été entreprise.

Les objectifs généraux de cette étude consistaient à utiliser le modèle VegeSTAR4 pour évaluer la sensibilité de l'interception lumineuse en fonction de la configuration structurelle des pommiers et du verger. Tout d'abord, le premier objectif était de reconstruire en trois dimensions les pommiers à partir des données collectées sur le terrain. Ensuite, le deuxième objectif consistait à valider le modèle après avoir lancé les simulations en comparant les résultats du modèle aux mesures *in situ*. Enfin, le troisième objectif portait sur l'analyse de la sensibilité de la quantité de lumière interceptée, en prenant en compte diverses caractéristiques structurelles du verger, telles que la structure des arbres, les distances entre les rangs et la hauteur des arbres dans les rangs (**Figure 4**).

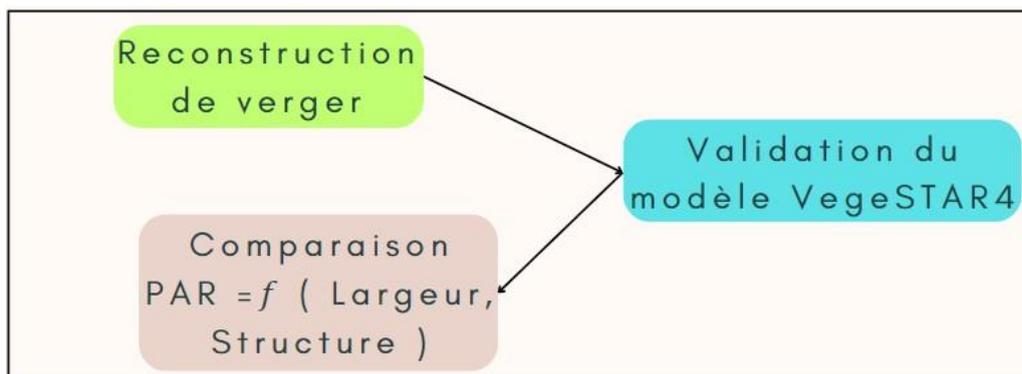


Figure 4 : Représentation graphique des trois objectifs clés abordés dans le cadre de cette étude.

III - MATERIEL & METHODES

1 – RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE DES POMMIERS

A – VEGESTAR4

Le logiciel VegeSTAR4 développé au sein de l'UMR PIAF, modélise l'architecture de plantes en trois dimensions, et permet de calculer leur capacité d'interception de la lumière. Les plantes sont décomposées en une collection d'organes, chacun pouvant être décrit par des formes géométriques basiques telles que des polygones, des ellipses, des cylindres, des cônes et des sphères. De plus, les organes peuvent être dotés de couleurs, définies par le code couleur RVB, facilitant ainsi leur identification dans l'interface du logiciel.

Les données d'entrée pour VegeSTAR4 se présentent sous deux formats distincts : les fichiers «.VGG » et les fichiers « .VGM ». Les fichiers au format VGX sont structurés en colonnes, avec pour première ligne une série de paramètres (**Tableau 2**) :

- Obj : forme de l'objet représentée par un code sous la forme d'un nombre entier,
- EchX, EchY, EchZ : paramètres de mise à l'échelle de l'objet,
- TransX, TransY, TransZ : coordonnées de l'objet dans le repère de la scène,
- RotX, RotY, RotZ : orientation de l'objet (angles d'Euler),
- R, G, B : couleur de l'objet.

Tableau 2 : Extrait d'un fichier d'entrée VGX. L'objet numéro onze fait appel à une forme de polygone ayant pour but de modéliser une feuille.

Obj	TransX	TransY	TransZ	EchX	EchY	EchZ	RotX	RotY	RotZ	R	G	B
11	51.0728	-19.00774	-110	5	5	5	0	0	0	250	0	0

Les fichiers en format VGM regroupent toutes les informations relatives à un ensemble. Par exemple, toutes les formes constituant la charpente de l'arbre sont répertoriées dans ce type de fichier, chaque ligne représentant un objet composant cette charpente.

Les fichiers au format «.VGM» agrègent les données des fichiers «.VGX», visant à regrouper l'ensemble des structures pour la reconstitution du verger. Ces fichiers incluent ainsi les données des fichiers «.VGX» qui représentent la charpente et le feuillage de l'arbre, ainsi que tout autre élément pertinent pour la reconstruction du verger. De plus, après l'appel du fichier «.VGX», de nouvelles coordonnées X, Y et Z peuvent être fournies pour translater la structure respective dans le repère de VegeSTAR4. C'est à cette endroit que seront

renseignées les coordonnées des arbres simulées dans la partie suivante, lors de la reconstitution du verger (**Figure 5**)

```
C:\Users\XXXX\XXXXX\BiAxe\VGX\Arbre1_Charpente.vgx,-64,32.395,-11.3  
C:\Users\XXXX\XXXXX\BiAxe\VGX\Arbre1_Feuillage.vgx,-64,32.395,-11.3  
C:\Users\XXXX\XXXXX\BiAxe\VGX\Arbre2_Charpente.vgx,56.22,0.316,-10.45  
C:\Users\XXXX\XXXXX\BiAxe\VGX\Arbre2_Feuillage.vgx,56.224,0.316,-10.454
```

Figure 5 : Extrait d'un fichier au format «.VGM », intégrant les fichiers «.VGX» correspondant aux arbres un et deux, préalablement digitalisés, et les disposant à leurs emplacements respectifs dans VegeSTAR4.

Concernant l'analyse de l'interception de la lumière, VegeSTAR4 considère la surface des feuilles depuis la perspective d'une source de lumière donnée, comme la direction du soleil par exemple. Cette surface éclairée par la source de lumière, exprimée en centimètre carré, représente ainsi la portion de feuillage interceptant la lumière. Cette évaluation est réalisée en comptabilisant les pixels de l'image de l'objet, visualisée selon l'orientation de la source lumineuse. Pour obtenir des résultats exhaustifs, deux simulations sont nécessaires pour capturer les deux composantes du rayonnement : l'éclairement provenant du rayonnement direct et l'éclairement provenant du rayonnement diffus. La première simulation, basée sur une séquence de la trajectoire solaire au cours d'une journée, permet de simuler le rayonnement direct. Afin d'inclure le rayonnement diffus, une deuxième simulation est requise. Dans cette seconde approche, 46 points sont généralement répartis de manière uniforme sur la voûte céleste pour simuler le rayonnement diffus. Ces points représentent les différentes directions de propagation du rayonnement diffus, permettant ainsi de capturer de manière exhaustive l'ensemble du rayonnement diffus sur le couvert végétal (**Figure 6**).

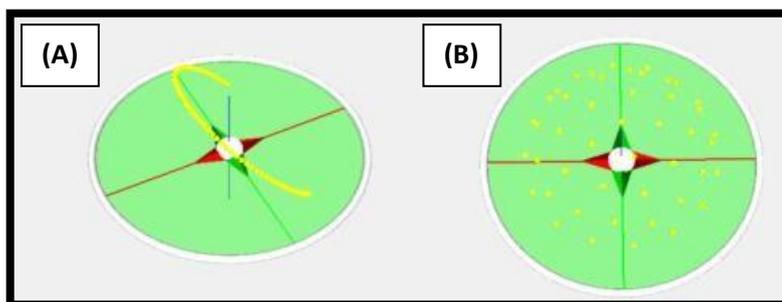


Figure 6 : (A) Visualisation de la trajectoire solaire dans VegeSTAR4 sur une période d'une journée dans le dessin d'acquérir la composante d'éclairement direct. (B) Visualisation de 46 directions dans le but d'acquérir la composante d'éclairement diffus.

B – DIGITALISATION

Note : Les premières phases du projet, comprenant la digitalisation (B) et la reconstruction des feuilles à travers des relations allométriques (C), ont été réalisées en amont de ce travail en 2022 et 2023. Ainsi, les résultats présentés dans ce rapport débiteront avec la phase de reconstitution de la disposition spatiale du verger (D).

Avant de pouvoir simuler le rayonnement au sein d'un couvert végétal dans VegeSTAR4, la première étape consistait à digitaliser le couvert végétal concerné. Cette digitalisation a été réalisée en utilisant la méthode de digitalisation sur différents arbres présents sur le site de la Morinière. La digitalisation est une technique permettant de décrire de manière précise l'architecture des plantes, ainsi que la géométrie et la topologie de tous leurs organes. Ce processus aboutit à la création d'un modèle statique de plantes virtuelles, offrant une représentation fixe de leur structure. Pour réaliser ces mesures, PiafDigit, un logiciel conçu pour faciliter l'acquisition de l'architecture tridimensionnelle, a été employé. Ce logiciel est spécifiquement conçu pour interagir avec le digitaliseur 3SPACE® FASTRAK® de la société POLHEMUS®. Il assure la configuration et la récupération des données numérisées, ainsi que la codification de l'architecture 3D des plantes, en incluant à la fois leur topologie et leur géométrie, offrant ainsi une base solide pour reproduire fidèlement les arbres.

Afin de mener à bien cette étude, deux types de pommiers ont été digitalisés: les pommiers de type "MonoAxe" et ceux de type "BiAxe". La modélisation de ces pommiers a été réalisée pour les années 2022 et 2023. Pour l'année 2022, la variété modélisée était « Gala ». Trois arbres ont été modélisés pour chaque type de structure, soit trois pour les pommiers "MonoAxe" et trois pour les pommiers "BiAxe". Pour l'année 2023, une variété différente a été sélectionnée « Swing » et uniquement la structure "MonoAxe" a été digitalisée. Au total, 4 arbres ont été modélisés pour 2023 (**Annexe 1**).

L'objectif suivant était de procéder à la reconstruction et à la modélisation de ces feuilles.

C – RELATION ALLOMETRIQUE ENTRE POUSSE ET FEUILLES

Concernant la modélisation des feuilles, celles-ci n'ont pas été intégralement mesurées mais ont été reconstruites par relations allométriques. En premier lieu, l'angle d'insertion du pétiole autour de la pousse a été enregistré. De même, l'orientation du limbe de la feuille, englobant à la fois l'angle d'élévation et d'inclinaison, a été prise en compte. Ces données ont

été obtenues par la numérisation des points d'insertion des feuilles, permettant d'obtenir leur disposition spatiale sur les différentes pousses des branches.

La reconstruction des feuilles a été réalisée en tenant compte de divers aspects cruciaux de leur structure afin d'établir des relations allométriques entre les pousses et les feuilles présentes sur le pommier. La première étape a été de distinguer les différentes pousses présentes sur les pommiers, qui peuvent être classées en plusieurs types : - Les pousses de bourse, sans fruit (Ba) ou avec fruits (Bf) - Les pousses provenant de pousse de bourse, courtes (Pc, mesurant moins de 5 cm) ou longues (Pl) - Les pousses végétatives, courtes (Vc, mesurant moins de 5 cm) ou longues (Vl)

Les relations allométriques ont été déterminées pour chaque type de pousse, permettant ainsi d'estimer des paramètres essentiels tels que la surface foliaire totale d'une branche et le nombre de feuilles en fonction de la longueur de la pousse concernée. En effet, la surface foliaire totale a été estimée en fonction de la longueur de la pousse. Le nombre de feuilles a également été estimé en fonction de cette même longueur. De plus, la surface d'une feuille individuelle a été évaluée en fonction du carré de la longueur foliaire, tandis que la largeur foliaire a été corrélée à la longueur foliaire.

Ce processus a permis de représenter la disposition et la morphologie des feuilles sur les différentes pousses des arbres, telles qu'elles se trouvent dans la nature (**Annexe 2**).

La reconstruction de la structure végétale et l'établissement des relations allométriques entre les feuilles et les différentes pousses ont été effectués pour chaque structure et pour les années 2022 et 2023.

D - RECONSTITUTION DE LA DISPOSITION SPATIALE DU VERGER

Après la reconstruction de la charpente et du feuillage des arbres, la phase suivante consistait à repositionner les arbres dans un verger. Cependant, avant de pouvoir procéder à cette reconstruction, il a été nécessaire d'adapter le repère orthonormé pour qu'il corresponde à nos besoins spécifiques avec VegeSTAR4. Cette adaptation a impliqué la translation du repère, afin de garantir que les axes de coordonnées reflètent correctement l'orientation géographique du verger et la disposition des arbres dans l'espace. L'axe des ordonnées (x) est orienté vers le nord, l'axe des abscisses (y) indique l'est, et l'axe vertical (z) est donc dirigé vers le bas. Cette configuration nous a fourni un cadre de référence cohérent pour placer les arbres dans le verger en fonction de leur position géographique et de leur orientation.

D.1 - OBTENTION DES DISTANCES INTRARANG

L'obtention des distances intrarang a été réalisée en utilisant les coordonnées X, Y et Z de la base des arbres collectées au moment de la digitalisation des arbres. Pour les arbres de type "MonoAxe", une seule mesure a été effectuée, tandis que pour les arbres de type "BiAxe", les bases ont été mesurées deux fois. En se basant sur ces données, il a été possible de calculer la distance intra-rang entre les différents arbres, permettant ainsi d'obtenir une moyenne de distance pour chaque configuration, que ce soit MonoAxe pour les années 2022 et 2023, ou BiAxe pour 2022. Cette distance a été déterminée en utilisant une formule dérivée du théorème de Pythagore appliquée dans un espace tridimensionnel :

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Cette expression permet de calculer la distance entre deux points dans l'espace tridimensionnel. Les termes x_1 , y_1 et z_1 représentent les coordonnées du premier point, correspondant au premier arbre, tandis que x_2 , y_2 et z_2 représentent les coordonnées du deuxième point, correspondant au deuxième arbre.

D.2 – ORIENTATION DES ARBRES

Une fois la distance moyenne obtenue, le second objectif était de calculer l'orientation des arbres selon l'axe Nord-Sud. Cette tâche a été réalisée à l'aide d'une formule trigonométrique. En collectant les coordonnées verticales (axe des ordonnées) de deux arbres donnés, notées x_1 et x_2 , la formule suivante a été appliquée :

$$Angle = \cos^{-1}\left(\frac{x_1 - x_2}{DistanceIntraRang}\right)$$

Cette méthode a permis de calculer l'angle en degrés entre la direction Sud-Nord et l'axe formé par les deux arbres considérés. Grâce à cette approche, une mesure précise de l'orientation Sud-Nord des arbres dans le verger a été obtenue. Il est à noter que cette procédure a été appliquée à chaque paire d'arbres digitalisée dans le verger, permettant ainsi d'obtenir une moyenne de cet angle pour l'ensemble des arbres.

D.3 – RECONSTRUCTION DU VERGER

Après avoir déterminé les moyennes de l'angle d'orientation et de la distance intra-rang entre les arbres dans le verger, il a été possible de procéder à la génération de nouvelles positions pour les arbres « fictifs » suivant afin de compléter les rangées existantes. Cette

étape cruciale a été réalisée en utilisant l'un des arbres digitalisés comme référence, sur lequel des formules spécifiques ont été appliquées pour calculer les coordonnées des arbres suivants. Pour obtenir la coordonnée X du prochain arbre à placer, la formule suivante a été utilisée :

$$X2 = X1 + \cos(\text{MoyenneAngleOrientation}) \times \text{MoyenneDistanceIntraRang}$$

Ici, X1 représente la coordonnée X de l'arbre de référence, la moyenne de l'angle d'orientation est exprimée en radians et la moyenne de la distance intra-rangée est en unités de mesure appropriée. Cette formule a permis de calculer la coordonnée X2 du prochain arbre à simuler, en tenant compte à la fois de l'orientation moyenne des arbres et de leur espacement moyen.

De manière similaire, pour obtenir la coordonnée Y du prochain arbre simulé, la formule suivante a été utilisée :

$$Y2 = Y1 + \sin(\text{MoyenneAngleOrientation}) \times \text{MoyenneDistanceIntraRang}$$

Ici, Y1 représente la coordonnée Y de l'arbre de référence. En appliquant cette formule, il a été possible de calculer la coordonnée Y2 du prochain arbre simulé, en tenant compte de l'angle moyen d'orientation et de la distance intra-rangée moyenne.

Pour simuler les coordonnées Z des arbres fictifs, une valeur a été choisie aléatoirement entre -1 et -10 centimètres afin de représenter la légère dénivellation que l'on peut rencontrer sur le terrain.

Ces calculs ont permis de reproduire la répartition spatiale des arbres dans le verger, assurant ainsi leur positionnement réaliste en fonction de leur orientation moyenne et de leur espacement moyen entre les rangées. Au total, neuf arbres ont été placés dans cette première rangée.

Après avoir établi les coordonnées de la première rangée, l'étape suivante consistait à créer les rangées adjacentes. Pour les vergers de type « BiAxe » et « MonoAxe », les distances inter-rangs étaient respectivement de 400 centimètres et 350 centimètres. En intégrant ces informations aux données et calculs précédents, il a été possible de générer des rangées supplémentaires en déplaçant les arbres vers l'est et vers l'ouest par rapport à la première rangée en tenant compte de la distance inter rang.

2 – CONVERSION DES SORTIES VEGESTAR4 EN RAYONNEMENT PAR

A – CONFIGURATION DES CAPTEURS VIRTUELS DANS VEGESTAR4

Après avoir reconstitué le verger dans VegeSTAR4, la phase subséquente impliquait la validation du modèle VegeSTAR4. Cette validation s'effectuait en confrontant les résultats générés par le modèle avec les données réelles captées sur le terrain à l'aide de capteurs PAR.

Pour mener à bien cette comparaison, des capteurs PAR ont été déployés dans les vergers des différents sites où les arbres ont été numérisés, à la fois en 2022 et en 2023. Plusieurs capteurs ont été positionnés à une hauteur de 1 mètre et à une distance maximale de 50 centimètres de chaque arbre et du côté ouest de la rangée digitalisée. De plus, deux capteurs ont été placés au-dessus du verger pour recueillir les données du PAR incident. En outre, un dernier capteur PAR, nommé "BF5", a été installé permettant de différencier le PAR provenant du rayonnement direct de celle du rayonnement diffus. Cette disposition a permis d'obtenir un ratio "Diffus / Global" tout au long de la journée, offrant ainsi une caractérisation plus détaillée de l'environnement lumineux dans le verger. Les valeurs de PAR ont été enregistrées toutes les 15 minutes.

Pour comparer les données générées par VegeSTAR4 avec les mesures réelles des capteurs PAR sur le terrain, une méthode spécifique a été employée dans le modèle. Sept formes polygonales de 17.5 centimètre carré ont été placées à une distance de 50 cm de la rangée principale, à 1 mètre de hauteur et du côté ouest de la rangée dans VegeSTAR4. L'objectif était d'assurer des conditions similaires à celles des capteurs réels sur le terrain afin de permettre une comparaison adéquate entre les données du modèle et celles obtenues in situ. Ces formes polygonales agissent comme des représentations virtuelles des capteurs PAR dans l'environnement simulé du modèle, permettant ainsi la comparaison des données simulées avec les données réelles.

B – CONVERSION DES DONNEES DE SURFACE EN FLUX LUMINEUX

Comme vu précédemment, les sorties du modèle VegeSTAR4 ne fournissent pas directement le rayonnement PAR transmis aux capteurs virtuels, mais la surface éclairée, en cm^2 , en fonction d'un intervalle de temps dérivé de l'éclairement du rayonnement direct et diffus. Une première étape consistée à convertir cette surface éclairée en rayonnement PAR reçu par le capteur virtuel, afin de pouvoir établir une comparaison avec les données relevées sur le terrain. Cette transformation était nécessaire pour harmoniser les métriques fournies par

le modèle avec les observations réelles, permettant ainsi une évaluation cohérente de la performance du modèle.

B.1 – CONVERSION DE LA SURFACE PROVENANT DE L'ECLAIREMENT DIRECT

Pour effectuer cette transformation de la surface en rayonnement PAR, il a été nécessaire d'utiliser les données du rayonnement incident d'une journée, obtenues par les capteurs incidents sur le terrain, ainsi que le rapport "Diffus / Global" fourni par le capteur BF5. Cette approche visait à attribuer la proportion adéquate du rayonnement PAR incident aux simulations de l'éclairage direct et diffus générées par VegeSTAR4 sur les surfaces.

La première étape consiste à déterminer la surface réellement éclairée du capteur dans VegeSTAR4. Cette surface éclairée correspond à la surface vue en fonction de l'élévation de la source lumineuse et à l'ombrage associé. Pour ces travaux, seule la surface liée à l'ombrage est intéressante. Il est donc nécessaire de diviser la surface vue par le sinus de l'élévation de la source lumineuse afin d'obtenir la surface réellement éclairée. Cette division permet de corriger l'effet de l'angle d'incidence de la lumière sur la surface. Ensuite, cette valeur est divisée par la surface totale du capteur virtuel afin d'obtenir la proportion de la surface réellement éclairée par rapport à la surface totale du capteur PAR virtuel. Pour information, en l'absence d'ombrage, la valeur associée à cette surface éclairée sera égale à 1. Cela peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Surface Eclairé}_{Direct(i)} = \frac{\text{Surface Vue}_{Direct(i)}}{\text{Sin}(el)(i)} \times \frac{1}{\text{Surface total du capteur virtuel}}$$

L'étape suivante consistait à multiplier la surface éclairée par le ratio (1 - Diffus / Global) pour obtenir, dans ce premier cas, la proportion du PAR) provenant du rayonnement direct. Ce résultat a ensuite été multiplié par le rayonnement incident au moment considéré pour obtenir le PAR transmis à nos capteurs virtuels provenant du rayonnement direct. Cela peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\text{PAR}_{Direct(i)} = \text{Rayonnement PAR Incident}(i) \times \text{Surface Eclairé}_{Direct(i)} \times \left(1 - \frac{\text{Diffus}}{\text{Global}}(i)\right)$$

B.2 – CONVERSION DE LA SURFACE PROVENANT DE L'ÉCLAIREMENT DIFFUS

La seconde partie consistait à récupérer la part du rayonnement diffus et de l'appliquer aux résultats des simulations provenant de l'éclairement du diffus de VegeSTAR4. Pour cela, la formule suivante a été utilisée :

$$\text{PAR}_{\text{Diffus}(i)} = \text{Rayonnement PAR incident}(i) \times \sum \left(\frac{\text{Surface Vue Diffus}(el) \times \text{Poids}(el)}{\text{Surface total du capteur virtuel}} \right) \times \frac{\text{Diffus}}{\text{Global}}(i)$$

La surface éclairée résultant de l'éclairement diffus ne dépend pas du pas de temps. En effet, cet éclairement diffus reste constant tout au long de la journée, ce qui signifie que la surface éclairée reste identique. Cependant, un nouveau facteur appelé "Poids" doit être pris en compte. Ce poids correspond à une valeur qui caractérise l'éclairement provenant d'une direction donnée en fonction de l'élévation du soleil. Par exemple, pour une surface éclairée identique, un éclairement provenant d'une direction avec une faible élévation solaire aura une importance plus faible que celui provenant de la même direction mais avec une élévation solaire plus importante. Les informations sur le poids de cette élévation sont issues des recherches menées par Liu et Jordan en 1960.

Pour la suite du processus, nous devons considérer la somme de toutes les surfaces éclairées. À chaque pas de temps, le PAR transmis est constitué à la fois de l'éclairement direct provenant d'une direction donnée et de la somme de l'éclairement diffus provenant de 46 directions différentes. Cette somme de l'éclairement diffus est ensuite multipliée par le ratio "Diffus / Global" ainsi que par le rayonnement incident au moment considéré. Cette procédure permet d'obtenir une estimation précise du PAR transmis à ce moment précis.

Pour conclure, l'estimation du PAR transmis total nécessite la sommation du PAR direct et du PAR diffus à chaque pas de temps. Cette approche nous permet de convertir toutes les surfaces simulées dans le modèle en rayonnement PAR, en tenant compte à la fois de la composante directe et de la composante diffuse de l'éclairement solaire.

IV - RESULTATS

1 – RECONSTRUCTION DU VERGER

L'objectif initial de cette étude était la reconstruction précise du verger. À partir des données recueillies, notamment les coordonnées X, Y et Z des arbres digitalisés constituant les rangées et en simulant la position des arbres suivants, il a été possible d'élaborer un plan dans un tableur. En utilisant ces informations et en effectuant un tirage aléatoire parmi les arbres digitalisés, il a été possible de reconstruire avec exactitude quatre rangées, chacune comprenant neuf arbres, offrant ainsi une représentation fidèle du verger pour chaque année et chaque structure (**Figure 7**).

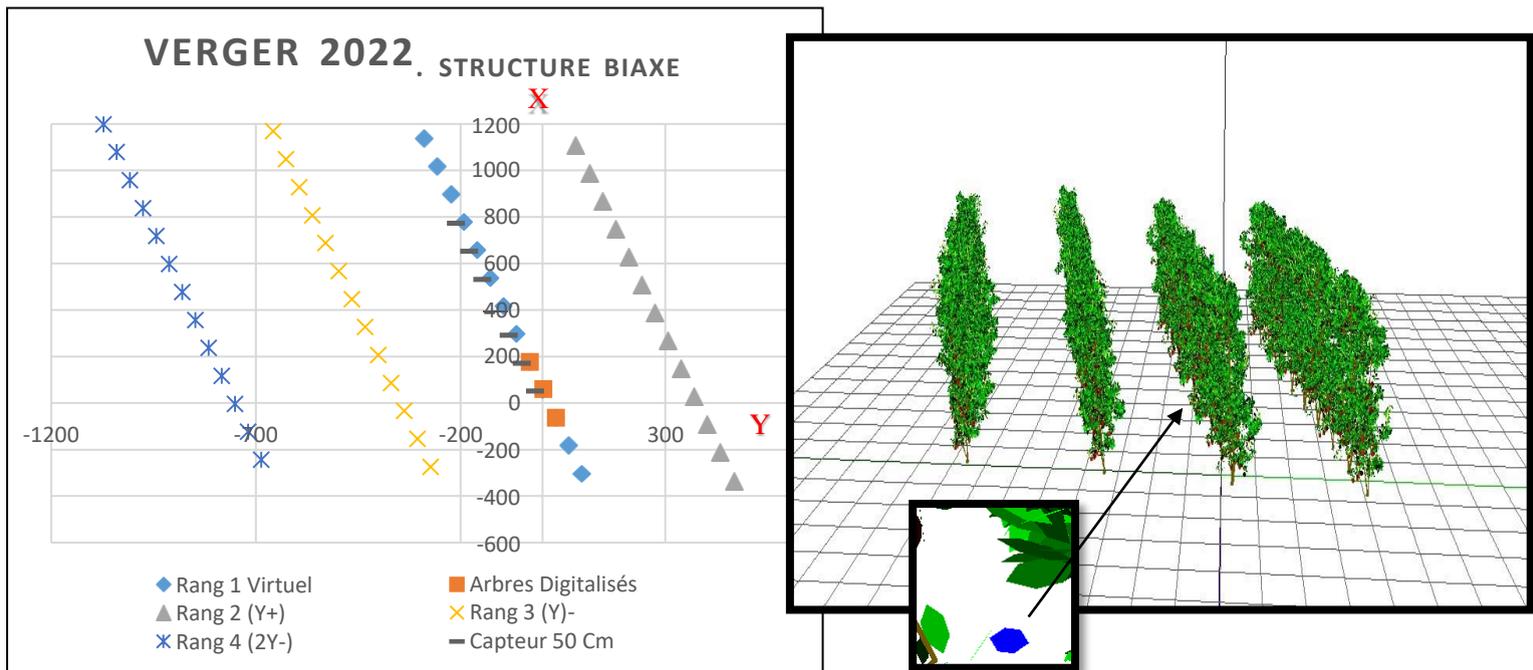


Figure 7 : (A) Représentation des coordonnées des arbres dans le plan du verger pour la structure BiAxe de l'année 2022. L'axe des abscisses (Y) indique la direction Ouest-Est, tandis que l'axe des ordonnées (X) indique la direction Nord-Sud. La distance intra-rang pour ce verger est en moyenne de 124 centimètres, la distance inter-rang est de 350 centimètres l'angle d'orientation Nord-Sud entre les arbres est en moyenne de 14,98°. **(B)** Représentation du verger dans VegeSTAR4 pour la structure BiAxe de l'année 2022. Les capteurs virtuels (polygones bleus) ont été positionnés à 50 cm à l'ouest de la deuxième rangée, en partant de la droite.

Les plans du verger pour la structure MonoAxe pour l'année 2022 sont disponible en annexe (**Annexe 3**)

2 – VALIDATION DU MODELE

La validation du modèle VegeSTAR4 constitue une étape cruciale dans son utilisation. Le second objectif était de confronter les sorties du modèle, une fois les surfaces éclairées transformées en rayonnement PAR transmis aux capteurs virtuels, avec les observations de terrain afin d'évaluer sa précision et sa fiabilité. Cette démarche vise à garantir que le modèle reproduit fidèlement les conditions observées dans le milieu réel, assurant ainsi la validité de ses prédictions.

Par ailleurs, il est également indispensable d'identifier les paramètres sensibles du modèle qui doivent être pris en compte lors du lancement d'une simulation. Cette identification permet de comprendre comment le modèle représente et interprète les processus et les phénomènes du système.

A – COMPARAISON DONNEES CAPTEURS TERRAIN

La première étape de la validation du modèle a consisté à effectuer une simulation initiale et à comparer les résultats obtenus avec VegeSTAR4 aux données captées sur le terrain. À cet effet, en se basant sur les données disponibles, la simulation a été réalisée pour le verger de 2022 sur la journée du 2 août 2022, en prenant en compte les deux types de structures. Les résultats du rayonnement PAR transmis, issus des 7 capteurs virtuels dans VegeSTAR4, ont été comparés aux données provenant de 9 capteurs PAR pour la structure BiAxe et 8 capteurs PAR pour la structure MonoAxe. La moyenne de la somme du rayonnement PAR transmis pour l'ensemble des capteurs a été comparée. Les résultats de cette comparaison peuvent être retrouvés ci-dessous (**Figure 8**).

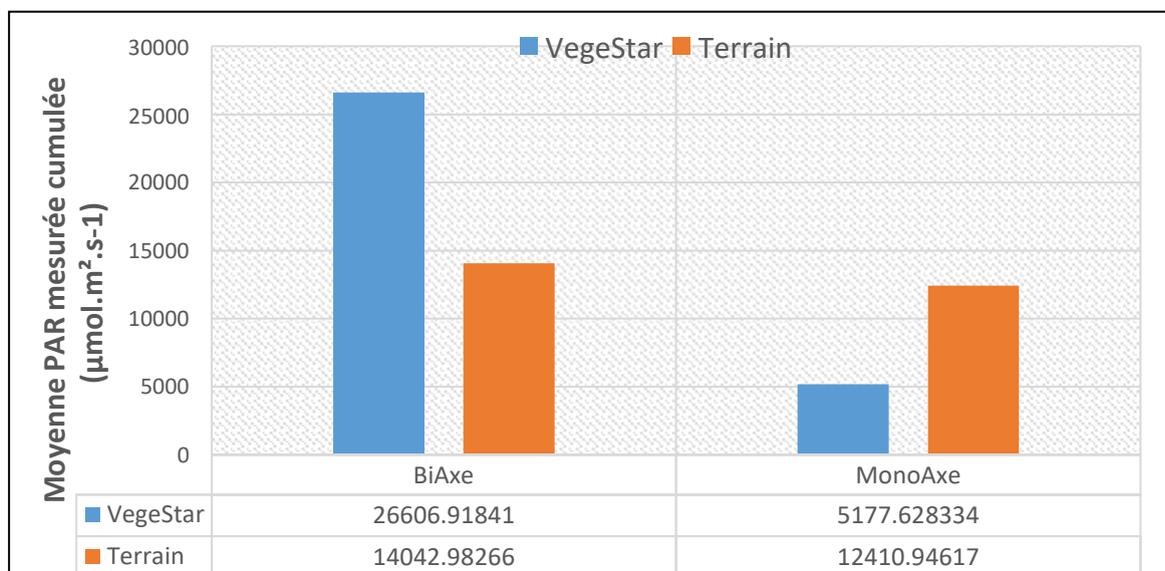


Figure 8 : Comparaison entre les résultats de VegeSTAR4 et les données terrain pour les structures BiAxe et MonoAxe le 2 août. Les résultats sont basés sur la moyenne du rayonnement PAR transmis cumulé sur la journée de tous les capteurs.

Les données révèlent qu'au cours de la journée du 2 août, en moyenne, les capteurs virtuels de VegeSTAR4 enregistrent un rayonnement transmis de 26 606 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, tandis que les capteurs du terrain pour la structure BiAxe enregistrent une valeur de 14 442 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Cette disparité représente une différence de 89% entre les résultats du modèle et les données réelles, indiquant une importante surestimation de VegeSTAR4 dans ce cas spécifique.

Pour la structure MonoAxe, les capteurs virtuels enregistrent, en moyenne, un rayonnement transmis de 5177 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, tandis que les données du terrain indiquent un rayonnement transmis de 12 410 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Cette comparaison révèle une différence de 58%, démontrant une sous-estimation par les capteurs virtuels de VegeSTAR4 par rapport aux mesures réelles du terrain pour cette configuration spécifique.

Au vu des résultats présentés par cette première simulation l'objectif suivant principal était de comprendre les raisons sous-jacentes à ces importantes différences entre les résultats du modèle et les observations sur le terrain. Pour ce faire, l'approche consistait à explorer et à tester divers paramètres dans le modèle afin d'identifier les éléments responsables de ces écarts.

B - EXPLORATION DES PARAMETRES SENSIBLES DANS VEGESTAR4

L'exploration des paramètres sensibles se concentrera sur trois variables manipulables dans le modèle VegeSTAR4. Dans un premier temps, l'effet de l'ajout d'arbres et de rangées supplémentaires dans le verger simulé sera évalué sur les résultats du modèle. Ensuite, la distance entre les capteurs virtuels et les rangées du verger sera examinée de près. Enfin, l'analyse portera sur l'effet du tirage aléatoire utilisé pour créer les rangées du verger dans VegeSTAR4. L'objectif principal est de mesurer l'incidence de ces paramètres sur la précision et la fiabilité des simulations. Les investigations portant sur les paramètres de sensibilité, présentées ci-dessous, ont été menées exclusivement pour l'année 2022, couvrant les deux types de structures, Monoaxe et Biaxe. Les données relatives au rayonnement PAR incident sont toujours issues de la journée du 2 août 2022.

B.1 – EFFET DE L’AJOUT D’ARBRES ET DE RANGEES SUPPLEMENTAIRES

Dans l'état actuel, le verger simulé dans VegeSTAR4 est composé de 36 arbres, disposés en 4 rangées avec 9 arbres par rangée. L'objectif était d'évaluer l'impact de l'ajout d'arbres et de rangées supplémentaires sur les résultats du rayonnement PAR transmis. Pour cette nouvelle configuration, il a été décidé d'ajouter 4 arbres supplémentaires par rangée et d'incorporer une rangée supplémentaire du côté Ouest. Ainsi, le verger compte désormais 65 arbres au total. Cependant, en raison des limitations techniques du modèle VegeSTAR4, qui ne pouvait pas gérer un nombre conséquent d'éléments, il n'a pas été possible de tester une configuration plus importante que 65 arbres, et par conséquent, les simulations n'auraient pas pu être lancées.

Les résultats de l'ajout d'arbres et de rangées pour la structure BiAxe sont présentés ci-dessous (**Figure 9**). Pour les résultats concernant la structure MonoAxe, ces derniers peuvent être retrouvés en Annexe (**Annexe 4**)

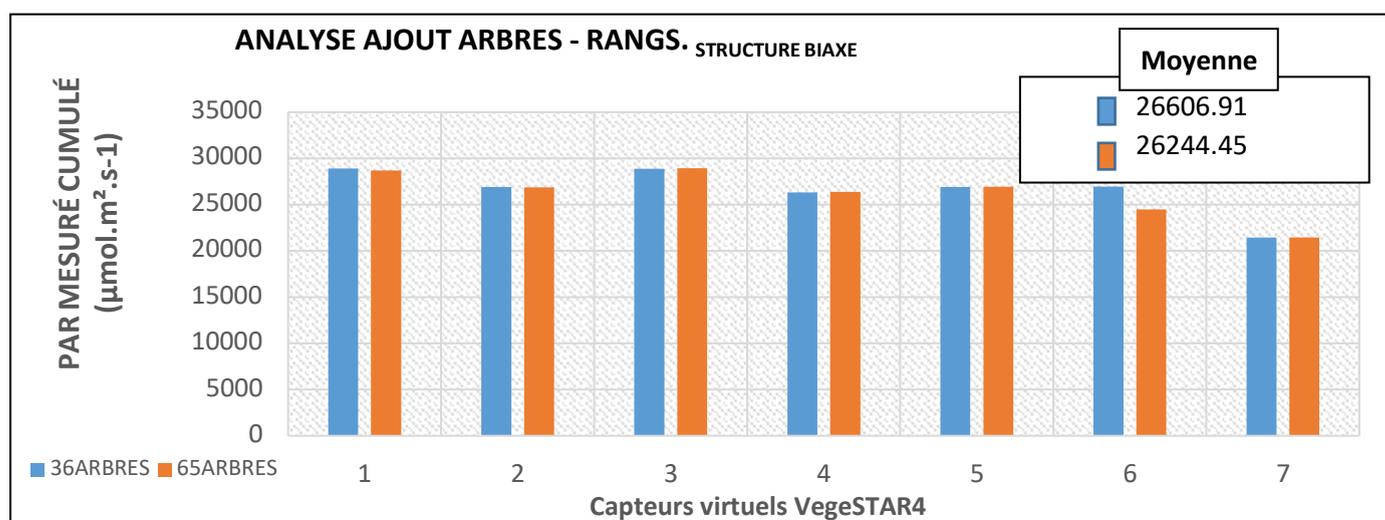


Figure 9 : Représentation graphique du PAR cumulé mesuré sur la journée du 2 août 2022 pour la structure Biaxe. Cette comparaison est effectuée entre les deux configurations du verger, 36 et 65 arbres. La moyenne correspond au PAR cumulé mesuré par l'ensemble des capteurs pour chaque configuration.

Que ce soit pour la structure BiAxe ou MonoAxe, les résultats ne révèlent aucune différence majeure entre les deux configurations de vergers, qu'il s'agisse de 36 arbres ou de 65 arbres. À l'échelle du rang, la moyenne du PAR mesuré cumulé reste similaire entre les deux configurations. Pour la structure BiAxe, la différence entre les moyennes est de 1,36% et de 2,06% pour la structure MonoAxe. Pour la majorité des capteurs, tant sur le MonoAxe que

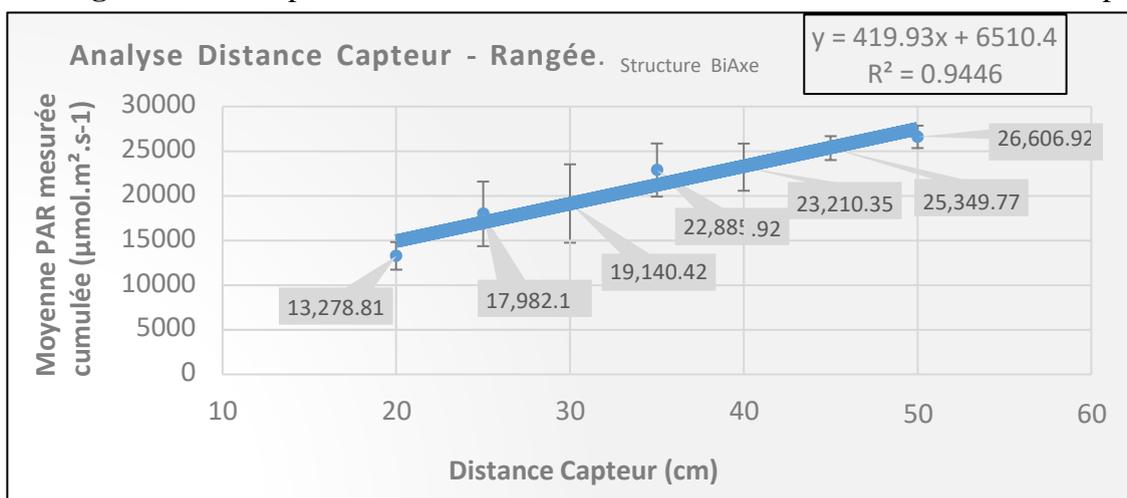
sur le BiAxe, les résultats sont comparables et aucune différence significative n'est observée entre les capteurs.

La quantité d'arbres et de rangées supplémentaires ajoutée dans le modèle VegeSTAR4 n'a pas d'impact significatif sur les sorties du modèle. Les résultats indiquant que l'ajout d'arbres n'affecte pas les sorties du modèle, les prochaines simulations seront réalisées sur l'ancienne configuration de 36 arbres. Cette décision a permis également d'éviter de surcharger VegeSTAR4 et à garantir des durées de simulation plus rapides.

B.2 - ANALYSE DE LA DISTANCE CAPTEUR-RANGÉE

Dans cette section, nous examinons les effets de la variation de la distance entre les capteurs virtuels et les rangées de vergers dans le modèle VegeSTAR4. L'objectif principal est d'évaluer comment le positionnement précis des capteurs influence les sorties du modèle. Sur le terrain, les capteurs étaient initialement placés à une distance maximale de 50 centimètres des rangées. Cependant, en raison de contraintes pratiques ou d'autres facteurs, cette distance peut varier légèrement de plusieurs centimètres. Pour mieux comprendre cette influence, six nouvelles simulations ont été réalisées en déplaçant les capteurs de 5 centimètres à chaque fois, jusqu'à ce qu'ils se rapprochent à 20 centimètres de la rangée. Étant donné que la distance maximale était de 50 cm de la rangée, il n'était pas nécessaire de tester des distances supérieures à cette valeur. Les résultats de l'analyse de la distance entre les capteurs virtuels et les rangées pour la structure BiAxe sont présentés ci-dessous (**Figure 10**). Les résultats concernant la structure MonoAxe sont disponibles en Annexe (**Annexe 5**).

Figure 10 : Comparaison des résultats obtenus avec différentes distances de capteurs



de 50 à 20 centimètres sur la structure BiAxe, en utilisant les informations relatives au rayonnement incident du 2 août 2022. Les valeurs représentent la moyenne du PAR cumulé

pour chaque capteur à différentes distances des arbres. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs de somme du rayonnement PAR cumulé pour chaque capteur."

L'analyse des résultats révèle des relations importantes entre la distance des capteurs et le PAR transmis pour les deux structures de capteurs étudiées, BiAxe et MonoAxe. Pour la structure BiAxe, une relation linéaire robuste est observée, illustrée par un coefficient de détermination (R^2) élevé de 0,94. Cette relation met en évidence une diminution progressive du PAR transmis à mesure que la distance entre les capteurs et les arbres diminue, ce qui est cohérent avec l'atténuation attendue de la lumière due au couvert végétal. En revanche, pour la structure MonoAxe, bien qu'une tendance similaire soit observée avec une diminution significative du PAR transmis à 20 et 25 centimètres, la relation linéaire est moins prononcée ($R^2 = 0,36$). On observe, à partir de 30 centimètres, la formation d'un plateau indiquant une stabilité relative du PAR transmis à des distances plus éloignées des arbres. Il est également important de noter une variabilité importante dans les mesures du PAR transmis pour des distances spécifiques des capteurs, notamment à 40, 45 et 50 centimètres, où l'écart type est plus prononcé. Il est possible que le plateau observé à partir de 30 centimètres sur la structure MonoAxe soit attribuable à l'impact prolongé du couvert végétal plus dense de cette structure. Les branches développées et la surface foliaire plus importante peuvent créer un ombrage persistant, même à des distances plus éloignées des arbres. Ainsi, malgré l'augmentation de la distance des capteurs, ces derniers pourraient continuer à être affectés par l'ombrage de la structure MonoAxe, ce qui pourrait expliquer le maintien du niveau de PAR transmis à ce seuil de distance.

En conclusion, ces résultats soulignent l'importance de considérer la distance des capteurs comme un paramètre sensible dans le modèle VegeSTAR4. Il est donc essentiel de spécifier avec précision cette valeur lors de la modélisation et de la validation du modèle, afin de garantir une représentation fidèle des conditions environnementales réelles, notamment dans le contexte de la réconciliation entre les valeurs de PAR simulées par les capteurs virtuels dans VegeSTAR4 et les valeurs observées par les capteurs sur le terrain. Après cette analyse, bien qu'il ait été initialement indiqué que les capteurs étaient positionnés au maximum à 50 centimètres, une vérification des plans du verger a montré que la distance moyenne des capteurs sur le terrain était en réalité d'environ 40 centimètres. Par conséquent, pour être aussi précis que possible, les capteurs virtuels ont été repositionnés dans VegeSTAR4 à une distance de 40 centimètres.

B.3 - ANALYSE DU TIRAGE ALEATOIRE

Le dernier paramètre de sensibilité étudié concerne le tirage aléatoire utilisé lors de la reconstruction des rangs. Pour rappel, en 2022, trois arbres de chaque type de structure, Monoaxe et Biaxe, ont été digitalisés, et l'ordre des arbres dans la rangée a été déterminé aléatoirement. Afin de tester ce paramètre, deux nouveaux tirages aléatoires ont été effectués pour comparer l'effet de la structure de l'arbre sur le rayonnement PAR transmis aux capteurs virtuels. Les résultats relatifs à la structure Biaxe sont présentés ci-dessous (**Figure 11**). Les résultats concernant la structure MonoAxe sont disponibles en annexe (**Annexe 6**).

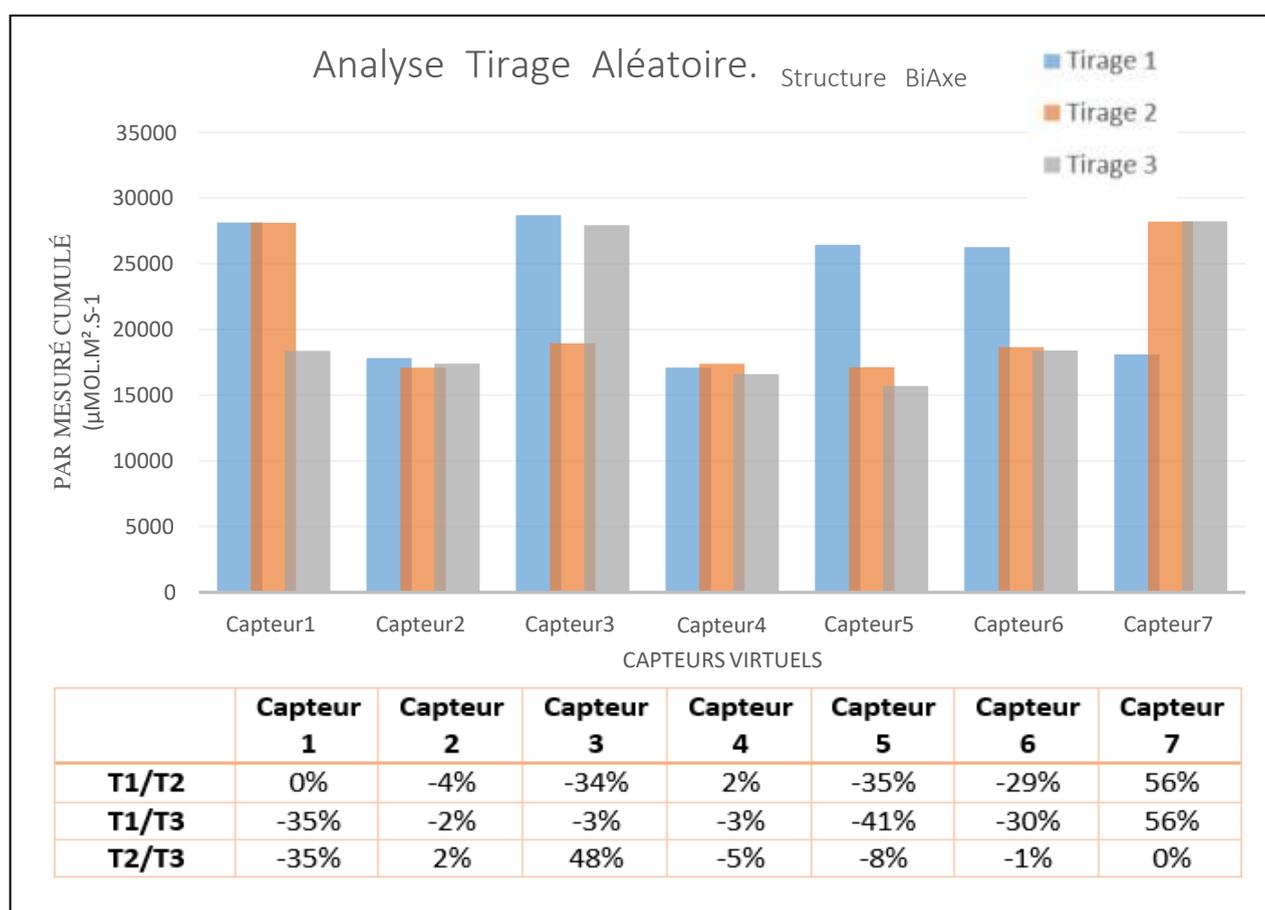


Figure 11 : Représentation graphique du PAR cumulé sur la journée du 2 août 2022 pour la structure Biaxe. Cette comparaison est effectuée entre trois tirages aléatoires parmi les arbres digitalisés lors de la reconstruction des rangs. Les pourcentages de différence pour chaque capteur, en fonction du tirage aléatoire, sont indiqués dans le tableau.

Les résultats montrent qu'à l'échelle du capteur (locale), de fortes différences sont observables pour la somme du PAR transmis sur la journée par capteur. Pour la structure Biaxe, ces différences peuvent atteindre jusqu'à 56% pour un même capteur, selon le tirage aléatoire. Cette disparité est encore plus marquée pour la structure Monoaxe, avec des écarts pouvant aller jusqu'à 958% entre deux capteurs identiques pour des tirages aléatoires différents.

Cependant, à l'échelle du rang, moyenne de la somme du rayonnement PAR transmis pour l'ensemble des capteurs, les moyennes se regroupent et aucune différence significative n'est observée entre les trois tirages ($p\text{-value} > 0,05$) et les deux types de structures BiAxe (**Figure 12**) et MonoAxe (**Annexe 7**). Cela suggère que bien qu'il y ait des variations importantes au niveau des capteurs, les effets du tirage aléatoire sont atténués à l'échelle du rang, ce qui permet de compenser les fluctuations locales.

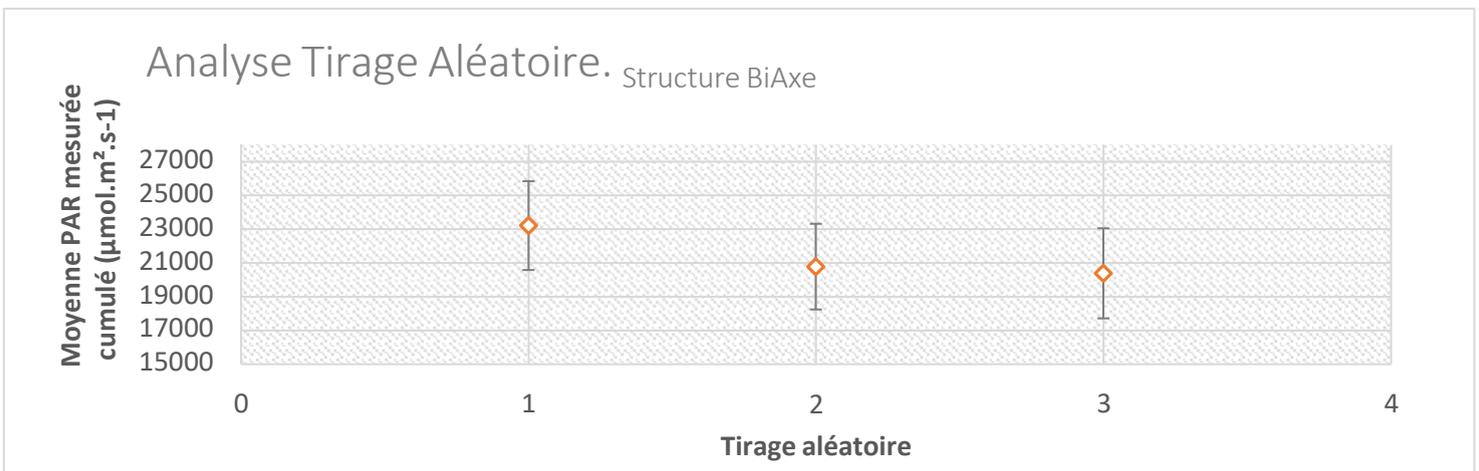


Figure 12 : Comparaison des résultats obtenus avec différents tirages aléatoires de la structure BiAxe. Les valeurs représentent la moyenne du PAR cumulé pour chaque capteur selon les différents tirages aléatoires. Les barres d'erreur indiquent l'écart type des valeurs de somme du rayonnement PAR cumulé pour chaque capteur.

Ainsi, il semble que le tirage aléatoire des arbres lors de la formation des rangées dans les sorties de VegeSTAR4 ne soit pas un paramètre sensible. Cependant, pour interpréter précisément les résultats, il est essentiel de se focaliser sur les données agrégées à l'échelle du rang complet plutôt qu'à l'échelle locale, comme implicitement réalisé lors de la comparaison des moyennes du PAR mesuré cumulé.

C – AJUSTEMENT DES PARAMETRES SENSIBLES DE VEGESTAR4

Parmi les paramètres sensibles étudiés, il apparaît que seule la distance entre le capteur et la rangée doit être prise en compte pour une analyse précise du rayonnement PAR transmis. En tenant compte de cette considération, de nouvelles simulations ont été lancées pour les journées du 2 et 3 août pour les structures BiAxe et MonoAxe. Il convient de noter qu'il n'a pas été possible d'effectuer davantage de simulations car seules ces deux journées disposaient d'informations sur le rayonnement PAR incident. Les résultats de ces simulations pour la structure BiAxe sont présentés dans la figure ci-dessous (**Figure 13**) et en annexe pour la structure MonoAxe (**Annexe 8**)

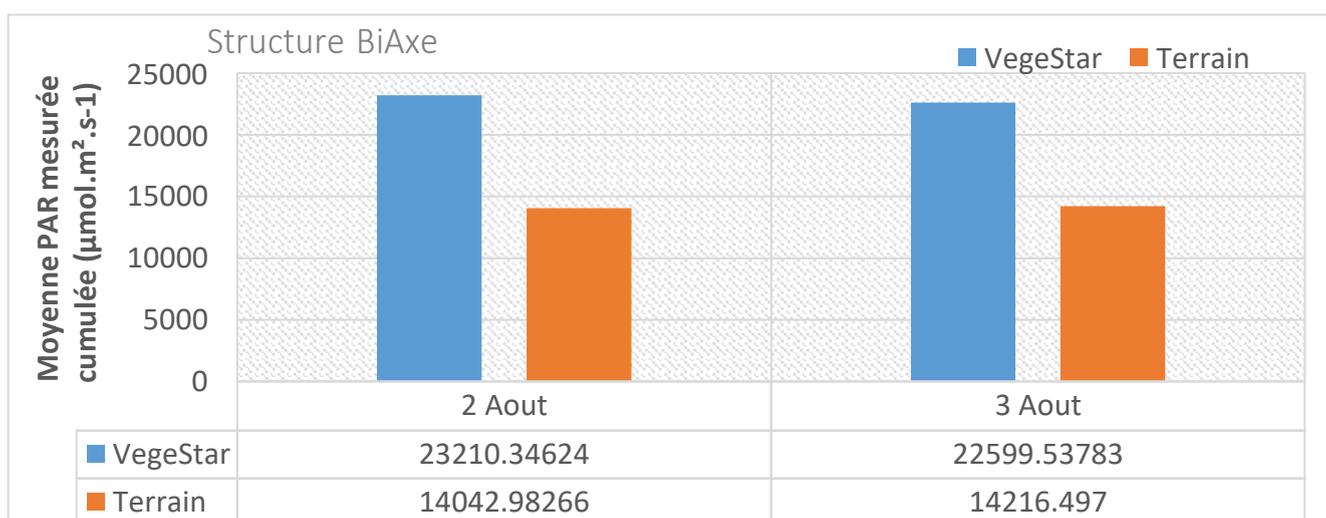


Figure 13 : Comparaison entre les résultats de VegeSTAR4 et les données terrain pour la structure BiAxe le 2 et 3 août 2022 avec des capteurs positionnés à 40 centimètres. Les résultats sont basés sur la moyenne du rayonnement PAR transmis cumulé sur la journée de tous les capteurs.

Malgré les ajustements réalisés, les résultats confirment la conclusion de la première simulation. En effet, même en rapprochant les capteurs à une distance de 40 centimètres, cela n'a pas été suffisant pour combler les fortes différences entre les résultats fournis par VegeSTAR4 et les données provenant des capteurs sur le terrain. On observe toujours une surestimation en moyenne de 62% pour la structure Biaxe et une sous-estimation de 60% pour la structure Monoaxe pour les journées du 2 et 3 août 2022.

V - DISCUSSION

1 - IMPACT DES FLUCTUATIONS LOCALES ET VALIDATION DE VEGESTAR4

La validation du modèle VegeSTAR4 demeure une entreprise complexe en raison des dissemblances avec les données observées sur le terrain. Malgré les ajustements apportés aux paramètres, le modèle reste en décalage par rapport aux observations réelles.

Cette situation peut en partie s'expliquer par la méthode de reconstruction des feuilles utilisée dans le modèle, qui repose sur des relations allométriques plutôt que sur une digitalisation précise. Les différences entre les surfaces digitalisées et celles reconstruites par relations allométriques résident dans la précision et la fidélité de la représentation. Lorsque les surfaces sont digitalisées, chaque détail est capturé de manière précise, offrant une représentation directe de la structure réelle. En revanche, lorsqu'elles sont reconstruites par relations allométriques, la méthode repose sur des modèles mathématiques qui extrapolent la forme et la structure en fonction de variables.

Bien que l'approche allométrique puisse être efficace pour estimer la structure des végétaux, elle peut entraîner des approximations qui ne rendent pas compte de tous les détails présents dans la réalité.

Une précédente étude (Sonohat *et al.*, 2005) avait déjà évoqué cette différence, dans une précédente utilisation de VegeSTAR, concernant les écarts significatifs entre les surfaces réelles (noté ici digitalisées) et reconstruites par relations allométriques à petite échelle.

(Figure 14).

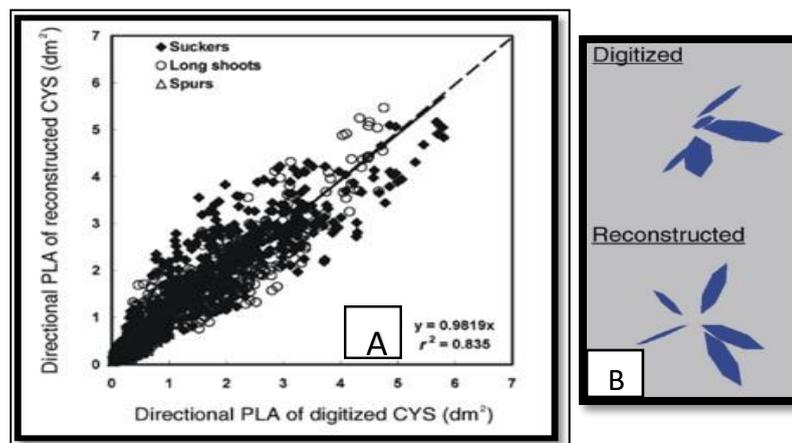


Figure 14 : Évaluation de la méthode de reconstruction des feuilles sur les pousses de l'année en cours (CYS – Current Year Shoots). (A) Surface foliaire projetée dans une direction (PLA) des CYS numérisés par rapport aux CYS reconstruits par relation allométriques (B) Comparaisons visuelles entre les maquettes numérisées et reconstruites des CYS. Source : Sonohat *et al.*, 2005.

La comparaison entre les surfaces foliaires digitalisées et reconstruites individuellement, illustrée dans la **Figure 14**, met en évidence des variations notables dans la surface foliaire projetée depuis une direction des pousses de l'année en cours. La surface foliaire projetée dans une direction désigne la surface totale des feuilles telles qu'elles apparaissent lorsqu'elles sont éclairées sous un angle spécifique. Par exemple, pour une surface digitalisée de 2 dm², la surface équivalente vue mais reconstruite peut varier entre 1 et 4 dm². Ces résultats suggèrent que la méthode de reconstruction peut générer des estimations de surface foliaire qui diffèrent considérablement de la réalité.

Dans le cadre du modèle VegeSTAR4, ces variations peuvent avoir des conséquences importantes sur la quantité de lumière interceptée par les capteurs. Dans le cas des simulations MonoAxe, des surfaces foliaires reconstruites plus importantes peuvent entraîner un recouvrement total des capteurs, réduisant ainsi la quantité de PAR transmis. En revanche, dans le cas du BiAxe, des surfaces foliaires reconstruites plus faibles par rapport à la réalité peuvent permettre à plus de lumière de passer entre les rangs, augmentant ainsi la quantité de lumière captée par les capteurs.

Ces observations suggèrent que (i) la méthode actuellement utilisée pour valider le modèle en utilisant des capteurs PAR localement n'est pas adéquate pour être reproduite dans VegeSTAR4 ou (ii) que la méthode de reconstruction des arbres n'est pas pertinente. Sur le point (i), la même étude, Sonohat *et al.*, 2005, a également démontré que ces fluctuations entre surface reconstruite et surface digitalisée étaient atténuées à une échelle plus globale, à l'échelle de l'arbre entier. Pour une même surface digitalisée, les résultats montraient une surface reconstruite identique avec un coefficient de détermination supérieure à 0.98 entre des surfaces reconstruites et des surfaces digitalisées (**Figure 15**).

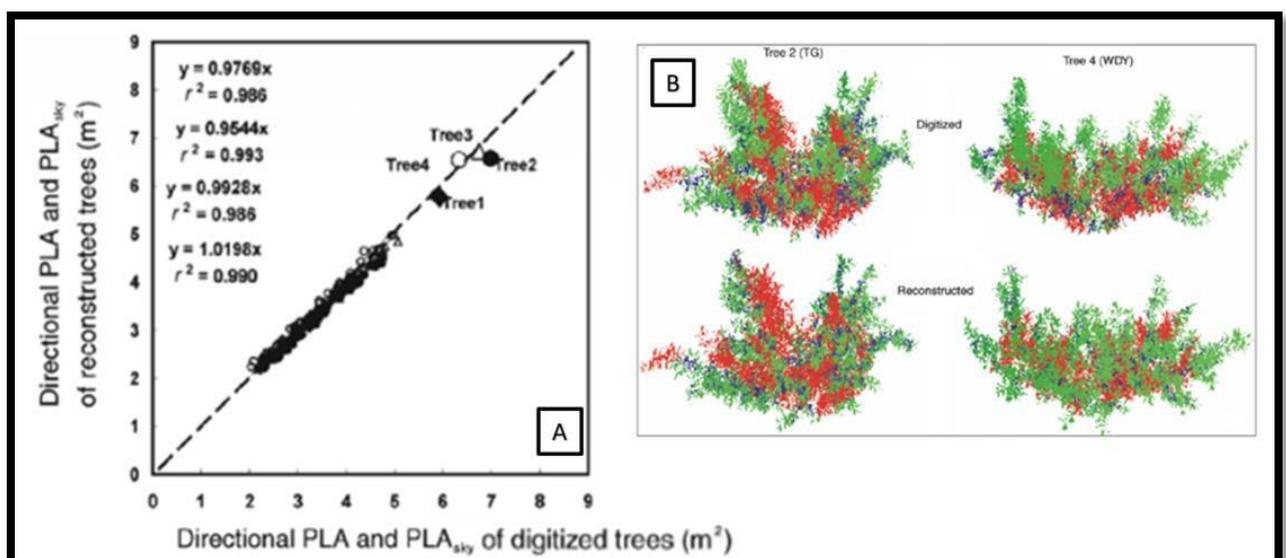


Figure 15 : Comparaison entre les arbres reconstruits et les arbres digitalisés : (A) Surface foliaire projetée dans une direction (PLA) et vers la voûte céleste (PLAsky) pour les arbres reconstruits et digitalisés. (B) Comparaison entre les arbres numérisés et reconstruits pour deux arbres différents. Source : Sonohat *et al.*, 2005.

Il serait donc intéressant, pour valider le modèle, de travailler à l'échelle d'un arbre ou du rang entier en plaçant plusieurs capteurs PAR, proche les uns des autres, sous une rangée d'arbres, formant ainsi une structure rectangulaire et de reproduire cette condition dans VegeSTAR4. Cela permettrait de travailler avec des données de PAR transmises directement au sein de la rangée offrant une perspective plus intéressante pour pouvoir comparer ces résultats avec VegeSTAR4 et ainsi effacer la disparité liée à la méthode de reconstruction des feuilles.

2 - BIAIS ENVIRONNEMENTAUX ET TECHNOLOGIQUES

A - VENT

Un autre biais potentiel pouvant expliquer les différences de PAR transmis entre les mesures sur le terrain et les simulations de VegeSTAR4 est l'influence du vent. Le modèle VegeSTAR4 reconstruit les vergers en utilisant des formes géométriques statiques, sans prendre en compte le mouvement des feuilles. En réalité, le vent peut provoquer des mouvements des feuilles, modifiant ainsi la transmission du PAR de manière imprévisible. Par exemple, ces mouvements peuvent créer des ouvertures temporaires dans le couvert végétal, permettant à plus de lumière directe de pénétrer jusqu'aux capteurs, ou au contraire, augmenter l'ombrage local et réduire le PAR transmis. Ces fluctuations dues au vent sont absentes dans les simulations statiques, ceux qui pourraient expliquer certaines des divergences observées entre les données de terrain et les simulations. Il est donc important de reconnaître cette limitation lors de l'interprétation des résultats.

B - CAPTEURS

Dans VegeSTAR4, la lecture des résultats repose sur une relation linéaire qui postule que le pourcentage de surface éclairée correspond directement au pourcentage de rayonnement. En d'autres termes, si 50% des capteurs virtuels sont éclairés, ils sont supposés recevoir 50% du rayonnement incident. Afin d'évaluer la validité de cette relation dans la réalité, des tests empiriques ont été conduits pour examiner précisément la correspondance entre la proportion de la surface des capteurs du terrain et le pourcentage réel du rayonnement associé.

Ces tests ont été conçus pour simuler diverses conditions d'exposition au rayonnement en obstruant progressivement différentes parties du capteur. Par exemple, dans une série de tests, la moitié supérieure, inférieure, gauche et droite du capteur ont été successivement occultées, maintenant ainsi une exposition de 50% de la surface du capteur à chaque fois (**Figure 16**). Toutefois, malgré cette uniformité dans l'exposition, les résultats du rayonnement perçu par les capteurs ont manifesté une variabilité, avec des valeurs oscillant entre 35% et 65% de l'incident. Ces fluctuations observées soulignent que la relation linéaire établie dans VegeSTAR4 ne capture pas toujours de manière précise la réalité des capteurs sur le terrain. Bien que la moyenne de ces tests converge vers une transmission moyenne de 50%, il est crucial de reconnaître et de tenir compte de cette variabilité lors de l'interprétation des résultats.

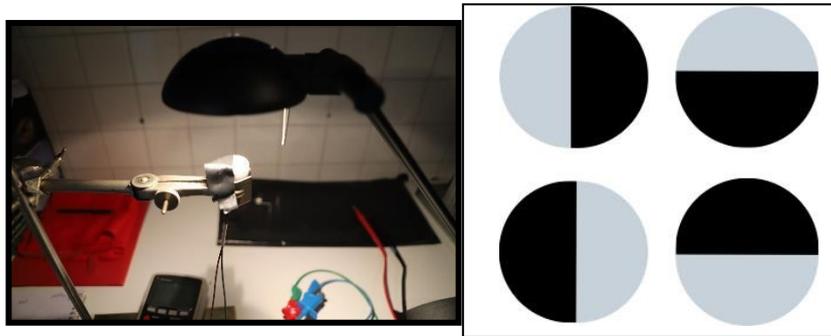


Figure 16 : Représentation des différentes configurations d'occultation des capteurs PAR, où dans une série de tests, la moitié supérieure, inférieure, gauche et droite du capteur ont été successivement occultées, maintenant ainsi une exposition de 50% de la surface du capteur à chaque fois.

VI - CONCLUSION

Actuellement, deux des trois objectifs initiaux ont été réalisés. La reconstitution du verger dans VegeSTAR4 s'est déroulée sans encombre, cependant, la validation du modèle présente des défis. Les résultats ont mis en lumière des disparités significatives entre les sorties du modèle VegeSTAR4 et les données observées sur le terrain.

L'ajustement des paramètres sensibles, tels que la distance entre les capteurs et les rangées d'arbres, a permis d'affiner les simulations sans toutefois corriger entièrement les écarts observés. Les variations observées entre les surfaces foliaires reconstruites et digitalisées à l'échelle locale indiquent que la méthode de reconstruction actuelle peut générer des estimations de surface foliaire imprécises, impactant ainsi la quantité de lumière interceptée par les capteurs.

En conclusion, bien que le modèle VegeSTAR4 offre un cadre prometteur pour la simulation du PAR, des améliorations sont nécessaires pour mieux aligner les sorties du modèle avec les données empiriques. Une approche future devrait inclure le test de nouvelles méthodes pour obtenir des données du terrain à l'échelle de l'arbre ou de la rangée, permettant une meilleure validation et une réduction des écarts à l'échelle locale.

Malgré le constat que le modèle VegeSTAR4 n'est pas encore pleinement validé, une décision éclairée sur la base de cette étude et des données issues de la bibliographie, a été prise de persévérer dans les analyses du troisième objectif. Cette décision découle de la confiance accordée à VegeSTAR4 en tant qu'outil prometteur malgré les défis rencontrés lors de la validation initiale. Les prochaines étapes de l'étude se concentreront sur l'analyse de la sensibilité de la quantité de lumière interceptée, prenant en compte diverses caractéristiques structurelles du verger. Cette transition marque une étape cruciale dans la poursuite de notre compréhension de l'impact des configurations structurelles sur l'interception lumineuse.

REFERENCES

- **Alain Masseron (2002)**. Pommier. Le mur fruitier. CTIFL. 110 pages. ISBN-10 : 2879111838
- **Ancelin Philippe, Fourcaud Thierry, Lac Patrick (2004)**. Modelling the biochemical behaviour of growing trees at the forest stand scale. Part I: Development of an incremental transfer matrix method and application to simplified tree structures. *Annals of Forest Science*, **61** (3) : 263-275.
- **Badiu, D.; Arion, F.H.; Muresan, I.C.; Lile, R.; Mitre, V. (2015)**. Evaluation of Economic Efficiency of Apple Orchard Investments. *Sustainability* 2015, 7, 10521-10533.
- **Barritt, B. H., B. S. Konishi, and M. A. Dilley. (1995)**. Performance of 3 apple cultivars with 23 dwarfing rootstocks during 8 seasons in Washington. *Fruit Var. J.* 49:158–170.
- **Barritt Bruce H. (2000)**. Selecting an Orchard - System for Apples. The compact fruit tree, volume 33, number 3, 2000
- **Beckman Peach T.G., W.R. Okie (1992)**. Rootstock Affect Bloom Date and Fruit Maturation of ‘Redhaven’. Southeastern Fruit and Tree Nut Research Laboratory, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, P. O. Box 87 Byron, GA 31008
- **Bernard Thibault, Léonce Hermann, André Belouin, Bernard Bidabe, Marcel Le Lezec, (1978)**. Pollinisateurs : poirier, pommier. Institut National de Vulgarisation pour les Fruits Légumes et Champignons, 2ème édition, pp.32, 1978. Ffhal-01600786f
- **Centurion University (2020)** - PLANNING OF ORCHARD, <https://courseware.cutm.ac.in/>
- **Chelle Michaël, Hanan Jim, Autret Hervé (2004)**. Lighting virtual crops: The CARIBU solution for open L-systems. In : Proceedings of the 4th International workshop on functional-structural plant models (FSPM)
- **Costes, Evelyne & Lauri, Pierre-Eric & Regnard, Jean Luc. (2006)**. Analysing Fruit Tree Architecture-Consequences for tree management and fruit production. 32.
- **Costes Evelyne E., Colin Smith, Michael Renton, Yann Guédon, Prusinkiewicz Przemyslaw (2008)**. MAppleT : simulation of apple tree development using mixed

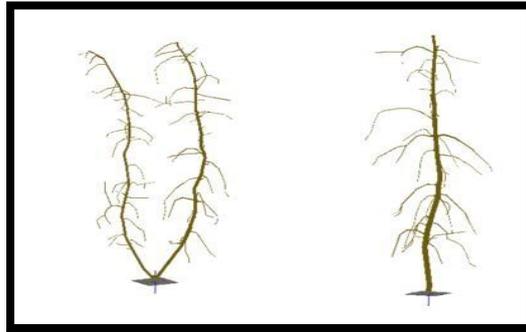
stochastic and biomechanical models. International Workshop on Functional Structural Plant Models, Napier, New Zealand. <10.1071/FP08081>. <hal-02824696>

- **INRAE (2009)**. VegeSTAR. UMR PIAF, <https://piaf.clermont.hub.inrae.fr/methodes-et-modeles/vegestar>
- **Jackson John E. (2004)**. Biology of Apples and Pears - Cambridge University Press. 500pp. ISBN 0 521 38018 9. Volume 61 Issue 1 - G. H. HARPER
- **Fallahi, E., W. M. Colt, B. Fallahi, and I. Chun. (2002)**. The importance of apple rootstocks on tree growth, yield, fruit quality, leaf nutrition and photosynthesis with an emphasis on ‘Fuji’. Horttechnology 12:38–44.).
- **FLORE J. A., LAKSO A. N., (1989)**. Environmental and physiological regulation of photosynthesis in fruit crops. Hort. Rev. 11, 111-157.
- **Ghislain Gosse, Claude Varlet-Grancher, Raymond R. Bonhomme, Michel Chartier, Jean Michel J. M. Allirand, (1986)**. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. Agronomie, 6 (1), pp.47-56. <hal-02728755>
- **Kolmanič Simon, Damjan Strnad, Štefan Kohek, Bedrich Benes, Peter Hirst, Borut Žalik, (2021)** An algorithm for automatic dormant tree pruning, Applied Soft Computing, Volume 99, 2021, 106931, ISSN 1568-4946,
- **Kumawat K.L., W.H. Raja, D.B. Singh, O.C. Sharma, J.I. Mir, A. Sharma, Sajad Un Nabi and S.N. Kirmani. (2020)**. Tall Spindle- A promising high density orchard planting system for apple. Technical Bulletin. ICAR-CITH, Srinagar
- **Kousar Javaid, SN Qureshi, Lubna Masoodi, Dr. Poonam Sharma, Nasreen Fatima and Ishrat Saleem (2017)**. Orchard designing in fruit crops. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 2017; 6(4): 1081-1091
- **Laurent Roche, (2016)**. LE POMMIER À L’HORIZON 2020-2030 Préparer aujourd’hui le verger de demain, INFOS CTIFL n°323 p34-41.
- **Larsen, F. E., S. S. Higgins, and C. A. Dolph. (1992)**. Rootstock influence over 25 years on yield, yield efficiency and tree growth of cultivars ‘Delicious’ and ‘Golden Delicious’ apple (*Malus domestica* Borkh.). Scientia Hort. 49:63–70.
- **Lindell Catherine A., Amy Irish-Brown, Nikki L. Rothwell, Anna E. Wallis, (2023)**. Pest and disease risk and management in high-density perennial crops: Current knowledge and areas of future research, Crop Protection, Volume 165, 106150, ISSN 0261-2194.

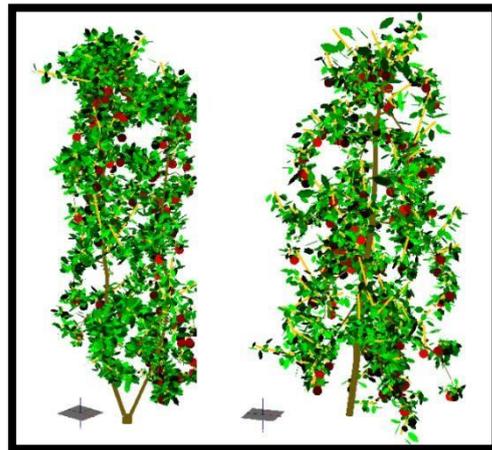
- **Liu, B. Y., and R. C. Jordan (1960)** The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy* 4:1–1
- **McCree K.J. (1973)**. The measurement of photosynthetically active radiation, *Solar Energy*, Volume 15, Issue 1, 1973, Pages 83-87, ISSN 0038-092X,
- **Ministère de l’agriculture et de l’alimentation (2017)**. Arboriculture Fruitière. Bilan de surveillance en 2007
- **Lauri P.E. (2002)**. From tree architecture to tree training -An overview of recent concepts developed in apple in France. *Journal of the Korean Society for Horticultural Science*, 43 (6), pp.782-788. {hal-02680454}
- **Rieger, M. (2006)**. Introduction to Fruit Crops (1st ed.). CRC Press.
- **Palmer J. W. , J. N. Wünsche, M. Meland & A. Hann (2002)**. Annual dry-matter production by three apple cultivars at four within-row spacings in New Zealand, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77:6, 712-717,
- **Pratt, C. (1988)**. Apple Flower and Fruit: Morphology and Anatomy. In *Horticultural Reviews*, J. Janick (Ed.). <https://doi.org/10.1002/9781118060834.ch8>
- **Richard P. Marini (2020)**. Training and Pruning Apple Trees in Intensive Orchards. Virginia Cooperative Extension - Virginia State University. Agricultural Research and Extension Center
- **Robinson, T.L. (2007)**. Effects of tree density and tree shape on apple orchard performance. *Acta Hort.* 732, 405-414.
- **Robinson, T.L., Hoying, S.A. and Reginato, G.H. (2011)**. THE TALL SPINDLE PLANTING SYSTEM: PRINCIPLES AND PERFORMANCE. *Acta Hort.* 903, 571-579.
- **ROBINSON T. L., LAKSO A. N., (1991)**. Bases of yield and production efficiency in apple orchards systems. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116 (2), 188-194.
- **Shuttleworth, L.A., Newman, S. & Korkos, I, (2023)**. A comparison of new and existing rootstocks to reduce canker of apple trees caused by *Neonectria ditissima* (Nectriaceae, Hypocreales). *CABI Agric Biosci* 4, 37.
- **Sonohat Gabriela, Hervé Sinoquet, Vengadessan Kulandaivelu, Didier Combes, Françoise Lescourret (2006)**. Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies. *Tree Physiology*, 26 (3), pp.337-351. {hal-01189143}
- **Taylor-Hell J (2005)**. Biomechanics in botanical trees. Master thesis, University of Calgary.

- **Taiz. L, Ziger. E, Max Moller. I, Murphy. A (2014).** Plant Physiology and Development – 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT.
- **Trillot M., A. Masseron, V. Mathieu, F. Bergougnoux, Christian Hutin (2002).** Le pommier. Monographie. CTIFL, 287 p., 2-87911-154-4. {hal-02833950}
- **Tustin D.S., B.M. van Hooijdonk and K.C. Breen (2018).** The Planar Cordon – new planting systems concepts to improve light utilisation and physiological function to increase apple orchard yield potential. The New Zealand Institute for Plant & Food Research Ltd., Hawke’s Bay Research Centre, Private Bag 1401, Havelock North, New Zealand.
- **Varlet-Grancher, G. Gosse, M. Chartier, Hervé Sinoquet, R. Bonhomme, J.M Allirand (1989).** Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. Agronomie, 9 (5), pp.419-439. {hal-00885212}
- **Weber, M.S. (2001).** Optimizing the tree density in apple orchards on dwarf rootstocks. Acta Hortic. 557, 229-234.

ANNEXES

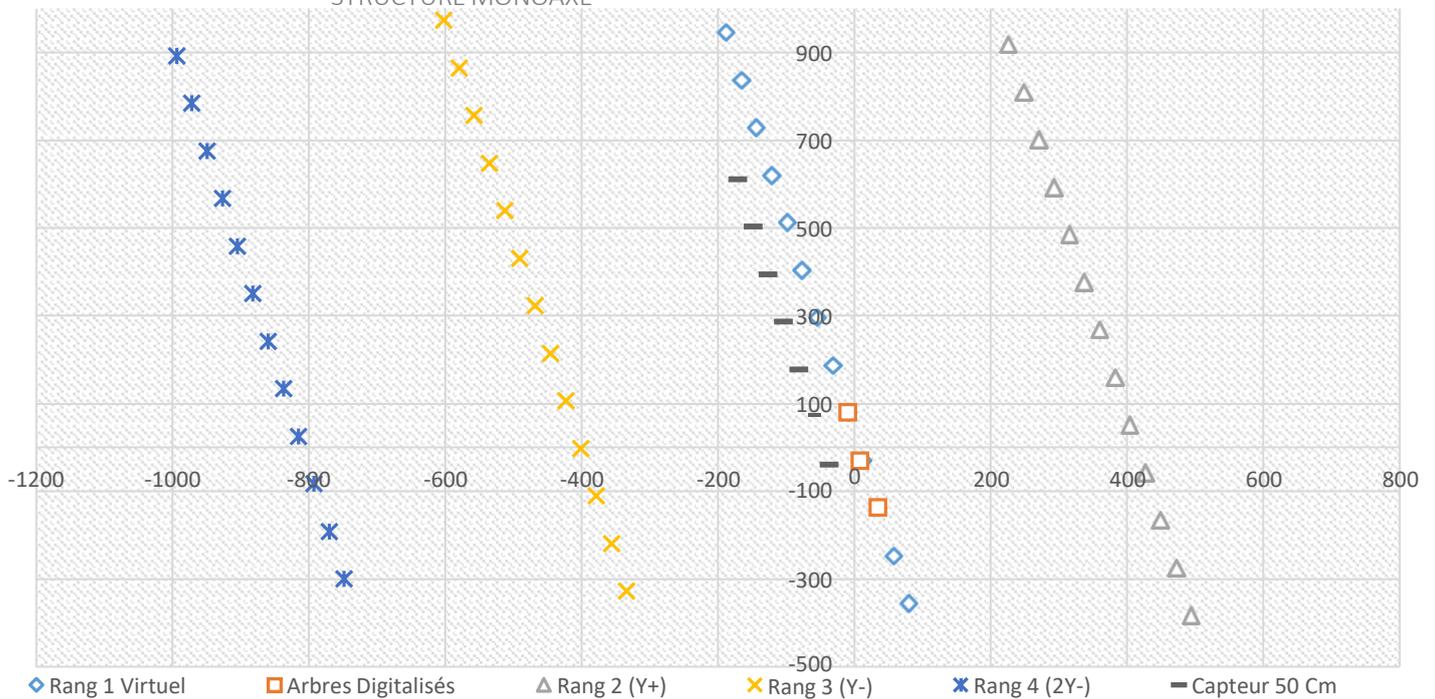


Annexe 1 : Illustration de la charpente des arbres de types "BiAxe" et "MonoAxe" dans Vegestar 4, présentée pour l'un des trois arbres numérisés de l'année 2022.

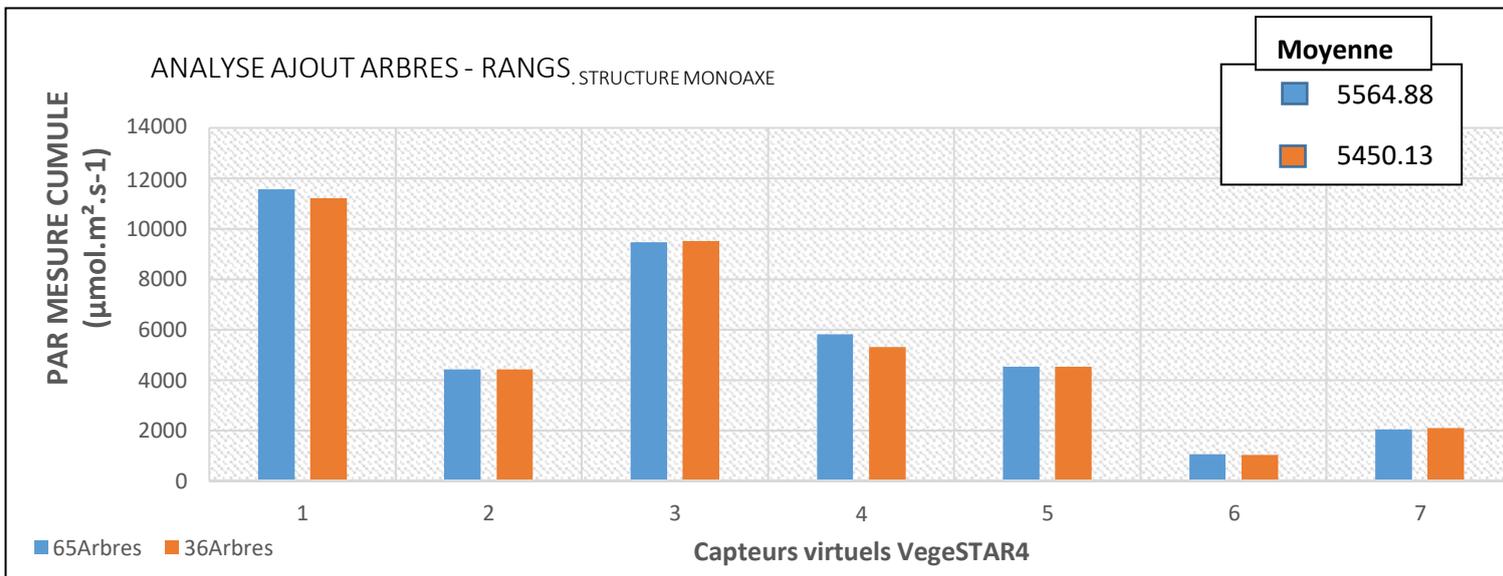


Annexe 2 : Illustration des arbres de types "BiAxe" et "MonoAxe" dans VegeSTAR4, après reconstruction et placement des feuilles. Cette représentation est fournie pour l'un des trois arbres numérisés de l'année 2022.

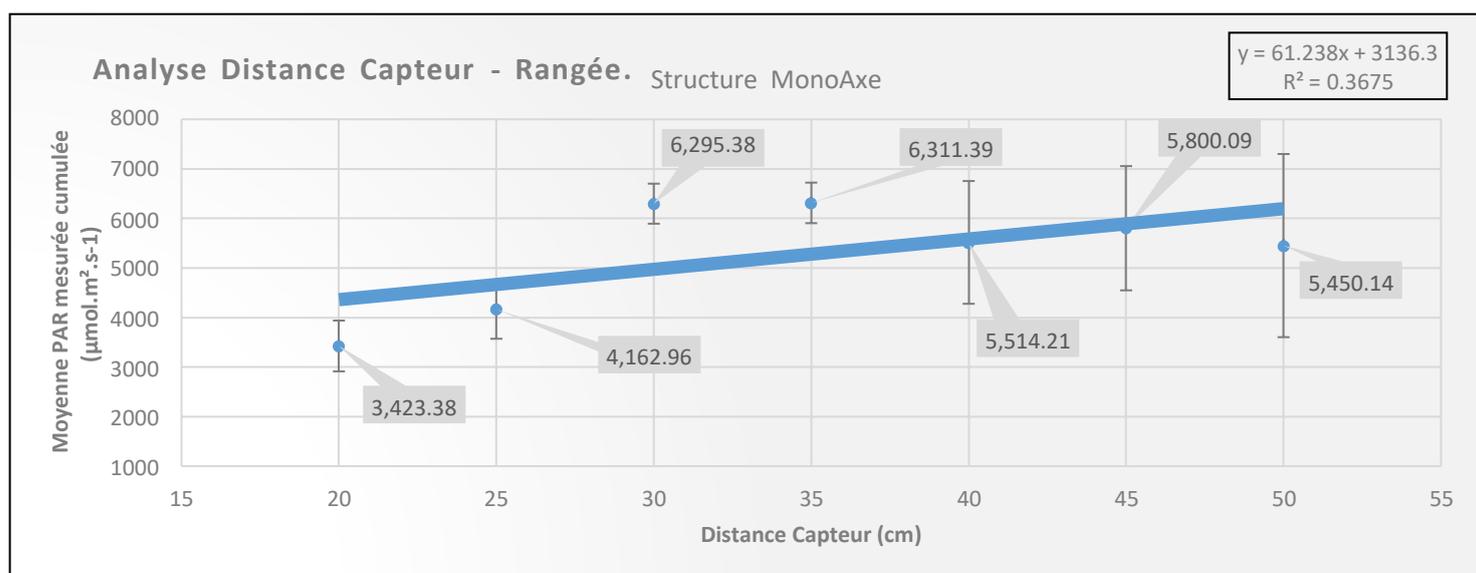
VERGER 2022. STRUCTURE MONOAXE



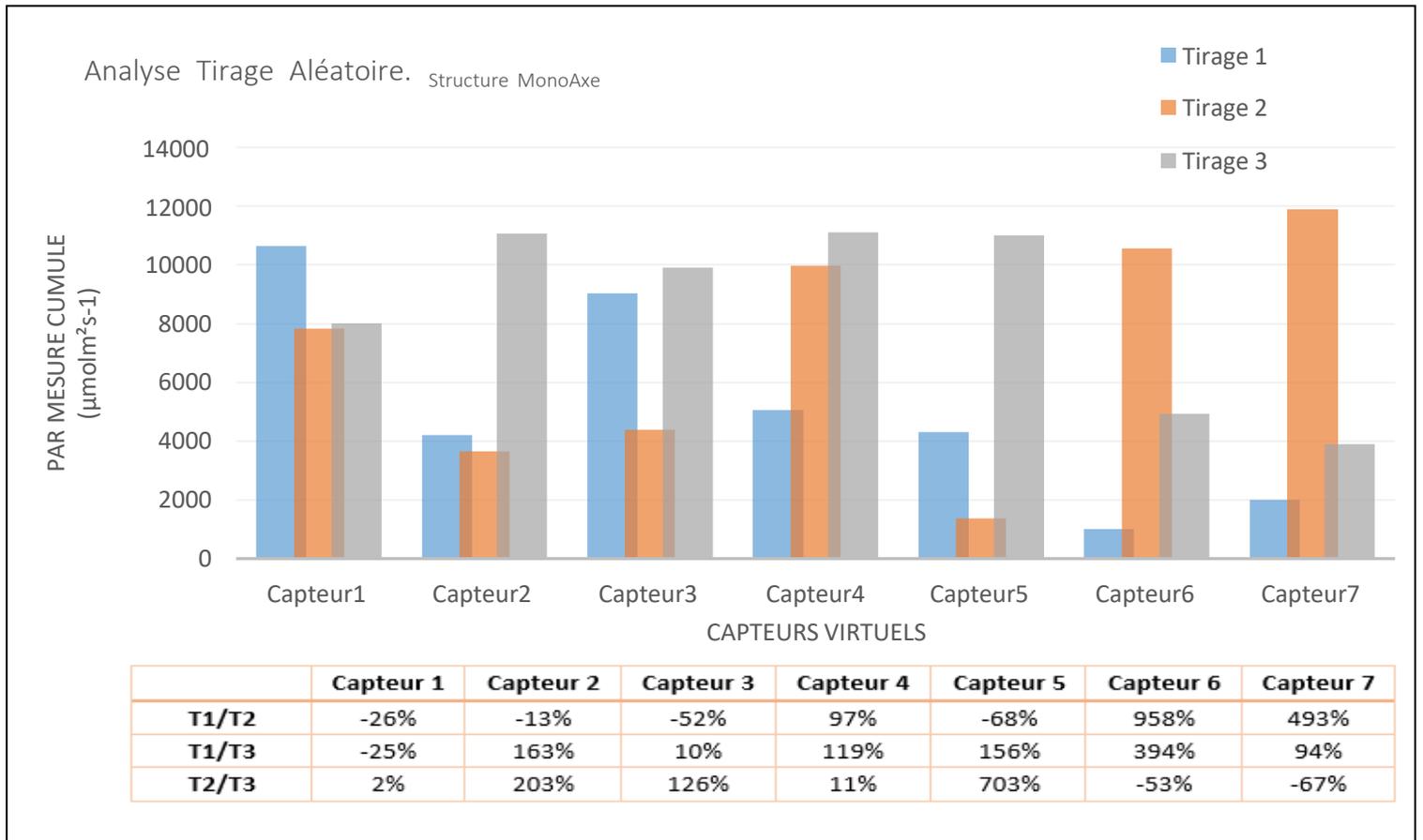
Annexe 3 : Représentation des coordonnées des arbres dans le plan du verger pour la structure MonoAxe de l'année 2022. L'axe des abscisses (Y) indique la direction Ouest-Est, tandis que l'axe des ordonnées (X) indique la direction Nord-Sud. La distance intra-rang pour ce verger est en moyenne de 110 centimètre, la distance inter-rang est de 400 centimètre et l'angle d'orientation Nord-Sud entre les arbres est en moyenne de 11,65°. Les capteurs virtuels ont été positionnés à 50 cm à l'ouest de la deuxième rangée, en partant de la droite.



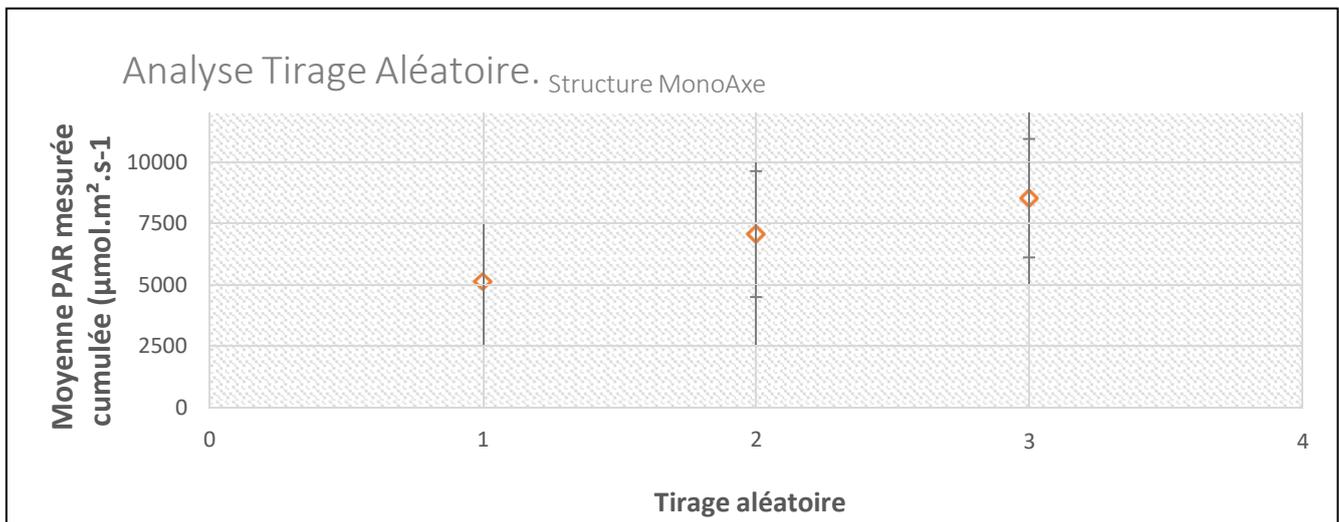
Annexe 4 : Représentation graphique du PAR cumulé simulé sur la journée du 2 août 2022 pour la structure MonoAxe. Cette comparaison est effectuée entre les deux configurations du verger, 36 et 65 arbres. La moyenne correspond à la moyenne du PAR cumulé mesuré pour l'ensemble des capteurs pour chaque configuration.



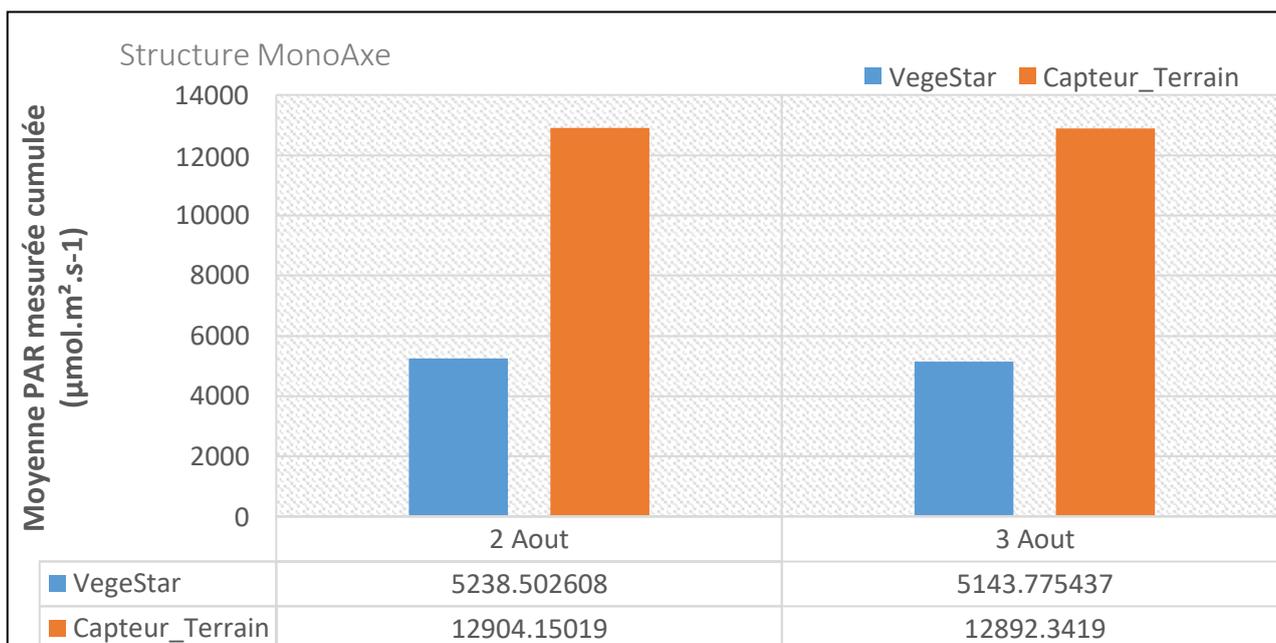
Annexe 5 : Comparaison des résultats obtenus avec différentes distances de capteurs de 50 à 20 centimètres sur la structure MonoAxe, en utilisant les informations relatives au rayonnement incident du 2 août 2022. Les valeurs représentent la moyenne du PAR cumulé pour chaque capteur à différentes distances des arbres. Les barres d'erreur représentent l'écart type des valeurs de somme du rayonnement PAR cumulé pour chaque capteur.



Annexe 6 : Représentation graphique du PAR cumulé mesuré sur la journée du 2 août 2022 pour la structure MonoAxe. Cette comparaison est effectuée entre trois tirages aléatoires parmi les arbres digitalisés lors de la reconstruction des rangs. Les pourcentages de différence pour chaque capteur, en fonction du tirage aléatoire, sont indiqués dans le tableau.



Annexe 7 : Comparaison des résultats obtenus avec différents tirages aléatoires de la structure MonoAxe. Les valeurs représentent la moyenne du PAR cumulé pour chaque capteur selon les différents tirages aléatoires. Les barres d'erreur indiquent l'écart type des valeurs de somme du rayonnement PAR cumulé pour chaque capteur



Annexe 8 : Comparaison entre les résultats de VegeSTAR4 et les données terrain pour la structure MonoAxe le 2 et 3 août 2022 avec des capteurs positionnés à 40 centimètres. Les résultats sont basés sur la moyenne du rayonnement PAR transmis cumulé sur la journée de tous les capteurs.