



Compte-rendu d'essai

Pomme 2023

Gestion de l'eau

OREVE : Optimisation de la Ressource en Eau pour les jeunes Vergers

Date : Novembre 2023

Rédacteur(s) : Xavier CRETE - SudExpé

Projet pomme : Améliorer les pratiques d'irrigations en jeunes vergers de pommiers et de pêchers

Porteur du projet : SudExpé

Année de mise en place : 2020

1. Rappel du contexte et objectifs

Rappeler rapidement les objectifs du projet, les partenaires et les actions initialement prévues.

Les besoins en eau des vergers adultes sont relativement bien connus des producteurs. Dans la majorité des cas les apports sont pilotés plus ou moins correctement avec l'aide de différents OAD (tensiomètres, sondes capacitatives, méthode des bilans, ETP...). (La notation de ETP est maintenue malgré le fait que ETP est utilisé aujourd'hui)

En revanche, les pratiques d'irrigation des jeunes vergers (entre la 1^{ère} et la 3^{ème} année pour les fruits à noyaux et à pépins, et jusqu'à la 6^{ème} année pour les noyers) sont souvent assez empiriques. Plusieurs raisons à cela :

1. Tant qu'il n'y a pas de production il y a peu d'investissement dans les OAD

2. Manque de connaissance des besoins réels des jeunes arbres
3. Apports de sécurité pour limiter les risques de dessèchement du fait d'un système racinaire peu développé et pour favoriser l'enracinement.

La pratique courante est d'apporter la moitié de la dose prévue pour les arbres adultes. Or la surface foliaire est largement inférieure de 50% (en pommier) à celle d'un arbre adulte, en particulier les deux premières années. De fait, les quelques mesures effectuées ont montré que les besoins étaient largement surestimés. En situation de sols drainants, des risques de pertes d'eau et d'engrais en profondeur (lixiviation des éléments fertilisants) sont importants avec des conséquences environnementales mais également agronomiques du fait d'un sous-dosage des apports en éléments fertilisants lié aux pertes en profondeur. En sols plus lourds, le risque principal est une asphyxie racinaire pouvant entraîner un blocage de la pousse, voire un dépérissement de l'arbre et/ou un développement de maladies comme par exemple le pathogène phytophthora.

Les excès d'apport d'eau en jeunes vergers entraînent régulièrement des blocages de développement qui ne sont pas toujours clairement interprétés par le producteur. En cela l'instrumentation (sonde de sol et/ou capteur plantes) permet de mieux analyser ce genre de situation.

Dans la pratique, on constate un manque de références techniques et économiques des pratiques d'irrigation en jeunes vergers pouvant engendrer des incohérences au niveau de la quantité d'eau apportée à la parcelle par rapport aux capacités de consommation des arbres. Ce projet vise donc à combler ces lacunes et apporter des éléments tangibles aux producteurs pour mieux gérer le démarrage de leur verger.

Le projet permet d'améliorer les connaissances sur les besoins en eau de diverses cultures en période juvénile. D'un point de vue scientifique, la gestion de l'irrigation des arbres fruitiers a largement été étudiée en vergers adultes. L'ambition de ce projet est de mieux connaître le fonctionnement des arbres jeunes, et ainsi leurs réels besoins hydriques, afin d'aider les arboriculteurs à optimiser l'irrigation de leurs jeunes vergers.

Aspect économique :

L'argument économique est important pour les producteurs. Comme vu précédemment, une meilleure gestion de l'irrigation dans les premières années d'implantation du verger peut diminuer les risques de mortalité précoce des jeunes arbres et permettre un développement des arbres de meilleure qualité ayant des répercussions positives sur la mise à fruit et la capacité future de production de ces derniers. Ainsi, le rendement économique pour le producteur devrait être amélioré avec une consommation en eau ajustée, moins d'arbres à remplacer et une production de qualité.

Aspects environnementaux :

Au sein des exploitations fruitières, la gestion de la ressource en eau est un enjeu majeur. Outre le fait que l'irrigation des vergers peut se révéler indispensable à la survie des arbres, sur certains types de sol extrêmement filtrants ou certaines années très sèches (ex. 2003 ou 2015), elle présente également de multiples intérêts dont une mise à fruits plus rapide avec un potentiel de production de rendement supérieur. Ainsi, de plus en plus de surfaces arboricoles sont équipées de systèmes d'irrigation. En pommier et pêcher, tous les vergers sont irrigués dans les conditions du sud de la France.

Par ailleurs, les étés sont de plus en plus secs et des périodes de restrictions d'eau sont connues chaque année par les arboriculteurs. Il convient donc de rechercher le bon équilibre au niveau de l'irrigation afin de garantir un développement correct des jeunes arbres tout en respectant les ressources en eau à disposition.

L'irrigation est également nécessaire pour valoriser les apports en fertilisants, puisque l'eau contribue à rendre disponible pour l'arbre les éléments nutritifs. Le but est de déterminer, pour chaque élément, la bonne dose, le bon endroit et le bon moment. Un excès d'eau peut entraîner des phénomènes de lixiviation qui, outre des risques de carences ou de stress des jeunes arbres, induisent des risques de pollution des nappes phréatiques.

L'intérêt environnemental d'une gestion raisonnée de l'irrigation en jeunes vergers est grand. Au-delà d'une consommation en eau rationnelle, l'adaptation des apports hydriques aux besoins réels des jeunes vergers permet de limiter les phénomènes de lixiviation, entraînant notamment des risques de pollution des nappes

phréatiques. De plus, un développement optimal du système racinaire des arbres dès les premières années engendre une meilleure exploitation des diverses ressources présentes dans le sol par ces derniers. Les besoins en intrants (eau, engrais) de ces mêmes arbres à l'âge adulte devraient donc diminuer.

Social :

Face à une pression sociétale croissante envers les producteurs, donner la preuve au grand public que la gestion du verger est la plus raisonnée possible devient une obligation. De plus, les enjeux liés à la répartition des ressources en eau entre l'industrie, les activités domestiques et l'agriculture sont de plus en plus forts, et sources de conflits, dans notre société. Dans ce contexte, il apparaît essentiel de déterminer au plus juste les besoins nécessaires à un jeune verger pour assurer une implantation harmonieuse des arbres tout en réduisant le risque de mortalité précoce, réduisant ainsi les pertes économiques pour les producteurs.

2. Résultats 2020

Pour cette première année du projet, les plantations n'ayant pas encore été faites, la première étape a été de caractériser les volumes de végétation. D'une part sur des vergers existants en Languedoc et d'autre part en exploitant la base de données réalisée dans le cadre du projet Pulvarbo piloté par le Ctifl. Dans le cadre de ce projet des mesures précises de verger ont été faites durant plusieurs années (2015 à 2019) sur différentes espèces et dans les différents bassins de production français. SudExpé a été contributeur de ces mesures sur pomme et pêche.

Mesures réalisées en vergers de production en 2020

Les mesures ont été réalisées sur 5 vergers dans l'est Montpellierain. L'ombre portée a été mesurée au midi solaire (+/- 1 heure). Une seule date de mesure a été réalisée (mi-juillet) après cette date le volume de végétation évolue assez peu, cf. données Pulvarbo présentées plus bas :

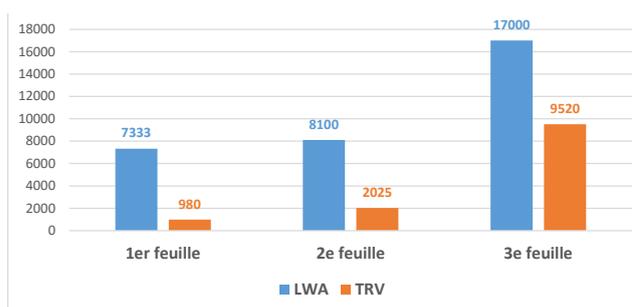


Figure 1 : Mesures de végétation de pommiers en fonction de l'âge du verger en 2020



Figure 2 : Photographie des prises de mesures au midi solaire

Analyses des données de la base Pulvarbo 2015-2019 :

1ères feuilles

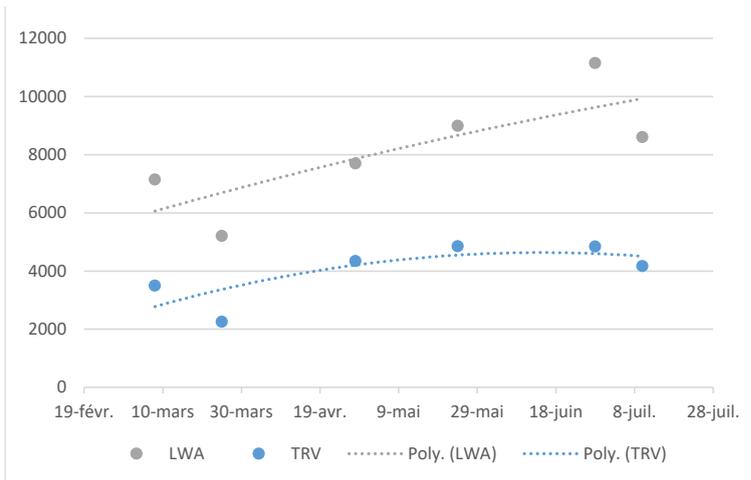


Figure 3: Evolution de LWA et TRV durant la saison 1ère feuille - Pulvarbo

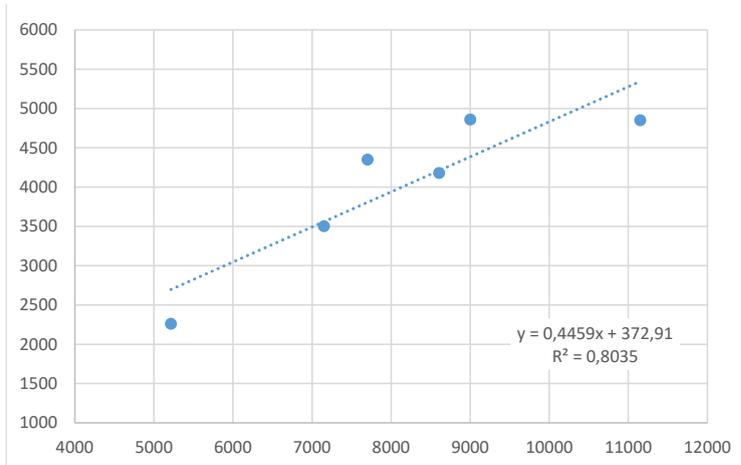


Figure 4 : Corrélation entre LWA et TRV pommiers en 1ère feuille - Pulvarbo

Pour les premières feuilles le nombre de données n'est sans doute pas suffisant pour valider la tendance observée ici. De fait, il ne semble pas forcément logique

que le TRV se stabilise à partir de fin mai alors que la LWA continue de progresser. Ce point sera à vérifier. On note par contre une bonne corrélation entre les deux indicateurs.

2èmes feuilles

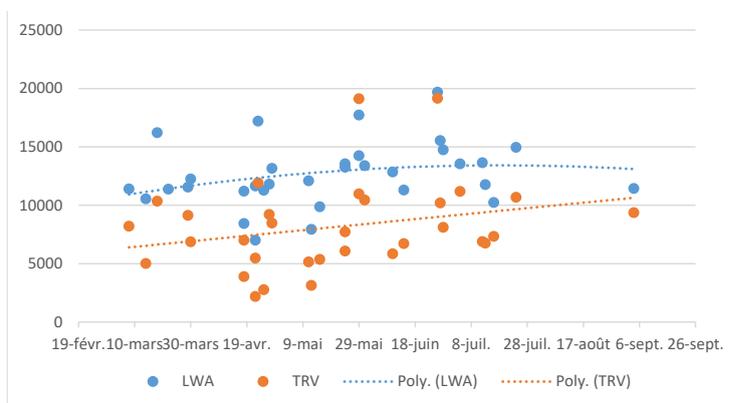


Figure 5 : Evolution de LWA et TRV durant la saison en 2ème feuille - Pulvarbo

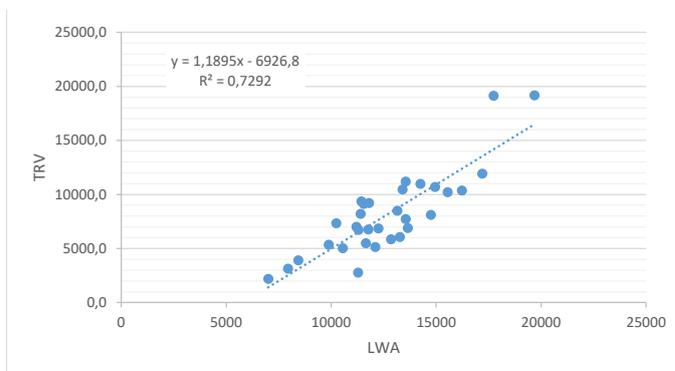


Figure 6 : Corrélation entre LWA et TRV pommiers en 2ème feuille - Pulvarbo

Sur ce jeu de données, plus conséquent, on observe des évolutions assez semblables entre LWA et PRD durant la saison. On note cependant une variabilité assez importante entre les vergers qui rendra sans doute difficile l'utilisation d'un

abaque de référence. On peut donc supposer que l'étape de la mesure au champ sera nécessaire si tant est que ce(s) critère(s) s'avère pertinent pour le pilotage des apports en eau.

3èmes feuilles

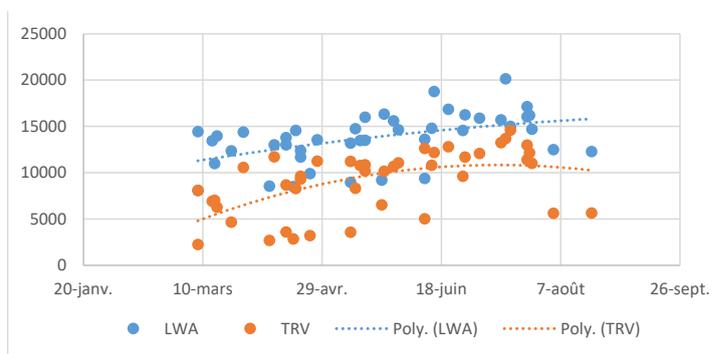


Figure 7 : Evolution de LWA et TRV durant la saison en 3ème feuille - Pulvarbo

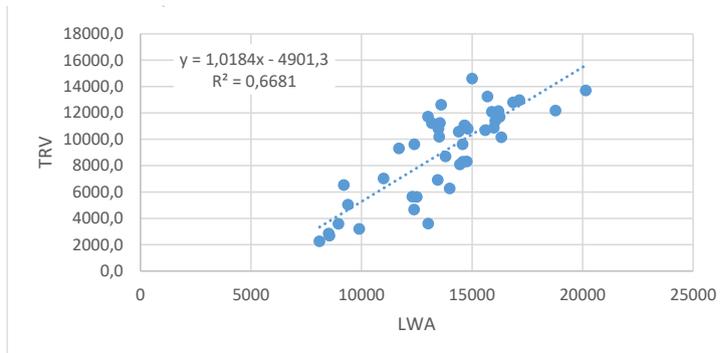


Figure 8 : Corrélation entre LWA et TRV pommiers 2ème feuille – Pulvarbo

En 3eme feuilles l'évolution durant la saison semble plus ou moins similaire à celle observée en 2eme feuille, par contre il semble que la corrélation entre LWA et TRV soit de moins en moins bonne au fur et à mesure du vieillissement du verger. Ce point sera aussi à vérifier.

L'essai ne concernant que les trois premières années du verger, le fait qu'il semble

y avoir une divergence entre LWA et TRV avec le vieillissement du verger ne posera pas de problème particulier. Ces mesures préliminaires devront être complétées avec d'autres vergers et confrontées aux autres indicateurs envisagés : Lidar, imagerie aérienne, etc.

3. Matériels et méthodes

La parcelle dédiée au projet OREVE couvre une superficie de 360 m² et est aménagée avec 120 arbres de la variété de pommes gala. Ces arbres sont répartis en quatre rangées, séparées par une distance de 4 mètres, chacune composée de 30 arbres. Pour chaque modalité (ou parcelle élémentaire), représentant différents traitements, dix arbres sont choisis comme échantillon. Les équipements de mesure, tels que les sondes et les dendromètres, sont installés sur la deuxième répétition de la parcelle. Dans la quatrième répétition (ou bloc de bordure), une autre culture, à savoir les mélilots, a été implantée en complément des pommiers. Cette culture auxiliaire contribue à améliorer le taux d'azote dans le sol.

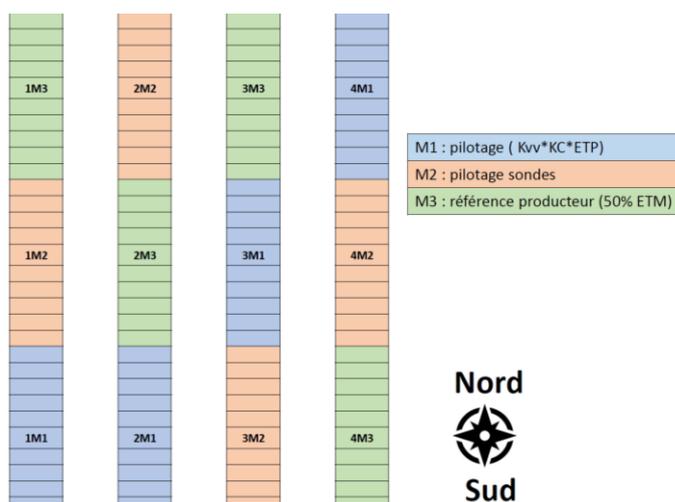


Figure 9 : Plan de parcelle d'essai OREVE sur pommier de Marsillargues

L'irrigation utilisée dans cette étude est de type goutte à goutte localisé. Les tuyaux d'irrigation sont fixés aux arbres à une hauteur de 50 cm au-dessus du sol, avec des goutteurs espacés de manière uniforme tous les 50 cm. Chaque goutteur délivre un débit constant de 1,6 litre par heure. Ces conduites d'irrigation sont contrôlées par des électrovannes, chaque modalité étant contrôlée individuellement. Ainsi, chaque rangée d'arbres est équipée de trois conduites d'irrigation distinctes pour alimenter chaque modalité de manière autonome. L'ensemble du système d'irrigation est géré par le programmeur SOLEM, une application conviviale

téléchargeable sur smartphone. Cette application permet d'ajuster les apports en eau chaque semaine en fonction des besoins des arbres et des variations des paramètres climatiques tels que l'ETP et les précipitations.

Le sol dans la zone d'étude est de type fluvisol, constitué de dépôts alluviaux riches en argile. La station de recherche est située dans la vallée du Vidourle, un cours d'eau côtier prenant sa source dans les Cévennes et se jetant dans la Méditerranée par l'étang du Ponant, à la frontière entre l'Hérault et le Gard.

Le climat dans cette région est de type méditerranéen, caractérisé par des hivers doux avec des gelées occasionnelles et des étés chauds. Les vents forts sont fréquents et l'ensoleillement est abondant. Les précipitations se concentrent principalement au printemps et à l'automne, tandis que les mois d'été et d'hiver sont relativement secs. Environ 40 % des précipitations annuelles sont enregistrées sur une période de trois mois.

Il convient de noter que les jours de pluie sont peu fréquents et sont irrégulièrement répartis tout au long de l'année. Par exemple, le mois de juillet présente généralement le plus faible cumul de précipitations de l'année, tandis qu'octobre est traditionnellement le mois le plus pluvieux. Par ailleurs, les précipitations peuvent souvent se présenter sous forme de phénomènes cévenols ou méditerranéens, où une quantité importante de pluie peut tomber en quelques heures, dépassant parfois quatre fois la moyenne mensuelle.

Modalité 1 : pilotage base sur la taille de la végétation

L'hypothèse faite dans le projet OREVE est l'utilisation du volume de végétation pour calculer le besoin en eau. Elle vient du fait que le lien entre surface foliaire et évapotranspiration est déjà établi (Lhomme et Katerji, 1986). Or, la mesure de cette surface est relativement complexe. En revanche, le lien entre le volume de canopée et le besoin en eau n'a pas encore été établi pour le pommier. La mesure du volume de canopée a déjà été appliquée au pommier pour adapter les doses de produits phytosanitaires dans le cadre des essais du projet Pulvarbo (Verpont, Favareille, et Prince, 2017 ; Douzals *et al.*, 2019).

Pour cela nous avons donc adapté la formule classique du bilan hydrique développée par Allen *et al.*(1998) :

$$\text{Besoin en eau} = Kc \times ETP$$

Pour l'étude sur les besoins du jeune verger, nous avons introduit un indicateur de volume de végétation (volume de végétation) multiplié par un coefficient de volume de végétation (Kvv). Pour déterminer le Kvv, nous avons utilisé la formule telle que présenté ci-dessous :

$$Kvv = \frac{B_{moyen}}{\text{Volume de végétation} \times Kc \times ETP_{moyen}}$$

L'initiative OREVE repose sur une hypothèse fondamentale : la possibilité de déterminer les besoins en eau des arbres en se basant sur leur volume de végétation ou leur surface foliaire. Ce concept a été progressivement mis en place sur une période de trois années. La première année a servi à établir les bases des équations, bien que celles-ci aient été basées sur des données de l'indice de végétation normalisé (NDVI) capturées par un drone, qui n'ont pas été utilisées lors de la deuxième année. Durant la seconde année une nouvelle équation à vue le jour grâce à des mesures manuelles. La troisième année a été consacrée à la validation et à l'ajustement précis du coefficient de volume de végétation.

Pour mettre en œuvre la modalité M1, la première étape consiste à caractériser la végétation. Cela implique de mesurer le volume de végétation et la surface foliaire, à partir desquels il est possible de calculer le coefficient de volume de végétation (kvv). Ce coefficient est crucial pour ajuster les besoins en eau en fonction de l'âge et de la taille des arbres.

La formule globale est la suivante :

$$ETM = kc * ETO * kvv$$

ETM : Évapotranspiration maximale

kc : coefficient cultural

ETP : évapotranspiration de référence

kvv : coefficient de volume de végétation

Les valeurs de kc et ETP sont obtenues à partir du bulletin du groupe BRL. Pour déterminer le coefficient kvv, il faut entamer les mesures manuelles du volume de végétation.

A. Estimation du volume de végétation et de la surface foliaire

L'estimation précise de la taille de la végétation (en termes de volume et de surface) nécessite l'utilisation de différentes méthodes de mesure, dont l'exactitude est vérifiée en comparant leurs résultats. Plusieurs méthodes ont été testées : l'imagerie satellite, le drone, le LIDAR et les mesures manuelles.

Pour cet essai, nous avons utilisé **l'imagerie satellite**. Pour cela nous avons fait la demande d'images avec les satellites Pléiades. Pléiades est un couple de deux satellites qui ont été développés par le CNES en partenariat avec deux filiales d'Airbus Defence & Space. Ces satellites permettent de compléter la famille de satellites de télédétection SPOT en réalisant des prises de vue d'une meilleure définition (moins d'un mètre). De plus, Pléiade peut réaliser des prises de vue multispectrales, notamment infrarouge, nécessaires pour obtenir des indicateurs tels que le NDVI. Un autre point positif est que les images sont gratuites pour tout organisme de recherche. Cependant, les images sont livrées brutes. Elles doivent donc être traitées à l'aide d'un logiciel spécifique. Dans ce cas, nous avons utilisé le logiciel QGIS.

Le drone est un instrument permettant d'obtenir très rapidement des relevés, même sur de grandes surfaces. Pour la parcelle OREVE, le temps de survol est inférieur à 5 minutes.

Le traitement des données est relativement complexe et nécessite de maîtriser un logiciel de traitement d'image (en l'occurrence QGIS). Aussi, le calcul des différents indicateurs (VARI ou NDVI) nécessite une expertise. En conséquence, pour obtenir des résultats rapidement, il faut avoir planifié l'intervention sur le terrain ainsi que le traitement des données. Par ailleurs, nous avons pu constater qu'il était difficile d'obtenir des résultats utilisables quand les arbres sont peu développés et que le couvert végétal au sol (l'enherbement) est important.



Figure 10 : Photographie du survol par drone de la parcelle de St-Gilles le 28 juillet 2021

Le LIDAR permet une mesure relativement rapide. Après quelques réglages, il faut passer au pas dans la rangée sur l'ensemble de la parcelle, ou dans des rangées choisies comme échantillon. Les mesures étaient réalisées par les équipes INRAE de l'UMR ITAP à Montpellier. Cette technologie a fait l'objet d'un long développement et est encore en évolution. Le traitement des données est très complexe et nécessite un programme particulier effectué sur Rstudio. Il a été possible d'obtenir des résultats assez précis en début d'essai. Toutefois il est nécessaire que la parcelle soit relativement propre. Le LIDAR permet de réaliser un nuage de point qui modélise les arbres, à partir duquel on peut obtenir plusieurs indicateurs, dont un indice de densité.

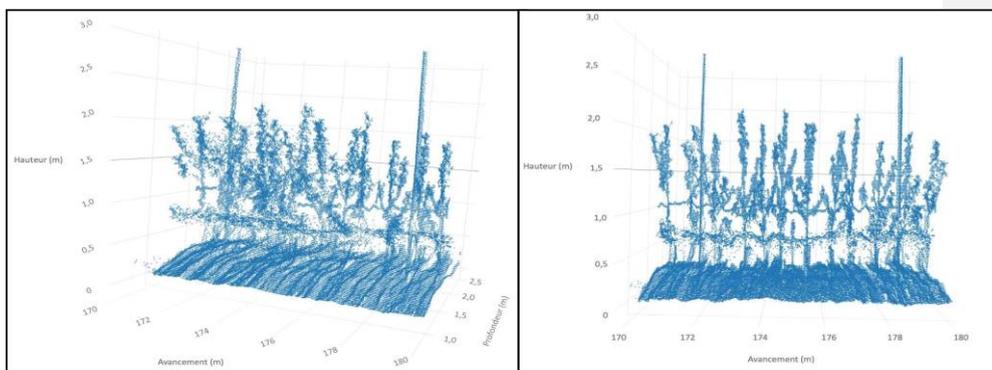


Figure 11 : Nuages de points acquis par le LIDAR le 02 juillet 2021

Quant aux **mesures manuelles**, elles sont réalisées en mesurant d'abord le volume de la canopée des pommiers. Cela se fait à l'aide d'un mètre ruban. La hauteur est déterminée en calculant la différence entre la branche la plus basse et le sommet de l'arbre. L'épaisseur est obtenue en prenant la moyenne des branches verticales les plus longues. La largeur est estimée en mesurant la distance entre deux arbres dans la haie.

Ces mesures permettent de calculer deux indicateurs : la surface foliaire (LWA) et le volume foliaire (TRV). L'objectif est d'établir une corrélation entre ces indicateurs et la quantité d'eau appliquée. Voici les formules de calcul des indicateurs LWA et TRV :

$$TRV = \frac{L * H * 10000}{D}$$

$$LWA = \frac{2 * H * 10000}{D}$$

- TRV : volume des rangés d'arbres (m^3 TRV ha⁻¹)
- LWA : surface de rangés d'arbres (m^2 LWA ha⁻¹)
- L : diamètre de la canopée à mi-hauteur sur la rangée (m)
- H : hauteur de canopée (m)
- D : espacement des rangs (m)

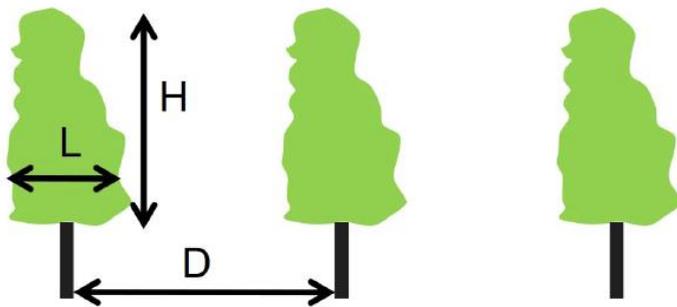


Figure 12 : Représentation de la surface foliaire et du volume de végétation dans un verger

Pour la dernière année, seules les mesures manuelles ont été prises en compte, car les autres méthodes testées les années précédentes ont rencontré des problèmes. La réception des données du LIDAR était trop tardive que l'exploitation des données ne permettaient pas d'exploiter les données en temps réel. Ce décalage ne permettait pas d'ajuster précisément la taille de la végétation.

En ce qui concerne le drone, le pilote, étant confronté à un problème personnel, n'a pas pu assurer la tâche. Le drone est le LIDAR sont plus propices à être utilisé sur vergers adultes que des vergers en voies de développement.

Enfin, les prises de vues concernant l'imagerie satellite n'ont pas permis de réaliser des mesures à l'échelle d'une parcelle d'essai en arboriculture

B. Détermination du coefficient k_{vv}

Une démarche en deux étapes est entreprise. Initialement, une période de référence est sélectionnée pendant laquelle les apports en eau doivent être adéquats (tension hydrique stable) pour les besoins des arbres. La modalité M1 est d'abord pilotée par le coefficient k_{vv} obtenue l'année précédente (pour l'année 2 et 3). Puis la modalité est irriguée grâce au OAD pour avoir une période de référence et ainsi réajuster le coefficient k_{vv} .

La détermination du coefficient k_{vv} résulte de plusieurs équations incluant l'irrigation journalière, le k_c , l'ETP ainsi que LWA ou TRV. Les données recueillies à

partir de la plateforme SUD AGRO METEO (SAM) et les relevés quotidiens des compteurs d'eau sont analysées par modalité.

La première étape consiste à sélectionner une période de référence où les tensions hydriques sont stables. Ensuite, les équations ci-dessous nous permette d'obtenir le kvv pour LWA et TRV :

$$kvv \text{ jour} = \frac{\text{Besoin en eau}(mm/j)}{LWA * kc * ETO}$$

$$kvv \text{ jour} = \frac{\text{Besoin en eau}(mm/j)}{TRV * kc * ETO}$$

L'opération est renouvelée chaque jour pendant 1 semaine pour obtenir un nouveau coefficient kvv. La moyenne des kvv jour est effectué pour LWA et pour TRV en fin de semaine. Grâce à ces deux nouveaux coefficients, nous allons pouvoir utiliser la formule suivante pour irriguer la parcelle :

$$\text{Besoin en eau}(mm/j) = kc * ETO * LWA * kvv$$

$$\text{Besoin en eau}(mm/j) = kc * ETO * TRV * kvv$$

Seulement le besoin en eau avec le TRV a été utilisé car celui avec le LWA était moins précis (en effet, il dépend que de la hauteur et de l'espacement entre les rangs).

Les valeurs du kvv trouvé reste néanmoins des estimations pour cette période.

Pourcentage d'écart entre les nnées

Soustraire rpemiere annes

Modalité 2 : pilotage assisté par les outils d'aide à la décision

Dans le cadre du projet OREVE mené sur le site de SUDEXPE, des stratégies de gestion plus économiques ont été mises en place pour réduire les irrigations excessives dans les jeunes vergers. Pour ce faire, des dispositifs de contrôle ont été déployés sur la parcelle, spécifiquement sur le deuxième rang, et ont été répartis de manière identique dans les trois modalités. La modalité 2 a été piloté grâce à ses outils d'aide à la décision (OAD).

A. Les sondes watermarks



Figure 13 : Photographie de sondes Watermarks installés dans la parcelle OREVE

Les mesures d'humidité du sol sont réalisées à l'aide de tensiomètres watermarks . Chaque modalité est équipée de six sondes tensiométriques implantées sous les goutteurs, à proximité des zones d'humidité du sol. Chaque sonde est composée d'une bougie poreuse et d'une tige fermée à l'extrémité opposée à la bougie. Les six sondes sont disposées à des profondeurs différentes dans la parcelle élémentaire, trois sondes à 45 cm de profondeur et les autres à 75 cm.

Lorsque le sol se dessèche, les relevés indiquent une augmentation de la tension, tandis que l'humidification du sol entraîne une diminution de la tension, rétablissant ainsi l'équilibre. Les données enregistrées sont traitées à travers la plateforme SAM, qui fournit des informations périodiques (toutes les heures) sur les tensions

d'eau dans le sol. La plateforme SAM, initiée en 2011 par SudExpé, répond aux besoins des professionnels de la pomiculture de la région.

Son objectif est de mettre à disposition des données agro-climatiques au plus près des cultures, favorisant une agriculture de précision axée sur la réduction des intrants et l'optimisation des ressources disponibles.

B. Les dendromètres

Un dendromètre, un appareil connecté au niveau du tronc des arbres, mesure les micro-variations quotidiennes du diamètre du tronc. Cet outil fournit des indications sur la présence de blocages dans le développement de l'arbre, qui peuvent être associés à un excès d'eau au niveau des racines.



Figure 15 : photographie d'un dendromètre installé dans la parcelle OREVE

Le dendromètre permet de déterminer si la croissance est régulière, d'identifier des différences de croissance entre les modalités ou d'évaluer et suivre si un arbre subit



Figure 16 : Photographie d'une sonde capacitive installé dans la parcelle OREVE

un stress. En cas de stress, des fluctuations significatives du diamètre sont observées quotidiennement. De plus, un stress important peut se traduire par des arrêts dans la croissance. Il est toutefois important de noter que l'utilisation exclusive de dendromètres pour le pilotage de l'irrigation serait complexe. Néanmoins, ils se révèlent être d'excellents indicateurs de stress, non seulement hydrique selon des études antérieures (Huguet et al., 1992), mais également mécanique. Leur courbe de variation présente une forme pseudo sinusoïdale, avec des amplitudes généralement inférieures à 0,4 mm (400 μm) pour des cultures telles que les pommiers, les abricotiers et les vignes (team, 2020)

un stress. En cas de stress, des fluctuations significatives du diamètre sont observées quotidiennement. De plus, un stress important peut se traduire par des arrêts dans la croissance. Il est toutefois important de noter que l'utilisation exclusive de dendromètres pour le pilotage de l'irrigation serait complexe. Néanmoins, ils se révèlent être d'excellents indicateurs de stress, non seulement hydrique selon des études antérieures (Huguet et al., 1992), mais également mécanique. Leur courbe de variation présente une forme pseudo sinusoïdale, avec des amplitudes généralement inférieures à 0,4 mm (400 μm) pour des cultures telles que les pommiers, les abricotiers et les vignes (team, 2020)

C. Les sondes capacitatives

Une sonde capacitive mesure l'humidité du sol en se basant sur la capacité diélectrique du sol, c'est-à-dire sa capacité à stocker une charge électrique. La sonde comporte généralement deux électrodes insérées dans le sol. Lorsque le sol est sec, il a une faible conductivité électrique et une capacité diélectrique plus faible. En revanche, lorsque le sol est humide, sa conductivité et sa capacité diélectrique augmentent. La sonde mesure ces variations et les convertit en pourcentage d'humidité du sol.

Modalité 3 pilotage par le bilan hydrique

La modalité 3 du projet OREVE repose sur un mode de pilotage de l'irrigation fondé sur le bilan hydrique, et plus spécifiquement sur une référence d'apport en eau établie à 50% de l'ETM. Cette approche s'appuie sur une méthode de gestion de l'irrigation qui prend en compte le cycle hydrologique du système sol-plante-atmosphère pour déterminer les besoins en eau des arbres.

L'ETM représente la quantité maximale d'eau évaporée et transpirée par les cultures dans des conditions idéales, généralement définies en fonction des caractéristiques de la culture et des conditions climatiques. En pilotant l'irrigation à 50% de l'ETM, cette modalité vise à maintenir une réserve suffisante en eau dans le sol pour les besoins des arbres, sans les surexposer à une saturation en eau qui pourrait causer des problèmes de drainage ou des contraintes physiologiques.

26/06/23 au 02/07/23	RFU (mm)	Coef. cultural	mm semaine	mm jour
ETP – Montpellier			48	6,9
Abricotier de saison	40	0,60	29	4,2
Abricotier tardif	40	0,60	29	4,2
Cerisier	40	0,40	19	2,8
Pêcher avant récolte	40	1,00	48	6,9
Pêcher après récolte	40	0,00	0	0,0
Pommier/Poirier avant récolte	80	1,00	48	6,9
Pommier/Poirier après récolte	80	0,00	0	0,0

Figure 17 : exemple du bulletin d'irrigation pour la période du 26/06/2023 au 02/07/2023(BRL, 2023)

4. Résultats 2021

Au niveau du matériel végétal

Les différentes mesures ont déterminé le volume des arbres au cours de la saison 2021. Les résultats par date de mesure et par méthode de mesure sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Toutes les mesures indiquent une progression du volume végétatif entre les mesures de juin juillet et août .

Les valeurs LWA manuel et LIDAR augmentent d'environ 20% entre juin et août. Les valeurs TRV progressent de 60% en manuel et 35% en LIDAR. Le ratio de densité à partir du LIDAR augmente de 40% pour la même période. En juin, la mesure NDVI avec le drone n'a pu être établie. Quant à la valeur NDVI, elle est très stable entre les relevés du 5 et du 25 juillet.

Conformément à ce qui était attendu, les modalités d'irrigation n'ont eu en début d'été qu'une faible influence sur le développement végétatif pour sur la première année du projet OREVE.

En juin, l'analyse de variance indique un R^2 de 30 à 90% selon les mesures, mais le modèle n'est pas significatif. Par ailleurs, il n'existe aucune différence significative entre les modalités.

Tableau 1 : Moyennes des mesures de volume végétal par modalité du mois de juin

	LWA M	TRV M	VARI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
M3	6323	2216	-0,0182	65,82	6361	2554
M1	6333	2003	-0,0221	59,97	6534	2272
M2	6156	2005	-0,0239	60,32	6279	2240
Pr > F(Modèle)	0,759	0,132	0,004	0,056	0,185	0,084
Significatif	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
Pr > F(Moda)	0,556	0,343	0,934	0,164	0,182	0,145
Significatif	Non	Non	Non	Non	Non	Non
R^2	0,300	0,690	0,911	0,776	0,645	0,739
Ecart type du résidu	246	215	0,0222	4,16	172	210

En juillet, le modèle n'est jamais significatif. Le R^2 indique des variabilités de de 8 à 67%. Il n'y a donc pas de différence significative entre les modalités. Toutefois, l'effet de la modalité tend à être significatif pour le ratio de densité au LIDAR ($P=0,09$).

Tableau 2: Moyennes des mesures de volume végétal par modalité du mois de juillet

	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
M3	6590	2977	0,417	76,14	6689	2969
M1	6711	2611	0,417	70,38	6683	3039
M2	6363	2532	0,404	82,78	6954	3304
Pr > F(Modèle)	0,429	0,158	0,702	0,152	0,440	0,289
Significatif	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Pr > F(Moda)	0,385	0,199	0,702	0,090	0,478	0,454
Significatif	Non	Non	Non	Non	Non	Non
R ²	0,49	0,67	0,08	0,67	0,48	0,57
Ecart type du résidu	334	324	0,026	6,47	338	372

En août, le modèle tend à être significatif pour les variables TRV manuel, Densité LIDAR et TRV LIDAR. Le R² indique que les modèles expliquent de 44 à 77% de variabilité des mesures. Les différences entre les modalités d'irrigation sont proches du seuil de signification de 5% pour le TRV manuel (P=0,05) et le ratio de densité (P=0,07). L'effet de la modalité d'irrigation apparaît comme significatif sur le TRV LIDAR (P=0,049).

Tableau 3: Moyennes des mesures de volume végétal par modalité du mois d'août

	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
M3	7930	3892	0,434	90,25	8036	3815
M2	7245	2976	0,397	92,98	7315	2968
M1	7336	3074	0,396	81,01	6931	2774
Pr > F(Modèle)	0,308	0,081	0,224	0,074	0,205	0,063
Significatif	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Pr > F(Moda)	0,199	0,055	0,224	0,074	0,141	0,049
Significatif	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
R ²	0,19	0,74	0,28	0,44	0,63	0,77
Ecart type du résidu	508	454	0,033	6,68	674	486

En conclusion, les mesures de volume végétal indiquent une légère influence favorable de la modalité M3 pour les observations d'août.

Au niveau des apports d'eau

Résultats des outils de contrôle de l'irrigation

On peut observer que les courbes dendrométriques des trois modalités suivent une évolution similaire. L'augmentation du diamètre des troncs est stable pour les trois modalités. Les quelques pics de l'amplitude journalière illustrent un stress de l'arbre. Mais ce stress n'est pas forcément lié à l'irrigation, il peut par exemple être dû à des conditions de vent importantes.

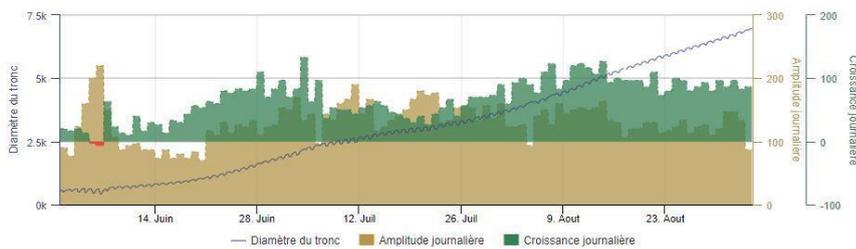


Figure 18 : Evolution de la dendrométrie de M1 entre le 1er juin et le 3 septembre 2021

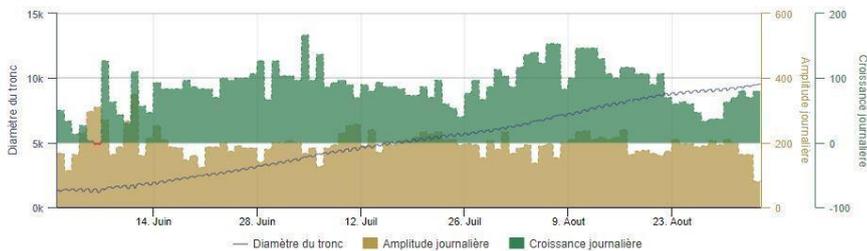


Figure 19 : Evolution de la dendrométrie de M2 entre le 1er juin et le 3 septembre 2021

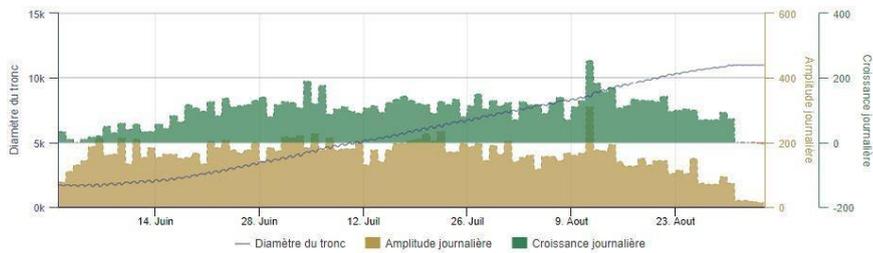


Figure 20 : Evolution de la dendrométrie de M3 entre le 1er juin et le 3 septembre 2021

On peut observer l'évolution des courbes tensiométriques de chaque modalité à 45 et 75 cm. On peut remarquer que les valeurs obtenues dans la modalité M3 sont assez faibles. Cela s'explique par le fait que les doses d'eau apportées sont plus importantes.

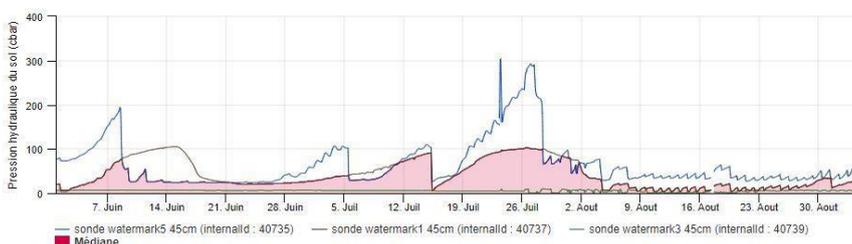


Figure 22 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 45 cm de profondeur

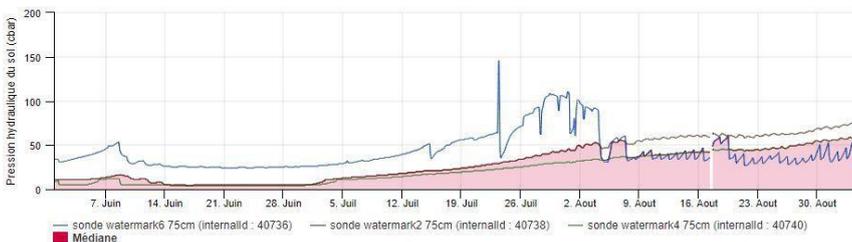


Figure 23 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 75cm de profondeur

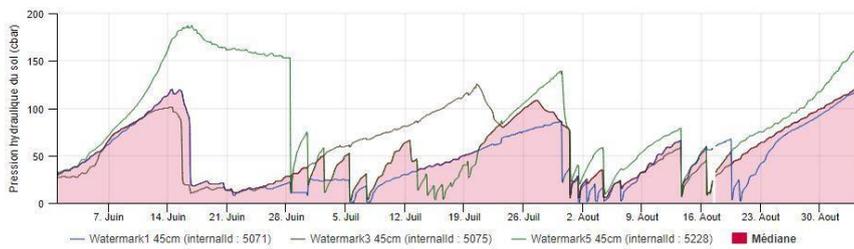


Figure 24 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 45cm de profondeur

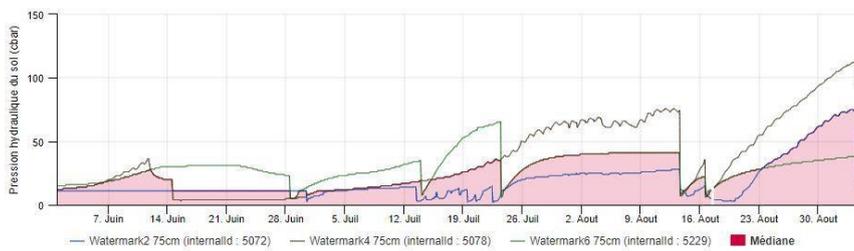


Figure 25 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 75cm de profondeur

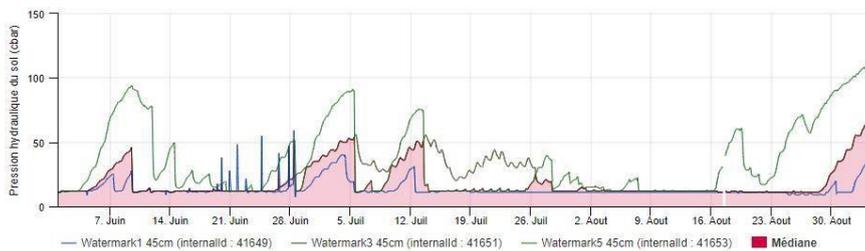


Figure 26 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 45cm de profondeur

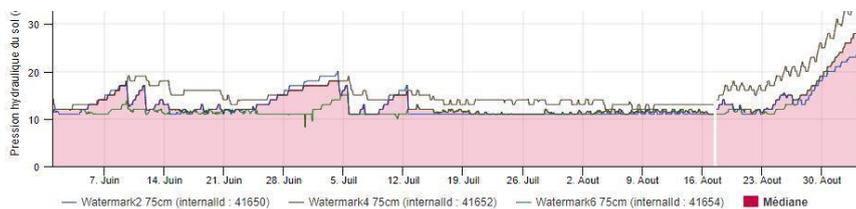


Figure 27 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 75cm de profondeur

Consommation en eau

Au cours de la saison 2021 (du 1^{er} juin au 10 septembre), les modalités M1 et M2 ont reçu respectivement un cumul d'irrigation (hors pluviométrie) de 83 mm et 78 mm, contre 150 mm pour la modalité M3. Le pilotage de l'irrigation par sonde a donc permis une économie d'eau de 45%. La légère différence entre les cumuls pour M1 et M2 s'explique par les défaillances du programmeur de M2. Pour la même période, le cumul de pluie s'élève à 105 mm.

Résultats des méthodes d'évaluation du volume végétatif

Analyse qualitative des différents indicateurs

Le projet a permis de comparer la mesure de la végétation avec quatre méthodes différentes. Chacune permet d'établir différents indicateurs.

Le drone est un instrument permettant d'obtenir très rapidement des relevés, même sur de grandes surfaces. Pour la parcelle OREVE, le temps de survol est inférieur à 5 minutes. A cela, il faut toutefois ajouter le temps de déplacement du pilote Benoit Chauvin-Buthaud qui vient de la Drôme.

Le traitement des données est relativement complexe et nécessite de maîtriser un logiciel de traitement d'image (en l'occurrence QGIS). Aussi, le calcul des différents indicateurs (VARI ou NDVI) nécessite une expertise. En conséquence, pour obtenir des résultats rapidement, il faut avoir planifié l'intervention sur le terrain ainsi que le traitement des données. Par ailleurs, nous avons pu constater qu'il était difficile d'obtenir des résultats utilisables quand les arbres sont peu développés et que le couvert végétal au sol (l'enherbement) est important.

Le LIDAR permet une mesure relativement rapide. Après quelques réglages, il faut passer au pas dans la rangée sur l'ensemble de la parcelle, ou dans des rangées choisies comme échantillon. Les mesures étaient réalisées par les équipes INRAE (Anice Cheraiet et Jean-Paul Douzals) de l'UMR ITAP à Montpellier. Comme indiqué plus haut, cette technologie a fait l'objet d'un long

développement et est encore en évolution. Le traitement des données est très complexe et nécessite un programme particulier effectué sur Rstudio. Il a été possible d'obtenir des résultats assez précis même en début d'essai. Toutefois il est nécessaire que la parcelle soit relativement propre. Le LIDAR permet de réaliser un nuage de point qui modélise les arbres, à partir duquel on peut obtenir plusieurs indicateurs, dont un indice de densité.

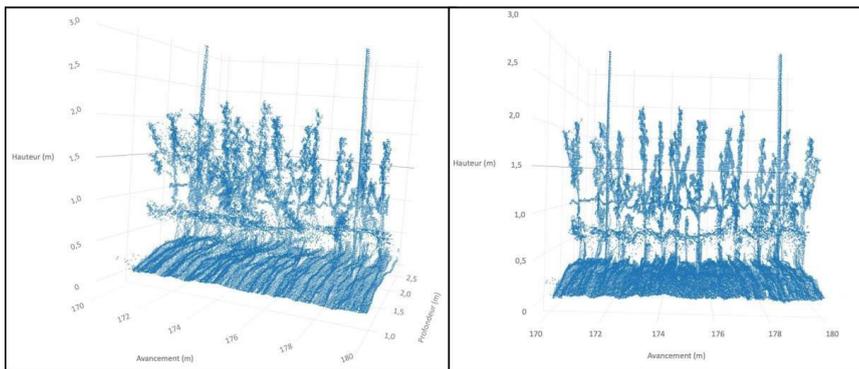


Figure 28 : Nuages de points acquis par le LIDAR le 02 juillet 2021

Les mesures manuelles sont la méthode de référence pour évaluer le volume de végétation d'un verger. Cependant, il semble qu'elles ne soient utilisées qu'à des fins expérimentales. Car cette technique peut être exigeante en temps passé selon le nombre de données que l'on souhaite obtenir. Toutefois, cette méthode n'exige pas d'expertise ou d'outils particuliers. Le traitement des données obtenues est relativement simple et ne demande que des connaissances de base en analyse de données.

Les images fournies par les satellites pléiades n'ont pas une définition suffisante pour permettre une analyse précise des micro-parcelles de jeunes arbres. Ce constat nous a amenés à abandonner l'utilisation d'images satellites au moins pour la première année du projet.

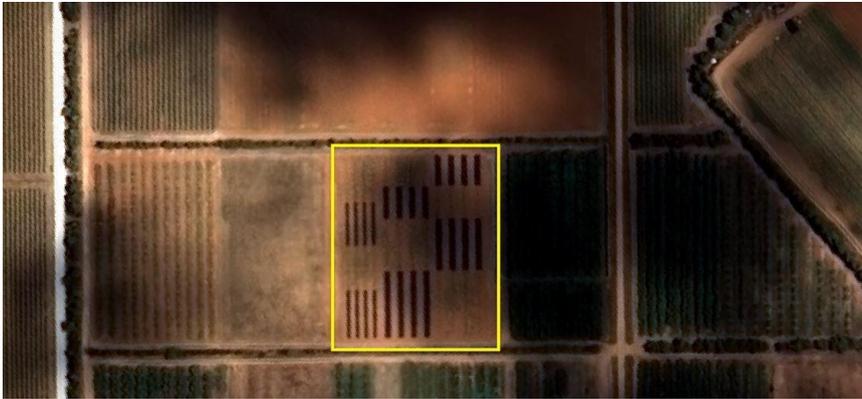


Figure 29 : Prise de vue satellite de la parcelle d'essai OREVE de St-Gilles le 13 juillet 2021

Analyse statistique des différents indicateurs.

Cette partie analyse les relations entre les indicateurs de volume végétal obtenus avec les différentes méthodes présentées plus haut. Les indicateurs retenus sont le LWA et le TRV calculés, d'une part avec les mesures manuelles et, d'autre part avec les mesures faites avec le LIDAR. De plus, le LIDAR fournit un ratio de densité de végétation. Enfin, le drone a permis de déterminer les indices VARI et NDVI.

Tableau 4 : Corrélations entre les indicateurs début juin

Variables	LWA M	TRV M	VARI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	1	0,033	-0,230	0,031	0,751	-0,042
TRV M		1	0,501	0,527	-0,277	0,975
VARI			1	0,775	-0,389	0,513
Densi Lid				1	-0,239	0,581
LWA Lid					1	-0,283
TRV Lid						1

p-value	LWA M	TRV M	VARI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	0	0,919	0,473	0,924	0,005	0,897
TRV M		0	0,097	0,078	0,384	< 0,0001
VARI			0	0,003	0,211	0,088
Densi Lid				0	0,455	0,047
LWA Lid					0	0,372
TRV Lid						0

Matrice de corrélation et p-values (Pearson). Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

Lors de cette première mesure avec le drone, la définition de 2,5 cm n’a pas permis de réaliser une mesure NDVI. Une mesure VARI a donc été réalisée à la place. De plus, le faible développement des arbres et l’importance relative du couvert végétal a rendu difficile l’analyse des images réalisées par drone.

La matrice de corrélation nous montre que les indices mesurés manuellement sont proportionnels à ceux mesurés par le LIDAR. La prise de mesure VARI prise par drone est corrélée à la mesure de densité réalisée à l’aide du LIDAR. Dans une moindre mesure, cette mesure de densité est aussi corrélée à l’indice de volume TRV mesuré par LIDAR.

Tableau 5 : Corrélations entre les indicateurs en juillet

Variables	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	1	0,428	0,727	0,104	0,100	0,416
TRV M		1	0,406	0,138	0,104	0,188
NDVI			1	0,229	-0,315	0,390
Densi Lid				1	0,344	0,867
LWA Lid					1	0,349
TRV Lid						1
p-value	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	0	0,165	0,007	0,748	0,756	0,179
TRV M		0	0,190	0,669	0,749	0,558
NDVI			0	0,474	0,318	0,210
Densi Lid				0	0,273	0,000
LWA Lid					0	0,266
TRV Lid						0

La matrice de corrélation de la deuxième session de mesure, nous montre que la mesure de densité est fortement corrélée avec l'indice de TRV réalisé à partir de données LIDAR. Une corrélation existe aussi entre la mesure NDVI et l'indice de LWA manuel.

Tableau 6 : Corrélations entre les indicateurs en août

Variables	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	1	0,855	0,817	0,358	0,774	0,703
TRV M		1	0,795	0,348	0,849	0,944
NDVI			1	0,401	0,679	0,703
Densi Lid				1	0,440	0,388
LWA Lid					1	0,911
TRV Lid						1
p-value	LWA M	TRV M	VARI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	0	0,000	0,001	0,254	0,003	0,011
TRV M		0	0,002	0,267	0,000	< 0,0001
VARI			0	0,197	0,015	0,011
Densi Lid				0	0,152	0,212
LWA Lid					0	< 0,0001
TRV Lid						0

Pour la dernière session de début août, tous les indices sont corrélés entre eux, sauf pour la mesure de densité. On peut remarquer que la corrélation est particulièrement élevée entre les deux indices LWA et TRV issus des mesures LIDAR (R=0,91 ; P< 0,0001).

Tableau 7 : Corrélations entre les indicateurs pour la totalité de la saison

Variables	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	1	0,801	0,492	0,571	0,726	0,482
TRV M		1	0,551	0,476	0,759	0,679
NDVI			1	0,218	0,356	0,604
Densi Lid				1	0,551	0,476
LWA Lid					1	0,733
TRV Lid						1

p-value	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
LWA M	0	< 0,0001	0,015	0,004	< 0,0001	0,017
TRV M		0	0,005	0,019	< 0,0001	0,000
NDVI			0	0,305	0,087	0,002
NDVI SD				0,618	0,723	0,202
Densi Lid				0	0,005	0,019
LWA Lid					0	< 0,0001
TRV Lid						0

Ce dernier test de corrélation prend en compte toutes les mesures réalisées sur la saison. Toutefois, les valeurs VARI obtenues lors de la première session de mesure par drone ne sont pas prises en compte.

La matrice de corrélation regroupant les mesures de la totalité de la saison, nous montre que les indicateurs de LWA et TRV sont tous corrélés entre eux, que les prises de mesures soient manuelles ou avec le LIDAR.

Le NDVI, mesuré seulement en juillet et août, est corrélé avec les TRV et LWA manuels, ainsi qu'avec le TRV mesuré par LIDAR. Le ratio de densité est corrélé avec les indicateurs TRV et LWA quelle que soit la méthode de mesure mais n'est pas lié à la mesure NDVI.

Coefficient de volume de végétation Kvv

Déterminer le Kvv s'est fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, il a fallu sélectionner une période de référence pour laquelle les mesures étaient de bonne qualité et les apports correspondaient aux besoins. Ensuite, le Kvv a pu être estimé.

Sélection de la période de référence

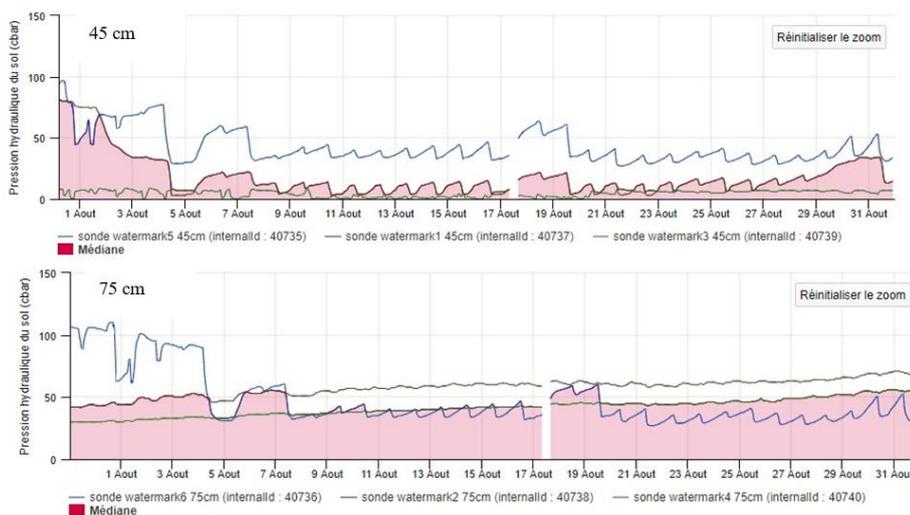


Figure 30 : Courbe de pression hydraulique mesurées par les sondes Watermarks à 45 cm et 75 cm pour la modalité M1 en août 2021

Les deux graphes montrent les courbes tensiométriques des données mesurées par les Watermarks au cours du mois d'août sur la Modalité 1. Sur la première semaine du mois, on peut observer des variations importantes avec certains tensiomètres mesurant des tensions très élevées pour la première semaine du mois d'août. Mais on peut constater qu'à partir du 9 août, les courbes tensiométriques suivent une variation quotidienne régulière. C'est-à-dire que la tension diminue avec les apports d'eau et augmente au fil de la journée à cause de l'évapotranspiration induite par les arbres. La régularité de ces courbes indique que les apports d'eau sont très proches des besoins des plantes et correspondent aux quantités d'eau évapo-transpirées. En effet, du 7 août au 10 septembre, les données tensiométriques montrent une amplitude quotidienne

(écart mini / maxi) constante. La dose apportée quotidiennement a varié entre 0,9 et 1,1 mm / jour. Cette période de référence a été retenue pour déterminer le Kvv.

Calcul du Kvv

A partir de la formule du Kvv, nous avons obtenu un coefficient de volume de végétation propre à chaque méthode de mesure.

*Tableau 8 : Calcul du Kvv par méthode d'estimation du volume de végétation
Détermination du Kvv à partir des relevés de terrain du 7 août au 10 septembre.*

	LWA M	TRV M	NDVI	Densi Lid	LWA Lid	TRV Lid
Date de l'observation	18-août		28-juil		30-juil	
Moyenne pour M1	7336,2 5	3074,2 3	0,40	81,01	6931,2 5	2773,7 7
Kvv calculé	3,71E- 05	8,86E- 05	6,88E- 01	3,36E- 03	3,93E- 05	9,82E- 05
Kvv ajusté (correction de la décimale)	3,713	8,861	0,688	3,363	3,930	9,821
Coefficient d'ajustement	100000	100000	1	1000	100000	100000

Une autre méthode a été utilisée par régression linéaire entre les apports quotidiens en eau (Bjour) et la résultante du produit suivant :

$$Kc \times ETO_{\text{jour}} \times \text{Volume de végétation}$$

Les résultats des calculs sont présentés ci-dessous pour les méthodes LWA M, NDVI et Densité LIDAR.

Equation du K_{vv} pour l'indicateur LWA M :

$$\text{Besoin en eau} = 0,9474 + 0,004467 \times K_c \times ET_0 \times LWA M$$

Tableau 9 : Calcul du K_{vv} à partir du LWA M

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	0,947	0,032	29,563	<0,0001	0,882	1,013
Résultante LWA M	0,004	0,010	0,451	0,655	-0,016	0,025

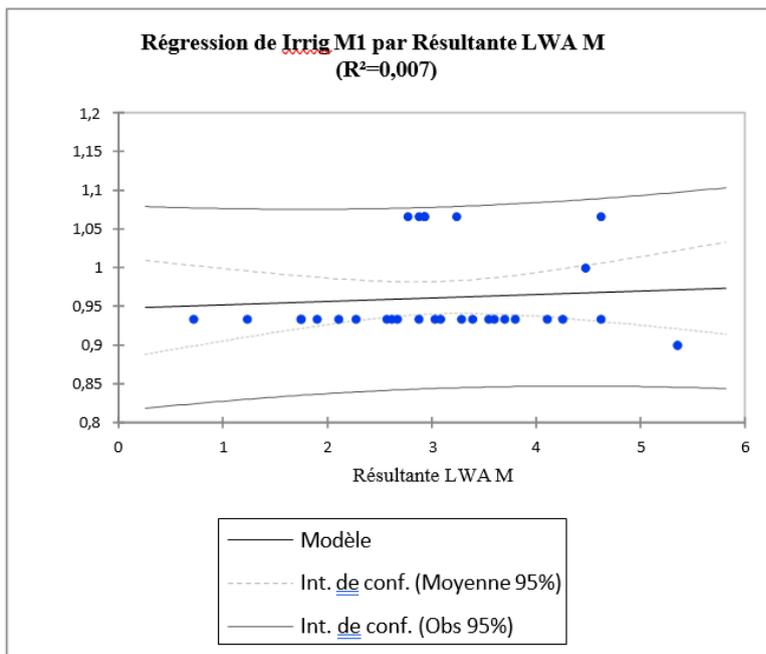


Figure 31 : Courbe de régression du K_{vv} pour LWA M

Equation du Kvv pour l'indicateur NDVI :

$$\text{Besoin en eau} = 0,9474 + 0,00828 \times Kc \times ETP \times NDVI$$

Tableau 10 : Calcul du Kvv à partir du NDVI

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	0,947	0,032	29,563	< 0,0001	0,882	1,013
Résultante NDVI	0,008	0,018	0,451	0,655	-0,029	0,046

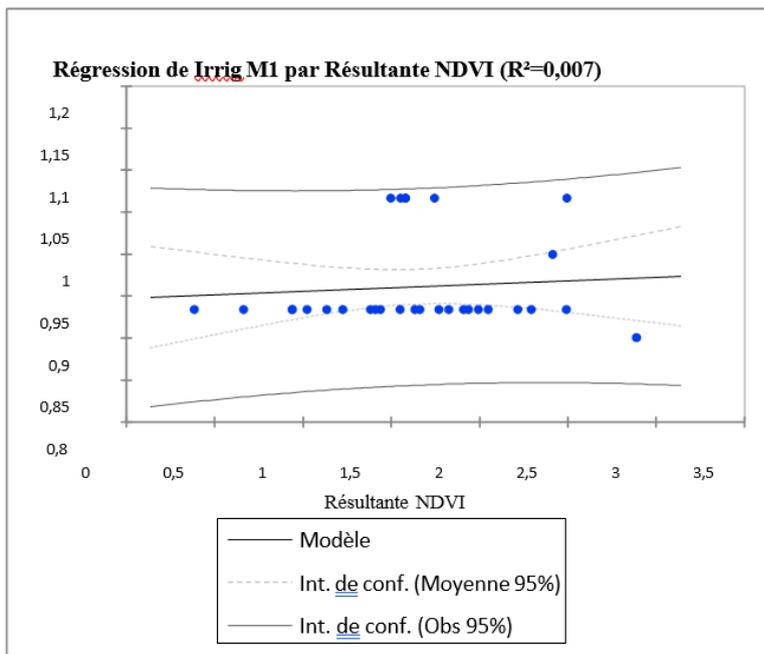


Figure 32 : Courbe de régression du Kvv pour NDVI

Equation du Kvv pour l'indicateur de Densité :

$$\text{Besoin en eau} = 0,9474 + 4,045 \times 10^{-5} \times Kc \times ETP \times \text{Densité}$$

Tableau 11 : Calcul du Kvv à partir de la densité

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	0,947	0,032	29,563	< 0,0001	0,882	1,013
Résultante densité	0,000	0,000	0,451	0,655	0,000	0,000

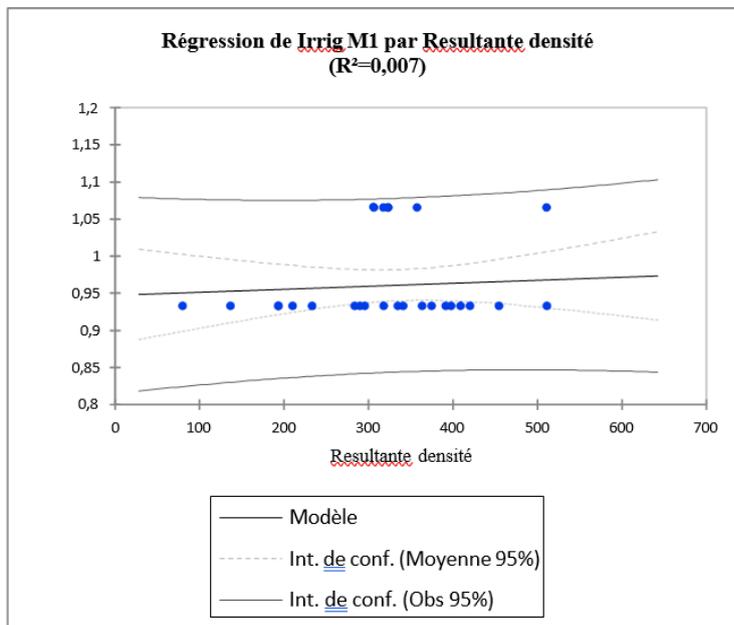


Figure 33 : Courbe de régression du Kvv pour l'indice de densité

Quel que soit l'indice de volume de végétation, le modèle du K_v estimé par régression fait apparaître un poids très important de la constante (proche de 1mm) et une faible influence du coefficient multiplicatif. En effet, les apports d'eau fixés pour la période de référence ont peu évolué malgré les variations quotidiennes d'ETP. Même si on peut s'attendre à un modèle plus variable, le modèle choisi apparaît très robuste. Ce modèle a servi de base pour la suite de l'essai.

5. Résultats 2022

Condition météorologique

Le bulletin d'irrigation fourni par le BRL nous permet de présenter l'accumulation de la pluviométrie de cette saison à partir d'avril. De plus, il nous permet de visualiser la trajectoire cumulée de l'évapotranspiration potentielle de cette année, en la comparant avec les moyennes de précipitations des années antérieures ainsi que les moyennes d'évapotranspiration correspondantes.

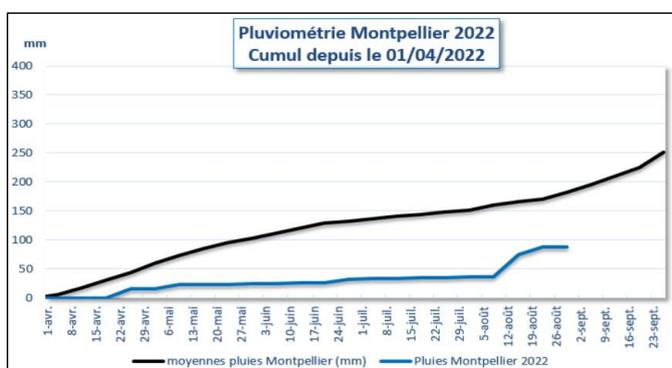


Figure 34 : cumul des pluviométries 2023 par rapport aux pluviométries moyennes de Montpellier (BRL, 2023)

Le cumul des pluies à Montpellier pour la saison 2023 est de 107 mm, soit un cumul déficitaire de 33% par rapport à la moyenne, qui est de 161 mm.

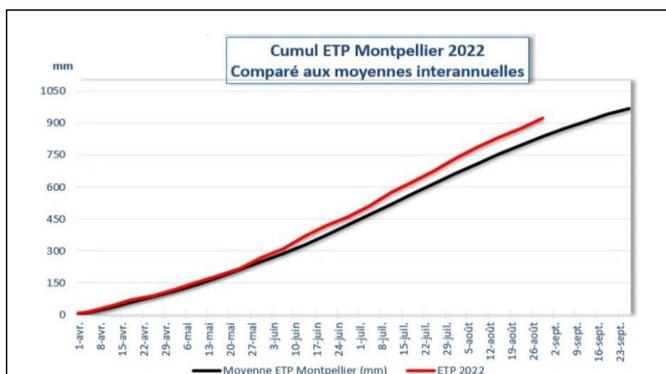


Figure 35 : Cumul de l'évapotranspiration potentielle de 2023 par rapport aux moyennes interannuelles (BRL, 2023)

Le cumul des ETP à Montpellier en 2022 est quant à lui supérieur de 8% à la moyenne. Soit 809 mm pour un cumul moyen de 752 mm.

A partir de ces résultats, on peut remarquer que les conditions climatiques durant cette étude étaient plus élevées que la moyenne, où la température de l'été 2023 est plus élevée comparée aux températures des années passées et les pluviométries également étaient moins importantes. En effet, le mois de juillet et août a été particulièrement touché avec aucune précipitation.

Les conditions météorologiques, notamment les températures et les précipitations, jouent un rôle crucial dans la planification de l'irrigation. Ces conditions varient d'une année à l'autre et d'une région à l'autre. Étant donné le caractère aride du climat méditerranéen, de nombreuses cultures, en particulier les pommiers, dépendent grandement de l'irrigation. Cette dépendance est particulièrement marquée dans le sud de la France, ainsi que dans l'ensemble du pays.

Effet de bloc sur les modalités

Pour étudier un éventuel effet bloc, entre la période de juin à août 2022, nous avons comparé les moyennes de LWA entre chaque rang.

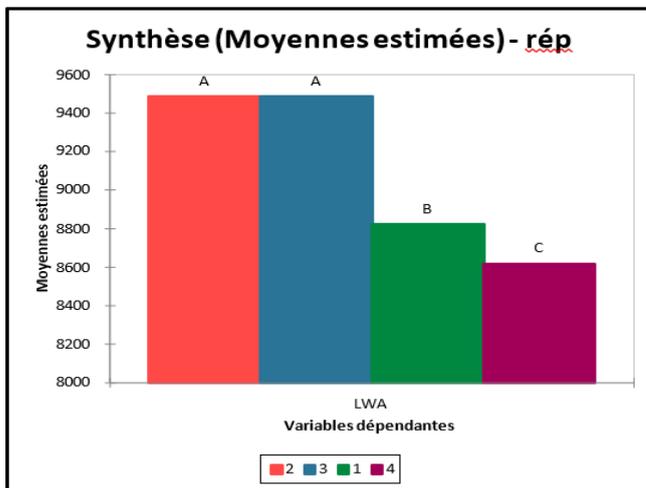


Figure 36 : résultat de moyennes estimées de la végétation en fonction d'effet bloc

Cette disparité observée entre les quatre blocs met en évidence l'influence de l'effet de bordure sur les arbres. Malgré une irrigation uniforme, les différences entre les répétitions sont manifestes, avec la répétition 4 qui semble moins développée que les autres. Une explication plausible réside dans la présence de la culture associée (intercalaire), à savoir les mélilots, une légumineuse couramment utilisée comme engrais vert pour enrichir le sol en azote et en matière organique. Cette culture a été implantée en association avec les pommiers du bloc 4, et il semble qu'elle ait exercé une influence sur la croissance de la végétation des pommiers. Concrètement, les arbres de ce bloc semblent se développer de manière moins vigoureuse par rapport aux autres blocs de pommiers, en grande partie parce qu'ils partagent la même allocation d'eau avec la culture de mélilot, initialement destinée exclusivement aux pommiers.

Dans la poursuite des résultats, nous allons restreindre notre analyse aux blocs 1, 2 et 3 afin de minimiser les risques d'erreurs potentielles liées à cette influence extérieure

Evolution de surface et volumes des arbres

Une analyse de variance ANOVA a été effectuée sur les différents paramètres pour connaître s'il y a un effet de l'irrigation sur l'évolution des arbres par modalité.

En analysant les moyennes estimées des surfaces foliaires et des tailles de végétation, il est évident que la croissance des arbres a été constante tout au long de la période de test de la saison 2022. Cependant, dès le mois de juillet, correspondant à l'augmentation de la taille des fruits au stade de maturité, cette croissance s'est ralentie, empêchant ainsi les arbres de connaître une expansion significative.

Les tableaux ci-dessous expliquent la dynamique de la moyenne de LWA au cours des cinq périodes de mesure :

Tableau 12 : moyenne estimée d'évolution des surfaces de végétation (LWA) d'avril à août

Synthèse des comparaisons multiples par paires pour les DATES (Tukey (HSD)) :				
Modalité	Moyennes estimées (LWA 2022)	Groupes		
08/2022	10697,367	A		
07/2022	10487,558	A		
06/2022	9923,611		B	
05/2022	9213,194			C
04/2022	8553,472			D

Les résultats des comparaisons multiples par paires mettent en évidence que le mois de juillet correspond au point d'arrêt de la croissance des arbres. Entre les deux derniers mois, aucune différence significative n'est observée (ils appartiennent au même groupe A). Cette tendance à l'horizontalité des courbes est également illustrée :

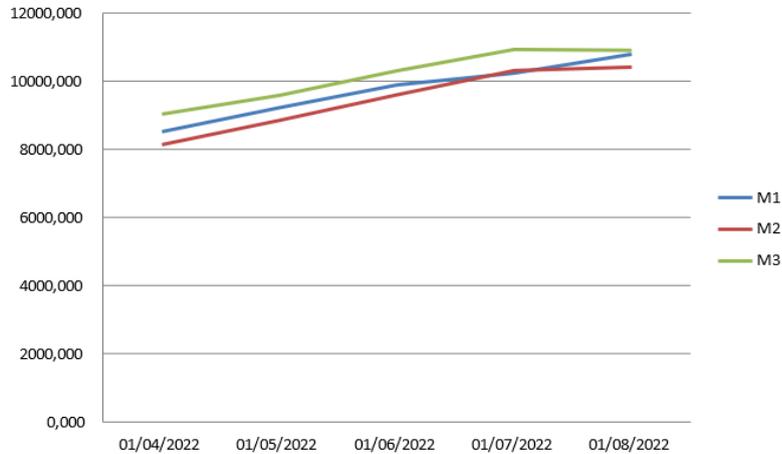


Figure 37 : dynamique d'évolution de la surface foliaire pour les trois modalités au cours du temps

L'effet de l'irrigation sur la croissance des troncs d'arbres

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

Les données obtenues à partir des mesures effectuées par le dendromètre indiquent que la quantité d'eau fournie jusqu'à présent a permis une croissance constante et dépourvue de toute séquence de stress détectée par les capteurs. Les courbes révèlent que les plantes continuent à développer leurs tiges sans montrer de signes de rétractation caractéristiques d'un stress, qu'il soit hydrique ou autre.

De manière significative, les résultats de l'expérimentation de 2019, menée sur le groupe Pink Lady à SudExpé, démontrent qu'avec une augmentation de l'approvisionnement en eau, la croissance des plantes s'interrompt complètement dès le début de la période d'irrigation lorsque le sol atteint la saturation en eau

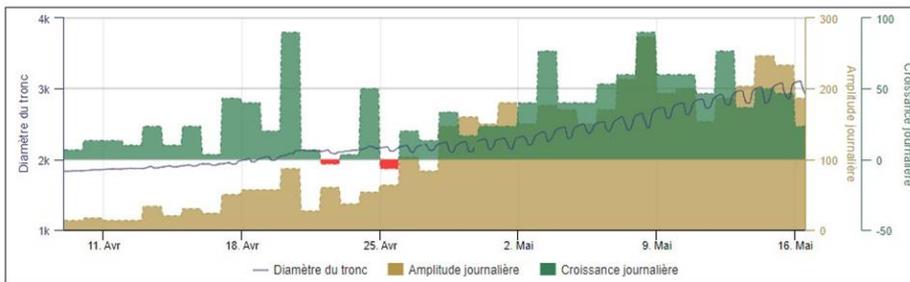


Figure 38 : l'évolution de la croissance de tronc d'arbre de M1 en 2022

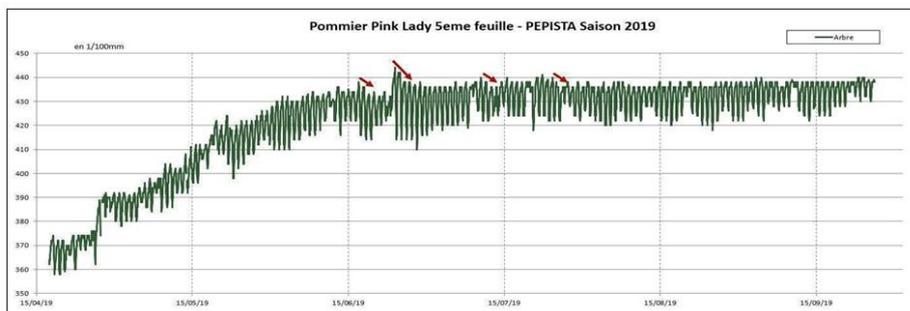


Figure 39 : l'évolution de l'arbre Pink lady en 2019 avec un excès d'eau

Les courbes présentées ci-dessous illustrent l'évolution de la croissance des différentes modalités et leurs amplitudes journalières. Il est manifeste que les courbes de M1 et M2 suivent une dynamique de croissance similaire, qui est nettement plus prononcée que celle de la modalité M3. En effet, il est évident que le

diamètre des arbres de la modalité M3 tend à rester constant de la mi-juin jusqu'à la fin de la saison. Ce phénomène explique l'arrêt de la croissance au niveau du tronc, malgré la dose d'eau surestimée attribuée à cette modalité, qui est notablement supérieure à celle des autres modalités, lesquelles continuent de se développer jusqu'à présent.

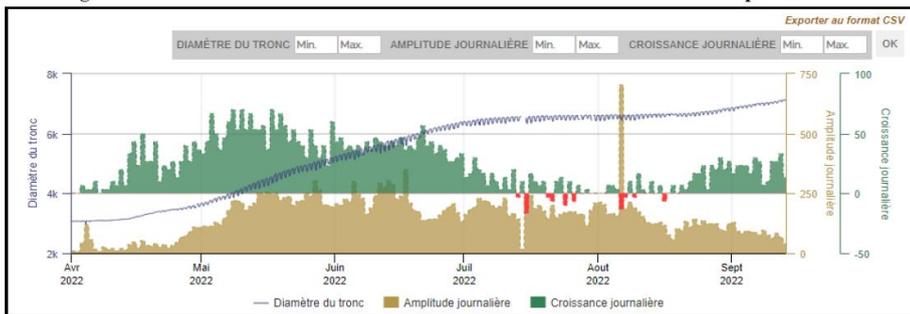


Figure 40 : résultat d'évolution de la dendrométrie de M1 entre le 1er avril à 12 septembre 2022

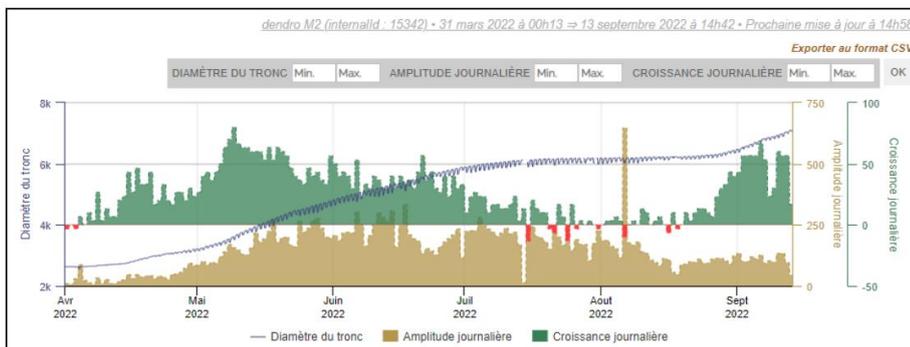


Figure 41 : résultat d'évolution de la dendrométrie de M2 entre le 1er avril à 12 septembre 2022

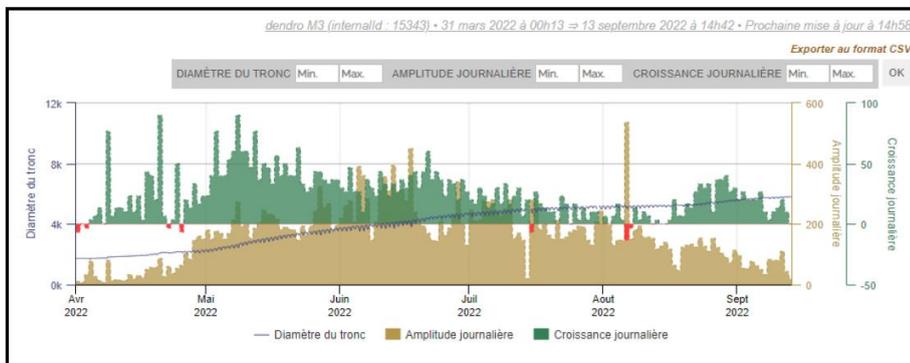


Figure 42 : résultat d'évolution de la dendrométrie de M3 entre le 1er avril à 12 septembre 2022

Effet de l'irrigation, évolution de la croissance des fruits

Calibre de fruits

À partir du 13 juillet, des mesures hebdomadaires des diamètres des fruits ont été effectuées afin d'analyser les différences de calibres et leurs évolutions au sein de chaque modalité. Cette démarche visait à déterminer si l'irrigation a un impact sur la croissance des fruits des jeunes vergers. Pour ce faire, une analyse de la variance (ANOVA) à trois facteurs a été employée, ayant pour variable dépendante le "calibre" et pour variables explicatives les "modalités, les dates et les répétitions."

Les résultats de cette analyse révèlent une croissance hebdomadaire significative et mettent en évidence des différences notables en termes de taille des fruits entre chaque modalité, comme présenté ci-dessous :

a mis en forme : Police :11 pt, Gras

a mis en forme : Police :11 pt, Gras

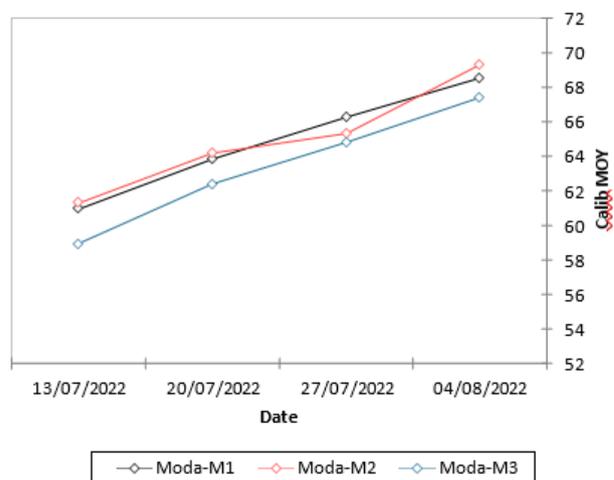


Figure 43 : évolution du diamètre des pommes au cours du temps

Le graphique illustrant l'évolution des calibres des fruits ci-dessus révèle une tendance à la croissance marquée depuis le début des mesures jusqu'à la période de récolte. Par ailleurs, il est notable que la différence entre la modalité M3 et les deux autres modalités demeure constante tout au long de la période de mesure.

Il est donc concluant de dire que la modalité M3 présente des différences significatives par rapport à M1 et M2, se caractérisant par des calibres plus petits en comparaison.

La classification des fruits à la récolte

Les calibres des fruits sont répartis conformément aux normes commerciales et sont évalués au moment de la récolte en se basant sur un échantillon de 100 fruits par modalité. Au cours de la première année de l'essai, les calibres les plus fréquents sont les 65/70, 70/75 et 75/80, représentant respectivement des proportions oscillant entre 21 à 24 %, 40 à 41 %, et 21 à 22 %.

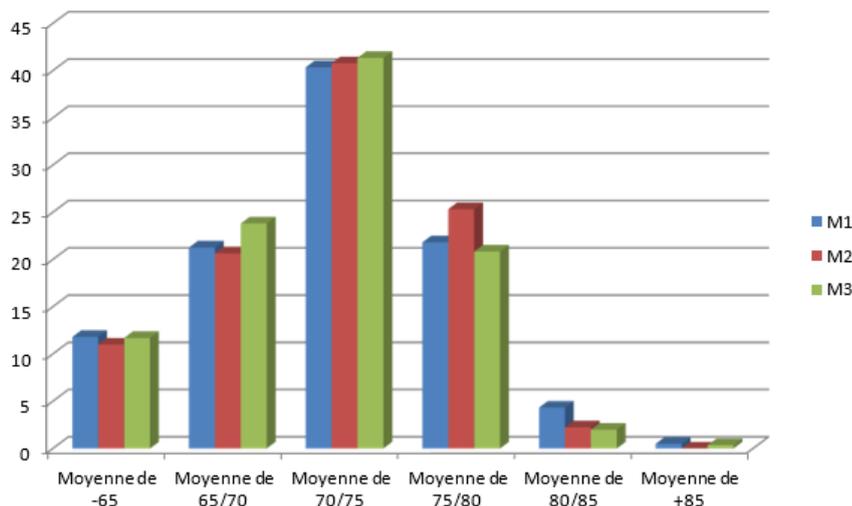


Figure 44 : classification par diamètres des fruits des trois modalités

En examinant les données présentées dans le graphique de classification des calibres de fruits, il est notable que les calibres des trois modalités sont sensiblement équivalents. Il n'y a pas de différences significatives entre les modalités en ce qui concerne les calibres allant de -65 à 75 mm, et l'abondance des calibres se situe principalement dans la plage de 70 à 80 mm pour l'ensemble des modalités.

Cependant, une différence significative entre les modalités est observée pour les calibres 80/85 mm et +85 mm. La modalité M1 se distingue en ayant des calibres plus importants dans cet intervalle (80/85 mm à +85 mm) que les autres modalités. Ces résultats démontrent l'importance de la dose d'irrigation, mettant en évidence que la quantité d'eau fournie à la modalité M1 était largement suffisante pour produire des calibres de fruits plus importants que ceux de la M3.

Observation à la récolte

La récolte a été réalisée la semaine de 8 août 2022, les résultats analysés sont les suivants :

Tableau 12 : résultats de la récolte pour les trois modalités

modalités	sommes des poids	poids moyen d'un fruit	sommes du nombre de fruit
M1	119,32	148,12	784
M2	123,37	140,32	797
M3	108,87	130,26	932

Le nombre total de fruits et la somme de ces nombres sont pratiquement identiques entre les modalités M1 et M2. Cependant, lorsqu'on examine le rapport entre le nombre de fruits et leur poids, une tendance significative se dessine. Même si la modalité M3 présente un grand nombre de fruits, le poids total est nettement inférieur par rapport aux autres modalités. Par exemple, pour 932 fruits, la modalité M3 affiche un poids d'environ 109 kg, tandis que les modalités M1 et M2, avec respectivement 784 et 797 fruits, présentent des poids plus élevés d'environ 119 kg et 123 kg.

Cela confirme que les calibres des fruits dans les modalités M1 et M2 sont plus importants que ceux de la M3, corroborant ce qui a déjà été expliqué précédemment concernant les classes de calibres. En conclusion, l'excès d'eau semble avoir un effet défavorable non seulement sur le développement de la végétation, mais aussi sur la taille des fruits.

Effet des tensiomètres dans l'évaluation de l'irrigation

L'irrigation a été enclenchée vers le 7 mai, une fois que les sondes à 45 centibars ont dépassé une moyenne de 100 centibars. Le déclenchement de l'irrigation n'était pas uniquement basé sur les valeurs de tension du sol, mais dépendait également des variations de température et de l'état de sécheresse de la parcelle.

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

Les données recueillies par les tensiomètres sont transmises à la plateforme SUD AGRO METEO (SAM). Les courbes affichées sur cette plateforme nous informent sur l'état de l'humidité du sol. Elles sont générées à partir de six sondes tensiométriques de type watermarks, situées à deux profondeurs (45 et 75 cm). La médiane des valeurs des trois sondes à chaque profondeur est également fournie, permettant d'obtenir une valeur moyenne. Cette médiane permet aussi de détecter tout dysfonctionnement d'une sonde, ou si elle est mal positionnée par rapport à la zone racinaire, ce qui est affiché sur la plateforme

-Pour M1 :

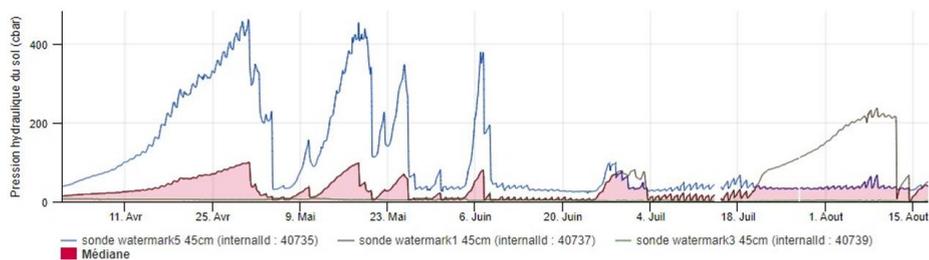


Figure 45 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 45cm de profondeur du 1^{er} Mai au 25 août 2022

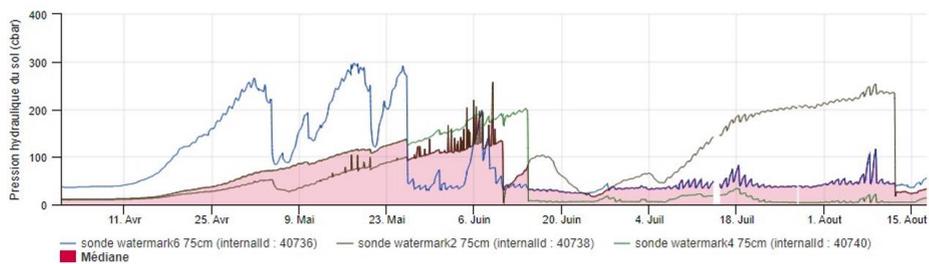


Figure 46 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 75cm de profondeur du 1^{er} Mai au 25 août 2022

Une analyse plus approfondie des courbes, en particulier celles des sondes ayant une tension de 75 centibars, révèle une période d'instabilité des tensions jusqu'au 10 juin. Même avec le déclenchement de l'irrigation le 7 mai, les tensions ont continué d'augmenter jusqu'au 10 juin. Cependant, après avoir apporté des ajustements au site, tel que le remplacement du programmeur, le rapprochement des sondes des bulbes d'eau et l'application de doses d'eau précises, ces problèmes

ont commencé à apparaître uniquement après le début de l'irrigation.

-Pour M2 :

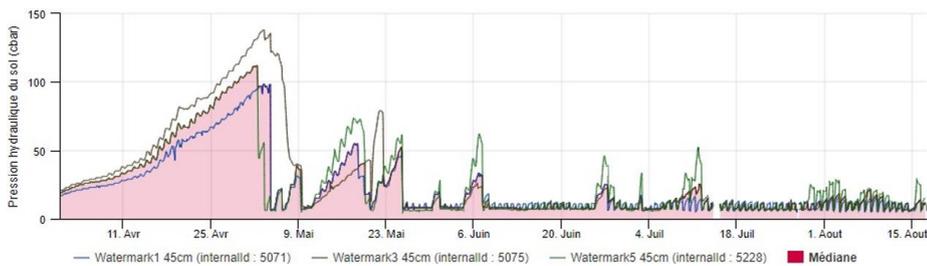


Figure 47 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 45cm de profondeur du 1er Mai au 25 août 2022

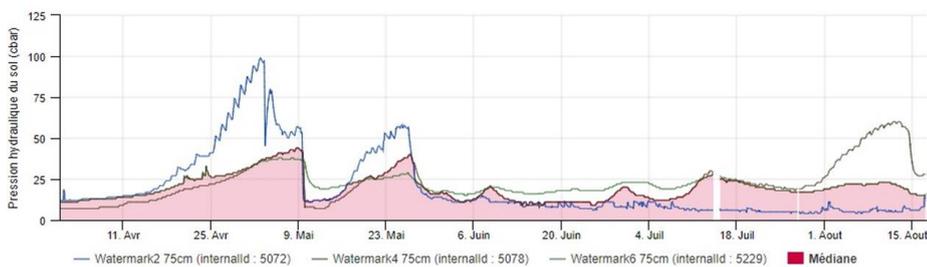


Figure 48 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 75cm de profondeur du 1er Mai au 25 août 2022

Pour la modalité M2, dès le déclenchement de l'irrigation, les tensions du sol ont diminué de manière significative, avec une médiane atteignant même moins de 50 centibars au mois de mai. Après le remplacement du programmateur, cette médiane est devenue encore plus stable, descendant en dessous de 25 centibars. Il est important de noter que, au début de l'essai, M1 et M2 étaient initialement pilotées de la même manière, recevant la même quantité d'eau. Cependant, la différence de tension observée entre les deux modalités met en évidence l'importance de l'emplacement des sondes dans la gestion de l'irrigation.

-Pour M3 :

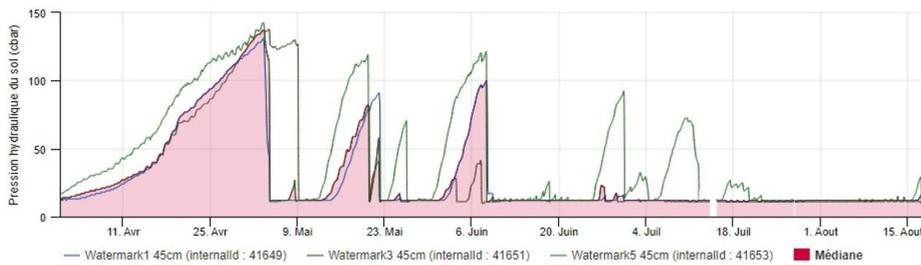


Figure 49 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 45cm de profondeur du 1er Mai au 25 août 2022

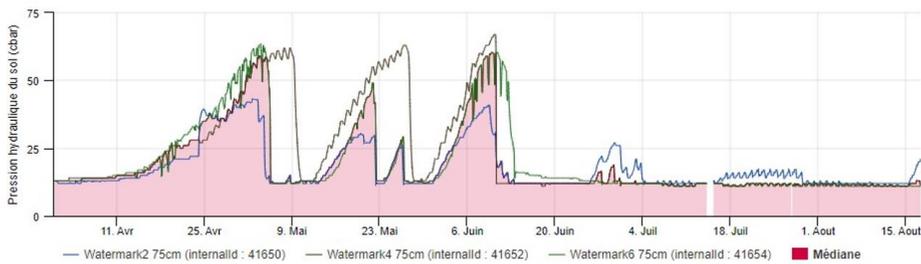


Figure 50 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 75cm de profondeur du 1er Mai au 25 août 2022

La modalité M3 présente un schéma similaire. Dès le début de l'irrigation, les tensions du sol diminuent de manière significative. Cependant, en raison de la nécessité d'actualiser le programmeur pour délivrer la dose quotidienne, l'irrigation est interrompue les weekends. Cela pose des problèmes, car avec un système d'irrigation goutte à goutte, une interruption régulière entraîne un assèchement rapide du sol, rendant difficile le maintien des sondes dans leur état initial.

Cependant, après le remplacement du programmeur, cette modalité a montré une tendance stable avec des valeurs de tension très basses, atteignant même 16

centibars pour les deux types de sondes. Cela met en évidence la quantité importante d'eau fournie par cette modalité, qui correspond à la quantité de référence des producteurs (50 % des besoins en eau de la culture selon le coefficient de culture * l'évapotranspiration potentielle).

Estimation du coefficient du volume de végétation kvv

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

Estimation par rapport à la surface foliaire

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

La régression linéaire simple permet de prédire une variable en fonction d'une autre variable, sur la base d'une relation linéaire déduite par un algorithme d'apprentissage supervisé. En utilisant la régression linéaire simple, notre but est d'étudier comment une seule variable explicative l'irrigation varie en fonction d'une résultante qui est également en fonction de $kc \cdot ETP$ multiplié par LWA, et si une relation linéaire a un sens. Les résultats de la régression linéaire entre l'irrigation réelle et la résultante de l'irrigation de LWA manuelle pendant la période de juin permet d'établir une équation qui est la suivante :

$$\text{Irrigation M1} = 2,031 - 3,284 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{résultante LWA})$$

Avec la résultante LWA est le produit entre l'ETP * kc et la moyenne de LWA pour la modalité de M1 à la période de référence.

Tableau 13 : Analyse de la variance (Irrigation M1) à partir de la résultante LWA :

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	0,075	0,075	0,313	0,580
Erreur	32	7,688	0,240		
Total corrigé	33	7,763			

Tableau 14 : Paramètres du modèle (Irrigation M1) en fonction de la résultante LWA :

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	2,032	0,414	4,904	<0,0001	1,188	2,875
<u>résultante</u> LWA	-0,033	0,059	-0,559	0,580	-0,152	0,087

Étant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0,05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 qui suit la loi normale, et retenir l'hypothèse alternative H_a où la fonction ne suit pas une loi normale.

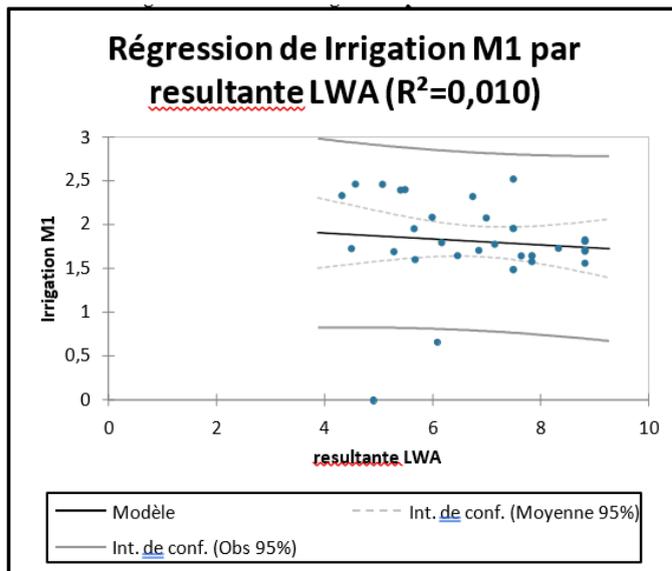


Figure 51 : courbe de régression pour l'indice LWA

Ce graphe nous permet de visualiser l'allure de la droite de régression linéaire, et les deux intervalles de confiance (le plus proche de la courbe est l'intervalle autour de la moyenne de l'estimateur, le deuxième est l'intervalle autour de l'estimation ponctuelle aussi appelé intervalle de prédiction). Nous voyons clairement une tendance linéaire, mais avec une forte variabilité autour de la droite. Nous pouvons également voir que les deux observations qui sont en dehors de l'intervalle $[-1,96, 1,96]$ sont également en dehors du second intervalle de confiance.

Estimation par rapport au volume de végétation

Pour l'estimation de l'irrigation par rapport à l'indicateur TRV on utilise aussi la régression linéaire simple, notre but est d'étudier comment une seule variable explicative l'irrigation varie en fonction d'une résultante qui est également en fonction de $kc \cdot ETP$ multiplié par TRV, et si une relation linéaire a un sens.

L'équation résulte de la régression entre l'irrigation réelle en juin et la résultante de

la TRV est la suivante :

$$\text{Irrigation M1} = 2,031 - 4,524 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{résultante TRV})$$

Et la résultante TRV c'est le produit entre l'ETP* kc et la moyenne de TRV pour la modalité de M1 au mois du juin :

Tableau 15 : Analyse de la variance (Irrigation M1) en fonction de la résultante TRV

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	0,075	0,075	0,313	0,580
Erreur	32	7,688	0,240		
Total corrigé	33	7,763			

Tableau 16 : paramètre du modèle (Irrigation M1) en fonction de la résultante TRV

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	2,032	0,414	4,904	<0,0001	1,188	2,875
<u>résultante TRV</u>	-0,045	0,081	-0,559	0,580	-0,210	0,120

Dans le graphique de la régression linéaire, qui est représenté en fonction de l'indice TRV. Nous voyons également une tendance linéaire, et une forte variabilité autour de la droite. Nous pouvons voir également les deux observations qui sont également en dehors du second intervalle de confiance.

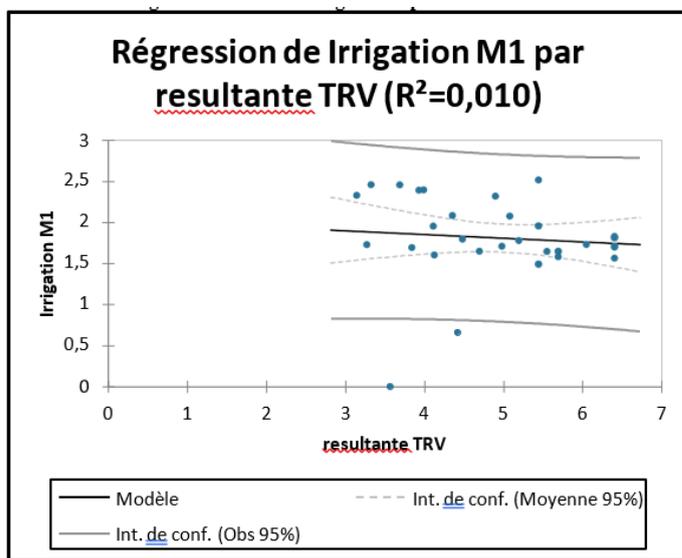


Figure 52 : courbe de régression pour l'indice TRV

Détermination de la valeur du coefficient de kvv :

Pour déterminer la valeur de kvv nous avons utilisé la méthode d'équivalence entre l'équation que nous avons trouvée ci-dessus et l'hypothèse de notre calcul, l'équation avec laquelle nous avons commencé en premier lieu pour trouver en fin cette équation :

$$K_{vv} = \frac{\text{Irrigation M1}}{k_c * \text{ETP}}$$

Après le calcul de l'irrigation quotidienne du mois de juin, la moyenne de kvv trouvée est de valeur 0,27. Mais cette valeur n'est qu'une estimation pour le mois de juin.

Apports en eau durant la saison

Le projet OREVE vise à contribuer à une meilleure rationalisation de la ressource en eau d'un point de vue économique et environnemental.

En effet les résultats de la dernière année du projet montrent qu'il s'agit bien d'une différence entre les quantités d'eau fournies pour chaque modalité. La figure 53 représente les apports d'eau cumulés effectués pour les trois modalités, ils sont exprimés en mm :

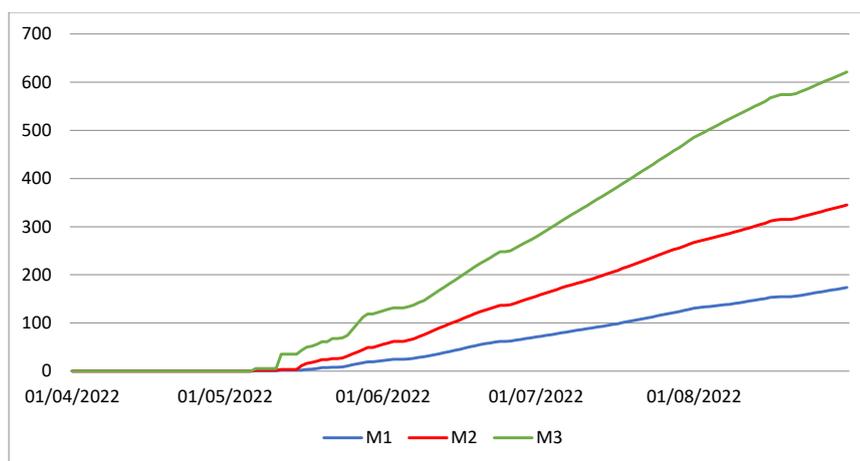


Figure 53 : courbes des apports cumulés des trois modalités

Depuis le début de la saison d'irrigation en mai jusqu'à la fin d'août, les quantités d'eau fournies aux modalités M1 et M2 ont été respectivement de 241,1 mm et 262,7 mm, tandis que la modalité de référence des producteurs a reçu 327,2 mm. Cela représente une économie de 26% en termes de volume d'eau pour les arbres de la modalité M1 par rapport au groupe témoin des producteurs. Quant à la modalité M2, l'économie atteint 20% par rapport à ce même groupe témoin. Exprimé en volume d'eau par hectare (m^3/ha), ces chiffres permettent de constater que les modalités 1 et 2 présentent des résultats assez similaires, suggérant ainsi que les OAD peuvent produire des résultats comparables. Cependant, il est essentiel de nuancer ces chiffres, étant donné que la modalité 1 a connu un début de saison difficile marqué par un léger déficit hydrique. De même, la modalité 2 a été conçue pour initier la saison avec un niveau de stress hydrique proche sans toutefois l'atteindre pleinement.

6. Résultats 2023

Condition météorologique

Le bulletin d'irrigation fourni par le BRL nous permet de présenter l'accumulation de la pluviométrie de cette saison à partir d'avril. De plus, il nous permet de visualiser la trajectoire cumulée de l'évapotranspiration potentielle de cette année, en la comparant avec les moyennes de précipitations des années antérieures ainsi que les moyennes d'évapotranspiration correspondantes.

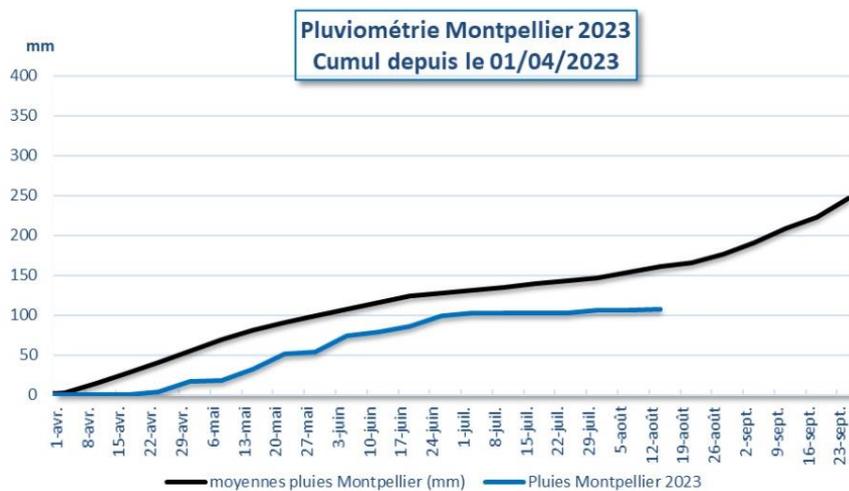


Figure 54 : cumul des pluviométries 2023 par rapport aux pluviométries moyennes de Montpellier (BRL, 2023)

Le cumul des pluies à Montpellier pour la saison 2023 est de 107 mm, soit un cumul déficitaire de 33% par rapport à la moyenne, qui est de 161 mm.

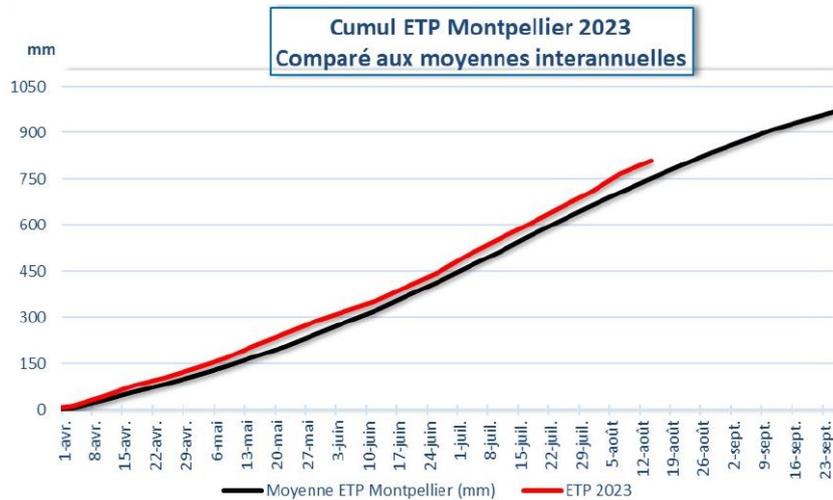


Figure 55 : Cumul de l'évapotranspiration potentiel de 2023 par rapport aux moyennes interannuelles (BRL, 2023)

Le cumul des ETP à Montpellier en 2023 est quant à lui supérieur de 8% à la moyenne. Soit 809 mm pour un cumul moyen de 752 mm.

A partir de ces résultats, on peut remarquer que les conditions climatiques durant cette étude étaient plus élevées que la moyenne, où la température de l'été 2023 est plus élevée comparée aux températures des années passées et les pluviométries également étaient moins importantes. En effet, le mois de juillet et août a été particulièrement touché avec aucune précipitation.

Effet de bloc sur les modalités

Pour étudier un éventuel effet bloc, entre la période de juin à août 2023, nous avons comparé les moyennes de LWA et TRV entre chaque rang.

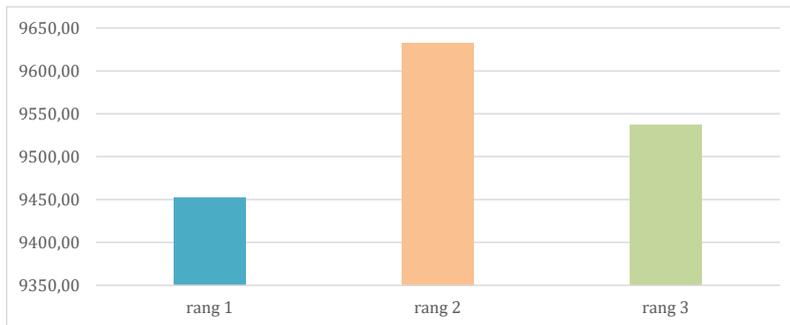


Figure 56 : résultat de moyennes estimées de la surface foliaire en fonction des rangs

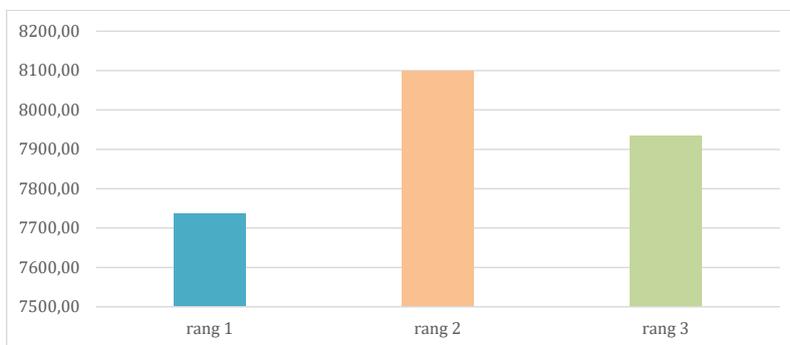


Figure 57 : résultat de moyennes estimées du volume de végétation en fonction des rangs

Il est clairement observé que des distinctions existent entre les trois blocs, bien qu'ils bénéficient de doses d'irrigation identiques. Néanmoins, cette divergence demeure de faible ampleur. Cette disparité peut être attribuée à la présence éventuelle d'adventices, potentiellement plus répandues sur les rangées 1 et 2. Il est à noter que cette explication reste une hypothèse.

Evolution de surface et volumes des arbres

Une analyse de variance (ANOVA) a été conduite sur les divers paramètres dans le but de déterminer si l'irrigation influe sur l'évolution des arbres selon chaque modalité. Les résultats des moyennes estimées des surfaces foliaires et des dimensions de la végétation indiquent clairement une croissance significative au fil de la période d'essai pendant la saison 2023. Cependant, cette croissance significative se manifeste jusqu'au

mois de juillet, correspondant à l'accroissement de la taille des fruits (stade de maturité). À ce stade, la croissance des arbres ne demeure pas significative. Cet état de fait peut-être attribué à la présence des fruits qui exerce une force vers le bas sur les branches, rendant les mesures inexactes. Cette condition entrave la précision des mesures, étant donné que les fruits agissent comme un facteur perturbateur. Ces mesures étaient originellement envisagées en raison de la phase de ralentissement de la croissance des feuilles et des pousses au cours de l'année, coïncidant avec la période de fructification. En effet, cette étape est centrée sur le développement des fruits. Pour appuyer cette hypothèse, Mehri et Grabbé ont noté en 2022 que "l'arrêt de la croissance a lieu vers la fin du mois de mai pour les pousses courtes et vers la fin du mois de juillet pour les pousses longues".

Le graphique ci-dessous fournit une illustration de la dynamique moyenne de la surface foliaire (LWA) au cours des quatre périodes de mesure :

Tableau 17 : moyenne estimée d'évolution des surfaces de végétation (LWA) de mai à août

Synthèse des comparaisons multiples par paires			
mois	groupe		
Août			C
Juillet			C
Juin		B	
Mai	A		

Les résultats des comparaisons multiples par paires mettent en évidence que le mois de juillet correspond au point d'arrêt de la croissance des arbres. Entre les deux derniers mois, aucune différence significative n'est observée (ils appartiennent au même groupe C). Cette tendance à l'horizontalité des courbes est également illustrée :

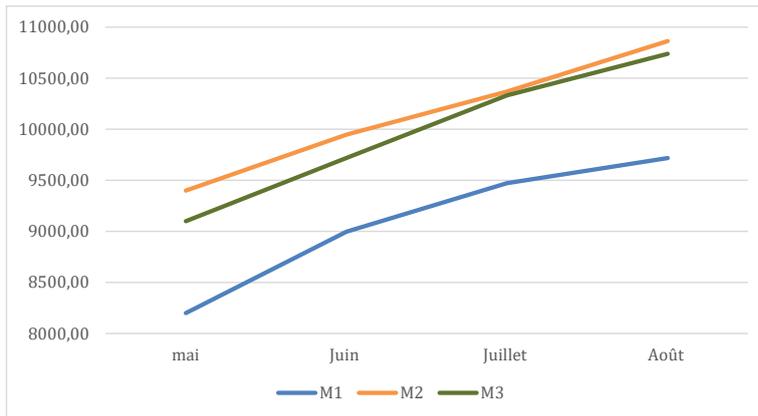


Figure 58 : dynamique d'évolution de la surface foliaire pour les trois modalités au cours du temps

L'effet de l'irrigation sur Croissance des troncs d'arbres

Les résultats des mesures effectuées au moyen du dendromètre ont été segmentés en deux périodes au cours de la saison : la première, de mi-avril à mi-juin, et la seconde, de mi-juin à mi-août. L'objectif de la première période était de confirmer que l'évolution était progressive et que les doses d'irrigation étaient équilibrées, évitant ainsi tout excès ou insuffisance d'eau.

Dans la deuxième partie de la saison, les dendromètres ont été transférés vers d'autres arbres de la même modalité. Ces arbres ont été chargés en fruits. Les résultats de cette phase se sont avérés très intéressants, révélant l'apparition d'un problème majeur.

a mis en forme : Police : (Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

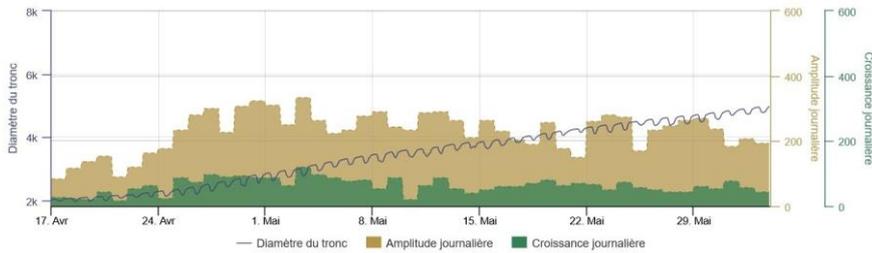


Figure 59 : évolution de la dendrométrie de M1 du 17 avril au 5 juin 2023

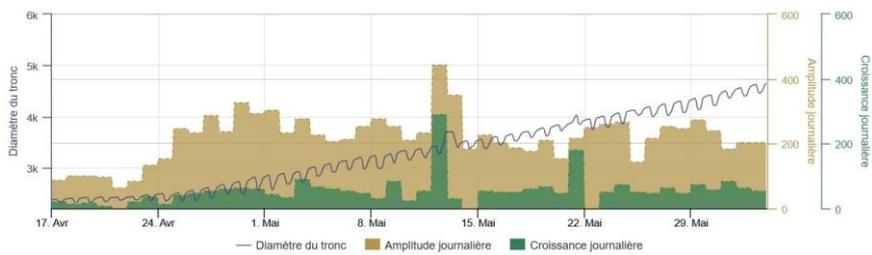


Figure 60 : évolution de la dendrométrie de M2 du 17 avril au 5 juin 2023

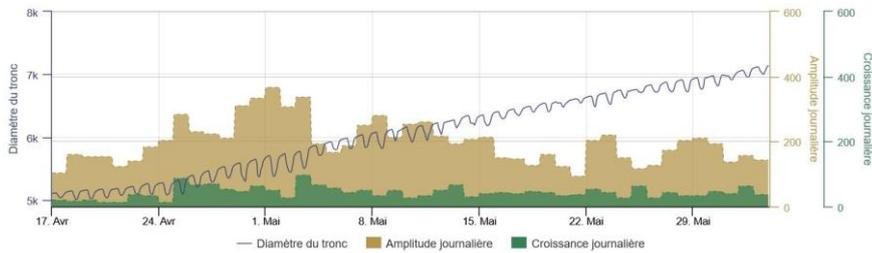


Figure 61 : évolution de la dendrométrie de M3 du 17 avril au 5 juin 2023

Les figures ci-dessus illustrent les évolutions des taux de croissance des différentes modalités ainsi que leurs amplitudes quotidiennes. On peut constater que ces courbes suivent une dynamique de croissance similaire. En observant ces graphiques, on aurait pu anticiper une continuité similaire dans la suite des événements, validant ainsi l'estimation du coefficient de végétation déterminé l'année précédente. Cependant, le déplacement des dendromètres a mis en évidence une réalité différente. Il est apparu que la modalité 1 évoluait peu, comme en témoigne la figure ci-dessous :

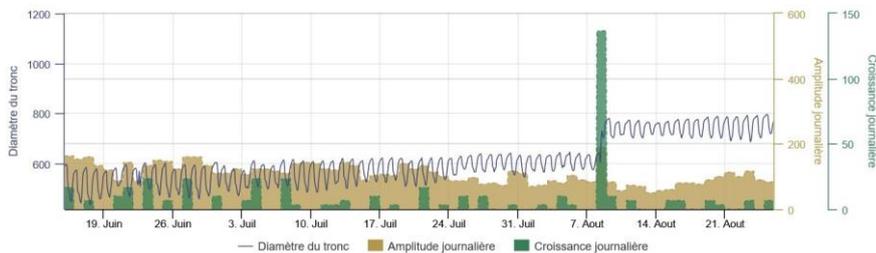


Figure 62 : évolution de la dendrométrie de M1 du 6 juin au 25 août 2023

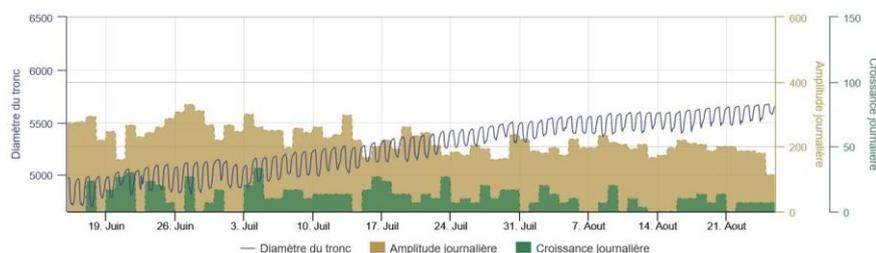


Figure 63 : évolution de la dendrométrie de M2 du 6 juin au 25 août 2023

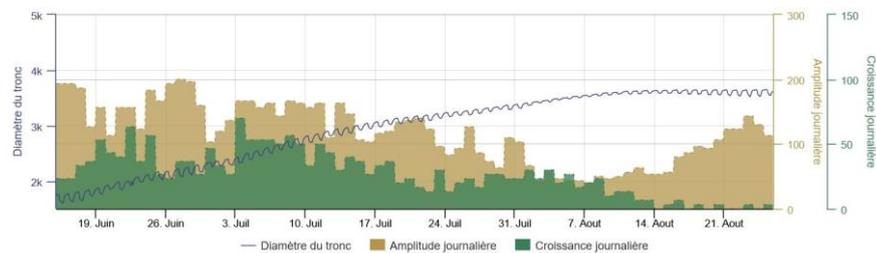


Figure 64 : évolution de la dendrométrie de M3 du 6 juin au 25 août 2023

En effet, le déplacement des dendromètres a révélé que les arbres pouvaient réagir différemment, en particulier en fonction de leur charge en fruits. Une observation claire est que le diamètre du tronc n'a pas augmenté de mi-juin à mi-juillet, ce qui peut être attribué à une irrigation non optimale. À la suite d'un ajustement d'irrigation entre mi-juillet et mi-août, une légère augmentation a pu être observée. Il est important de noter que la variation observée pendant la semaine du 7 août n'est pas liée à l'irrigation, mais plutôt à une erreur survenue lors du déplacement du dendromètre, qui a probablement été déplacé pendant l'étalonnage.

En ce qui concerne la modalité 2, on constate une croissance relativement constante, bien que moins marquée que pendant la première partie de la saison. Cette diminution de croissance peut être attribuée à la mise en œuvre d'une stratégie plus économe en eau, ce qui a pu limiter la croissance. En revanche, pour la modalité 3, une croissance régulière et significative a été observée, soulignant l'efficacité de l'irrigation dans cette configuration. Néanmoins, il est à noter que le diamètre du tronc tend à stagner à partir du début août. Cette stagnation pourrait être influencée par les températures caniculaires qui ont eu lieu à cette période.

E'effet de l'irrigationvolution de la croissance des fruits

Calibre de fruits

Des mesures ont été faites chaque semaine à partir de 9 juin jusqu'au 18 août 2023 au niveau des diamètres des fruits pour voir la différence des calibres ainsi leurs évolutions pour chaque modalité afin de voir s'il y a un effet de l'irrigation sur la croissance des fruits des jeunes vergers. Il y a une très légère variation de la taille des fruits comme en témoigne la figure 65 ci-dessous :

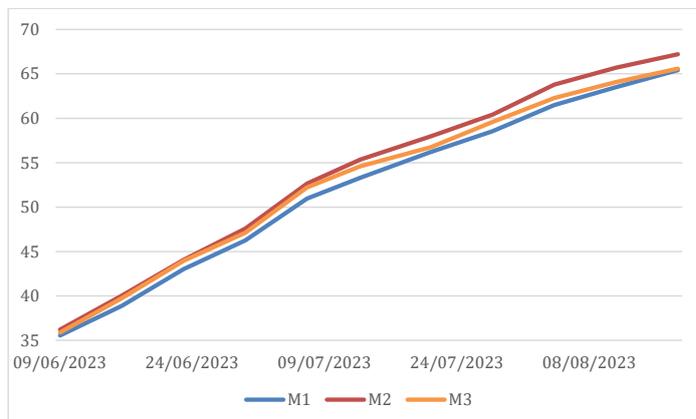


Figure 65 : évolution du diamètre des pommes au cours du temps

La différence entre les 3 modalités est relativement faible. Le fait que M1 est la plus faible moyenne peut-être expliqué que cette modalité a été légèrement sous-irrigué la première partie de saison.

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

Le graphe d'évolution des calibres des fruits ci-dessus ne permet pas de mettre en évidence de différence majeure. La progression reste quand même assez constante tout le long de la saison.

La classification des fruits à la récolte

Les classes de calibres sont distribuées, selon les normes commerciales, et réalisées au moment de la récolte sur un échantillon de 100 fruits par modalité.

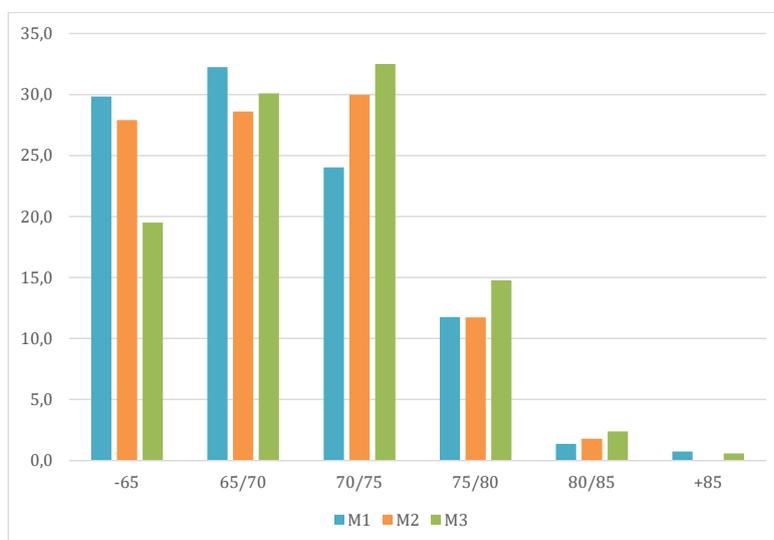


Figure 66 : classification par diamètres des fruits des trois modalités

En analysant les valeurs données ci-dessus de classification des calibres de fruits, on peut constater que les calibres des trois modalités sont très différents. La modalité 1 possède un pourcentage élevé dans la gamme 65/70 avec une décroissance par la suite dans les gammes au-dessus. L'irrigation faible en première saison n'a donc pas impacté la suite de la récolte. La modalité 2 évolue positivement jusqu'à la gamme 70/75 mais chute brutalement par la suite. Quant à la modalité 3, elle augmente de façon significative pour avoir un pourcentage le plus élevé dans la gamme 70/75.

Observation à la récolte

La récolte a été réalisée la semaine de 18 août 2023, les résultats ont été analysés sont les suivants :

Tableau 18 : résultats de la récolte pour les trois modalités

modalités	sommes des poids	poids moyen d'un fruit	sommes du nombre de fruit
M1	45,97	126,62	367
M2	35,29	129,8	270
M3	37,06	129,15	273

Le poids de la récolte de M1 est plus élevé que les 2 autres modalités mais est expliqué par le fait que le nombre de fruit est plus important. De plus le poids moyen est inférieur aux 2 autres modalités. M2 et M3 sont quasiment identiques dans les différentes analyses.

Effet des tensiomètres dans l'évaluation de l'irrigation

L'irrigation a débuté le 3 mai 2023. La décision de démarrer l'irrigation dépendait non seulement des mesures des tensiomètres, mais également de l'élévation de la température ambiante.

Les données enregistrées par les tensiomètres sont transmises à la Plateforme SUD AGRO METEO (SAM). Les courbes affichées dans cette plateforme nous offrent un aperçu de l'humidité dans le sol, mesurée au moyen de six sondes tensiométriques de type watermarks. De plus, la médiane des valeurs des trois sondes situées à chaque profondeur (45 et 75 cm) est également calculée, fournissant une meilleure approche de l'humidité dans le sol.

-Pour M1 :



Figure 67 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 45cm de profondeur du 1^{er} Mai au 25 août



Figure 68 : Evolution de la pression hydraulique de M1 à 75cm de profondeur du 1^{er} Mai au 25 août

Sur les figures 67 et 68, il est évident que l'irrigation présente des lacunes sur le plan de l'efficacité. En effet, en dépassant le seuil de 100 centibars au cours du mois de juin, il devient logique que les racines rencontrent des difficultés croissantes pour accéder à l'eau nécessaire. Cette situation découle directement d'une insuffisance dans le processus d'irrigation, attribuable à une sous-estimation significative du coefficient de végétation de l'année précédente. La décision a été prise de maintenir l'utilisation de ce coefficient jusqu'au début du mois de juillet. À partir de ce moment-là, des sondes ont été remplacées (certaines ne fonctionnaient pas correctement) et un nouveau coefficient a été calculé. Durant les deux premières semaines de juillet, le schéma d'irrigation est resté identique à celui du M2, ceci afin d'établir une période de référence. Une observation importante se dégage : à compter du 17 juillet, moment où le nouveau coefficient a été appliqué, la pression hydraulique du sol se situe autour de 20 centibars, indiquant un niveau de confort hydrique satisfaisant.

-Pour M2 :

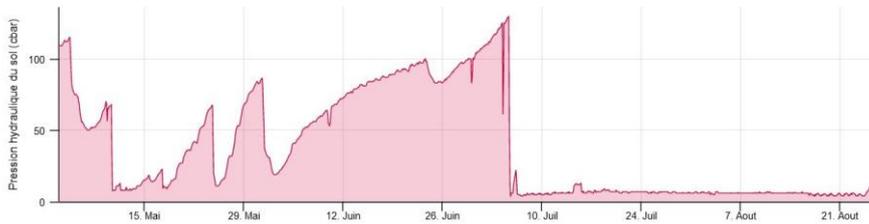


Figure 69 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 45cm de profondeur du 1er Mai au 25 août

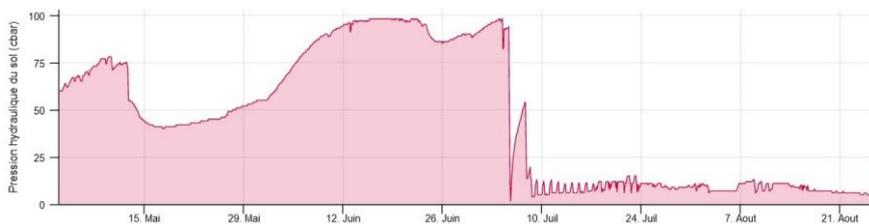


Figure 70 : Evolution de la pression hydraulique de M2 à 75cm de profondeur du 1er Mai au 25 août

Les graphiques mettent en évidence une stabilité notable durant le mois de mai. À une profondeur de 75 cm, la pression hydraulique du sol reste autour de 40 centibars, ce qui favorise un développement optimal de l'arbre et de ses racines. En conséquence, la décision a été prise d'utiliser cette pression comme levier pour une utilisation plus efficace de l'eau. Cela a conduit à une réduction de l'irrigation, entraînant une diminution de la pression hydraulique du sol, qui a atteint un niveau légèrement inférieur à 100 centibars jusqu'au mois de juillet. Les capteurs tensiométriques ont également été remplacés, pour des raisons similaires à celles de la modalité 1. La seconde partie de la saison a été caractérisée par une approche plus rigoureuse, visant à maintenir les valeurs de tension autour de 20 centibars tout au long de la saison, garantissant ainsi un état de confort hydrique optimal.

-Pour M3 :



Figure 71 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 45cm de profondeur du 1er Mai au 25 août

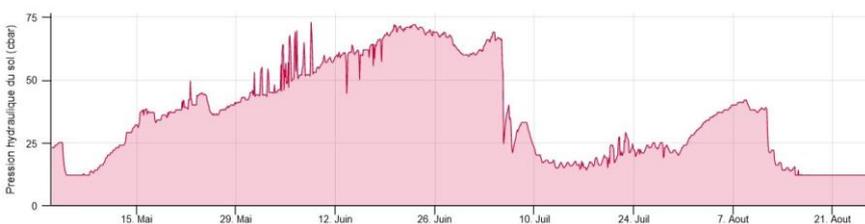


Figure 72 : Evolution de la pression hydraulique de M3 à 75cm de profondeur du 1er Mai au 25 août

En ce qui concerne la modalité 3, où l'irrigation est pilotée selon les références du producteur, il est observé que la pression à une profondeur de 45 cm varie dans une fourchette allant de 15 à 75 centibars. Les débuts de la gestion de l'irrigation avec le programmeur ont été difficiles, notamment en raison de l'impossibilité d'irriguer durant les week-ends. Vers la mi-juin, la pression a atteint 100 centibars car l'irrigation ne s'était pas déclenchée. Après le remplacement des tensiomètres en début juillet et la mise en place d'une programmation adéquate incluant l'irrigation le week-end, il est immédiatement remarqué que la pression hydraulique du sol devient stable à 45 cm et se situe entre 15 et 40 centibars à 75 cm de profondeur.

Estimation du coefficient du volume de végétation kvv

Durant la saison d'irrigation 2023, l'objectif est de valider le coefficient de végétation trouvé l'année d'avant et de l'ajuster si besoin. Durant les 2 premiers mois, l'irrigation a été largement sous-estimé au vu des résultats précédent. Il a donc fallu ajuster le coefficient kvv par rapport à LWA et TRV. Le descriptif de la méthode est précisé dans la

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

a mis en forme : Police :(Par défaut) Verdana, 11 pt, Gras

partie matériels et méthodes. On a donc pu obtenir un nouveau coefficient kvv pour LWA et TRV observé dans le tableau suivant:

Tableau 19 : récapitulatifs des moyennes du mois de juillet et août de LWA et TRV ainsi que leur coefficient de végétation estimé

	LWA	TRV	LWA	TRV
Date de l'observation	Juillet		Août	
Moyenne pour M1	9471,67	6794,81	9718,33	6976,41
Kvv	4,98E-05	6,94E-05		

Ainsi, grâce aux équations ci-dessous, nous avons pu avoir des doses journalières d'irrigations optimales comme en témoigne la pression hydraulique du sol évoqué dans la partie précédente :

$$\text{Besoin en eau}(mm/j) = kc * ET0 * LWA * kvv$$

$$\text{Besoin en eau}(mm/j) = kc * ET0 * TRV * kvv$$

Le LWA et le TRV a été mesuré au mois d'août afin d'assurer l'irrigation de manière adéquat. Au vu des résultats, ce fut une bonne chose que le kvv soit réajuster car sinon la modalité 1 aurait subi une irrigation non-optimale pendant toute la saison.

Apports en eau durant la saison

Le projet OREVE vise à contribuer à une meilleure rationalisation de la ressource en eau d'un point de vue économique et environnemental.

En effet les résultats de la dernière année du projet montrent qu'il s'agit bien d'une différence entre les quantités d'eau fournies pour chaque modalité. La figure 73 représente les apports d'eau cumulés effectués pour les trois modalités, ils sont exprimés en mm :

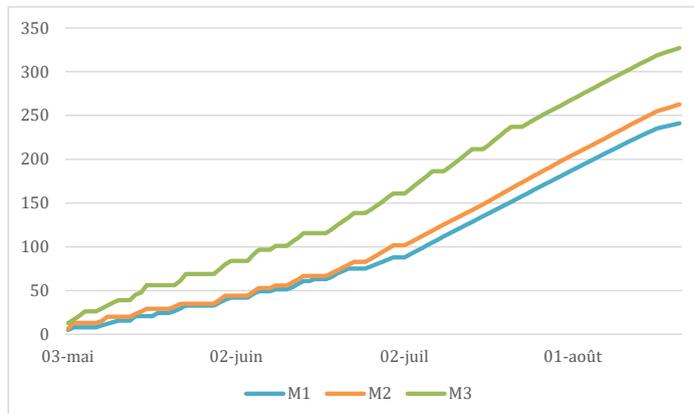


Figure 73 : courbes des apports cumulés des trois modalités

Depuis le début de la saison d'irrigation en mai jusqu'à la fin d'août, les quantités d'eau fournies aux modalités M1 et M2 ont été respectivement de 241,1 mm et 262,7 mm, tandis que la modalité de référence des producteurs a reçu 327,2 mm. Cela représente une économie de 26% en termes de volume d'eau pour les arbres de la modalité M1 par rapport au groupe témoin des producteurs. Quant à la modalité M2, l'économie atteint 20% par rapport à ce même groupe témoin. Exprimé en volume d'eau par hectare (m^3/ha), ces chiffres permettent de constater que les modalités 1 et 2 présentent des résultats assez similaires, suggérant ainsi que les OAD peuvent produire des résultats comparables.

Par conséquent, si cette réduction de la consommation d'eau perdure pendant la phase juvénile des pommiers, soit les trois premières années, les économies réalisées revêtiraient une grande importance à la fois pour la préservation de la ressource en eau et pour alléger les charges financières des producteurs.

7. Discussion

Rappel des objectifs

Le projet OREVE a pour objectif d'améliorer les connaissances sur les besoins en eau de diverses cultures arboricoles durant leur période juvénile. En améliorant nos connaissances sur le fonctionnement des jeunes arbres (3 premières années après plantation), notre but est de mieux définir les besoins hydriques des jeunes vergers et apporter ainsi aux arboriculteurs des références pour optimiser la conduite des irrigations. Cette étude sur jeunes pommiers compare 3 modalités d'irrigation (M1, M2, M3), et évalue la pertinence d'irriguer en fonction d'un coefficient basé sur le volume de végétation. Les objectifs sont rappelés ici :

- Etablir un coefficient de volume de végétation qui permet d'adapter la dose d'irrigation au volume de végétation des pommiers
- Tester l'efficacité de la modalité M1 qui est piloté par la nouvelle formule, en intégrant le nouveau coefficient, ainsi la modalité M2 qui est gérée par les outils d'aides à la décision par rapport à la modalité M3 référence producteurs.

Réflexion sur la notion de « jeunes vergers »

La réflexion sur la notion de "jeunes vergers" revêt une importance capitale dans le contexte de l'agriculture moderne et durable. Les jeunes vergers, désignant les plantations de jeunes arbres fruitiers à un stade précoce de développement, constituent un maillon essentiel de la chaîne de production fruitière. Ils marquent le point de départ de cycles de croissance qui influenceront non seulement la productivité à court terme, mais aussi la durabilité et la viabilité de l'exploitation à long terme.

L'irrigation joue un rôle fondamental dans la création et la gestion de jeunes vergers prospères. L'une des principales raisons réside dans le besoin crucial de fournir aux jeunes arbres une source d'eau régulière et adéquate pour soutenir leur croissance initiale. Durant cette phase sensible, les arbres sont particulièrement vulnérables aux variations environnementales, et le manque d'eau peut entraver le développement racinaire, la photosynthèse et la croissance globale. En conséquence, une irrigation bien planifiée et adaptée aux besoins spécifiques des jeunes vergers peut stimuler une croissance vigoureuse, un enracinement solide et une meilleure résistance aux stress

biotiques et abiotiques.

Cependant, il est impératif de reconnaître que l'irrigation des jeunes vergers ne consiste pas simplement à inonder le sol de manière excessive. La quantité et la fréquence d'irrigation doivent être minutieusement ajustées en fonction des conditions climatiques, des caractéristiques du sol et des besoins spécifiques des variétés cultivées. Un équilibre délicat doit être maintenu pour éviter un excès d'eau, qui peut provoquer une mauvaise aération des racines, une stagnation de la croissance et une sensibilité accrue aux maladies racinaires. En outre, l'irrigation excessive peut également entraîner un gaspillage d'eau, en contradiction avec les impératifs de durabilité environnementale.

La planification et la mise en œuvre de l'irrigation dans les jeunes vergers nécessitent donc une approche éclairée, basée sur une compréhension approfondie des exigences de chaque espèce, des spécificités locales et des ressources en eau disponibles. Les technologies modernes, telles que les capteurs d'humidité du sol et les systèmes d'irrigation intelligents, offrent des outils précieux pour surveiller et ajuster l'apport en eau de manière précise et efficace. De plus, l'intégration de méthodes d'irrigation économes en eau, telles que l'irrigation goutte à goutte, peut améliorer l'utilisation des ressources et minimiser les pertes.

En conclusion, la réflexion sur la notion de "jeunes vergers" met en lumière l'importance cruciale de la gestion de l'eau dans le développement initial des arbres fruitiers. Une approche équilibrée, prenant en compte les facteurs biologiques, environnementaux et technologiques, peut créer des conditions optimales pour une croissance saine et vigoureuse des jeunes arbres. Les décisions prises à cette étape cruciale peuvent avoir un impact durable sur la production future, la qualité des récoltes et la durabilité globale de l'exploitation agricole.

Comparaison de la surface et du volume foliaire durant les 3 années

Une étude comparative a été réalisée entre les différentes années du projet afin de savoir la différence d'évolution globale de la végétation de verger entre les trois ans :

Tableau 20 : évolution globale de la végétation durant les trois années

Année/Indicateur	LWA	TRV
2021	20%	60%
2022	19%	34%
2023	13%	17%

On observe que l'année 2023 a enregistré une baisse de la croissance du volume foliaire ainsi que du taux de croissance de la surface foliaire, comparativement à l'année précédente. Cette diminution peut être attribuée à l'influence des fruits sur le processus de croissance, étant donné que les arbres entrent en phase de production. Ainsi, au cours de la saison de développement, la croissance ne se limite pas seulement aux branches et aux feuilles, mais englobe également la formation des fruits. Cette réalité explique la réduction de la croissance des arbres dès que les fruits atteignent le stade de maturité.

Effectivement, les années consécutives à la première année sont principalement dédiées à la production. À mesure que l'arbre mûrit, il alloue davantage de ressources à la reproduction, ce qui inclut la floraison et la fructification. Cette réorientation des ressources vers la reproduction peut induire une diminution de la croissance végétative, reflétant l'investissement de l'arbre dans ses processus reproductifs.

Mode de pilotage des irrigations

L'objectif du projet OREVE est de comparer trois modalités d'apports en eau :

M1 est pilotée en utilisant le volume de végétation.

M2 utilise des outils d'aide à la décision.

M3 est la méthode de référence producteur (50% de $K_c \times ETP$).

Pendant la dernière année du projet, la modalité 1 a été soumise à une irrigation basée sur le coefficient de végétation déterminé l'année précédente pour les mois de mai et

juin. Comme détaillé dans la section des résultats, pour les mois de juillet et août, une irrigation a été mise en œuvre en utilisant le nouveau coefficient estimé. La modalité 2 a permis une gestion économe de l'irrigation pendant la première partie de la saison, suivie d'une période de confort hydrique pour la seconde moitié. La modalité 3 a adopté une approche d'irrigation optimale en se référant aux pratiques des producteurs. Cependant, des épisodes où les déclenchements d'irrigation n'ont pas eu lieu en début de saison ont occasionnellement conduit à des niveaux légèrement plus élevés de pression hydraulique du sol. Cependant, il est intéressant de noter que plusieurs indicateurs de croissance végétative tendent à être plus élevés pour les modalités M2 et M3 en août.

Il convient pour l'analyse de nos résultats de tenir compte du fait que l'importance de l'évaporation par le sol est une large fraction de l'évapotranspiration totale, notamment dans le cas des jeunes vergers. Cette proportion a été mesurée entre 41 et 45% pour des vergers d'oliviers âgés de 7 ans au Portugal par Paço *et al.* (2019). Cependant, on peut penser que le besoin en eau des vergers d'oliviers est moindre que celui des vergers de pommiers.

Les résultats de la première année d'essai semblent confirmer que l'hypothèse initiale d'une de sur-irrigation des jeunes vergers est réelle. En effet les apports d'eau pour la première année ont été presque divisés par deux par rapport à la méthode de référence producteur.

L'automatisation de l'irrigation est un enjeu important en arboriculture et particulièrement pour les jeunes vergers (Knieling et Monney, 2015). Plusieurs études précédentes ont cherché à calibrer des systèmes d'automatisation de l'irrigation. Ainsi, Osroosh *et al.*, (2016) ont comparé plusieurs systèmes de programmation de l'irrigation des pommiers avec un système de contrôle basé sur des capteurs de météorologie et du sol dans la région de Prosser (WA, USA). Ils concluent qu'un système de bilan hydrique du sol présente les meilleures performances de facilité d'emploi et de précision par rapport à d'autres systèmes utilisant la température.

L'irrigation des arbres à partir d'une mesure de volume végétatif est une technique qui consomme moins d'eau que la méthode classique, selon Li et Huguet (1990). Ces auteurs soulignent que la photosynthèse est augmentée, la chute prématurée des fruits est réduite et que les racines se sont mieux développées.

L'efficacité de l'irrigation selon le kvv

Selon l'étude de la première année, une équation a été proposée pour gérer l'irrigation de M1, et c'était prévu de la suivre pour la deuxième année du projet :

$$\text{Besoin eau}(mm/j) = 0,9474 + 0,028 * kc * ET0(mm/j) * NDVI$$

Mais vu que cette équation est basée sur l'indicateur NDVI elle n'y avait pas des mesures par drone pour la deuxième année, cette équation a donc été rejetée pour cette année-là. Même avec une équation basée sur l'indicateur LWA, cela ne donnait pas de résultat correct.

Selon l'étude de la deuxième année, un coefficient de végétation a pu être trouvé :

$$\text{Besoin eau}(mm/j) = kc * ET0(mm/j) * 0,27$$

Cependant, ce coefficient était une estimation et n'était pas du tout adapté pour la dernière saison d'irrigation comme en témoignent les résultats. Lors de la troisième année, il a été décidé de réajuster ce coefficient en proposant deux nouvelles équations en fonction de TRV et LWA :

$$\text{Besoin eau}(mm/j) = kc * ET0 * LWA * kvv$$

$$\text{Besoin eau}(mm/j) = kc * ET0 * TRV * kvv$$

Ces équations ont permis d'irriguer de manière efficace la parcelle sur la fin de saison de cette 3^{ème} année. Cependant, elles ne prouvent pas pour autant leur efficacité sur les deux premières années.

Bilan de l'économie sur la ressource en eau

L'ambition du projet OREVE est de contribuer à une meilleure rationalisation de la ressource en eau dans le sens économique, environnemental et sociétal. Les premiers résultats de la première année apportent quelques éléments de réponses. En effet, il serait possible de maintenir une croissance satisfaisante des jeunes plants en première

feuille tout en économisant 45% par rapport à la modalité témoin (M3). Lors de la seconde année, l'économie réalisée était de 37% puis de 26% lors de la dernière année. L'économie d'eau est de moins en moins importante mais cela est logique puisqu'après la troisième année, l'irrigation suit la référence producteur qui est nettement plus importante.

Tableau 21 : économie d'eau de chaque année exprimée en pourcentage

Année	Économie (%)
2021	45%
2022	37%
2023	26%

Au final, sur l'ensemble de ces 3 années, une économie d'eau de 2560 m³/ha par rapport à la référence producteur a été réalisé.

8. Bilan

Face aux défis pressants de pénurie de ressources, de pollution agricole et d'impacts du changement climatique, incluant des périodes de chaleur accrue et de sécheresse estivale, il devient impératif de repenser nos méthodes de production pour les rendre durables. La gestion de l'irrigation, pivot essentiel de ce processus, offre une opportunité majeure pour accroître la résilience agricole face à ces bouleversements climatiques, tout en maintenant la productivité et l'efficacité.

L'étude au sein du projet OREVE, se concentrant sur les jeunes vergers de la variété de pommiers GALA, dévoile des résultats intrigants qui suggèrent que les pommiers peuvent prospérer avec une quantité d'eau judicieusement dosée. La gestion, qu'elle soit guidée par des sondes ou d'autres outils d'aide à la décision, ou par une irrigation éclairée par le coefficient du volume de végétation (kvv), se révèle prometteuse par rapport à la modalité de référence des producteurs, qui se révèle excessive pour des arbres en phase juvénile.

Pour de futures recherches, il est impératif de diversifier les moyens d'estimation de la taille de la végétation, les méthodes manuelles étant intrinsèquement limitées. En outre, il serait judicieux de réexploiter d'autres outils utilisés lors de la première année, tels que les drones, l'imagerie satellitaire et le Lidar. Ce déploiement élargi de moyens d'évaluation renforcera la rigueur de notre bilan et enrichira nos perspectives pour une gestion toujours plus éclairée de l'irrigation et des ressources en eau dans les vergers de pommiers en développement.

Suite à cette étude, une fiche technique et une fiche pratique est mis à disposition pour une meilleur application du nouveau système.