



Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome

Spécialité : Agronomie et agroalimentaire

Option : Production Végétale Durable

Caractérisation de l'effet de différents systèmes d'irrigation sur la culture du kiwi (*Actinidia deliciosa*)



Par Bastien Sébal

Année de soutenance : 2023

Organisme d'accueil : Bureau National Interprofessionnel du Kiwi





Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome

Spécialité : Agronomie et agroalimentaire

Option : Production Végétale Durable

Caractérisation de l'effet de différents systèmes d'irrigation sur la culture du kiwi (*Actinidia deliciosa*)



Par Bastien Sébal

Année de soutenance : 2023

Organisme d'accueil : Bureau National Interprofessionnel du Kiwi

Mémoire préparé sous la direction de :
Hélène MARROU

Maitre de stage :
Adeline GACHEIN

Présenté le 13/09/2024

Devant le jury :
Aurélie METAY
Hélène MARROU
Claire MARSDEN

Résumé

Titre : Caractérisation de l'effet de différents systèmes d'irrigation sur la culture de kiwi

Cette étude, conduite par le Bureau national Interprofessionnel du Kiwi sur la commune de Moissac, vise à évaluer l'impact de différents systèmes d'irrigation sur le développement du système racinaire du kiwi. Cet essai, à lieu dans un contexte de dépérissement accru observé en France depuis 2020. Le dépérissement, principalement causé par un engorgement en eau du sol qui limite la capacité des racines à absorber l'oxygène, peut entraîner la nécrose des racines et, dans les cas les plus sévères, la mort des arbres. L'expérimentation, initiée en 2023, compare les effets de l'irrigation par goutte à goutte et de la micro-aspersion sur la répartition de l'humidité dans le sol ainsi que sur la croissance et la distribution des racines. L'objectif est de déterminer si un des systèmes d'irrigation est plus adapté pour limiter le dépérissement des plants. Les données sont collectées à l'aide de micro-fosses et de prélèvements à la tarière entre 0 et 30 cm de profondeur. Malgré une pluviométrie élevée au cours de l'essai, qui a réduit l'impact observable des systèmes d'irrigation sur la distribution racinaire, l'analyse des bulbes d'humectation en profondeur (60 cm) et en largeur (90 cm) à l'aide de sondes capacitatives et tensiométriques a révélée des résultats intéressants. Le système goutte à goutte tend à concentrer l'humidité le long des rangs, avec une humidité du sol plus élevée que celle observée sous la micro-aspersion. En revanche, la micro-aspersion distribue l'humidité sur une plus grande surface, mais avec une infiltration en profondeur moindre pour des rayons d'aspersion plus étendus. Bien qu'aucune différence significative n'ait été constatée quant à la répartition racinaire dans le sol, certaines tendances suggèrent que les racines sous irrigation goutte à goutte sont plus superficielles par rapport à celles sous micro-aspersion. Il est essentiel de poursuivre cette expérimentation sur plusieurs saisons pour obtenir des comparaisons plus robustes, notamment sous des conditions climatiques plus sèches qui nécessiteraient une utilisation accrue de l'irrigation.

Mots clés : Kiwi – Dépérissement – Systèmes racinaires – Humidité – Systèmes d'irrigation

Abstract

Title: Characterization of the Effect of Different Irrigation Systems on Kiwi Cultivation

This study, conducted by the National Interprofessional Kiwi Bureau in the commune of Moissac, aims to characterize the effect of different irrigation systems on the root system of kiwi plants. Initiated in 2023 following the emergence and increase of kiwi decline cases in France since 2020, the research addresses a problem caused by waterlogged soils and the plants' reduced ability to absorb oxygen, leading to root death and, in some cases, the death of the entire tree. The experiment seeks to test the impact of drip irrigation and micro-sprinkler systems on soil moisture distribution, as well as the development and distribution of the root system. The objective is to determine whether a particular irrigation method is better suited to combatting kiwi decline. Measurements are taken using mini-pits and auger samples at depths of 0 to 30 cm. Due to high rainfall during the trial, the effects of the irrigation systems on root distribution were significantly diminished. However, the study of wetting bulbs at depth (60 cm) and horizontally (90 cm) using capacitive and tensiometric probes provided valuable insights. The drip system showed water concentration along the rows with higher humidity compared to micro-sprinkling. Conversely, micro-sprinklers distributed moisture over a larger area, with shallower infiltration but broader spray radii. Although no significant differences were observed in root distribution, certain trends emerged. The root system for the drip irrigation treatment appeared to be shallower than that for micro-sprinkler systems. It is important to continue this trial over several years to enable comparisons, particularly under drier weather conditions with increased irrigation use.

Keywords : Kiwi – Early kiwi decline – Root systems – Irrigation systems – Soil moisture

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadrante de stage et directrice du Bureau national Interprofessionnel du Kiwi : Adeline Gachein, pour sa confiance tout au long du stage qui m'a permis une grande autonomie et pour ses conseils. Je remercie également, le producteur, David Guerrero, sans qui l'essai n'aurait pas été possible, ainsi que pour son écoute et ses connaissances sur la culture du kiwi.

Je tiens également à remercier Hélène Marrou, tutrice de ce stage, pour ses conseils et son écoute.

Merci à toute l'équipe du BIK : Marianne Avignon, pour ton précieux accompagnement ; Morgane Fumeaux, et Zoé Monchecourt pour votre gentillesse et surtout pour votre bonne humeur à toutes les trois. Je remercie également les producteurs et professionnels (techniciens de coopératives et commerciaux) rencontrés durant les journées techniques ou autres déplacements.

Enfin, je remercie l'équipe pédagogique de l'option Production Végétale Durable pour leur accompagnement durant toute cette année et durant ce stage. Un grand merci à la promotion PVD-AD 2023-2024, pour cette belle dernière année passée à Montpellier.

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
Table des matières.....	6
Avant-propos.....	8
Table des tableaux.....	9
Table des figures.....	9
Table des annexes.....	11
Glossaire.....	12
Liste des abréviations.....	13
Introduction.....	14
I. État de l'art.....	15
A. Marché du kiwi.....	15
B. Caractéristiques du kiwi.....	15
1. Système aérien.....	15
2. Système racinaire.....	16
C. Dépérissement.....	17
D. Sensibilité à l'anoxie.....	18
E. Irrigation.....	19
1. Systèmes d'irrigation.....	20
2. Gestion de l'irrigation.....	21
F. Problématique de stage.....	21
II. Matériel et méthodes.....	22
A. Site expérimental.....	22
B. Matériel végétal et conduite de la culture.....	23
C. Modalités et matériel d'irrigation.....	24
D. Mesures.....	25
1. Conductivité du sol.....	25
2. Données météorologiques.....	26
3. Parties souterraines.....	26
4. Parties aériennes.....	28
E. Analyses de données.....	29

III.	Résultats	29
A.	Conditions hydriques	29
1.	Pluviométrie	29
2.	Volumes d'irrigation	30
B.	État du verger avant le démarrage de l'irrigation	31
1.	LAI	31
2.	Micro-fosses	32
3.	Tarière	33
C.	État du verger après le démarrage de l'irrigation	34
1.	Parties aériennes	34
2.	Parties souterraines	36
IV.	Discussion	48
A.	Résultats	48
1.	Apports d'eau par irrigation faibles et insuffisants	48
2.	Une vigueur des plants homogène	48
3.	Influence du système et de la quantité d'irrigation sur les bulbes d'humectation ...	48
4.	Une répartition des racines similaire malgré des croissances contrastées	50
5.	Un système d'irrigation plus adapté aux risques de dépérissement ?	51
B.	Méthodes	52
1.	Des méthodes et outils peu adaptés	52
	Conclusion et perspectives	53
	Références bibliographiques	54
	Annexes	58

Avant-propos

Au cours de la préparation de ce travail, l'auteur, je soussigné Bastien Sébal a utilisé l'IA générative [Chat GPT] afin de [Reformuler].

Table des tableaux

Tableau 1 : Ensemble d'apports d'eau par irrigation et précipitations pour chaque modalité du 05/05 au 27/07.....	31
---	----

Table des figures

Figure 1 : Grappe de racines fines de kiwi	16
Figure 2 : Profils d'humectation (bulbe) au goutte à goutte des sols sableux et argileux à faible et fort débits (FAO, 1990).....	20
Figure 3 : Localisation de la zone expérimentale en France et à l'intérieur de la parcelle de production	23
Figure 4 : Plan expérimental de la zone expérimentale	24
Figure 5 : Cartographie de la conductivité du sol à 600 cm de profondeur.....	25
Figure 6 : Schéma de positionnement des sondes tensiométriques et capacitives.....	27
Figure 7 : Schéma de positionnement des micro-fosses	27
Figure 8 : Schéma de positionnement des photographies pour la mesure du LAI	29
Figure 9 : Pluviométrie en fonction de la date (du 05/05 au 27/07)	30
Figure 10 : Quantité d'eau apportée par irrigation (en mm) pour chaque modalité jusqu'au 27/07	30
Figure 11 : LAI moyen par arbre en fonction de la modalité d'irrigation le 03/05.....	31
Figure 12 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la profondeur pour les fosses (a) parallèles et (b) perpendiculaires le 03/05.....	32
Figure 13 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la distance à l'arbre pour les fosses (c) parallèles et perpendiculaires (d) le 03/05	33
Figure 14 : Masse volumique moyenne (en mg/cm ²) de racines fines en fonction de la profondeur de prélèvement et de la modalité au 30/05 (les lettres montrent une différence statistique significative entre les colonnes : modalités).....	33
Figure 15 : Masse volumique moyenne (en mg/cm ²) de racines fines en fonction de la profondeur, de la position et de la modalité de prélèvement au 30/05	34
Figure 16 : Mesures de dendrométrie à un pas de temps horaire. Modalités : 1 en (violet), 2 en (noir), 3 en (rouge), 4 en (vert)	35
Figure 17 : LAI moyen par plants de chaque modalité entre le 03/05 et le 26/07.....	35
Figure 18 : Évolution de l'humidité (en %) dans le temps en moyenne sur l'ensemble des profondeurs (sondes capacitives) en fonction de la modalité.	36
Figure 19 : Humidité (en %) en fonction de la profondeur et de la modalité.....	36
Figure 20 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 1.....	37
Figure 21 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 1.....	37
Figure 22 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 2.....	38

Figure 23 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 2.....	38
Figure 24 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 3.....	39
Figure 25 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 3.....	39
Figure 26 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 4.....	40
Figure 27 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 4.....	40
Figure 28 : Tensiométrie (en cbars) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation et de la modalité.....	41
Figure 29 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 1	41
Figure 30 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 2	42
Figure 31 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 3	42
Figure 32 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 4	43
Figure 33 : Coefficient d'assèchement tensiométrique (en cbar/jour) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation et de la modalité.....	43
Figure 34 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 1 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire	44
Figure 35 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 2 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire	44
Figure 36 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 3 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire	44
Figure 37 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 4 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire	45
Figure 38 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la profondeur pour les fosses (a) parallèles et (b) perpendiculaires le 12/08.....	45
Figure 39 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la distance à l'arbre pour les fosses (c) parallèles et (d) perpendiculaires le 12/08	46
Figure 40 : Masse volumique moyenne (en mg/cm ²) de racines fines en fonction de la profondeur de prélèvement et de la modalité au 12/08.....	47
Figure 41 : Masse volumique moyenne (en mg/cm ²) de racines fines en fonction de la profondeur, de la position et de la modalité de prélèvement au 12/08	47

Table des annexes

Annexe 1 : Graphiques de distribution de l'eau dans le rang et l'inter-rang pour la modalité 2 et pluviométrie (mm/h) selon la distance.....	58
Annexe 2 : Graphiques de distribution de l'eau dans le rang et l'inter-rang pour la modalité 3 et pluviométrie (mm/h) selon la distance.....	58
Annexe 3 : Carte de positionnement des sondes 2024 et des sondes 2023 par rapport à la conductivité du sol.....	59
Annexe 4 : Pluviomètre Comsag	59
Annexe 5 : Compteur d'eau et silo de réception des données Comsag.....	60
Annexe 6 : Sondes tensiométriques Comsag.....	60
Annexe 7 : Dendromètre Comsag.....	61

Glossaire

Aérenchyme : tissu végétal dont les cellules sont séparées par des méats ou lacunes aérifères permettant les échanges gazeux.

Dépérissement : Perte de vigueur des arbres pouvant aller jusqu'à une mort totale, dont les symptômes sont des nécroses racinaires, une diminution de la quantité de racines fibreuses, un flétrissement, un jaunissement et une chute des feuilles.

Infiltration : Écoulement de l'eau de façon verticale sous l'effet de la gravité.

Racines fibreuses : racines non lignifiées de petit diamètre (entre 10 et 2 mm) permettant l'absorption de l'eau et des nutriments.

Racines structurantes ou lignifiées : racines permettant l'ancrage de l'arbre dans le sol.

Racines fines : racines fibreuses blanches de très petit diamètre (< 2 mm)

Liste des abréviations

BIK : Bureau national Interprofessionnel du Kiwi

CC : Capacité au champ

ET0 : Évapotranspiration de référence

ETM : Évapotranspiration maximale

k : Coefficient d'extinction lumineuse

Kc : Coefficient culturel

LAI : Leaf Area Index : Indice de surface foliaire

M1/2/3 ou 4 : Modalité d'irrigation

PAI : Plant Area Index : Indice de surface végétale

PSA : *Pseudomonas syringae* pv *Actinidiae*

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RU : Réserve Utile

Introduction

Le marché du kiwi, fruit originaire de Chine, a connu une expansion remarquable depuis son introduction en Europe dans les années 1970 et 1980. En France, la production de kiwi est principalement concentrée dans le sud-ouest, notamment en Nouvelle-Aquitaine et en Occitanie, qui représentent 75 % de la production nationale. En 2022, la France a produit environ 62 000 tonnes de kiwi (Agreste, 2023), se positionnant comme le 6ème producteur mondial et le 3ème en Europe, après l'Italie et la Grèce, malgré une production plus modeste comparée à des géants comme la Chine (1 300 000 tonnes par an), la Nouvelle-Zélande (485 000 tonnes par an), et l'Italie (451 000 tonnes par an).

La filière française du kiwi, doit cependant faire face à un défi récent, la grande sensibilité des plants aux inondations pouvant causer le dépérissement des plants. Ce phénomène se manifeste par une dégradation progressive de la santé des plantes pouvant conduire dans certains cas jusqu'à la mort de la plante entière. Le dépérissement constitue une menace majeure pour la durabilité de cette culture, réduisant significativement les rendements et compromettant la viabilité économique des exploitations agricoles. Le phénomène de dépérissement apparu en France il y a environ 3 ans est causé par la sensibilité du kiwi au stress hydrique. Lors d'événements d'engorgement, jusqu'à 78 % des racines marquées pouvaient mourir dans les quatre semaines suivant l'engorgement, mettant en évidence la vulnérabilité du système racinaire à des conditions de sol mal aéré (Reid et al., 1993).

Cette sensibilité est en grande partie due à la faible concentration en oxygène dans les racines du kiwi, mesurée à seulement 2 % d'espace intercellulaire, ce qui limite les échanges gazeux essentiels pour la survie de la plante (Smith et al., 1989). En conséquence, les racines du kiwi peuvent épuiser l'oxygène disponible dans leur environnement en seulement cinq heures lors d'une saturation en eau prolongée (Smith et al., 1989). Le système racinaire du kiwi, bien que possédant des racines fines et très ramifiées qui constituent environ 11 à 18 % du poids sec total des racines mais jusqu'à 90 % de leur longueur totale (Xiloyannis et al., 1993), est particulièrement vulnérable à l'engorgement. Les racines fines sont cruciales pour l'absorption d'eau et de nutriments, mais elles sont aussi les premières à souffrir en cas de conditions défavorables comme un excès d'eau, contribuant ainsi au dépérissement des plants. Ce phénomène peut être accentué en cas de mauvaises pratiques culturales ou de conditions climatiques extrêmes (Baudry et al., 2003). Pour pallier ce problème, l'irrigation joue un rôle crucial dans la gestion de cette sensibilité. En effet, la culture du kiwi nécessite un apport hydrique précis, pouvant atteindre jusqu'à 2000 m³/ha, et l'apport maximal peut varier entre 1000 mm/mois de mai à octobre (Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine, 2021), soit 300 à 600 mm apportés par irrigation (Baudry et al., 2003). Les systèmes d'irrigation localisée comme le goutte-à-goutte, la micro-aspersion, et le micro-jet sont utilisés pour optimiser l'apport en eau tout en minimisant les risques d'engorgement. Les défis liés à la gestion de l'irrigation sont également accentués par les variations climatiques et les pratiques culturales. Les outils de mesure de l'humidité du sol, comme les sondes tensiométriques et capacitatives, sont essentiels pour ajuster les apports en eau de manière précise.

Ce projet a débuté en mars 2023 sur la commune de Moissac (82). Il s'agit de la deuxième année que l'expérimentation est effectuée. La parcelle et le matériel d'irrigation utilisés sont les mêmes. Ce projet s'inscrit dans la continuité d'un sujet de thèse mis en place en 2021 par le Bureau national Interprofessionnel du Kiwi concernant le dépérissement du kiwi (projet Unlocked) et ses solutions de remédiation. Il vise à tester différents systèmes d'irrigation pour répondre à la problématique suivante.

I. État de l'art

A. Marché du kiwi

Le marché du kiwi, fruit originaire de Chine, a connu une expansion remarquable depuis son introduction en Europe dans les années 1970 et 1980. En France, la production de kiwi est principalement concentrée dans le sud-ouest, notamment en Nouvelle-Aquitaine et en Occitanie, qui représentent 75 % de la production nationale. Le pays bénéficie de conditions climatiques favorables et de sols adaptés, permettant de cultiver principalement les variétés *Actinidia deliciosa* (kiwi vert) et *Actinidia chinensis* (kiwi jaune).

En 2022, la France a produit environ 62 000 tonnes de kiwi (Agreste, 2023), se positionnant comme le 6ème producteur mondial et le 3ème en Europe, après l'Italie et la Grèce. Malgré une production plus modeste comparée à des géants comme la Chine (1 300 000 tonnes par an), la Nouvelle-Zélande (485 000 tonnes par an), et l'Italie (451 000 tonnes par an), la France se distingue par la qualité de ses fruits. Les exportations néo-zélandaises dominent le marché international grâce à la marque Zespri, tandis que l'Italie reste le principal producteur en Europe. La filière française du kiwi, malgré sa compétitivité et la qualité de ses produits, doit faire face à des défis récents, notamment des problèmes sanitaires comme le *Pseudomonas syringae* pv. *Actinidiae* (PSA), la punaise diabolique (*Halyomorpha halys*), et une grande sensibilité aux inondations pouvant causer le dépérissement des plants.

B. Caractéristiques du kiwi

La plante du kiwi, ou *Actinidia*, est originaire de la Chine orientale et centrale. C'est une liane vigoureuse et grimpante atteignant 1,60 à 1,80 mètres de hauteur. Le premier verger de kiwis a été créé en Nouvelle-Zélande en 1930 à partir de matériel végétal d'*Actinidia deliciosa*. La variété "Hayward" de l'espèce *Actinidia deliciosa* étudiée ici, représente la variété de kiwi la plus cultivée au monde (Salinero et al., 2009). La plante est dioïque, nécessitant des pieds mâles et femelles séparés pour la pollinisation et la reproduction. Le kiwi se développe mieux dans des sols bien drainés qui maintiennent une certaine humidité même durant les périodes sèches. Les sols très argileux, compactés ou excessivement sableux ne conviennent pas à la culture de l'*Actinidia*. De plus, cette plante est sensible à un taux de calcaire actif dépassant 7 %. Pour un développement optimal, le pH du sol doit se situer entre 5 et 7,5 (Baudry et al., 2003).

1. Système aérien

La partie pérenne du plant est constituée d'un tronc vertical et de deux charpentières horizontales soutenues par une structure de palissage (Baudry et al., 2003). La partie productrice est composée de tiges latérales d'un an sur lesquelles vont se développer les rameaux de l'année qui vont porter les fruits. Il existe trois catégories de rameaux, les rameaux à croissance déterminée mesurant de 10 à 30 cm, indéterminée pouvant atteindre 3 à 4 m et intermédiaire atteignant 50 à 70 cm (Blanchet, 1985; Blanchet & Roubault, 1987). La proportion de chaque type de rameaux dépend de la vigueur du plant et des conditions de développement (Baudry et al., 2003). Le débourrement des pousses fruitières se produit en fin d'hiver et la floraison a lieu de mi-mai à début juin puis les fruits arrivent à maturité environ 150 jours après la floraison pour une récolte s'étendant de début octobre à fin novembre. Par la suite, avec la baisse des températures, la plante entre en dormance jusqu'à fin février (Baudry et al., 2003).

2. Système racinaire

Le système racinaire du kiwi est composé de racines principales épaisses dites structurales ainsi que de nombreuses radicelles secondaires très ramifiées (Baudry et al., 2003; Xiloyannis et al., 1993). Toutes ces nouvelles radicelles aussi appelées racines fines sont blanches et finissent au bout d'un certain temps par devenir brunes. Ce brunissement appelé subérisation est causé par une dégradation progressive des cellules corticales et une accumulation de tanins qui entraîne une diminution de 77 % des activités métaboliques (Buwalda & Hutton, 1988; Comas et al., 2000). Ces racines fines, généralement inférieures à 1 ou 2 mm de diamètre selon les auteurs sont regroupées en touffes et se développent à partir des extrémités des racines larges (Figure 1). Elles représentent l'élément absorbant du système racinaire ainsi que la partie la plus dynamique (Comas et al., 2002; Xiloyannis et al., 1993).



Figure 1 : Grappe de racines fines de kiwi

Le système racinaire du kiwi est caractérisé par une faible dominance de l'apex racinaire, favorisant la formation d'un grand nombre de racines fines (Xiloyannis et al., 2012). D'après ((Xiloyannis et al., 1993), ces racines représentent entre 11 et 18 % du poids sec total des racines, mais jusqu'à 90 % de leur longueur totale. Cette caractéristique est typique de certains arbres fruitiers. En effet, les racines fines peuvent représenter plus de 98 % de la longueur totale du système racinaire pour moins de 20 % de la biomasse totale (Atkinson, 2011).

Les racines explorent le sol de manière intensive mais peu profonde. La capacité du système à explorer le sol ainsi que sa répartition varie significativement selon l'âge des plants, le type de sol et l'humidité disponible (Bécel, 2010). En effet, d'après (David et al., 2022), la densité racinaire la plus élevée se situe dans les 40 premiers centimètres du sol. Or, (McAneney & Judd, 1983) démontrent que bien que la majorité des racines se trouve dans les 70 premiers centimètres, dans des sols sans barrières, les racines peuvent s'étendre jusqu'à plusieurs mètres. Elles peuvent atteindre jusqu'à 2.2 mètres latéralement et au moins 2,4 mètres de profondeur dans des sols profonds. Cette faible exploration du sol en profondeur s'explique par une faible dominance apicale des racines (Xiloyannis et al., 1993), causant une grande densité racinaire dans un plus faible volume de sol exploré en comparaison d'autres espèces d'arbres (Miller, 1998). Ces observations sont confirmées par (Gandar & Hughes, 1988; Hughes & Gandar, 1989) qui montrent une diminution de la densité racinaire avec la profondeur, surtout chez les jeunes plants. Cette diminution de croissance racinaire peut être expliquée par différents paramètres tels que la baisse de température, d'oxygène ou encore de nutriments (Gradwell,

1976). La densité de longueur racinaire (DLR) diminue avec la profondeur et la distance radiale chez les jeunes plants de moins de dix ans, mais chez les arbres plus âgés, cette variation est moins prononcée, la DLR moyenne varie entre 0,4 et 1,2 cm/cm³. Il est intéressant de noter que le volume de sol exploré augmente avec l'âge des plants, avec une observation intéressante chez les jeunes plants où environ la moitié du volume racinaire peut être inoccupée (Gandar & Hughes, 1988).

Concernant la biomasse racinaire, les racines fines stabilisent leur production à trois tonnes par hectare après dix ans, tandis que la masse des racines plus grosses et moyennes (racines structurelles) s'accroît avec l'âge des plants, représentant plus de 90 % de la masse racinaire après 15 à 20 ans. Ces racines structurelles jouent un rôle déterminant dans la distribution des racines fines, qui suivent initialement un modèle en forme de bol à la base du plant et évoluent avec le temps à mesure que les racines structurelles s'étendent dans le sol (Hughes & Gandar, 1989). De plus, les recherches révèlent que les plants de kiwi peuvent rapidement ajuster leur modèle d'absorption d'eau face aux changements environnementaux, modifiant ainsi la distribution des racines fines et épaisses (Green & Clothier, 1995).

Le développement racinaire du kiwi se caractérise par des dynamiques complexes de croissance et de mortalité avec une périodicité très marquée. D'après (Buwalda & Hutton, 1988), 40 à 50 % de la longueur racinaire totale se renouvelle chaque année. Le début de l'élongation des racines blanches intervient entre 65 et 70 jours après le débourrement, avec des pics de croissance des racines fines qui surviennent en réponse à la croissance rapide des pousses et des fruits. Ces pics de croissance se manifestent en deux phases, respectivement en début de printemps et début d'été. Le premier arrive entre 60-80 jours après le débourrement soit entre 35-55 jours après la floraison et le second, 140 jours après le débourrement soit 95 jours après la floraison (Von Bennewitz et al., 2019). La période de croissance la plus intense se situe en fin d'été, lorsque la croissance aérienne des pousses et des fruits est achevée (Buwalda & Hutton, 1988). (Reid et al., 1993) ont étudié la longévité des racines du kiwi sur 2 ans pendant lesquels 1 418 racines ont été marquées pour suivre leur développement. Les résultats montrent que 51 % des racines meurent à un âge inférieur à 28 jours, 18 % entre 29 et 56 jours, et seulement 8 % survivent plus de 252 jours, certaines devenant des racines structurelles subérisées. Par ailleurs, il est noté que les racines qui deviennent brunes meurent généralement deux semaines après leur changement de couleur, avec environ 75 % des racines subissant ce processus avant de disparaître. Cependant, avec un intervalle d'observation de 14 jours, il s'est avéré impossible pour (Reid et al., 1993) de mesurer avec précision la durée pendant laquelle les racines restent blanches. De plus, aucune influence de la saison d'apparition des racines n'a été observée sur leur durée de vie.

C. Dépérissement

L'apparition du dépérissement du kiwi en Nouvelle-Zélande remonte à mars 1988, à la suite d'un cyclone provoquant des engorgements en eau et une mauvaise aération des sols (Bardi, 2020; Reid et al., 1992). Ce phénomène a entraîné une diminution de la vigueur des arbres, pouvant aller jusqu'à leur mort, avec plus de 50 hectares perdus cette année-là en Nouvelle-Zélande (Reid et al., 1991). Depuis, des symptômes similaires de dépérissement ont été observés en Italie à partir de 2012, même en l'absence d'inondations (Tacconi et al., 2019). Les symptômes provoqués par ce phénomène comprennent des nécroses racinaires et une réduction de la quantité de racines fibreuses au niveau souterrain, ainsi que des flétrissements, jaunissements et chutes de feuilles au niveau aérien (Hughes & Wilde, 1989; Reid et al., 1991). Si ce phénomène n'entraîne pas systématiquement la mort du plant, il cause cependant une nette

diminution de la croissance avec une division par deux de la matière sèche aérienne (Savé & Serrano, 1986).

Il est largement admis que la principale cause du dépérissement est le manque d'oxygène dans les racines. De multiples facteurs contribuent également à ce phénomène, notamment la sensibilité des plants de kiwi à l'engorgement causée par certaines de ses caractéristiques physiologiques ou encore la structure et la capacité drainante du sol (Reid et al., 1991). De plus, les effets du changement climatique, tels que des événements météorologiques plus intenses (gel, inondations, sécheresse) survenant aux périodes sensibles pour le kiwi, ainsi que l'état physique du sol, peuvent aggraver le problème. Les pratiques culturales, telles que le passage d'engins lourds qui accentuent la compaction du sol, et l'irrigation, notamment par inondations dans certaines régions d'Italie peuvent également jouer un rôle dans le dépérissement du kiwi en saturant le sol en eau lors de périodes critiques pour la plante. Bien que des microorganismes pathogènes tels que *Phytophthora*, *Pythium*, *Cylindrocarpon*, *Fusarium*, *Pyrenochaeta* et *Erwinia* aient été identifiés dans le sol et les racines des plants dépérissants, ils ne sont pas considérés comme les principaux responsables du phénomène, mais plutôt comme une conséquence du manque d'oxygène et de l'excès d'eau dans la zone racinaire, ainsi que des racines endommagées (Bardi, 2020; Reid et al., 1991; Smith et al., 1990).

D. Sensibilité à l'anoxie

Une des principales causes du dépérissement est la sensibilité du plant à l'engorgement. Lors d'une étude, (Reid & Petrie, 1991) a étudié la réponse du système racinaire à un événement d'engorgement. En général, la longueur des racines a montré une nette diminution à la suite de périodes où le potentiel matriciel devenait inférieur à -35 kPa. Après le traitement d'engorgement, la moyenne d'âge des racines des plants engorgés tendait à être inférieure à celle des racines des plants contrôles, avec une mortalité significativement supérieure des racines. Quatre semaines après l'engorgement, 78% des racines marquées étaient mortes, soit 53 % de la longueur racinaire visible et ce chiffre a atteint 65% après cinq semaines. La répartition par âge des racines mortes indique qu'en général, les racines de moins de 100 jours environ étaient les plus vulnérables. Les racines de plus de 100 jours qui ont survécu à l'engorgement étaient généralement des racines axiales > 2 mm de diamètre. En effet, il y a une diminution significative des racines fines dont le tissu cortical perd de sa rigidité et se détache alors que chez les racines structurales, une décoloration brune de la stèle centrale est observée (Bardi, 2020; Tosi et al., 2015).

Cette sensibilité s'explique par le fonctionnement et la physiologie unique de ses racines. En effet, les racines de kiwi possèdent un espace intercellulaire moyen de seulement 2%, ce qui limite considérablement leur capacité à diffuser l'oxygène depuis la partie aérienne vers les racines (Smith et al., 1989). Contrairement à d'autres plantes qui, en conditions d'anoxie, développent des aerenchymes facilitant les échanges gazeux, le kiwi ne dispose pas de cette adaptation (Justin & Armstrong, 1987). De plus, la consommation d'oxygène du kiwi est relativement élevée, mesurée à $9,1 \times 10^{-10}$ mol/m/s soit $4,6 \times 10^{-6}$ mol/m³/s. En comparaison, d'autres plantes consomment entre 1,8 et 9×10^{-6} mol/m³/s. Dans certains sols, en condition d'anoxie, sans apport d'oxygène, le kiwi épuiserait la totalité de l'oxygène disponible dans le volume exploré en seulement cinq heures, ce qui souligne sa forte sensibilité à l'asphyxie. Cette forte consommation d'oxygène augmente la vulnérabilité du kiwi à des conditions de sol mal aérées, ce qui accroît le risque de stress et de défaillance racinaire en cas d'engorgement prolongé.

Lorsque les racines sont submergées, la faible concentration en oxygène diminue considérablement leur capacité à absorber l'eau et les nutriments en raison d'une résistance accrue aux prélèvements (Jackson & Drew, 1984). Cette résistance intensifie d'autant plus le stress hydrique. En parallèle, les feuilles de kiwi, larges et sujettes à une forte transpiration, subissent un stress supplémentaire en raison de la fermeture partielle des stomates dès les premières heures de submersion. D'après une étude menée par (Savé & Serrano, 1986), cette fermeture stomatique partielle qui peut se produire dès le premier jour sans diminution préalable de la turgescence, indique une réponse directe au stress d'aération plutôt qu'un simple déficit hydrique. Lors de cette étude, des plants de kiwi ont été suivis pendant 1 mois après une inondation. Pendant les 28 jours, la résistance stomatique était significativement supérieure pour les plantes inondées, et les stomates étaient pratiquement fermés à partir du 22^e jour, accompagnés par une réduction de la transpiration.

Cette vulnérabilité est aggravée par des facteurs environnementaux tels que les températures élevées. Le système racinaire du kiwi est particulièrement vulnérable aux températures élevées du sol. En effet, lorsque la température du sol dépasse 25°C, le développement des racines est considérablement réduit (Smith et al., 1989, 1990). Cette situation est aggravée par la diminution de la disponibilité de l'oxygène dans le sol à des températures élevées, ajoutant un stress supplémentaire pour les racines. Ces conditions défavorables coïncident souvent avec des périodes où la surface foliaire est très développée, entraînant un besoin de transpiration accru. Par ailleurs, le vent peut exacerber ce stress en augmentant l'évapotranspiration et en diminuant l'humidité de l'air, contribuant ainsi au dessèchement du kiwi (Baudry et al., 2003).

Malgré cette sensibilité, il peut y avoir une récupération partielle du système racinaire après un engorgement si suffisamment de racines survivent. Le taux de survie des arbres est à mettre en relation avec la vigueur des plants. Le dépérissement est moins sévère pour des plants plus vigoureux, il est plus rapide pour des diamètres de tronc plus faibles (28 à 32.6 mm) comparé à des diamètres de tronc plus élevés (57.8 mm) (Reid & Petrie, 1991).

Cependant, le taux de croissance de nouvelles racines est rarement égal à un turnover normal sur un plant contrôle. L'aptitude du kiwi à régénérer de nouvelles racines après une inondation dépend fortement de la durée de l'engorgement. Des racines adventives apparaissent généralement à la base du tronc pour des plants submergés pendant moins de cinq jours (Smith et al., 1990). Moins l'inondation est longue, plus le nombre de nouvelles racines est élevé. Cependant, après quatre jours d'engorgement, la conductance stomatique ne retrouve pas son niveau normal, et les stomates restent partiellement fermés après seulement deux à trois heures de submersion, affectant négativement la photosynthèse et la croissance de nouvelles racines (Smith et al., 1990). La faible apparition de racines adventives n'est souvent pas suffisante pour compenser la perte du système racinaire (Savé & Serrano, 1986).

E. Irrigation

La culture du kiwi (*Actinidia deliciosa*) nécessite une irrigation régulière, pouvant atteindre 2000 m³/ha, et un apport hydrique maximal de 1000 mm/mois entre mai et octobre (Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine, 2021). Au fil des années, divers systèmes d'irrigation ont été développés et utilisés. Ces systèmes se classent principalement en deux catégories : l'irrigation localisée, comprenant le goutte-à-goutte, la micro-aspersion et le micro-jet, qui humidifient seulement une partie spécifique du sol, et l'aspersion, qui irrigue l'ensemble de la surface.

1. Systèmes d'irrigation

Le système de goutte-à-goutte, bien qu'adapté pour un apport d'eau localisé sous la frondaison des arbres, présente une influence limitée sur l'hygrométrie globale de la parcelle. Le volume de sol humidifié par ce système est relativement faible et irrégulier, variant en fonction de la texture du sol, du volume d'eau appliqué et du débit des goutteurs. Ce système est inapproprié pour les sols argileux ou sableux (Baudry et al., 2003). En sols sableux, l'apport d'eau localisé entraîne un drainage rapide vers les horizons inférieurs, inaccessibles aux racines. Dans les sols argileux, l'eau se déplace latéralement de manière plus marquée, tandis que dans les sols limoneux, l'humidification prend la forme d'une sphère avec une profondeur et un diamètre similaires (Figure 2) (Sné, 2007). De ce fait, l'irrigation doit être appliquée en plus petites quantités mais à des fréquences plus élevées.

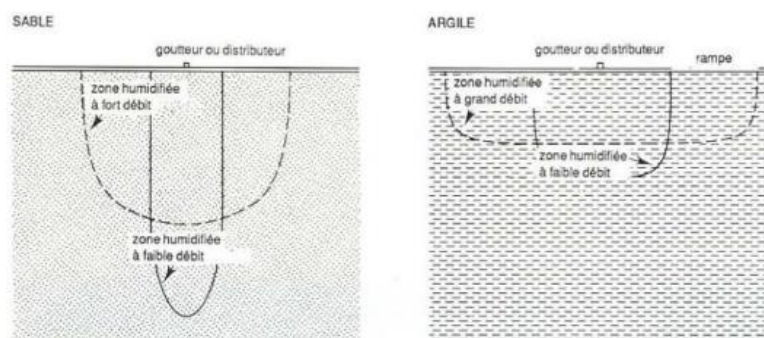


Figure 2 : Profils d'humectation (bulbe) au goutte à goutte des sols sableux et argileux à faible et fort débits (FAO, 1990).

La micro-aspersion, quant à elle, irrigue un diamètre de 5 à 10 mètres avec des débits de 50 à 150 litres par heure par asperseur. Cette méthode permet d'humidifier un volume de sol plus large tout en augmentant l'humidité de l'air et la circulation de l'oxygène dans le sol (Chartzoulakis et al., 1991). Bien que l'investissement initial soit plus élevé que pour le goutte-à-goutte ou le micro-jet, l'utilisation de sondes tensiométriques pour le contrôle de l'humidité est plus adaptée à ce système. Les micro-asperseurs sont généralement suspendus entre 50 et 70 cm de hauteur.

Le micro-jet assure un apport d'eau localisé sous la frondaison, avec deux diffuseurs par arbre couvrant un diamètre de 2 mètres, représentant jusqu'à 80 % de la zone de forte densité racinaire (Baudry et al., 2003). Grâce à la variété des formes des arroseurs (cercle complet, demi-cercle, aile de papillon, pinceau), les surfaces arrosées peuvent être adaptées pour éviter l'arrosage du collet et du palissage, limitant ainsi le développement de maladies. L'humidité du sol est contrôlée efficacement par des tensiomètres, adaptés à ce système.

L'aspersion, en revanche, est moins adaptée à l'irrigation du kiwi en raison de la hauteur des arbres et de la forme de leur canopée. L'aspersion sous frondaison est limitée par la canopée, empêchant une distribution homogène de l'eau. De même, l'aspersion sur frondaison est inefficace car le feuillage redirige l'eau vers l'inter-rang, où la densité racinaire est moindre. De plus, ce système peut causer des traces noires sur les fruits (Baudry et al., 2003). Toutefois, l'aspersion sur frondaison reste la méthode la plus efficace pour la protection contre le gel printanier.

Plusieurs études ont comparé ces systèmes d'irrigation. (Chartzoulakis et al., 1991) ont observé que la densité racinaire était plus élevée et mieux répartie avec le goutte-à-goutte qu'avec la micro-aspersion. Les racines tendaient à se concentrer autour des micro-asperseurs et

pénétraient plus profondément mais uniquement sous la source d'eau. En revanche, (Holzapfel et al., 2000) ont rapporté des résultats contradictoires, pouvant être attribués à des différences de structure et de texture du sol. Il a démontré que, pour un même volume d'eau appliqué, le rendement était supérieur avec le micro-jet par rapport au goutte-à-goutte, probablement en raison d'une meilleure aération du sol et d'un volume de sol humidifié plus grand, favorisant une exploration racinaire plus étendue. Ces observations mettent en lumière l'importance de choisir un système d'irrigation adapté aux caractéristiques spécifiques du sol et aux besoins de la culture, afin d'optimiser l'efficacité de l'irrigation et d'assurer un développement racinaire optimal et une production fructifère de haute qualité.

2. Gestion de l'irrigation

Pour déterminer les quantités d'eau à apporter, on peut se baser sur l'ETM quotidienne pour les systèmes de goutte-à-goutte ou sur l'accumulation de l'ET0 des trois jours précédents pour les systèmes de micro-jet. Les besoins en eau du kiwi représentent généralement 20 à 30 % de l'ET0 de mai à septembre (Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine, 2021). La consommation d'eau des plantes, estimée à partir de données climatiques par l'ET0 (évapotranspiration de référence), est essentielle pour une irrigation efficace. L'ET0, qui correspond à l'évapotranspiration d'une pelouse rase en conditions optimales, est multipliée par un coefficient cultural (K_c) pour obtenir l'ETM (évapotranspiration maximale). Pour le kiwi, en irrigation localisée, le K_c est de 0,85 d'avril à juillet et de 0,75 en août et septembre, tandis qu'il est de 1,1 et 1,0 sous aspersion pour les mêmes périodes respectivement (Station de recherche agronomique de San Giuliano, 1989). En Italie, les valeurs du K_c pour l'irrigation localisée varient de 0,5 en avril à 1,2 de juillet à septembre, puis diminuent à 0,9 en octobre (Netafim).

Une irrigation précise repose sur la connaissance des seuils critiques de l'humidité du sol. La Chine a établi des seuils à 65 % de la capacité au champ (CC) du débourrement jusqu'à l'apparition des premières feuilles, puis à 70 % de la CC de la floraison à la nouaison et jusqu'au développement des fruits, avant de revenir à 65 % de la CC pour la maturation des fruits. Ainsi, l'irrigation commence lorsque le sol atteint ces seuils d'humidité.

Différents outils peuvent être utilisés pour piloter l'irrigation, notamment les sondes tensiométriques et les sondes capacitatives. Les sondes capacitatives, qui mesurent l'humidité par électromagnétisme dans un volume de sol défini tous les 10 cm, fournissent un pourcentage d'humidité convertible en millimètres d'eau. Toutefois, elles ne permettent pas de déterminer directement la disponibilité de l'eau pour la plante, contrairement aux sondes tensiométriques, qui signalent une disponibilité en eau en dessous de 1,3 MPa en moyenne (Chambre d'agriculture du Tarn). Les facteurs influençant les mesures incluent la texture, la structure, la température, la salinité et le contact sol-capteur (Gaudu et al., 1993).

F. Problématique de stage

Le kiwi, étant particulièrement sensible aux excès d'eau, requiert une gestion précise de l'irrigation pour optimiser sa culture. En réponse à ce problème, le Bureau national Interprofessionnel du Kiwi (BIK) a initié un essai visant à évaluer l'impact de divers systèmes d'irrigation sur cette culture. La problématique étudiée durant ce stage est :

Quels sont les effets des différents systèmes d'irrigation sur la distribution en eau et sur la croissance du système racinaire en culture de kiwi ?

Dans cet essai, plusieurs systèmes d'irrigation sont testés : gouttes à gouttes et micro-aspersion à débits différents. La variable de la dose d'irrigation apportée n'est pas testée, toutes les modalités reçoivent donc la même quantité d'eau en théorie. De plus, s'agissant d'une parcelle de production, tout est fait pour qu'il n'y ait pas de situations de stress hydriques (excès ou déficit). L'objectif est de déterminer la répartition de l'eau dans le sol, soit l'humidité à différentes profondeurs et à différentes distances de l'aspersion afin d'étudier la croissance du système racinaire en fonction de chaque type d'irrigation.

Cette problématique repose sur différentes hypothèses déduites des recherches bibliographiques :

- Les différents systèmes d'irrigation modifient la distribution de l'humidité dans le sol, tant en profondeur qu'en latéralité. Le bulbe d'irrigation généré par un système de goutte-à-goutte serait généralement plus restreint en volume comparé à celui d'un micro-asperseur.
- Le débit d'application horaire influence également la distribution de l'eau dans le sol. Un débit plus faible réduirait la percolation verticale, ce qui favoriserait une diffusion latérale par capillarité.
- La morphologie du bulbe d'irrigation a une incidence directe sur l'architecture du système racinaire, en particulier sur les racines fibreuses, et sur la densité racinaire. Une irrigation localisée, telle que celle du goutte-à-goutte, engendrerait un système racinaire plus superficiel et concentré autour de l'axe principal de l'arbre.
- Le développement du système racinaire du kiwi est significativement freiné, voire interrompu, en situation de stress hydrique, qu'il s'agisse d'un déficit en eau ou d'un engorgement du sol.
- À l'inverse, une réduction de la disponibilité en eau due à une hétérogénéité de la répartition dans la zone racinaire pourrait stimuler la croissance des racines, incitant celles-ci à explorer davantage le sol pour accéder à l'eau disponible.

II. Matériel et méthodes

A. Site expérimental

La parcelle utilisée pour l'essai est une parcelle de production appartenant à un adhérent du BIK et est située à Moissac, dans le département du Tarn-et-Garonne, au nord-ouest de Toulouse (Figure 3). Moissac bénéficie d'un climat océanique altéré, caractérisé par une température moyenne annuelle de 13,6 °C. Les températures varient entre un minimum de 2 °C en hiver et un maximum de 28 °C en été (données de Météo-France et Weather Spark).

Cette parcelle se trouve entre deux cours d'eau, le Lemboulas à l'ouest et le Tarn à l'est, qui se rejoignent au sud de la parcelle. Le sol de cette parcelle est principalement constitué de sable limoneux. Une analyse détaillée du sol, réalisée en 2020 par le Laboratoire Galys en collaboration avec l'association de producteurs de kiwi Garlanpy, a révélé que le sol est composé de 49 % de sable, 33 % de limon et 12 % d'argile, avec un taux de cailloux nul.

Ce type de sol, bien que léger, présente une grande instabilité dans sa structure pouvant se compacter facilement et étant sujet à la battance. La forte proportion de sable entraîne

également une réserve utile (RU) faible de 32 mm. Cette RU a été calculée en tenant compte d'un enracinement majoritaire à une profondeur de 20 cm et d'une RU de 1,6 mm par cm de sol sablo-limoneux, sans présence de cailloux (Marty 1969, INRA de Toulouse). Le pH du sol est relativement élevé à 8,3, tandis que la teneur en matière organique est de 1,8 %, indiquant une fertilité modérée. La surface totale de la parcelle utilisée pour cet essai est de 9 000 m².

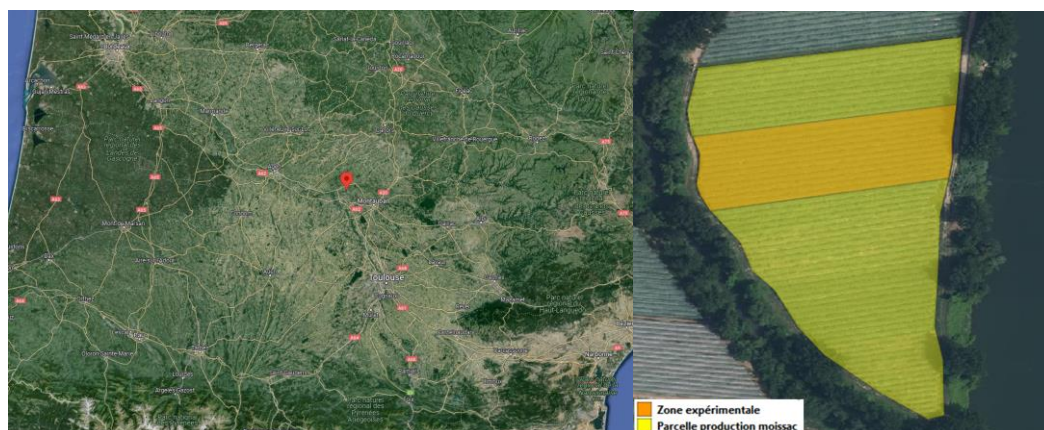


Figure 3 : Localisation de la zone expérimentale en France et à l'intérieur de la parcelle de production

B. Matériel végétal et conduite de la culture

Les arbres sur lesquels l'expérimentation est menée ont 22 ans pour la modalité 4, tandis que les autres modalités concernent des arbres de 14 ans, ce qui correspond à un âge de pleine production. Ces arbres sont de la variété Hayward (*Actinidia deliciosa*) et sont plantés avec un espacement de 2,5 m sur le rang et de 5 m entre les rangs, résultant en une densité de 800 arbres par hectare. Ils sont conduits en T-bar à trois fils avec deux charpentières et il y a un pied mâle pour huit pieds femelles. Des filets anti-grêle protègent la parcelle.

Un décompactage à 50 cm de profondeur a été effectué à environ 1,20 m du rang après la récolte de 2023, à l'aide d'une dent Michel. Conduit en agriculture biologique, le verger a reçu 20 tonnes par hectare de compost de déchets verts durant l'hiver, sans incorporation dans le sol. Ensuite, en mars, 50 kg par hectare de fertilisant organique (7/3/11) ont été épandus, suivis de deux applications de 400 kg par hectare de farine de plume. L'enherbement est très dense, atteignant parfois plus de 1 mètre après la tonte estivale, avec des espèces variées et spontanées telles que les orties (*Urtica*), la potentille rampante (*Potentilla reptans*), des graminées et la prêle (*Equisetum arvense*). Le désherbage est réalisé mécaniquement avec un gyrobroyeur sur l'inter-rang. Une tonte a été effectuée dans l'inter-rang le 10 mai 2024 pour préparer l'essai.

Depuis la plantation, l'irrigation des arbres est assurée par microaspersion. Chaque micro-asperseur, espacé de 2,5 m, délivre un débit de 55 L/h, soit un asperseur par arbre. Théoriquement, les asperseurs sont placés à 30 cm de l'arbre, bien que cela puisse varier entre 0 et 40 cm. L'agriculteur appliquait initialement 12 mm d'eau, soit 3 heures d'irrigation, augmentant progressivement à 30 mm, soit 8 heures d'irrigation. Les intervalles entre les irrigations sont généralement d'une semaine, ajustés selon les conditions météorologiques. La quantité d'eau a été augmentée par rapport aux années précédentes (de 8 mm à 12 mm puis 30 mm par apport) pour garantir une meilleure infiltration en profondeur.

Cette parcelle et cette zone sont saines et ne montrent aucun signe de dépérissement, un facteur essentiel pour le suivi de l'effet de l'irrigation. Cela garantit, que l'état sanitaire des arbres ne constituera pas un facteur supplémentaire à analyser dans la croissance du système racinaire.

En théorie, les arbres devraient avoir la même vigueur, vérifiable par les notations initiales, et aucun autre paramètre que l'irrigation ne devrait influencer les effets sur le système aérien ou racinaire.

C. Modalités et matériel d'irrigation

Dans cet essai, quatre modalités distinctes sont étudiées. Les modalités 1 et 4 comprennent chacune quatre rangs de 155 mètres, ce qui représente théoriquement 248 arbres par modalité. En revanche, les modalités 2 et 3 consistent en deux rangs de 155 mètres chacun, soit un total de 124 arbres par modalité. L'essai comprend donc un total de 744 arbres (Figure 4).

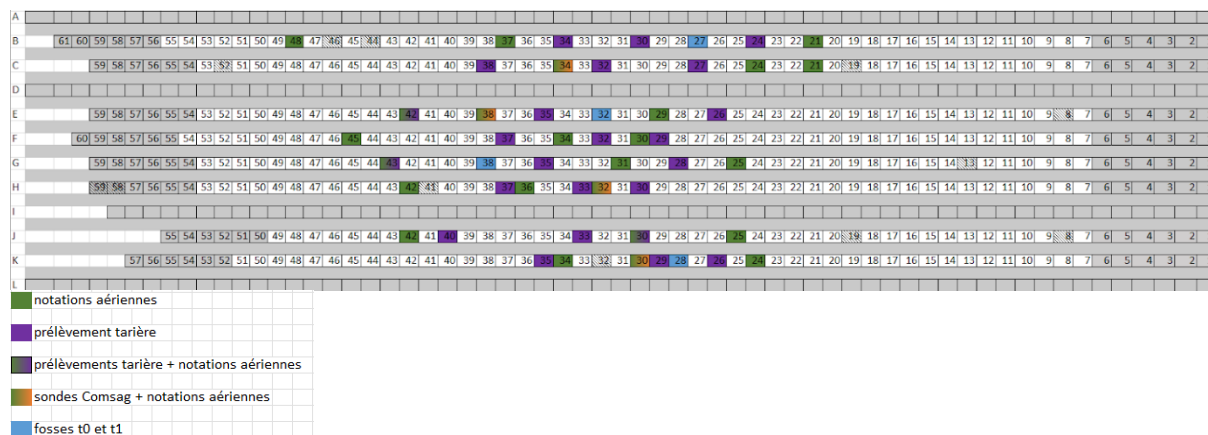


Figure 4 : Plan expérimental de la zone expérimentale

La première modalité utilise un système d'irrigation par goutte-à-goutte. Les goutteurs, avec un débit de 1,6 L/h, sont espacés de 50 cm le long de la rampe d'irrigation, qui est suspendue à une hauteur de 160 cm du sol. Chaque rang d'arbre est équipé de deux rampes positionnées à 30 cm de l'arbre, soit un espacement de 60 cm entre les rampes. Deux des rangs sont équipés de matériel de la société Rivulis (Hydro PC) et les deux autres utilisent celui de la société Netafim (Uniram AS), bien que les goutteurs aient des caractéristiques identiques. Ce double système de rampes a été choisi pour assurer un apport en eau suffisant pour les kiwis, évitant ainsi tout stress hydrique, notamment parce que le système racinaire a été initialement développé sous une irrigation par micro-aspersion. La double rampe augmente également la diffusion latérale de l'eau dans un sol filtrant. La suspension des goutteurs a été nécessaire pour éviter tout obstacle et éviter la casse du matériel lors du désherbage avec un gyrobroyeur, et pour permettre un point d'accroche au niveau des T-bar.

La deuxième modalité utilise des micro-asperseurs de 35 L/h, avec un distributeur par arbre, espacés de 2,5 mètres et suspendus à une hauteur de 70 cm du sol. Le matériel pour cette modalité provient de la société Rivulis (2002 AquaSmart), avec une portée de 1,5 mètre (Annexe 1).

La troisième modalité est similaire à la deuxième, mais utilise du matériel de la société Netafim (SuperNet UDSR) avec une portée de 2 mètres (Annexe 2). Le débit de 35 L/h est plus faible que celui de la modalité témoin, ce qui entraîne une durée d'irrigation plus longue pour apporter un volume d'irrigation équivalent, permettant ainsi une irrigation théoriquement plus progressive. Ces trois premières modalités sont équipées d'un système de filtration à disques à 130 µ (filtre Netafim).

La dernière modalité, qui sert de témoin, utilise l'irrigation déjà en place, à savoir des micro-asperseurs de 55 L/h espacés de 2,5 mètres (Rivulis JFR) avec une portée de 3,2 mètres. L'irrigation est déclenchée en fonction des données de sondes capacitatives et du jugement de l'agriculteur. Les fréquences et durées d'irrigation varient pour chaque modalité. En effet, pour des débits similaires, le temps d'irrigation avec le système de goutte-à-goutte est 3,5 fois plus long que pour le témoin et 1,5 fois plus long pour les modalités 2 et 3 en micro-aspersion à bas débit. Pour des raisons techniques, les quantités d'eau appliquées ne sont pas exactement les mêmes mais sont approximées au plus près. Les pourcentages de différence de quantité d'eau apportée entre les modalités ont donc été calculés. Des compteurs d'eau sont installés au niveau des quatre modalités pour obtenir une mesure précise de l'eau appliquée.

Les modalités ne sont pas réparties en plots randomisés sur la parcelle en raison de contraintes techniques. Pour chaque modalité, les mesures sont effectuées sur 8 arbres, considérés comme des pseudo-répétitions. Les deux rangs situés à la limite entre deux modalités ne sont pas inclus dans l'étude afin d'éviter l'influence d'un système d'irrigation sur l'autre. Par ailleurs, les six arbres situés à chaque extrémité de chaque rang sont également exclus pour éliminer l'effet de bordure.

D. Mesures

1. Conductivité du sol

La cartographie de la conductivité du sol (Figure 5) a été effectuée en début d'essai. Cette analyse permet de supprimer la variabilité du sol lors de l'analyse des résultats. En effet, au vu de l'absence de blocs randomisés, les mesures expérimentales ont été réalisées dans une zone de conductivité homogène. Toutes les mesures et les sondes ont donc été effectuées et placées dans la zone de conductivité 20-25 mS/m (Annexe 3) car c'est la plage de conductivité la plus représentée sur la zone expérimentale.

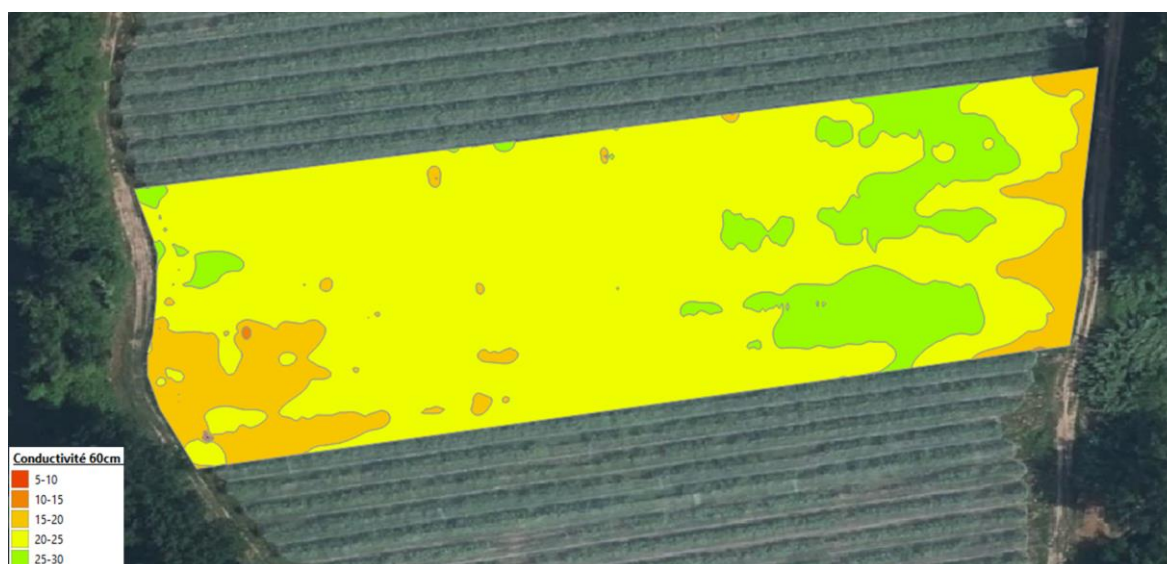


Figure 5 : Cartographie de la conductivité du sol à 600 cm de profondeur

La cartographie (MapSol) a été réalisée par TCSD Comsag à l'aide d'un conductimètre tracté par un engin motorisé entre chaque rang de kiwi. Le conductimètre permet d'analyser la conductivité à 60 cm et à 140 cm. La carte de conductivité à 60 cm a été utilisée car c'est à cette profondeur que se situe la majorité des racines.

2. Données météorologiques

Des données météorologiques telles que la pluviométrie ainsi que la température et l'humidité au-dessus et au-dessous de la canopée ont été enregistrées tout au long de l'essai grâce à des stations météo Comsag® (Annexe 4), situées sur chaque modalité. L'ET₀ a également été mesurée à environ 2 km à vol d'oiseau de la parcelle grâce à une station météo Sencrop®. L'ET₀ a été calculée en utilisant la formule de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), basée sur les données mesurées par la station, incluant l'irradiance, l'humidité relative, la pression de vapeur, la température et la vitesse du vent. Pour le calcul de l'ETM, les coefficients cultureux fournis par Netafim Italie ont été utilisés. Les différents apports d'irrigation ont été mesurés grâce à des compteurs installés directement sur les lignes (Annexe 5).

3. Parties souterraines

a) *Humidité du sol*

Pour cette étude, des sondes capacitives (AquaCheck®, TCSD Comsag) permettant une mesure directe de l'humidité ont été installées dans une zone représentative de l'humidité du sol, en évitant les zones de recouvrements de l'irrigation. Les sondes ont été placées en respectant les critères de la zone d'influence du distributeur et de la zone de prélèvement de la plante (Figure 6). Chaque modalité dispose d'une sonde implantée sur le rang. Pour la modalité 1, la sonde se trouve à 30 cm des goutteurs, tandis que pour les modalités 3 et 4, elles sont positionnées à 60 cm de l'asperseur, et à 50 cm pour la modalité 2. Les sondes mesurent l'humidité tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 60 cm. Une application (Webcomsag) permet de suivre à distance les variations d'humidité, ainsi que la température du sol à différentes profondeurs. Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes.

Des sondes tensiométriques ont également été installées (Annexe 6), elles mesurent indirectement l'humidité du sol en mesurant la force que la racine doit exercer pour extraire l'eau du sol. Les sondes ont été placées en respectant les critères de la zone d'influence du distributeur et de la zone de prélèvement de la plante (Figure 6).

Chaque modalité dispose de trois sondes implantées sur le rang. Leur installation a pour but d'analyser la forme du bulbe d'irrigation. Les sondes sont placées à 30 cm de profondeur, à 30 cm entre elles et respectivement à 30, 60 et 90 cm d'un asperseur. Le choix de profondeur à 30 cm a été fait pour considérer au mieux la répartition du système racinaire (David et al., 2022). Chaque sonde réalise une mesure toutes les 15 minutes et les résultats sont disponibles sur l'application Webcomsag.

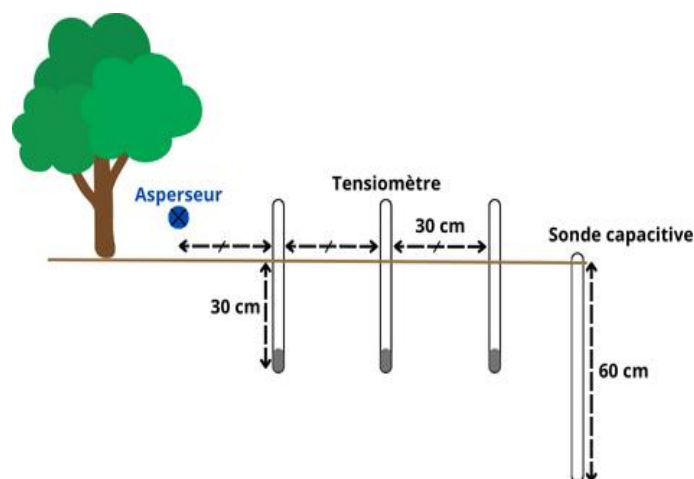


Figure 6 : Schéma de positionnement des sondes tensiométriques et capacitives

Pour mieux comprendre la forme des bulbes d'irrigation dans le sol, des micro-fosses ont été creusées à deux moments distincts de l'essai : une fois avant le déclenchement de l'irrigation (03/05) et une autre à la fin de l'essai (12/08). Pour chaque période, un arbre par modalité a été sélectionné, en veillant à utiliser le même arbre au début et à la fin. Sur cet arbre, deux fosses ont été creusées : l'une parallèle au rang et l'autre perpendiculaire, permettant ainsi d'observer la diffusion de l'eau dans les deux directions (Figure 7). Les fosses ont été creusées à une distance de 65 à 70 cm du tronc, avec une largeur minimale de 50 cm et une profondeur de 30 cm. La fosse parallèle au rang a été positionnée de manière à inclure au moins un distributeur à son extrémité.

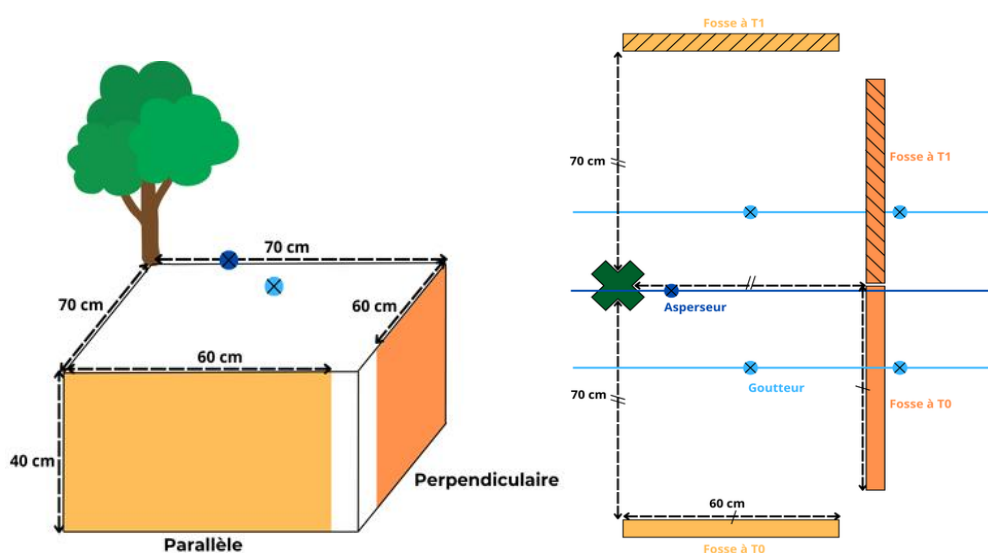


Figure 7 : Schéma de positionnement des micro-fosses

L'humidité du sol a été mesurée à l'aide d'un kit de mesure des propriétés diélectriques du sol (TDR) : le Wet Sensor (Delta-T Devices). Les mesures ont été prises tous les 10 cm en profondeur, ainsi qu'à 10, 30 et 50 cm horizontalement pour les deux fosses.

b) Exploration racinaire

Lors de la réalisation des fosses pour les mesures d'humidité, un comptage des racines a été effectué. Une grille de 30 cm de large sur 50 cm de long, divisée en quadrats de 5 cm x 5 cm, est utilisée pour cette tâche.

La seconde méthode de mesure racinaire a consisté à prélever des échantillons à l'aide d'une tarière bulldog à deux profondeurs. Chaque prélèvement a une longueur de 15 cm pour 6.5 cm de diamètre, prélevés de 0 à 15 cm et de 15 à 30 cm. Trois prélèvements ont été effectués à chaque profondeur pour chaque arbre. Ces échantillons, prélevés sur des arbres différents de ceux utilisés pour les fosses et entre les deux dates de mesure, permettent de déterminer la masse racinaire par échantillon. Les prélèvements ont été réalisés sur deux arbres par modalité à trois moments distincts pendant l'essai : avant l'activation de l'irrigation, à la fin de l'essai, et à mi-parcours.

Les racines ont ensuite été extraites des carottes de terre. Les échantillons ont été placés sur un tamis à mailles de 1 mm² et lavés à l'aide d'un jet d'eau sous pression. Les racines de kiwi ont alors été isolées et collectées, puis séchées dans une étuve pendant 48h à 75°C. L'ensemble des racines a été pesée une première fois puis une deuxième pesée a été réalisée sur les racines fines (< 2 mm) pour une analyse précise de la biomasse racinaire. Ensuite la variable de la masse racinaire par volume de sol (en mg/cm³) est calculée à partir du volume de chaque échantillon.

4. Parties aériennes

a) Dendrométrie

Des dendromètres ont été placés dans le tronc à une hauteur d'environ 1.8 m du sol sur un arbre par modalité (Annexe 7). Chaque dendromètre est installé sur une charpentièrre dont le diamètre est compris entre 15 et 20 mm. Le but est de choisir une branche suffisamment développée qui ne sera pas supprimée à court terme, les cannes productrices n'ont donc pas pu être utilisées. Le tronc des arbres n'a pas été choisi car l'installation de l'appareil à la verticale est plus compliquée et les variations de diamètre sont plus subtiles. Les données collectées ont été utilisées pour calculer la croissance du tronc et les variations journalières de diamètre afin de détecter un potentiel stress hydrique.

b) LAI

Le LAI a été mesuré grâce à l'application Viticanopy. Il a été mesuré à 3 temps, T0 (31/05), T1 (21/06) et T3 (12/07). Cette application utilise des photographies prises par un téléphone au-dessus ou au-dessous d'une plante afin de déterminer différents paramètres physiologiques de la canopée (De Bei et al., 2016). L'algorithme utilise la porosité de la canopée et la transmission de la lumière, considérant la proportion de pixels du ciel visibles pour estimer le LAI. Par défaut, le coefficient d'extinction lumineuse (k) est fixé à 0.7 pour la vigne. Pour le kiwi, le coefficient k est fixé à 0.883. En effet, k varie entre 0.787 et 0.979 au cours de la saison, typique des canopées avec une prédominance de feuilles inclinées horizontalement (Buwalda et al., 1992; Morgan & McNaughton, 1991). Pour la prise de photos, le protocole suivi est similaire à celui utilisé sur vergers de cerisiers, pêchers et abricotiers par (Courault et al., 2024). Quatre photographies sont prises verticalement sous les cannes et orientées vers la canopée, des deux côtés du tronc le long des deux charpentières (Figure 8). Les photographies ont toujours été prises aux mêmes endroits pour chaque date, situés à 40 cm des charpentières et avec 1 m entre chaque photographie. Chaque photographie a été prise 50 cm en dessous de la canopée. 8 photos ont été prises par arbres et 6 arbres ont été suivis par modalité représentant

donc un total de 192 photos sur la parcelle. Pour chaque photographie, l'application fournit un tableau avec la couverture de la canopée, la porosité de la canopée et le PAI qui est moyenné pour chaque arbre par la suite. Le PAI correspond à la surface des végétaux présents comprenant à la fois le feuillage ainsi que les tiges.

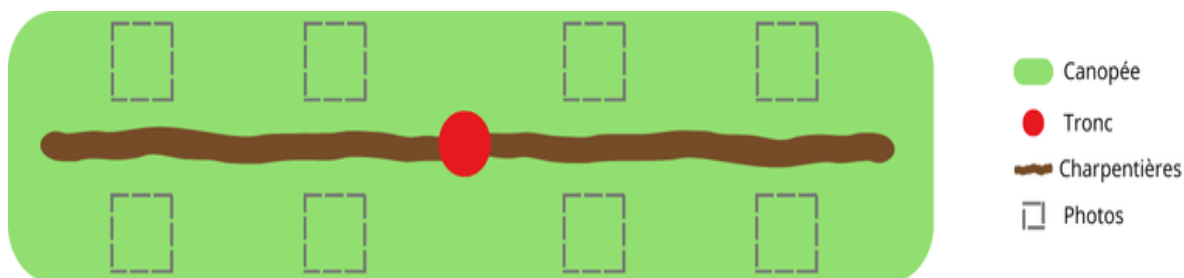


Figure 8 : Schéma de positionnement des photographies pour la mesure du LAI

E. Analyses de données

Les effets des différents systèmes d'irrigation sur la masse volumique racinaire (tarière), ainsi que l'humidité du sol (sondes tensiométriques et capacitatives) sont testés par une analyse de la variance, avec une vérification au préalable de l'effet des facteurs (profondeur, position, individu, modalité) et leurs interactions. En cas de significativité de l'interaction, les effets sont testés en fonction des différents facteurs. Ces analyses sont réalisées grâce au logiciel R, avec la fonction anova. Il en est de même pour les parties aérienne (LAI), en prenant en compte le facteur temps et individu. La validité des résidus de chaque modèle (normalité, homoscedasticité et indépendance) a été vérifiée avant chaque analyse de la variance. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour l'évaluation de la normalité et le test de Levene pour celle de l'homogénéité des variances. Lorsque ces conditions n'étaient pas valides, une transformation des données a été appliquée ou dans certains cas un test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Lors de différences significatives, le test post-hoc de Tukey a été appliqué dans le cadre d'une ANOVA significative. Le seuil de risque de première espèce utilisé est de 5%.

III. Résultats

A. Conditions hydriques

1. Pluviométrie

Les données de pluviométries sont présentées du 05/05 au 27/07. À partir de cette date, jusqu'au 27/07, 222.9 mm de pluies ont été enregistrés (Figure 9).

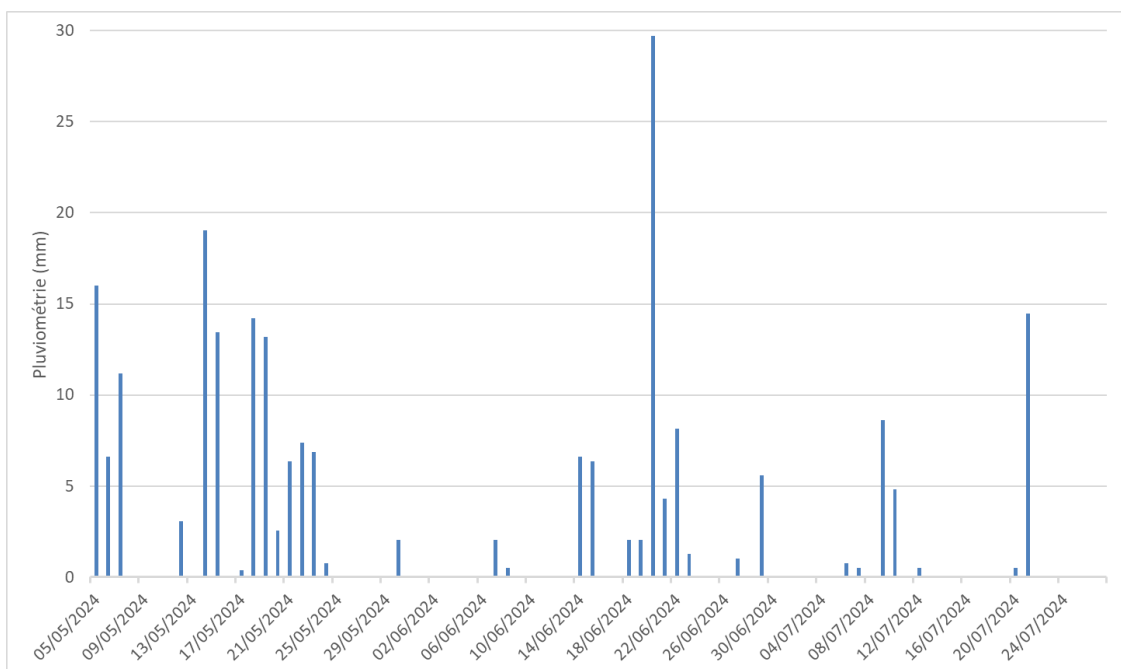


Figure 9 : Pluviométrie en fonction de la date (du 05/05 au 27/07)

2. Volumes d'irrigation

L'irrigation a débuté le 19/06 pour l'ensemble des modalités. Sur l'ensemble des apports d'eau par irrigation, la quantité apportée par goutte à goutte est souvent plus faible que pour les autres modalités (Figure 10). Ces différences sont causées par des différences lors des ouvertures et fermetures de vannes. De plus, une fuite avait été détectée sur le réseau du goutte à goutte au début du mois de juillet réduisant ainsi davantage les quantités apportées. Toutes les irrigations sont généralement déclenchées entre 1 et 2 semaines après les dernières précipitations.

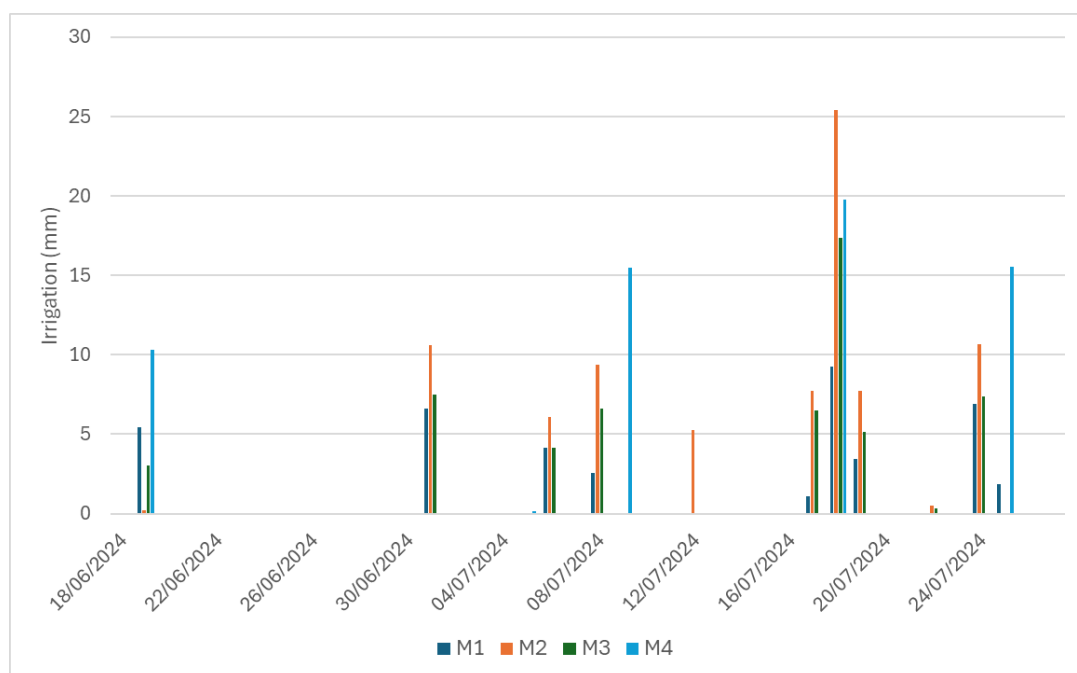


Figure 10 : Quantité d'eau apportée par irrigation (en mm) pour chaque modalité jusqu'au 27/07

Malgré une volonté d'apports d'eau égaux pour chaque modalité durant l'essai, des différences sont présentes. La modalité 2 est celle ayant reçu le plus d'eau par irrigation, en effet elle a reçu 27 % de plus que la modalité 4, 31 % de plus que la modalité 3 et 51 % de plus que la modalité 1 (Tableau 1). En moyenne, les plants ont reçu 3.6 fois plus d'eau par précipitations que par irrigation entre le 05/05 et le 27/07.

Tableau 1 : Ensemble d'apports d'eau par irrigation et précipitations pour chaque modalité du 05/05 au 27/07

En mm	M1	M2	M3	M4
Apports par irrigation	41,34	83,59	58,1	61,27
Apports par la pluie	222.9			
Apport totaux	130,34	172,59	147,1	150,27

B. État du verger avant le démarrage de l'irrigation

Les résultats préliminaires correspondent aux mesures effectuées sur le terrain avant le déclenchement de l'irrigation sur l'année 2024. Ces résultats permettent de mettre en perspectives de potentielles observations après le déclenchement de l'irrigation.

1. LAI

Au 03/05, le LAI moyen de chaque modalité est équivalent et aucune différence significative n'est observée entre les 4 modalités (p-value = 0.8) (Figure 11).

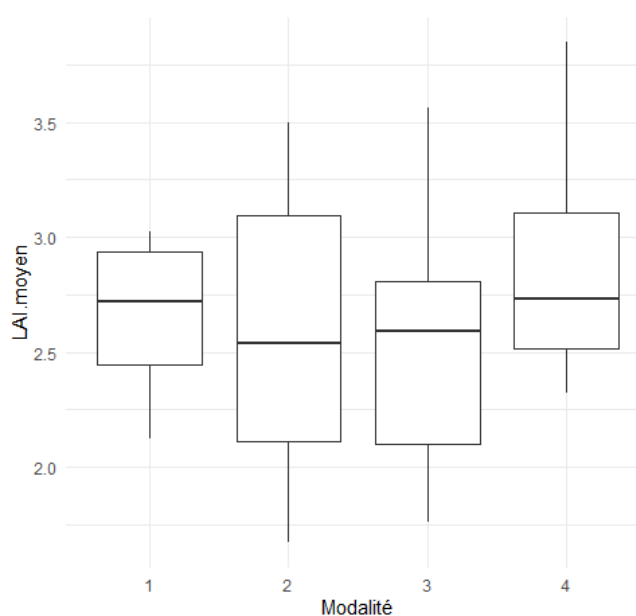


Figure 11 : LAI moyen par arbre en fonction de la modalité d'irrigation le 03/05

2. Micro-fosses

De manière générale, au 03/05, le nombre d'impacts racinaires est plus élevé pour les fosses perpendiculaires avec un nombre d'impacts racinaires supérieur de 33 % en moyenne (Figure 12). La modalité goutte à goutte (M1) est celle qui possède le plus d'impacts racinaires pour la fosse parallèle. La majorité des impacts pour les modalités 1 et 4 sont situés entre 5 et 15 cm. Pour les modalités 2 et 3, la majorité des impacts sont situés entre 15 et 25 cm. Pour toutes les modalités, la répartition des racines est bien marquée.

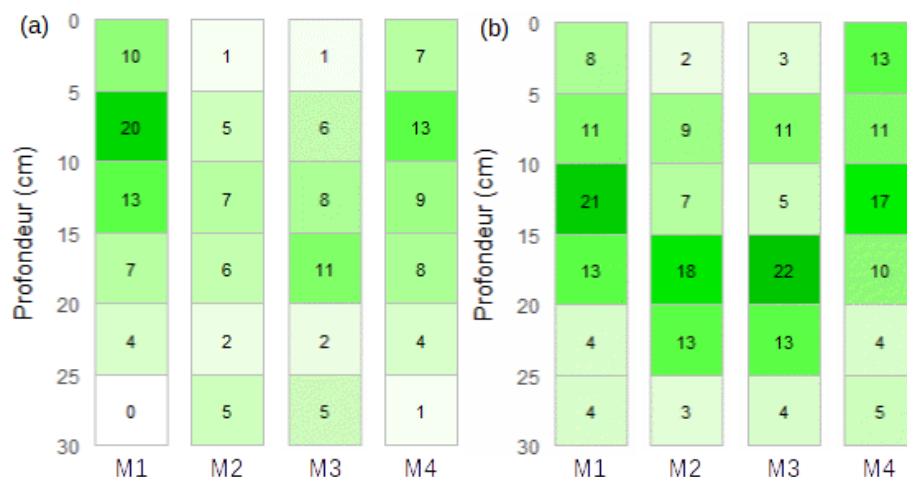


Figure 12 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la profondeur pour les fosses (a) parallèles et (b) perpendiculaires le 03/05

Pour l'ensemble des fosses, l'arbre est situé à la distance 0 cm et les goutteurs ou asperseurs sont situés entre 5 et 15 cm de l'arbre. Pour les fosses perpendiculaires des modalités 1, 2 et 3, il semble y avoir une plus forte concentration d'impacts racinaires situés à 15-25 cm de l'arbre dans l'inter-rang. Alors que pour la modalité 4, la majorité des impacts semblent situés à 10-25 cm de l'arbre.

Mis à part cela, la répartition est beaucoup moins marquée et beaucoup plus homogène entre chaque modalité (Figure 13).





Figure 13 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la distance à l'arbre pour les fosses (c) parallèles et perpendiculaires (d) le 03/05

3. Tarière

Lors du premier prélèvement le 30/05, ce sont les modalités 1 et 3 qui ont la plus grande masse volumique racinaire avec respectivement 1 et 1.03 mg/cm² de racines fines entre 0 et 30 cm de profondeur. La modalité 2 (micro-asperion Rivulis) en possède deux fois moins avec seulement 0.408 mg/cm² de racines. Sur les 15 premiers centimètres, la masse volumique racinaire des modalités 1 et 3 est plus importante que la modalité 2 (p-value = 4.5×10^{-3}). Entre la profondeur 15 cm et 30 cm aucunes différences significatives ne sont constatées (p-value = 0.58) (Figure 14).

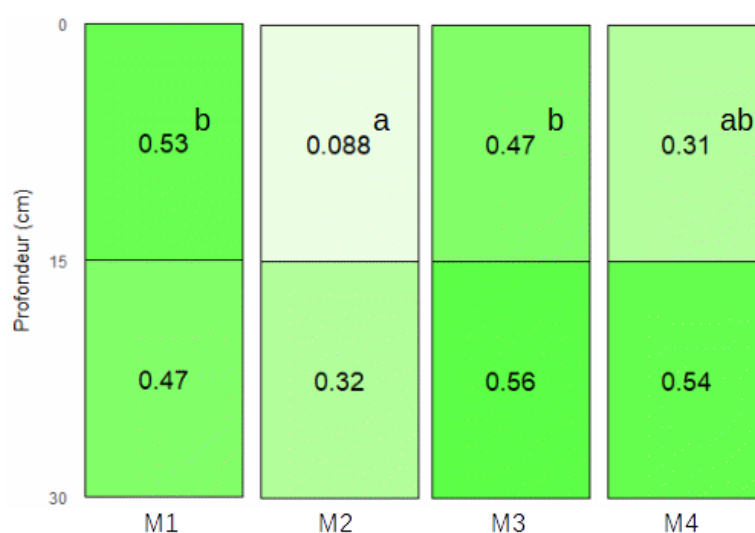


Figure 14 : Masse volumique moyenne (en mg/cm²) de racines fines en fonction de la profondeur de prélèvement et de la modalité au 30/05 (les lettres montrent une différence statistique significative entre les colonnes : modalités).

Au sein de chaque modalité, aucune position ne comprend une masse volumique racinaire significativement différente (p-values > 0.5) (Figure 15). Un schéma de répartition racinaire par rapport à la position semble se distinguer sur l'ensemble des modalités. En effet, pour les prélèvements à proximité de l'arbre (position 1), la masse volumique racinaire semble élevée entre 15 et 30 cm et plus le prélèvement est éloigné (position 3), plus la masse volumique semble élevée entre 0 et 15 cm de profondeur.

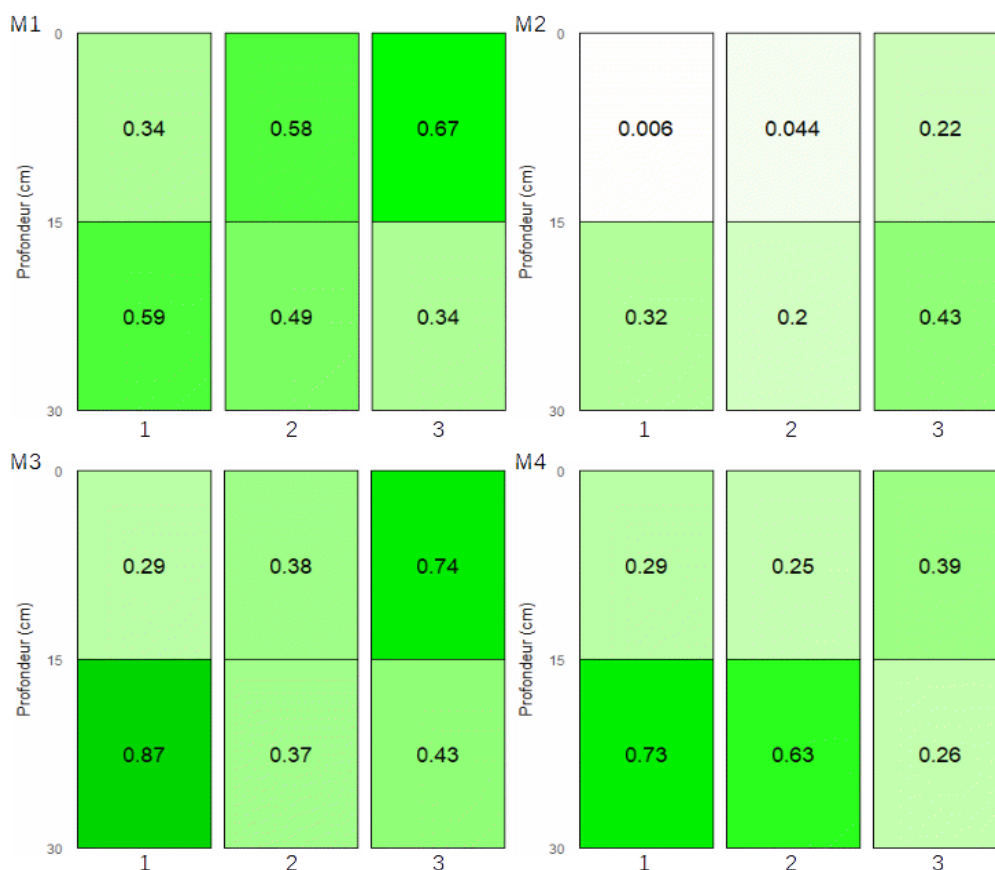


Figure 15 : Masse volumique moyenne (en mg/cm³) de racines fines en fonction de la profondeur, de la position et de la modalité de prélèvement au 30/05

C. État du verger après le démarrage de l'irrigation

1. Parties aériennes

a) Dendrométrie

Sur ce graphique, les diamètres initiaux des branches de chaque modalité ont été standardisés afin de pouvoir comparer les quatre courbes sur le même graphique tout en observant les variations de diamètres horaires (Figure 16). L'augmentation des diamètres est constante pour chaque modalité mis à part pour celui du goutte à goutte (en violet) qui atteint un plateau à partir du 15/07 et qui montre des signes de diminutions. Le diamètre de la tige de la modalité 2 augmente nettement plus rapidement que les autres. La croissance des tiges des modalités 1 et 4 sont similaires jusqu'au 10/07 où la vitesse de croissance de la modalité 1 commence à diminuer.

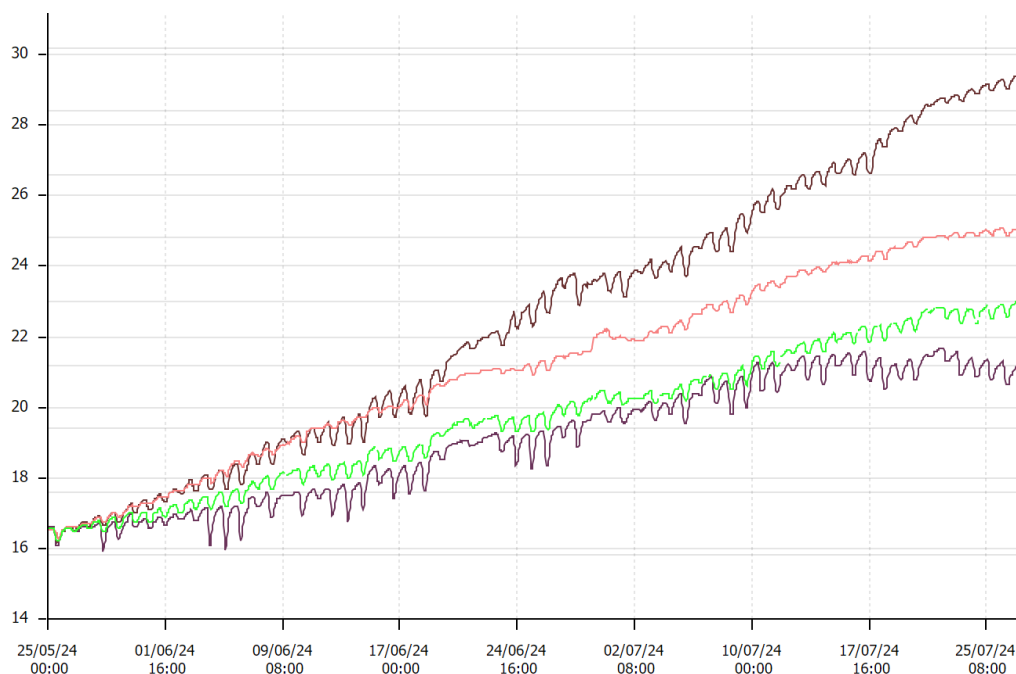


Figure 16 : Mesures de dendrométrie à un pas de temps horaire. Modalités : 1 en (violet), 2 en (noir), 3 en (rouge), 4 en (vert)

b) LAI

Le LAI des plants de kiwi montre une claire augmentation entre le 03/05 et 26/07 (Figure 17). Cependant, aucune différence significative n'est observée entre les modalités (p-value = 0.67) pour chaque temps de mesure. Il est intéressant de noter que pour les modalités 1, 3 et 4, l'augmentation entre T1 et T2 est moins élevée qu'entre T0 et T1, avec respectivement (p-value = 1.61×10^{-6} ; 0.0021 ; 0.0054) pouvant signifier soit une diminution de la croissance foliaire soit une limite dans le protocole de mesure du LAI. Pour la modalité 2, l'augmentation du LAI est plus lente mais plus constante (p-value = 0.033).

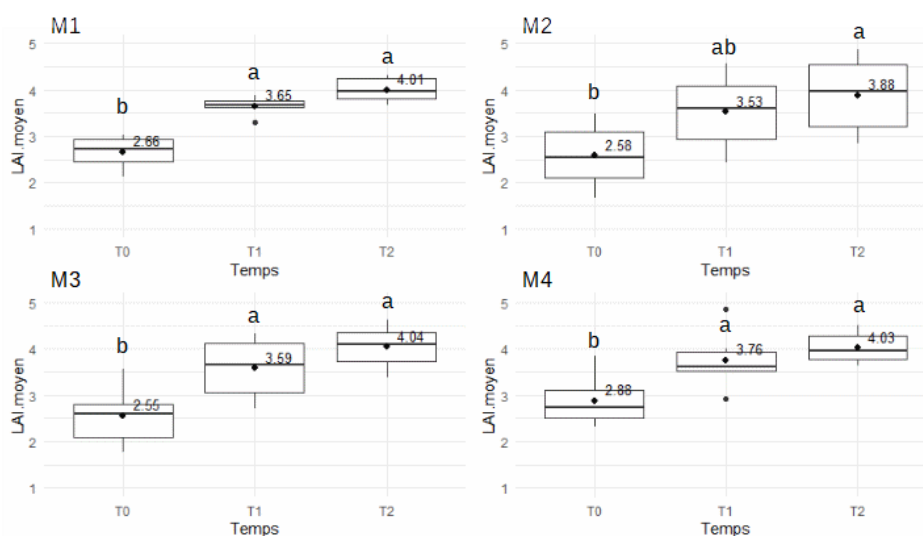


Figure 17 : LAI moyen par plants de chaque modalité entre le 03/05 et le 26/07

2. Parties souterraines

a) Sondes capacitives

En moyenne, l'humidité des quatre modalités réagit de façon équivalente avec des courbes de formes similaires. Cependant, l'humidité des modalités 1 et 2 est supérieure à celle des modalités 3 et 4 sur la totalité des mesures de l'expérimentation (Figure 18).

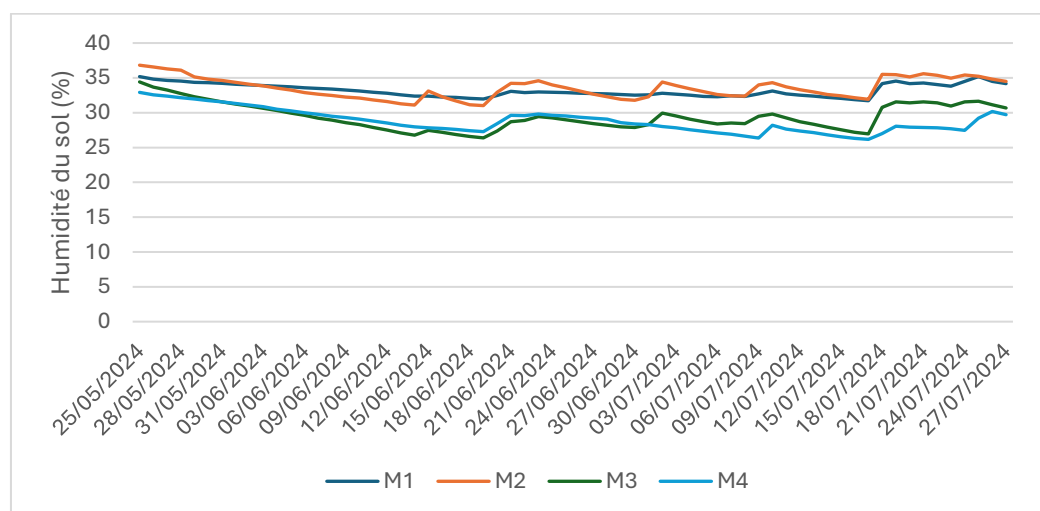


Figure 18 : Évolution de l'humidité (en %) dans le temps en moyenne sur l'ensemble des profondeurs (sondes capacitives) en fonction de la modalité.

Pour toutes les modalités, l'humidité varie fortement en fonction de la profondeur (p-value = 2×10^{-16} pour les quatre modalités) (Figure 19). Les variations d'humidité en profondeur sont comparables entre les modalités 1 et 2 et entre les modalités 3 et 4. Pour l'irrigation en goutte à goutte (M1) l'humidité augmente jusqu'à 30-40 cm puis diminue à 50 cm de profondeur et augmente à nouveau à 60 cm. Les variations sont similaires pour l'irrigation en micro-aspiration Rivulis (M2) où l'humidité augmente jusqu'à 40-50 cm avant de diminuer à 60 cm de profondeur. Pour l'irrigation en micro-aspiration Netafim (M3), l'humidité diminue entre 0 et 20 cm puis augmente jusqu'à 40 cm et diminue à nouveau à 60 cm de profondeur. De même pour la modalité témoin (M4), l'humidité diminue jusqu'à 30 cm puis augmente à 40 cm et se stabilise jusqu'à 60 cm.

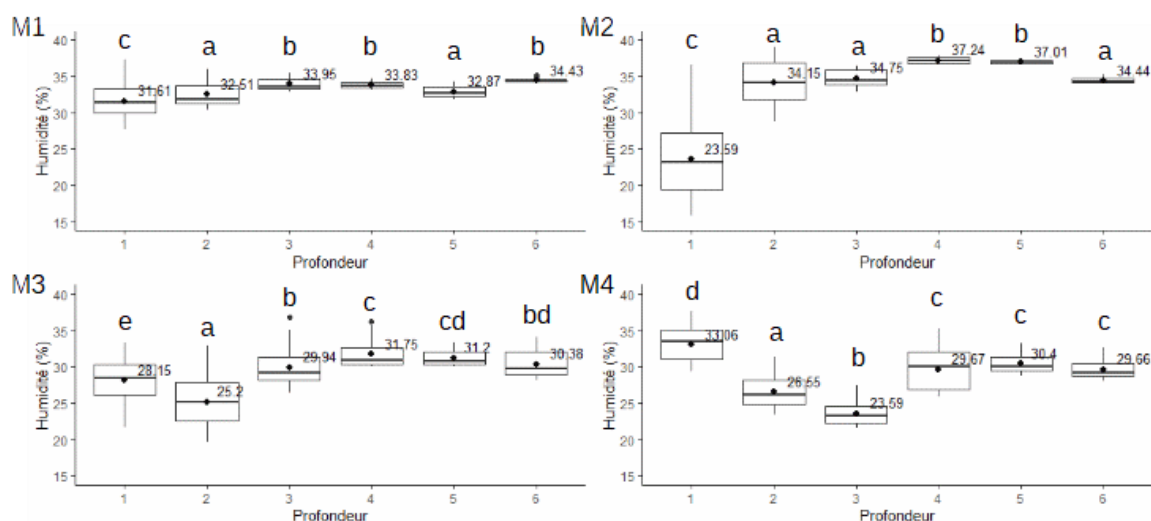


Figure 19 : Humidité (en %) en fonction de la profondeur et de la modalité.

Pour la modalité 1, l'humidité après un évènement d'irrigation augmente en majorité sur les 20 premiers centimètres. L'humidité entre 20 et 30 cm peut augmenter en cas de forte irrigation (Figure 20). En effet, ce sont les deux profondeurs avec le plus de variations (Figure 19).

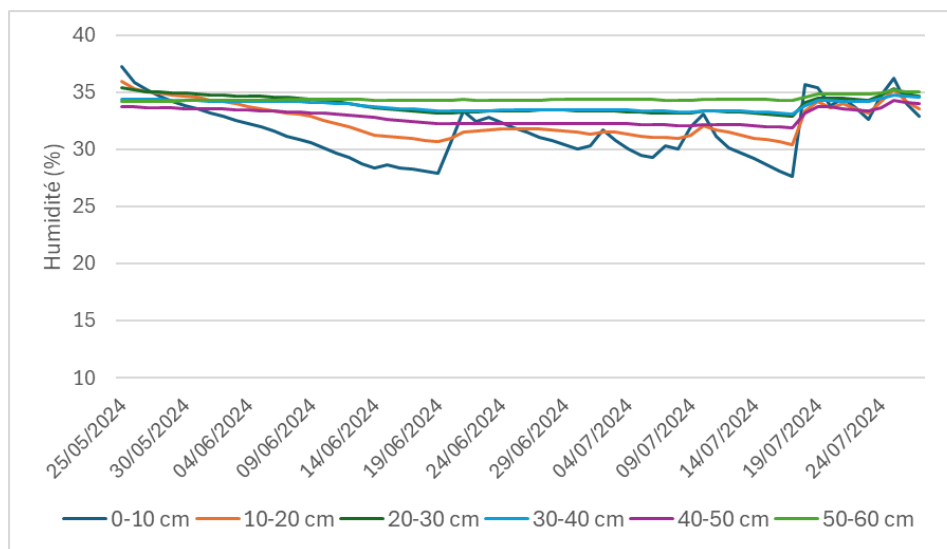


Figure 20 : Evolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 1

Pour la modalité 1, la vitesse d'assèchement du sol est supérieure pour les profondeurs 10 cm et 20 cm avec une perte d'humidité moyenne respective de -0.63 % et -0.19 % par jour (p-value = 3.13×10^{-9}). À partir de 30 cm la vitesse d'assèchement varie peu et est proche ou égale à 0 (Figure 21).

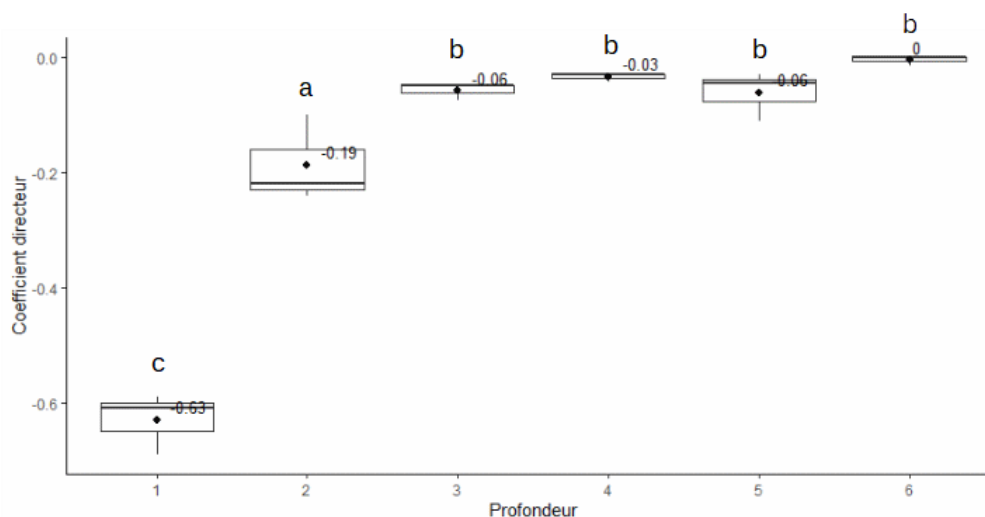


Figure 21 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 1.

Pour la modalité 2, les augmentations d'humidité après une irrigation sont observées uniquement sur les profondeurs 0 à 20 cm comme la modalité 1. Cependant les variations d'humidité sont plus élevées (Figure 22).

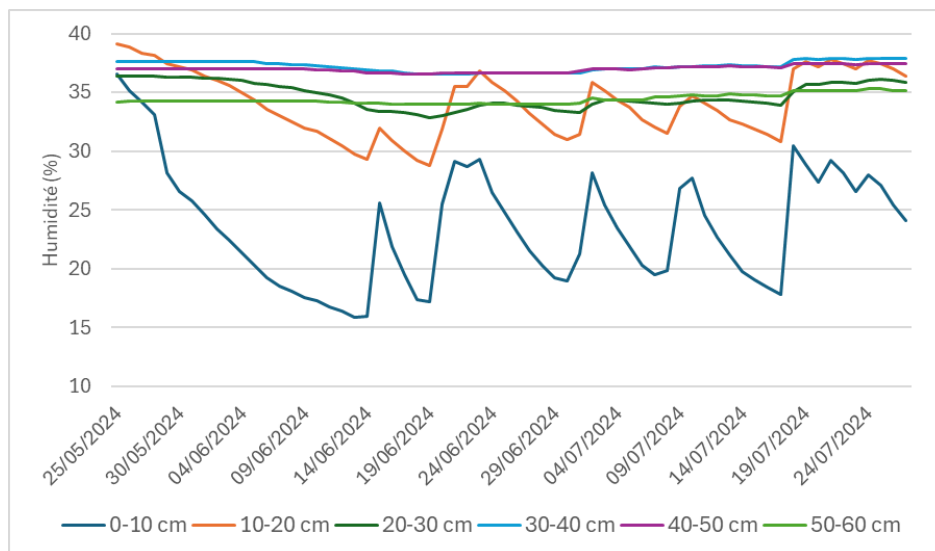


Figure 22 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 2

Les dynamiques d'assèchement de la modalité 2, sont similaires à la modalité 1 avec des vitesses supérieures. La vitesse d'assèchement est supérieure pour les profondeurs 10 cm et 20 cm avec une perte d'humidité moyenne respective de -1.49 % et -0.64 % par jour (p-value = 2.52×10^{-13}). À partir de 30 cm la vitesse d'assèchement varie peu et est proche de 0 (Figure 23).

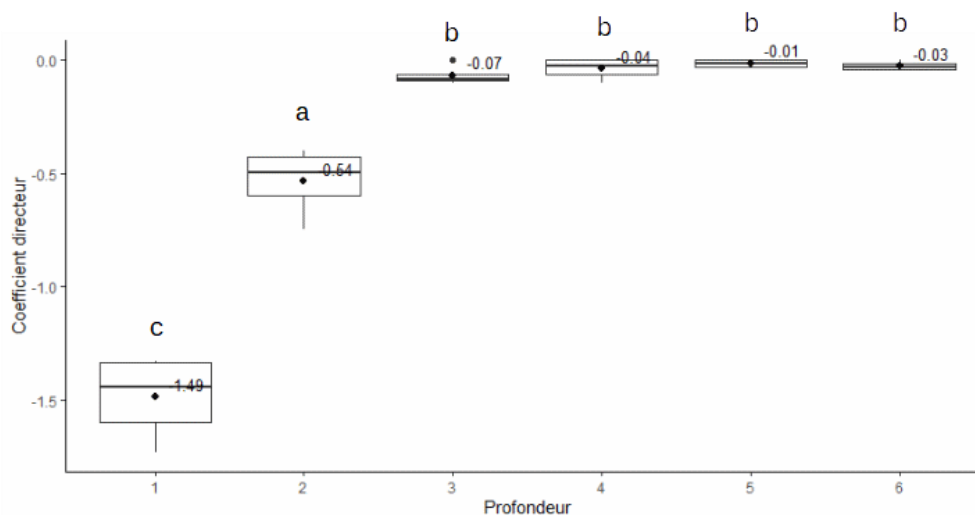


Figure 23 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 2.

Pour la modalité 3, l'humidité après un évènement d'irrigation augmente en majorité sur les 30 premiers centimètres (Figure 24Figure 20).

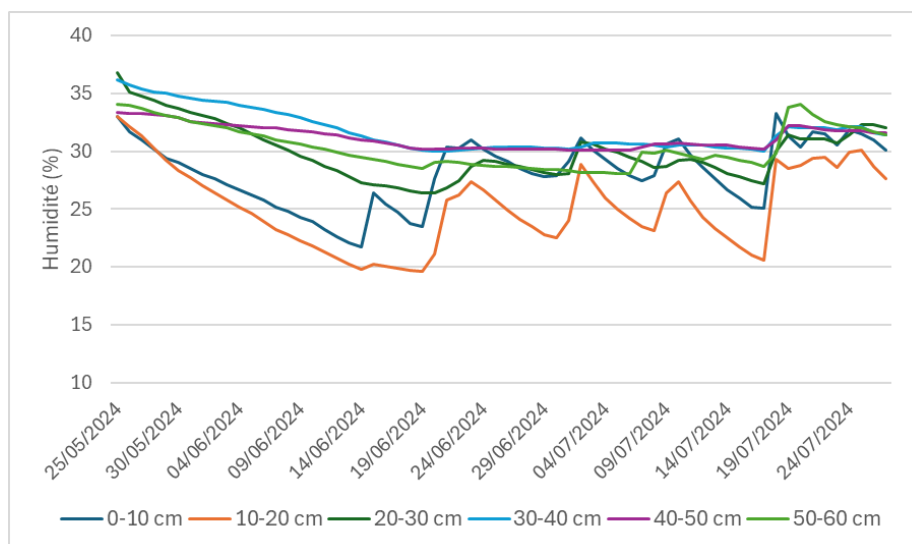


Figure 24 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 3

Cette fois-ci, la vitesse d'assèchement pour les profondeurs 10 et 20 cm sont les plus fortes mais non significativement différentes entre elles. La vitesse d'assèchement moyenne à 20 cm (-0.97 %/jour) est supérieure à celle de 10 cm (-0.68 %/jour). Les vitesses entre 30 et 60 cm de profondeur ne sont pas significativement différentes mais celle à 30 cm reste supérieure par rapport aux autres modalités (Figure 25).

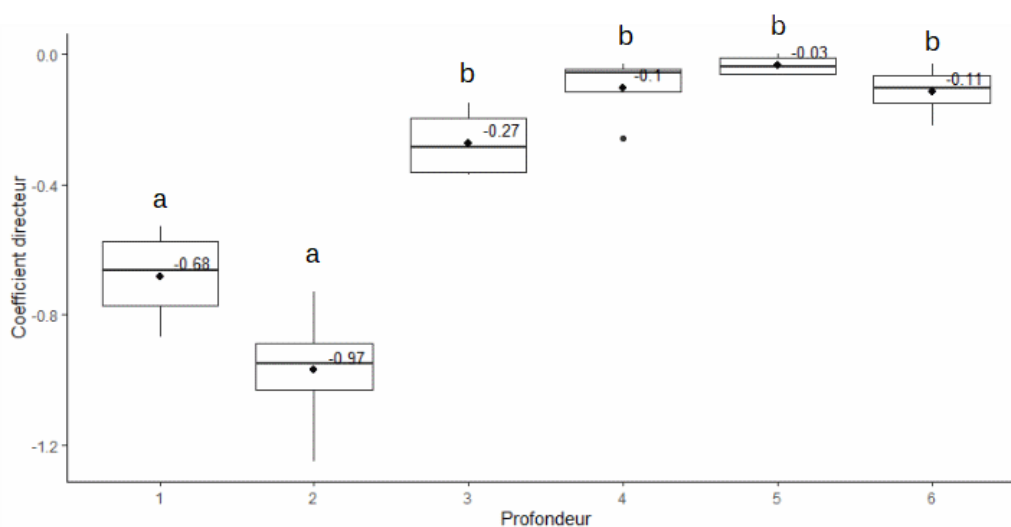


Figure 25 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 3.

Pour la modalité 4, l'humidité après un évènement d'irrigation augmente en majorité sur les 40 premiers centimètres (Figure 26).

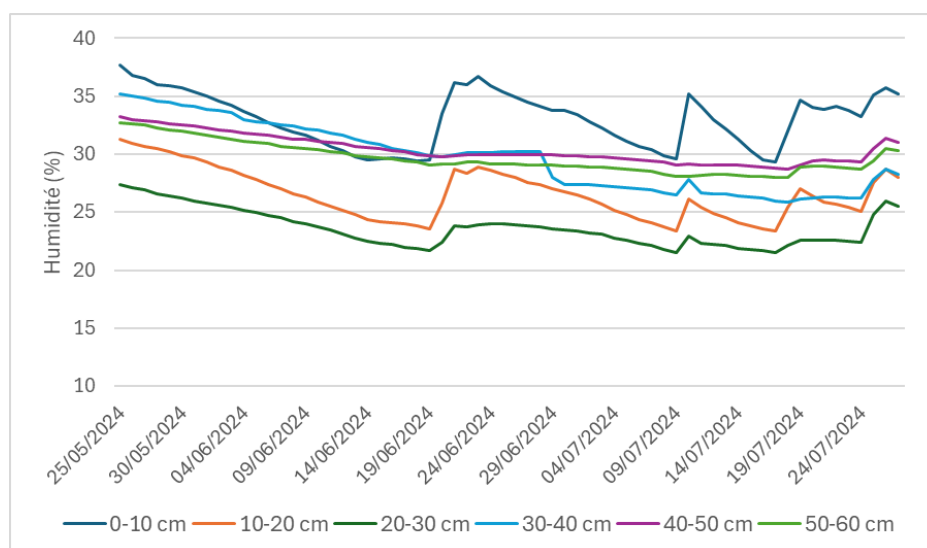


Figure 26 : Évolution de l'humidité (en %) en fonction de la profondeur de mesure pour la modalité 4

Pour la modalité 4, la vitesse d'assèchement à 10 cm de profondeur est inférieure à celles des profondeurs 50 et 60 cm (p -value = 0.013) (Figure 27). Il s'agit de la modalité avec la plus faible amplitude de dynamique d'assèchement, de -0.51 %/jour à 10 cm à -0.06 %/jour à 50 cm de profondeur. Comme pour les autres systèmes d'irrigation, la vitesse d'assèchement tend vers 0 pour les plus grandes profondeurs.

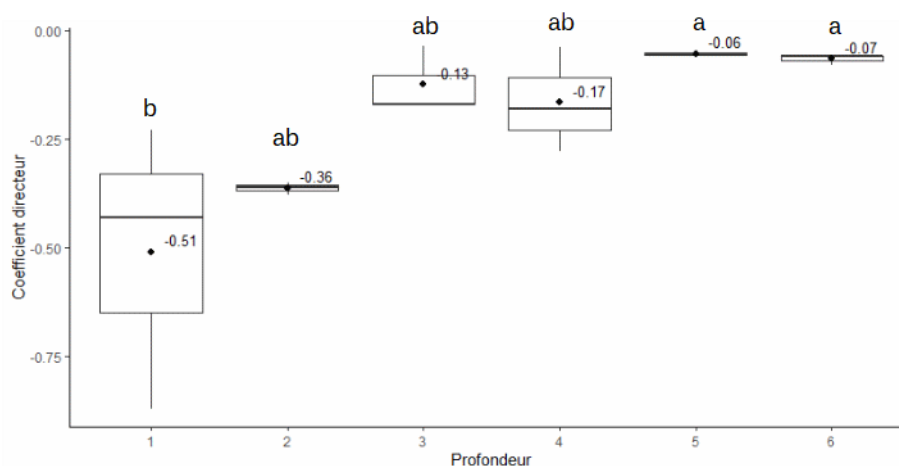


Figure 27 : Vitesse d'assèchement du sol (en %/jour) en fonction de la profondeur pour la modalité 4.

b) Tensiométrie

Pour rappel, le tensiomètre mesure l'inverse de la sonde capacitive. Il calcule la force nécessaire à une plante pour extraire l'eau du sol. De ce fait, plus la valeur de tensiométrie est haute, plus l'humidité est basse.

Concernant les variations d'humidité en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation, seules les modalités 3 et 4 ont des dynamiques similaires. Pour la modalité 3, l'humidité est inférieure à 30 cm de l'asperseur par rapport à 60 et 90 cm de distance (p -value = 9.61×10^{-9}). Les variations sont identiques pour la modalité 4 avec des valeurs d'humidités plus faibles que pour M3 (p -value = 8.69×10^{-6}). Pour l'irrigation M1, l'humidité est plus faible à 30 et 60 cm de distance et augmente à 90 cm (p -value = 0.0029). Enfin, pour la modalité 2, l'humidité est supérieure à 30 cm de distance et diminue à 60 et 90 cm (p -value = 7.62×10^{-6}) (Figure 28).

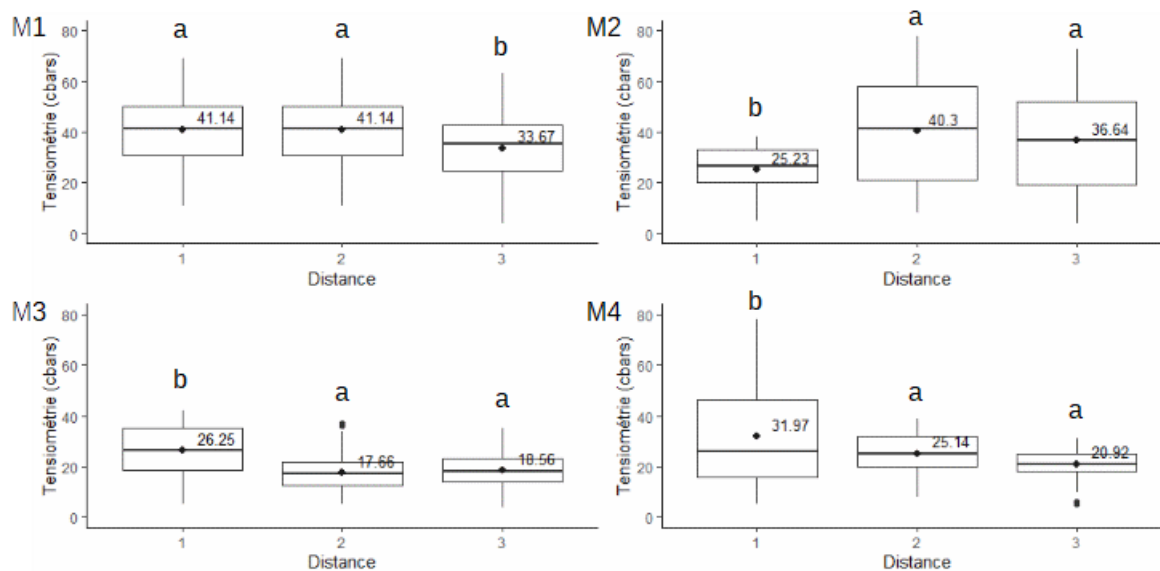


Figure 28 : Tensiométrie (en cbars) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation et de la modalité.

Pour la modalité 1, l'humidité après un évènement d'irrigation varie de façon similaire sur l'ensemble des distances au gouteur (Figure 29).

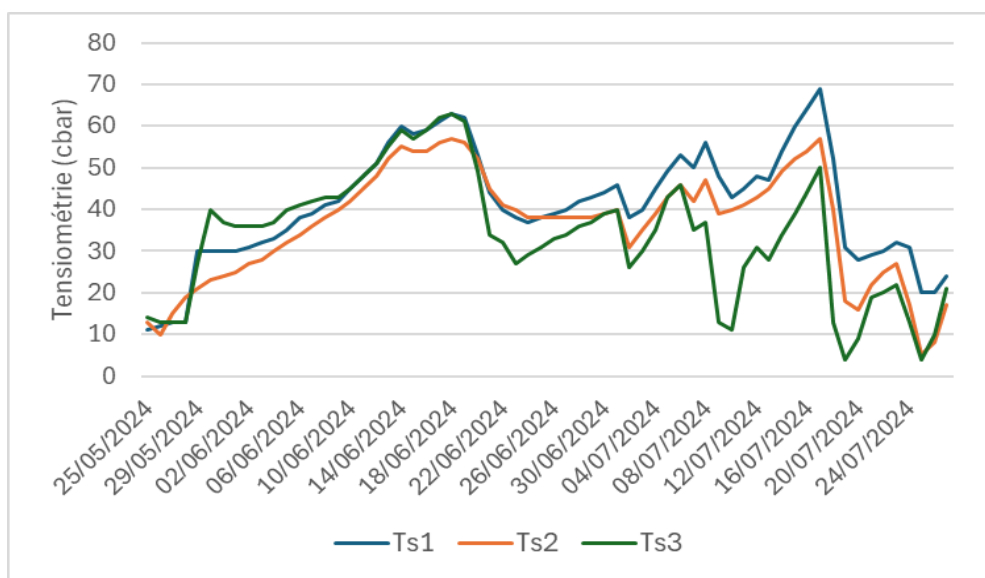


Figure 29 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 1

Pour la modalité 2, les variations d'humidité sont beaucoup plus faibles à 30 cm de l'asperseur, alors que les variations à 60 et 90 cm de distance sont similaires (Figure 30).

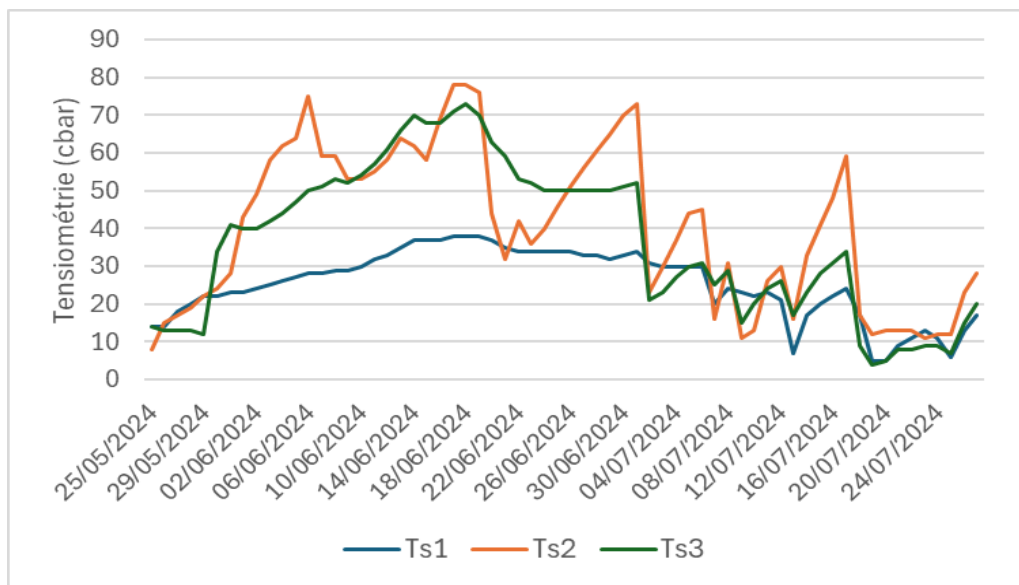


Figure 30 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 2

Les variations d'humidité à 30 cm sont plus fortes mais beaucoup moins fréquentes qu'à 60 et 90 cm (Figure 31).

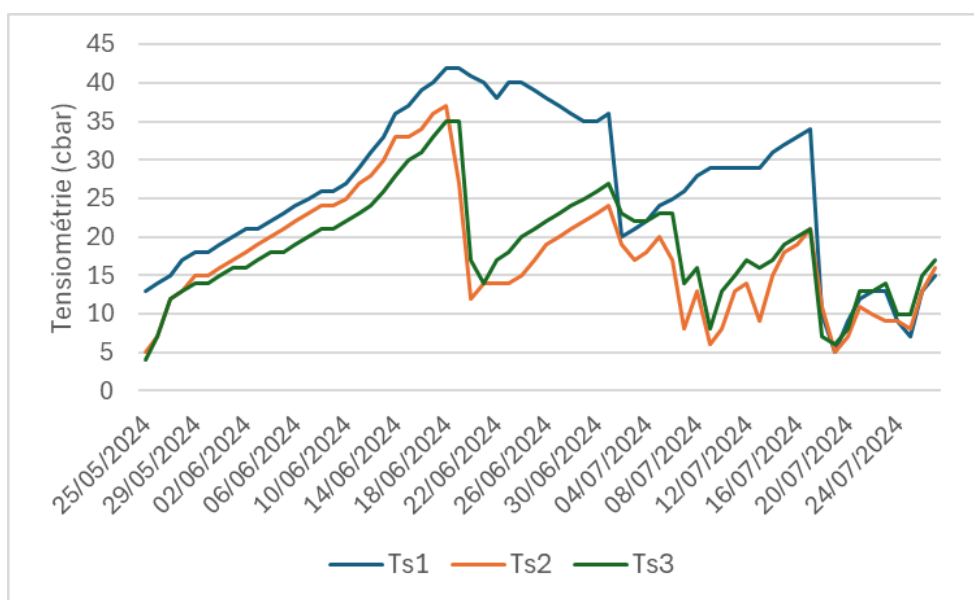


Figure 31 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 3

Les variations d'humidité à 30 cm sont beaucoup plus fortes et celles à 60 cm sont légèrement supérieur que celles à 90 cm de distance (Figure 32).

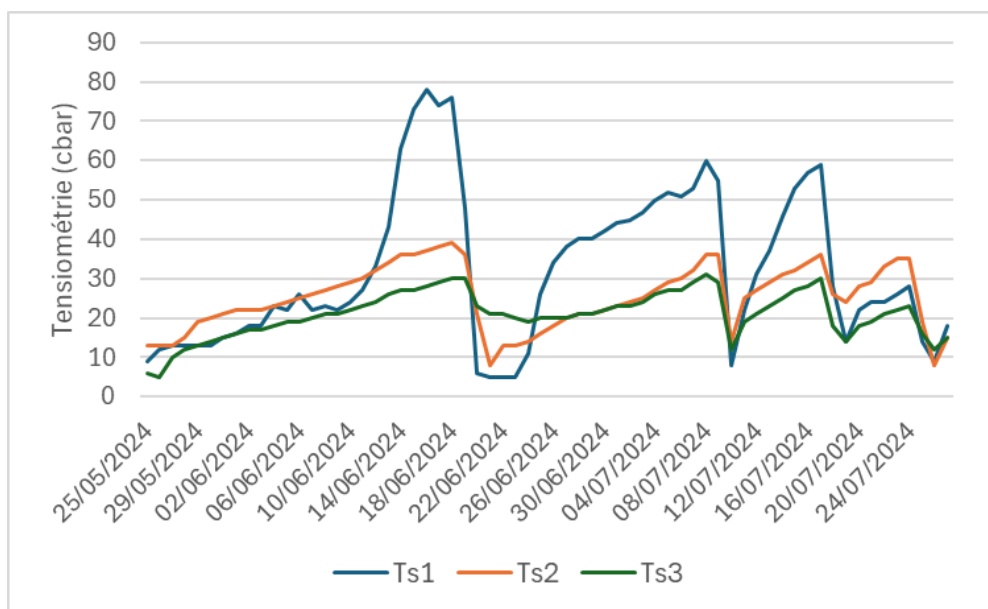


Figure 32 : Évolution de la tensiométrie (en cbar) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation pour la modalité 4

Concernant les vitesses d'assèchement, malgré des niveaux et des amplitudes d'humidités différentes, aucune différence significative n'est observée en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation (Figure 33). La modalité 2 et 3 montrent un assèchement supérieur à 60 cm de distance. Pour la modalité 1, la vitesse d'assèchement augmenta avec la distance. Pour la modalité 4, c'est l'inverse avec une diminution des vitesses d'assèchement avec la distance.

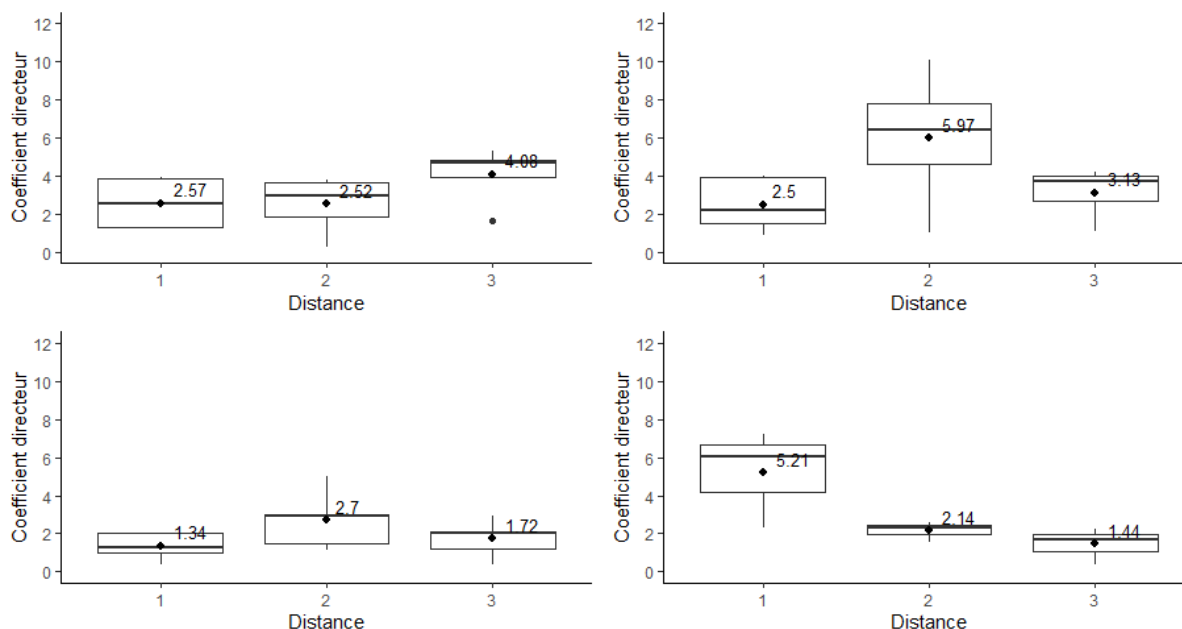


Figure 33 : Coefficient d'assèchement tensiométrique (en cbar/jour) en fonction de la distance à l'appareil d'irrigation et de la modalité

c) Impacts racinaires des micro-fosses

Pour la modalité 1, il y a un total de 135 impacts racinaire sur l'ensemble des deux fosses dont 75% des impacts sont présents entre 0 et 15 cm de profondeur (Figure 34).

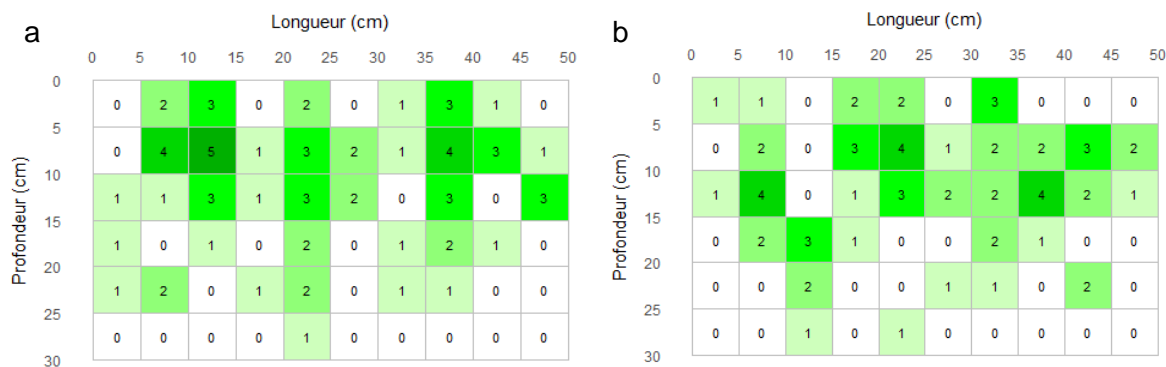


Figure 34 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 1 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire

Pour la modalité 2, il y a 120 impacts racinaire dont 72% sont dénombrés entre 10 et 25 cm de profondeur (Figure 35).

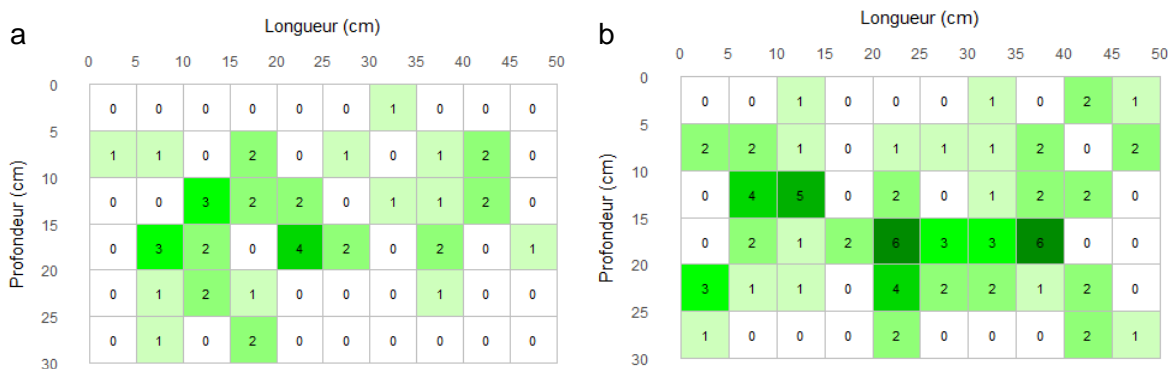


Figure 35 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 2 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire

124 impacts sont présents sur l'ensemble de la modalité 3, dont 70% des sont situés entre 10 et 25 cm de profondeur (Figure 36).

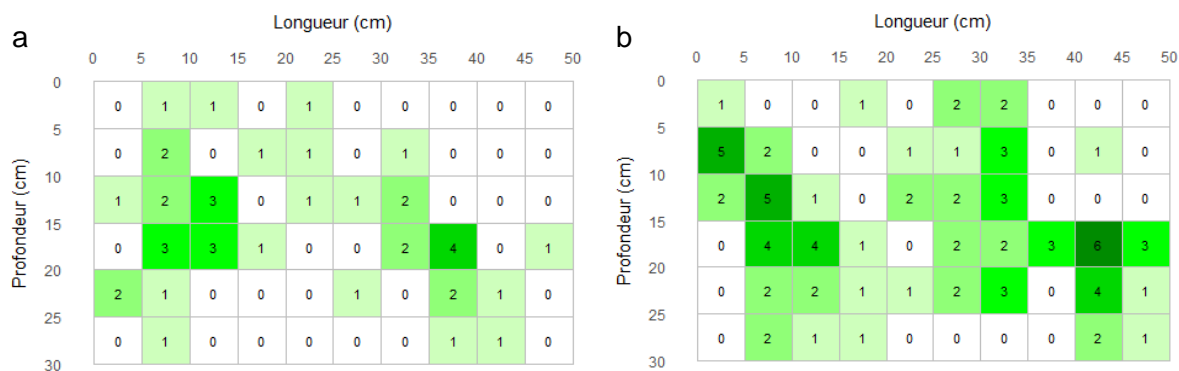


Figure 36 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 3 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire

Enfin, pour la modalité 4, il y a 128 impacts avec 70% des impacts présents entre 5 et 20 cm de profondeur (Figure 37).

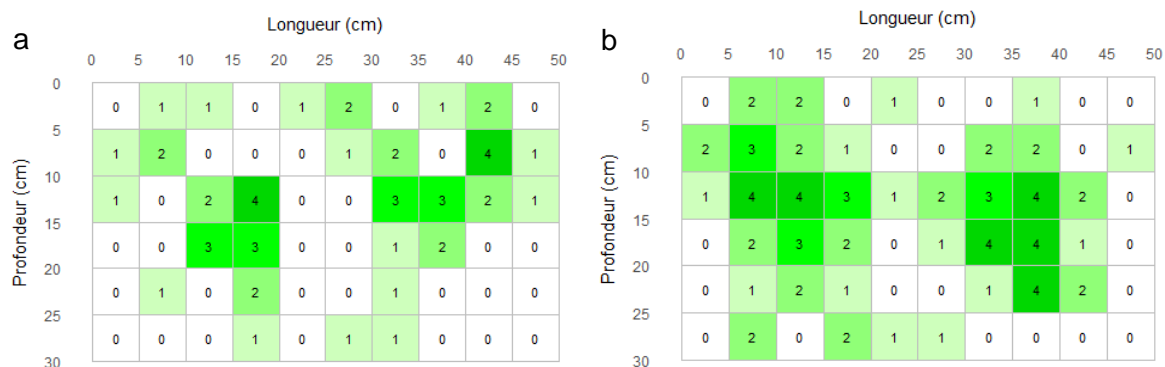


Figure 37 : Cartographie d'impacts racinaires pour l'arbre de la modalité 4 le 12/08, (a) parallèle et (b) perpendiculaire

Sur l'ensemble des cartographies au 12/08, davantage d'impacts racinaires sont présents sur les fosses perpendiculaires (Figure 38). La répartition des impacts racinaires ressemble fortement à celle du 03/05 présente dans les résultats préliminaires. Il y a eu une augmentation du nombre d'impacts pour toutes les modalités et toutes les fosses. Cependant, pour la modalité 1, l'augmentation du nombre d'impact est plus élevée pour la fosse parallèle que pour la fosse perpendiculaire comparé aux autres.

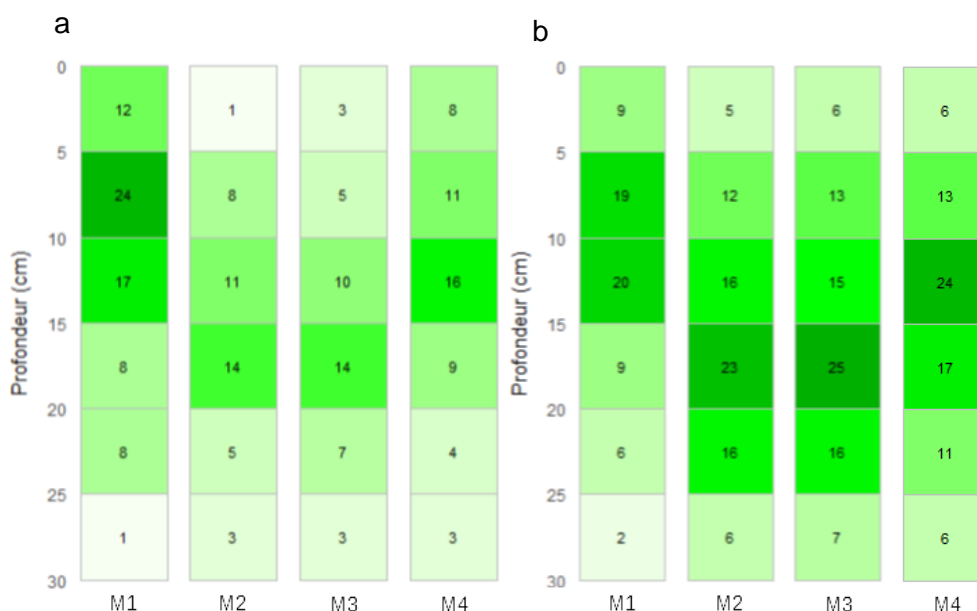


Figure 38 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la profondeur pour les fosses (a) parallèles et (b) perpendiculaires le 12/08

Encore une fois, il est difficile d'observer un schéma de répartition des impacts racinaires en fonction de la distance à l'arbre (Figure 39).

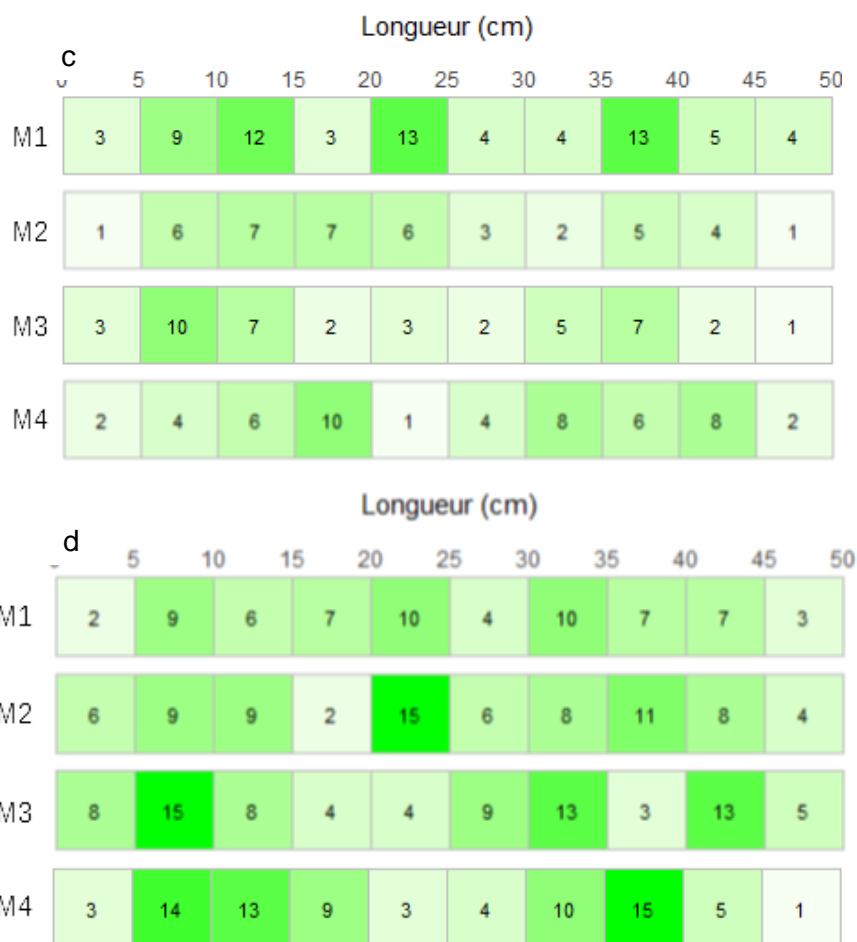


Figure 39 : Nombre d'impacts racinaires en fonction de la modalité et de la distance à l'arbre pour les fosses (c) parallèles et (d) perpendiculaires le 12/08

d) Masse volumique prélevée à la tarière

Au 12/08, aucune différence significative n'est observée entre les différentes modalités pour chaque profondeur. Entre 15 et 30 cm, les modalités 1 et 3 ont tout de même une masse volumique de racine non significativement inférieure que les modalités 2 et 4 entre 15 et 30 cm (p -value = 0.24) (Figure 40).

Sur l'ensemble de la profondeur (0 à 30 cm), les masses volumiques sont statistiquement similaires pour les quatre modalités (p -value = 0.43) avec 1.33 mg/cm² pour M1, 1.29 mg/cm² pour M2, 1.1 mg/cm² pour M3 et 1.61 mg/cm² pour M4.

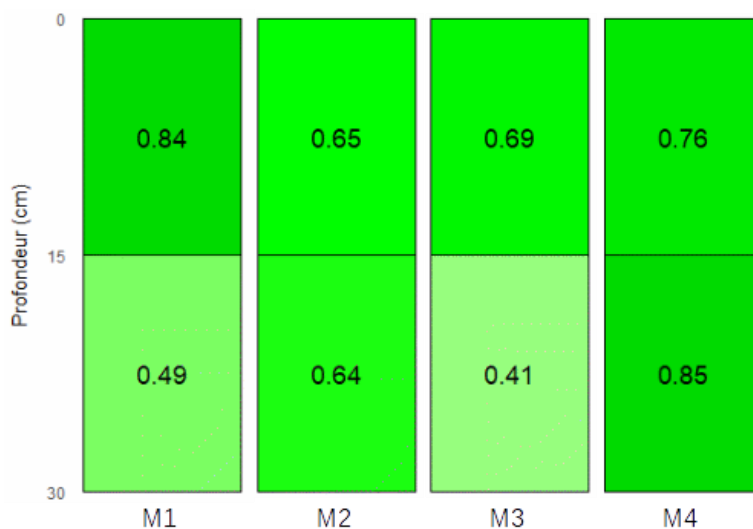


Figure 40 : Masse volumique moyenne (en mg/cm³) de racines fines en fonction de la profondeur de prélèvement et de la modalité au 12/08.

Aucune différence significative n'est observée entre les différentes positions pour toutes les modalités (Figure 41). Aucun schéma de croissance racinaire ne semble se distinguer pour chacune des modalités.

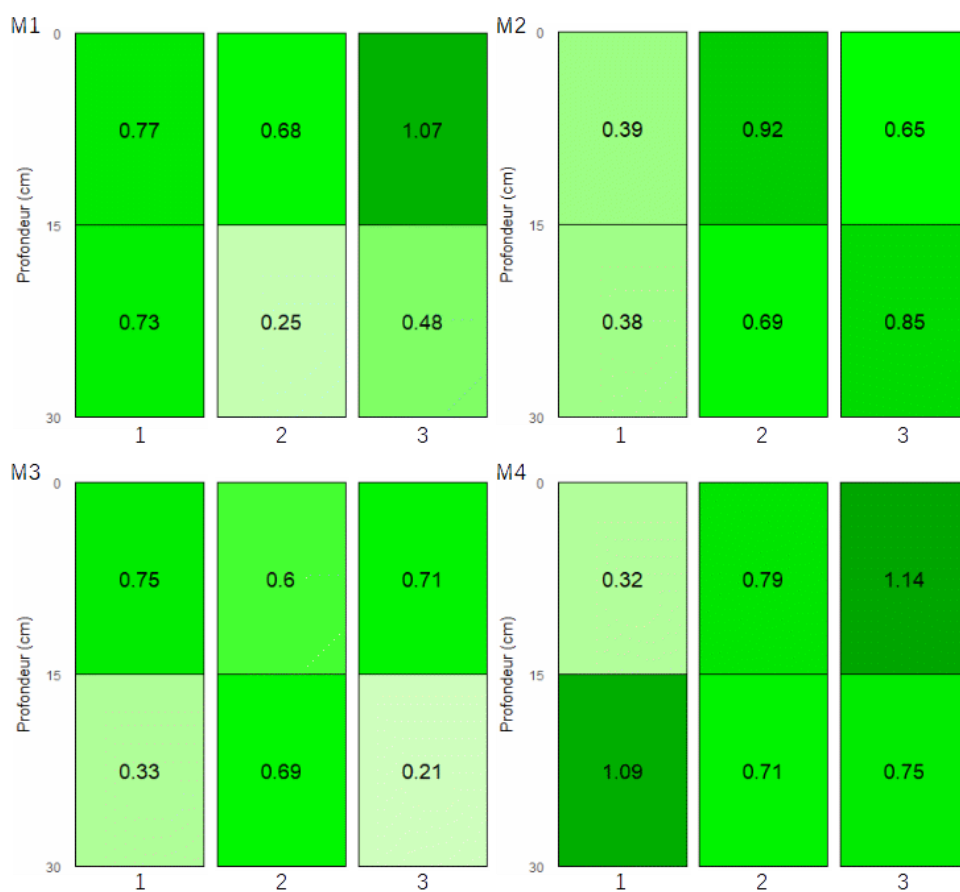


Figure 41 : Masse volumique moyenne (en mg/cm³) de racines fines en fonction de la profondeur, de la position et de la modalité de prélèvement au 12/08

IV. Discussion

A. Résultats

1. Apports d'eau par irrigation faibles et insuffisants

L'irrigation pour cette année 2024, a débuté très tardivement, et les quantités d'eau apportées sur la période de mesure sont encore plus faibles que celles de l'année dernière. En début de saison, la pluviométrie seule a été suffisante pour répondre aux besoins du kiwi. En effet, la première irrigation n'a eu lieu que le 18/06. Pourtant, pour la culture de kiwi, la période de forte demande en eau est située entre le 15/05 et le 25/06 (6 semaines après la floraison) ce qui témoigne des importantes quantités apportées par précipitations. En théorie, les besoins en eau d'irrigation pour combler le déficit hydrique sont situés entre 300 et 600 mm entre avril et octobre (Baudry et al., 2003). Or au 27/07, la quantité moyenne apportée est de 61 mm soit un cinquième du minimum théorique pour une moyenne de cinq évènements d'irrigation. De plus, l'année dernière à une date équivalente (07/08) soit 10 jours plus tard, la quantité moyenne apportée représentait 143 mm soit 2.5 fois plus que cette année. La pluviométrie mesurée sur la même période est de 223 mm, soit 3.6 fois plus que l'eau d'irrigation. Cela pose donc question quant au rôle de l'irrigation sur de potentiels effets observés. De plus, les différentes modalités n'ont pas reçu la même quantité d'eau comme espéré en début d'essai. Ces différences peuvent être expliquées par un fractionnement des irrigations pour les modalités 1, 2 et 3 pouvant donc être interrompues en cas de pluie. La modalité goutte à goutte est celle ayant reçu le moins d'eau par irrigation (41.34 mm) dû à une erreur dans la gestion de l'irrigation et à une fuite sur le réseau du goutte à goutte. Il est étonnant de voir des valeurs d'irrigations différentes entre la modalité 2 et 3. En effet, ces deux modalités sont raccordées à la même vanne et devraient théoriquement avoir reçu la même quantité d'eau. On peut donc se demander si la quantité d'eau apportée par chaque goutteur/asperseur est similaire. Il est donc important de prendre avec précaution les différents résultats et explications démontrés par la suite car de nombreux facteurs en plus de la modalité d'irrigation sont rentrés en jeu cette année.

2. Une vigueur des plants homogène

La croissance aérienne des plants de kiwi a été mesurée grâce au LAI. Cet indice mesurant la surface végétale permet d'avoir une information sur l'état de l'arbre. Ces mesures ont été mises en place dans le but de repérer un potentiel déficit hydrique. La parcelle de production choisie a un bon état sanitaire et est conduite de façon à ne pas générer de stress hydrique. Il est donc normal que l'augmentation de la surface foliaire soit similaire pour les quatre modalités. Néanmoins, sur la dernière date de mesure, une diminution de la vitesse de croissance peut être observée (significative ou non). Cette diminution peut expliquer un stade végétatif atteint par l'arbre où la croissance aérienne de l'arbre diminue pour favoriser la croissance des fruits (Buwalda & Hutton, 1988). Mais il est également possible que la méthodologie de mesure du LAI employée ne soit pas adaptée à la culture du kiwi.

3. Influence du système et de la quantité d'irrigation sur les bulbes d'humectation

Les résultats obtenus mettent en évidence des différences notables dans la dynamique de l'humidité du sol en fonction des différents systèmes d'irrigation appliqués. Les sondes capacitatives ont montré que les valeurs moyennes d'humidité sont restées relativement élevées tout au long de l'essai pour l'ensemble des modalités, évitant ainsi tout stress hydrique, comme

confirmé par les données des dendromètres (Wittling & Ruelle, 2022). Ces observations rejoignent les conclusions de (Dufils et al., 2009), où des valeurs élevées d'humidité peuvent théoriquement éviter tout déficit hydrique, bien que dans certains cas extrêmes, des valeurs supérieures à la capacité au champ puissent indiquer un engorgement du sol. Cette absence de stress hydrique peut également être attribuée aux précipitations régulières survenues durant la période de l'essai. Il est important de noter que les sondes capacitatives utilisées pour mesurer l'humidité sont distinctes de celle utilisée par l'agriculteur pour déclencher l'irrigation situé au nord de la parcelle.

Les variations d'humidité observées dans le sol sont en accord avec les spécificités de chaque modalité d'irrigation. Dans la modalité 1, utilisant l'irrigation au goutte à goutte, l'humidité du sol est plus élevée entre 0 et 60 cm de profondeur, avec une amplitude de variation relativement faible (31.6 % à 34.4 %), et ce, malgré des apports en eau inférieurs à ceux des autres modalités. Ce système d'irrigation se caractérise par une distribution de l'eau très localisée et fréquente, expliquant pourquoi l'humidité après une irrigation est concentrée sur les 30 premiers centimètres et n'atteint pas de plus grandes profondeurs. Ces observations sont en cohérence avec celles de (Chartzoulakis et al., 1991), qui indiquent qu'une irrigation goutte à goutte est souvent plus efficace pour maintenir l'humidité superficielle tout en minimisant les pertes d'eau par évapotranspiration. L'assèchement le plus lent du sol à 10 cm (-0.53 %/jour) par rapport à 20 cm (0.19 %/jour) suggère que l'eau en surface reste disponible plus longtemps, ce qui est cohérent avec les principes de l'irrigation au goutte à goutte. Cependant, la diminution de l'humidité observée à partir de 90 cm de distance du goutteur indique une limitation dans les transferts d'eau horizontaux.

La modalité utilisant la micro-aspersion Rivulis présente une humidité moyenne élevée sur 0-60 cm de profondeur, similaire à celle observée avec le goutte à goutte. Après chaque irrigation, l'humidité est principalement modifiée sur les 20 premiers centimètres du sol. L'assèchement plus rapide à 20 cm de profondeur (-1.49 %/jour) comparé à 10 cm (-0.64 %/jour) pourrait s'expliquer par une densité racinaire plus élevée à cette profondeur, entraînant une absorption d'eau plus rapide. Cela pourrait également refléter une distribution plus large de l'eau, où l'eau mieux répartie en surface s'infiltrerait moins profondément (Chartzoulakis et al., 1991). Par ailleurs, l'augmentation de l'humidité observée à partir de 60 cm de distance à l'asperseur confirme la répartition d'eau mesurée où une augmentation de l'humidité est notable sur les premiers mètres (Annexe).

En ce qui concerne la modalité utilisant la micro-aspersion Netafim, l'humidité moyenne dans le sol est inférieure à celle de la modalité Rivulis, probablement en raison de volumes d'irrigation plus faibles. Toutefois, l'impact de l'irrigation se fait sentir sur une profondeur de 0 à 30 cm, soit 10 cm de plus que pour la modalité Rivulis. Ces résultats sont cohérents avec les données des fabricants, confirmant que la modalité Netafim pourrait permettre une meilleure infiltration de l'eau, bien que sur une zone plus restreinte, ce qui limite son efficacité sur une plus grande surface.

De manière similaire à la modalité Rivulis, l'assèchement est plus marqué à 20 cm de profondeur (-0.97 %/jour) qu'à 10 cm (-0.68 %/jour), ce qui pourrait également être dû à une plus forte concentration de racines à cette profondeur. La diminution de l'humidité au-delà de 60 cm de distance s'explique par une réduction des apports en eau dans cette zone (Annexe).

Enfin, la modalité témoin en micro-aspersion à haut débit révèle une distribution de l'humidité distincte des autres modalités, avec une humidité maximale observée à 10 cm de profondeur, qui diminue progressivement jusqu'à 30 cm. À chaque événement d'irrigation, l'humidité est

affectée sur une profondeur de 40 cm. Ces résultats sont surprenants étant donné que cette modalité a reçu une quantité d'irrigation inférieure à celle de la modalité 2, mais s'expliquent par une infiltration plus profonde due à une plus grande quantité apportée dans la quasi-totalité des événements d'irrigation. La vitesse d'assèchement est plus rapide à 10 cm (-0.51 %/jour) qu'à 20 cm (-0.36 %/jour), ce qui peut être lié à une évaporation plus rapide en surface.

4. Une répartition des racines similaire malgré des croissances contrastées

Malgré des quantités d'irrigation relativement faibles, la répartition des racines dans le sol, observée à travers les micro-fosses et les prélèvements à la tarière, semble varier en fonction des modalités d'irrigation utilisées. Ces différences se traduisent par des schémas différents de répartition et de croissance racinaire selon chaque modalité.

Pour la modalité goutte à goutte, les racines tendent à se concentrer entre 0 et 15 cm de profondeur. Cette tendance est cohérente avec l'observation d'une humidité plus élevée et stable à ces profondeurs. Selon (Chartzoulakis et al., 1991), les systèmes racinaires sous irrigation goutte à goutte tendent à se répartir de manière plus homogène en superficie et le long de l'axe du rang. Toutefois, en raison des faibles apports en eau, surtout pour cette modalité, la croissance racinaire orientée dans le sens du rang, n'a pas été observée cette année.

Pour l'irrigation en micro-aspersion Rivulis, les résultats entre tarière et micro-fosses sont cohérents. Les racines se développent principalement entre 10 et 25 cm de profondeur. Ces résultats correspondent à la distribution de l'eau mesurée, où l'humidité est très variable dans les dix premiers centimètres, puis stable et élevée entre 10 et 30 cm. Les systèmes d'irrigation par micro-aspersion créent souvent des gradients d'humidité qui encouragent un enracinement plus profond, particulièrement dans les sols bien drainés. Ce type d'irrigation semble en effet permettre un enracinement légèrement plus profond.

Concernant la micro-aspersion Netafim, les résultats obtenus via les micro-fosses et les prélèvements à la tarière montrent des divergences. Les prélèvements indiquent une concentration racinaire plus forte entre 0 et 15 cm, tandis que les observations en micro-fosses suggèrent une répartition entre 10 et 25 cm de profondeur. Cette différence pourrait indiquer que l'enracinement est légèrement moins profond avec ce système qu'avec l'irrigation Rivulis. Ces divergences peuvent résulter de facteurs abiotiques tels que la texture du sol, la topographie ou la disponibilité en nutriments influençant la dynamique racinaire indépendamment du type d'irrigation. Il est également possible que la répartition racinaire observée en micro-fosses ne soit pas totalement représentative de l'ensemble du système racinaire de l'arbre.

Enfin, la modalité témoin en micro-aspersion haut débit présente une distribution racinaire majoritairement entre 15 et 30 cm de profondeur selon les prélèvements à la tarière. Cependant, les observations en micro-fosses montrent une présence racinaire plus en surface entre 10 et 20 cm. Cette faible disparité pourrait s'expliquer par le manque de précision des prélèvements à la tarière, qui ne permettent une précision que de 15 cm, ou par une différence de distance à l'arbre lors des prélèvements.

Aucune différence significative n'est observée dans la répartition des racines en profondeur en fonction des modalités. Cependant, selon (Buwalda & Hutton, 1988), le développement des racines fibreuses peut continuer plus tard dans la saison, une fois que la croissance végétative ralentit. De plus, cette année, une importante quantité d'eau d'irrigation a été apportée après l'arrêt des précipitations en août.

Toutefois, la croissance racinaire au cours de la saison a montré des variations significatives entre certaines modalités. Au 30 mai, la masse volumique racinaire de la modalité 2 était significativement inférieure à celle des modalités 1 et 3 pour la profondeur 0-15 cm. Or, cette différence avait disparu au 12 août, indiquant une croissance racinaire plus forte dans la modalité 2 à cette profondeur. Il est néanmoins difficile de déterminer si cette croissance accrue est réellement attribuable à la modalité d'irrigation. Il est possible que cette croissance accrue soit liée à une réponse adaptative des plantes à un déficit racinaire et hydrique initial, stimulant la prolifération racinaire par la suite (Phene et al., 1991). Il est également important de noter que cette modalité a reçu les apports d'irrigation les plus importants, ce qui pourrait aussi avoir influencé la dynamique racinaire.

5. Un système d'irrigation plus adapté aux risques de dépérissement ?

L'analyse des résultats obtenus au cours de cet essai révèle la difficulté du choix d'un système d'irrigation optimal par rapport à la dynamique de croissance racinaire. En effet, aucune des modalités testées n'a montré un effet significativement différent sur la croissance racinaire. Cependant, en tenant compte de la problématique de dépérissement, certains systèmes se distinguent. Le dépérissement des kiwis est principalement causé par un engorgement en eau des sols, qui empêche une respiration suffisante du système racinaire. Pour atténuer ce risque, il est crucial de privilégier un système d'irrigation favorisant le développement racinaire à des profondeurs intermédiaires (15-30 cm) voire superficielles (5-15 cm), ainsi qu'un développement racinaire sur une large surface (Buwalda & Hutton, 1988). Un enracinement à faible profondeur permet un accès plus facile à des niveaux d'oxygène plus élevés, tandis qu'une répartition étendue des racines augmente les chances d'atteindre des zones du sol moins engorgées. De plus, un système d'irrigation qui favorise une vitesse d'assèchement rapide à ces mêmes profondeurs contribue à une meilleure aération des racines. Dans cette optique, les modalités M1 et M3 se sont distinguées en favorisant un développement racinaire en surface (0-15 cm). Bien que la modalité M2 ait montré des signes similaires, le déficit racinaire observé en début d'essai rend cette conclusion moins certaine. Cependant, la concentration racinaire sur une faible surface caractéristique du goutte à goutte, comme observé dans la modalité M1, peut présenter des inconvénients. En cas de perturbation du système d'irrigation, telle qu'une fuite, ou un stress hydrique sévère, les racines concentrées dans une zone limitée pourraient ne pas compenser un déficit ou un engorgement en eau.

En comparaison, les modalités utilisant la micro-aspersion (Rivulis et Netafim) ont montré une distribution racinaire plus étendue. Cette répartition plus large est avantageuse car elle permet aux plantes d'exploiter le sol sur une plus grande surface augmentant ainsi leur résilience face à des conditions variables. De plus, ces systèmes d'irrigation ont démontré des vitesses d'assèchement plus rapides dans les premières couches du sol (0-20 cm), ce qui pourrait contribuer à une meilleure aération du système racinaire, réduisant ainsi les risques de dépérissement.

À la lumière de ces observations, la micro-aspersion Netafim (M3) semble être la modalité la plus prometteuse pour lutter contre le phénomène de dépérissement, en offrant un bon équilibre entre distribution racinaire et aération du sol.

B. Méthodes

1. Des méthodes et outils peu adaptés

L'analyse de la distribution racinaire à travers les micro-fosses et les prélèvements à la tarière s'est révélée intéressante, bien que ces méthodes présentent des limites notables. Ces techniques, bien qu'elles fournissent des données détaillées, elles sont à la fois chronophages, destructrices et limitée dans l'espace. Il aurait été intéressant de réaliser un profil racinaire plus profond (au moins 1 m), afin de mieux comprendre la profondeur d'enracinement des kiwis. La réalisation de huit micro-fosses (deux par modalité, en orientation parallèle et perpendiculaire) a nécessité en moyenne sept heures de travail. Il serait donc inimaginable de creuser des micro-fosses plus profondes à la main. De plus, ces fosses ne permettent pas, en l'absence de répétitions, de fournir des résultats statistiques, ce qui limite les possibilités d'interprétation des différences entre les résultats des fosses et ceux issus des prélèvements à la tarière.

Les techniques de micro-fosses et de prélèvements à la tarière sont également extrêmement destructrices. Elles entraînent la perte d'une partie des racines, posant ainsi un risque sanitaire pour les arbres dans une parcelle de production. En outre, la destruction des racines rend difficile la répétition des mesures sur le même arbre au cours de la saison, ce qui pourrait biaiser les résultats en l'absence de suffisamment de répétitions. La modification de la structure du sol et la perte d'une partie du système racinaire peuvent également avoir un impact significatif sur la croissance racinaire qui suit (augmentation ou diminution). Selon (Gregory & Hinsinger, 1999), ces perturbations peuvent induire des biais substantiels dans la mesure des dynamiques racinaires. Un autre inconvénient majeur des prélèvements à la tarière Bulldog est son cône de prélèvement de 15 cm de long, réduisant ainsi la précision de la répartition racinaire sur 30 cm. Cependant, contrairement à l'année dernière, la tarière Bulldog est plus adaptée que la tarière hélicoïdale (Gabriel & Nedellec, 2017). En outre, la nécessité de creuser et d'élargir les zones de prélèvements pour accéder à des profondeurs de 15 à 30 cm, en raison des ailettes de la tarière (Annexe), ajoute à la complexité de cette méthode.

Pour pallier les limitations rencontrées avec les micro-fosses, l'installation de rhizotron pourrait être une alternative intéressante. Il s'agit de fosses creusées dans le sol, isolées et étanchéifiées, avec une face recouverte de plexiglas, permettant un suivi visuel continu de la croissance racinaire avec des perturbations minimales (Reid & Petrie, 1991).

Les sondes tensiométriques ont également posé problème durant l'essai. Initialement, l'objectif était de les positionner à différentes distances des goutteurs/asperseurs (1, 2 et 3 mètres) pour obtenir des résultats représentatifs des différentes modalités. Cependant, les sondes tensiométriques fournies par Comsag, qui dépassent du sol contrairement aux sondes capacitatives, auraient gêné le passage des engins agricoles dans l'inter-rang, rendant leurs installations problématiques. Des recherches ont montré que le positionnement des sondes dans les systèmes d'irrigation peut considérablement influencer les mesures d'humidité et que des sondes mal placées peuvent induire des erreurs significatives dans l'évaluation de l'état hydrique du sol. D'autres mesures, telles que la conductance stomatique, auraient également pu être pertinentes pour évaluer l'efficacité des différents systèmes d'irrigation (Smith et al., 1989).

Conclusion et perspectives

Les résultats de l'essai 2024 sont très ressemblants à ceux de l'année précédente. Ils ont été fortement influencés par des apports d'eau par irrigation insuffisants et des précipitations importantes en début de saison. Ces conditions ont empêché l'observation des effets potentiels de l'irrigation sur une saison complète, en particulier durant la période critique entre la floraison et le développement des fruits. Par conséquent, aucune différence significative n'a été constatée au niveau des parties aériennes des plants, confirmant l'absence de stress hydrique visible pour chacune des modalités. Les mesures sur les parties aériennes ont montré une vigueur relativement homogène entre les modalités, bien que les arbres sous irrigation goutte-à-goutte aient présenté une croissance légèrement inférieure. Cette année, peu de différences ont été observées dans la répartition racinaire en fonction des différents systèmes d'irrigation, bien que la modalité utilisant la micro-aspersion Netafim semble favoriser une meilleure infiltration de l'eau et un développement racinaire plus large, ce qui pourrait être bénéfique pour prévenir le dépérissement des cultures de kiwi. Les méthodes utilisées pour l'analyse de la distribution racinaire ont montré leurs limites, notamment en termes de précision et de représentativité, ce qui souligne la nécessité de méthodes alternatives pour de futures études. Les résultats obtenus cette année suggèrent que pour bien évaluer les systèmes d'irrigation, il est essentiel de poursuivre l'essai sur plusieurs années. Cependant dans le cas de conditions climatiques identiques, il serait peut-être intéressant de limiter les apports par précipitations. Cela aidera à mieux saisir l'impact des divers systèmes d'irrigation sur la vigueur et l'état sanitaire des plants de kiwi, ainsi qu'à élaborer des stratégies efficaces pour éviter le dépérissement dans les cultures de kiwi.

Références bibliographiques

- Agreste. (2023). Graph'agri 2023 : L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires. 149-150.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Atkinson, D. (2011). The Distribution and Effectiveness of the Roots of Tree Crops. In *Hortic. Rev.* (Vol. 2, p. 424-490). <https://doi.org/10.1002/9781118060759.ch9>
- Bardi, L. (2020). Early Kiwifruit Decline : A Soil-Borne Disease Syndrome or a Climate Change Effect on Plant–Soil Relations? *Frontiers in Agronomy*, 2, 3. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.00003>
- Baudry, A., Hennion, B., Hutin, Floc'hlay, F., Fournier, J.-M., Mazollier, J., & Vaysse, P. (2003). Le kiwi (CTIFL).
- Bécel, C. (2010). Croissance racinaire en verger de pêchers. Influence de la distribution de l'eau dans le sol et de la disponibilité en assimilats carbonés. UNIVERSITE D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE.
- Blanchet, P. (1985). Fertilité et croissance du kiwi (*Actinidia chinensis* PL.). vol.
- Blanchet, P., & Roubault, S. (1987). Différenciation florale, pollinisation et développement du fruit de kiwi (*Actinidia deliciosa* CHEV.). *Fruits*, 42(9), 521-528.
- Buwalda, J. G., & Hutton, R. C. (1988). Seasonal changes in root growth of kiwifruit. *Scientia Horticulturae*, 36(3-4), 251-260. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(88\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(88)90059-3)
- Buwalda, J. G., Meekings, J. S., & Smith, G. S. (1992). Radiation and photosynthesis in kiwifruit canopies. *Acta Horticulturae*, 297, 307-314. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.297.41>
- Chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine. (2021). Guide conversion et conduite du kiwi en agriculture biologique dans le Sud-Ouest.
- Chambre d'agriculture du Tarn. (s. d.). Les outils d'aide au pilotage de l'irrigation : Les sondes tensiométriques et capacitives.
- Chartzoulakis, K., Michelakis, N., & Vougioukalou, E. (1991). Growth and production of kiwi under different irrigation systems.pdf. *Fruits*, 46(1), 75-81.
- Comas, L., Bouma, T., & Eissenstat, D. (2002). Linking root traits to potential growth rate in six temperate tree species. *Oecologia*, 132(1), 34-43. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0922-8>
- Comas, L., Eissenstat, D. M., & Lakso, A. N. (2000). Assessing root death and root system dynamics in a study of grape canopy pruning. *New Phytologist*, 147(1), 171-178. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00679.x>
- Courault, D., Rouault, P., Pouget, G., Flamain, F., Diop, P., Desfonds, V., Doussan, C., Chanzy, A., Debolini, M., McCabe, M., & Lopez-Lozano, R. (2024). Phenological and Biophysical Assessment on Mediterranean Orchards from Ground-Based Methods and Sentinel-2 Data. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4792002>
- David, M., Ligier, H. D., & Sanchez, E. E. (2022). Distribucion radical en plantaciones de kiwi (*Actinidia chinensis* var. *Deliciosa*) en el sudeste bonaerense y su implicancia en

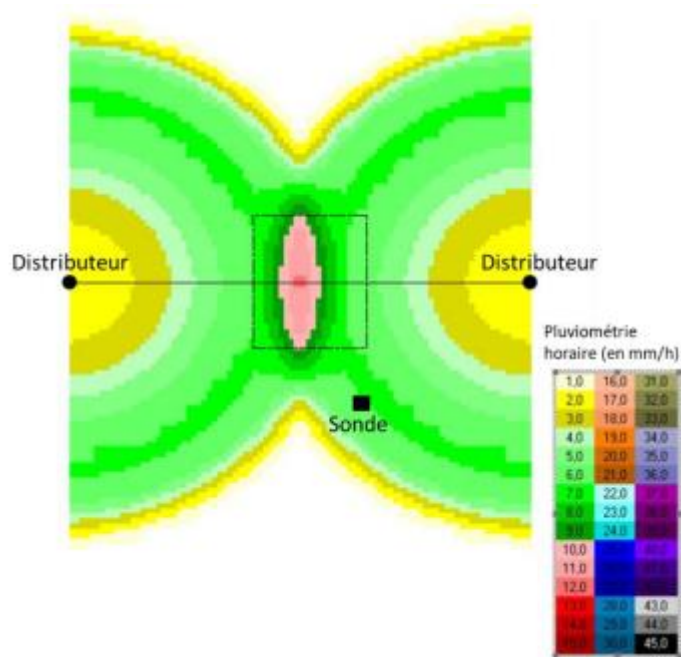
- el manejo racional del riego. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 48(2), 126-131.
- De Bei, R., Fuentes, S., Gilliam, M., Tyerman, S., Edwards, E., Bianchini, N., Smith, J., & Collins, C. (2016). VitiCanopy : A Free Computer App to Estimate Canopy Vigor and Porosity for Grapevine. *Sensors*, 16(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/s16040585>
- Dufils, A., Bérud, M., Martinez, A.-M., Boyer, I., Mouiren, C., & Huebourg. (2009). Gestion économe de l'eau en verger de pommier : Intérêt des sondes capacitives Diviner dans le pilotage de l'irrigation.
- FAO. (1990). *Gestion des eaux en irrigation. Méthodes d'irrigation.*
- Gabriel, H., & Nedellec. (2017). Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière. *Ec'eau & énergie : Chambre agriculture du Tarn.*
- Gandar, P. W., & Hughes, K. A. (1988). Kiwifruit root systems 1. Root-length densities. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 16(1), 35-46. <https://doi.org/10.1080/03015521.1988.10425612>
- Gaudu, J., Mathieu, J., Fumanal, J., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P., & Guennelon, R. (1993). Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : Analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie*, 13(1), 57-73. <https://doi.org/10.1051/agro:19930105>
- Gradwell, M. W. (1976). Available-water capacities of some intrazonal soils of New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 19(1), 69-78. <https://doi.org/10.1080/00288233.1976.10421048>
- Green, S. R., & Clothier, B. E. (1995). Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and soil*, 173, 317-328. <https://doi.org/10.1007/BF00011470>
- Gregory, P. J., & Hinsinger, P. (1999). New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere : An overview. *Plant and Soil*, 211, 1-9.
- Holzappel, E. A., Merino, R., Mariño, M. A., & Matta, R. (2000). Water production functions in kiwi. *Irrigation Science*, 19(2), 73-79. <https://doi.org/10.1007/s002710050003>
- Hughes, K. A., & Gandar, P. W. (1989). Kiwifruit root systems 2. Root weights. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 17(2), 137-144. <https://doi.org/10.1080/01140671.1989.10428022>
- Jackson, M. B., & Drew, M. C. (1984). CHAPTER 3—Effects of Flooding on Growth and Metabolism of Herbaceous Plants. In T. T. Kozlowski (Éd.), *Flooding and Plant Growth* (p. 47-128). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-424120-6.50008-0>
- Justin, S. H. F. W., & Armstrong, W. (1987). The Anatomical Characteristics of Roots and Plant Response to Soil Flooding. *The New Phytologist*, 106(3), 465-495.
- McAneney, K. J., & Judd, M. J. (1983). Observations on kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) root exploration, root pressure, hydraulic conductivity, and water uptake. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 26(4), 507-510. <https://doi.org/10.1080/00288233.1983.10427029>
- Miller, S. (1998). Effects of Water Stress on Fruit Quality Attributes of Kiwifruit. *Annals of Botany*, 81(1), 73-81. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0537>

- Morgan, E. R., & McNaughton, K. G. (1991). Architecture of a kiwifruit canopy. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(3), 237-246.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1991.10421807>
- Phene, C. J., Davis, K. R., Hutmacher, R. B., Bar-Yosef, B., Meek, D. W., & Misaki, J. (1991). Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. *Irrigation Science*, 12(3), 135-140.
<https://doi.org/10.1007/BF00192284>
- Reid, J. B., & Petrie, R. A. (1991). Effects of soil aeration on root demography in kiwifruit. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(4), 423-432.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1991.10422888>
- Reid, J. B., Sorensen, I., & Petrie, R. A. (1993). Root demography in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *Plant, Cell & Environment*, 16(8), 949-957.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00518.x>
- Reid, J. B., Tate, K. G., & Brown, N. S. (1992). Effects of flooding and alluvium deposition on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*): 2. Vine performance the following season. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 20(3), 283-288.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1992.10421769>
- Reid, J. B., Tate, K. G., Brown, N. S., & Cheah, L. H. (1991). Effects of flooding and alluvium deposition on kiwifruit (*Actinidia deliciosa*): 1. Early vine decline. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 19(3), 247-257.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1991.10421808>
- Salinero, M. C., Vela, P., & Sainz, M. J. (2009). Phenological growth stages of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* 'Hayward'). *Scientia Horticulturae*, 121(1), 27-31.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.01.013>
- Savé, R., & Serrano, L. (1986). Some physiological and growth responses of kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. *Physiologia Plantarum*, 66(1), 75-78.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1986.tb01236.x>
- Smith, G. S., Buwalda, J. G., Green, T. G. A., & Clark, C. J. (1989). Effect of oxygen supply and temperature at the root on the physiology of kiwifruit vines. *New Phytologist*, 113(4), 431-437. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1989.tb00354.x>
- Smith, G. S., Judd, M. J., Miller, S. A., & Buwalda, J. G. (1990). Recovery of kiwifruit vines from transient waterlogging of the root system. *New Phytologist*, 115(2), 325-333.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00459.x>
- Sné, M. (2007). *L'irrigation au goutte-à-goutte* (2^e éd.). CINADCO, ministère de l'Agriculture et du développement rural centre de coopération international pour le développement Agricole, Etat d'Israël.
- Tacconi, G., Giacomini, A., Vittone, G., Nari, L., Spadaro, D., Savian, F., Ermacora, P., Saro, S., Morone, C., Bardi, L., & Tosi, L. (2019). Il punto sulla moria del kiwi a 8 anni dalla sua comparsa. *L'informatore Agrario*, 21, 34-36.
- Tosi, L., Giacomini, A., & Tacconi, G. (2015). La moria del kiwi, situazione e prospettive. *L'Informatore agrario*, 44, 67-70.
- Von Bennewitz, E., Suazo, S., Keutgen, A. J., Lošák, T., & Carrasco-Benavides, M. (2019). Seasonal Root, Shoot, and Fruit Growth Patterns in Kiwifruit (*Actinidia deliciosa* a.

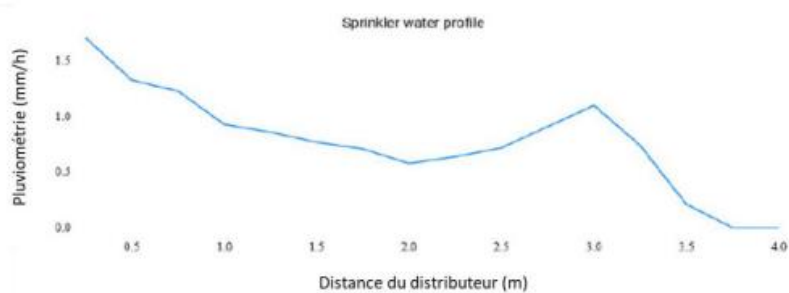
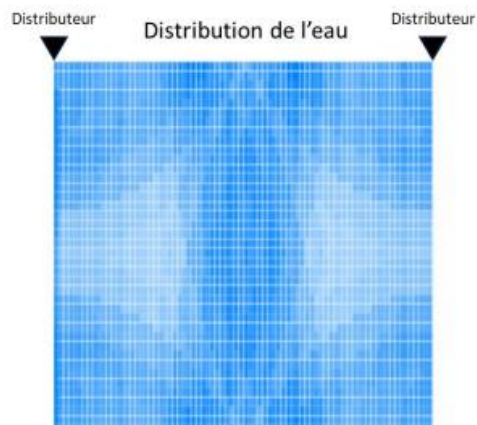
- Chev.) in Central Chile. *Erwerbs-Obstbau*, 61(3), 283-292.
<https://doi.org/10.1007/s10341-019-00429-1>
- Wittling, C., & Ruelle, P. (2022). *Guide de l'irrigation* (4^e éd.). Quae.
- Xiloyannis, C., Massai, R., Piccotino, D., Baroni, G., & Bovo, M. (1993). Method and technique of irrigation in relation to root system characteristics in fruit growing. *Acta Horticulturae*, 62, 505-510. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1993.335.62>
- Xiloyannis, C., Montanaro, G., & Dichio, B. (2012). Kiwifruit. In *Crop yield response to water* (p. 487-497). FAO.

Annexes

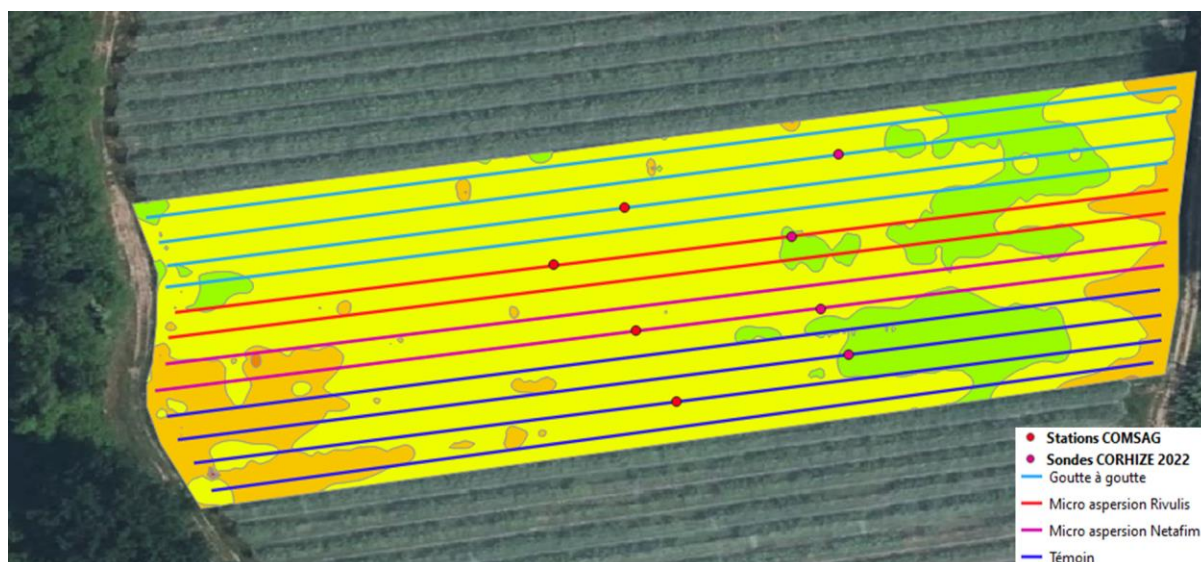
Annexe 1 : Graphiques de distribution de l'eau dans le rang et l'inter-rang pour la modalité 2 et pluviométrie (mm/h) selon la distance



Annexe 2 : Graphiques de distribution de l'eau dans le rang et l'inter-rang pour la modalité 3 et pluviométrie (mm/h) selon la distance



Annexe 3 : Carte de positionnement des sondes 2024 et des sondes 2023 par rapport à la conductivité du sol



Annexe 4 : Pluviomètre Comsag



Annexe 5 : Compteur d'eau et silo de réception des données Comsag



Annexe 6 : Sondes tensiométriques Comsag



Annexe 7 : Dendromètre Comsag



Résumé

Titre : Caractérisation de l'effet de différents systèmes d'irrigation sur la culture de kiwi

Cette étude, conduite par le Bureau national Interprofessionnel du Kiwi sur la commune de Moissac, vise à évaluer l'impact de différents systèmes d'irrigation sur le développement du système racinaire du kiwi. Cet essai, à lieu dans un contexte de dépérissement accru observé en France depuis 2020. Le dépérissement, principalement causé par un engorgement en eau du sol qui limite la capacité des racines à absorber l'oxygène, peut entraîner la nécrose des racines et, dans les cas les plus sévères, la mort des arbres. L'expérimentation, initiée en 2023, compare les effets de l'irrigation par goutte à goutte et de la micro-aspersion sur la répartition de l'humidité dans le sol ainsi que sur la croissance et la distribution des racines. L'objectif est de déterminer si un des systèmes d'irrigation est plus adapté pour limiter le dépérissement des plants. Les données sont collectées à l'aide de micro-fosses et de prélèvements à la tarière entre 0 et 30 cm de profondeur. Malgré une pluviométrie élevée au cours de l'essai, qui a réduit l'impact observable des systèmes d'irrigation sur la distribution racinaire, l'analyse des bulbes d'humectation en profondeur (60 cm) et en largeur (90 cm) à l'aide de sondes capacitatives et tensiométriques a révélée des résultats intéressants. Le système goutte à goutte tend à concentrer l'humidité le long des rangs, avec une humidité du sol plus élevée que celle observée sous la micro-aspersion. En revanche, la micro-aspersion distribue l'humidité sur une plus grande surface, mais avec une infiltration en profondeur moindre pour des rayons d'aspersion plus étendus. Bien qu'aucune différence significative n'ait été constatée quant à la répartition racinaire dans le sol, certaines tendances suggèrent que les racines sous irrigation goutte à goutte sont plus superficielles par rapport à celles sous micro-aspersion. Il est essentiel de poursuivre cette expérimentation sur plusieurs saisons pour obtenir des comparaisons plus robustes, notamment sous des conditions climatiques plus sèches qui nécessiteraient une utilisation accrue de l'irrigation.

Mots clés : Kiwi – Dépérissement – Systèmes racinaires – Humidité – Systèmes d'irrigation