

**ENSH-(n° d'ordre)**

**THESE DE DOCTORAT  
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

Madame **TANKEUOO KOPA IMERINA**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Sujet de la thèse :

**Irrigation de précision des agrumes et cultures maraichères :  
cas de la plaine de la Mitidja**

Thèse présentée et soutenue à Blida le 08/10/2024 devant le jury composé de :

M. RASSOUL Abdelaziz	Professeur, ENSH Blida	Président
M. MEDDI Mohamed	Professeur, ENSH Blida	Directeur de thèse
M. AMMARI Abdelhadi	MCA, ENSH Blida	Co-Directeur de thèse
M. HACHEMI Abdelkader	Professeur, ENSH Blida	Examineur
Mme. TAIBI Sabrina	MCA., U. Blida I	Examinatrice
M. BOUDERBALA Abdelkader	Professeur, U. Khemis Miliana	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

## REMERCIEMENTS

*« Seigneur tout puissant, je te rends grâce pour tout ce que tu ne cesses d’accomplir dans ma vie. Tu n’as jamais cessé de m’accompagner, de me soutenir et de m’éclairer dans tout ce que j’entreprends. A toi, je te suis reconnaissante et je t’adresse mes sincères remerciements ».*

Au moment où j’achève la rédaction de ce travail, je tiens à adresser mes sincères remerciements à :

- mes encadreurs, Pr. MEDDI Mohamed et Dr AMMARI Abdelhadi de l’Ecole Nationale Supérieure d’Hydraulique de Blida, qui ont bien voulu consacrer une partie de leurs temps précieux pour diriger mes pas dans ce vaste monde scientifique qu’est la recherche. Leurs patiences, tolérances, encouragements et conseils envers ma personne m’ont permis de conduire ce travail jusqu’au bout ;
- Professeur RASSOUL Abdelaziz, qui m’a fait l’honneur d’accepter d’être le président du jury.
- Professeur HACHEMI Abdelkader, de bien vouloir étudier et évaluer avec attention ce travail.
- Docteur TAIBI Sabrina, d’avoir l’amabilité d’analyser et apprécier ce travail avec soin et rigueur.
- Docteur BOUDERBALA Abdelkader, d’avoir accepté d’assister et évaluer ce travail.
- tous les enseignants et personnel administratif de l’Ecole Nationale Supérieure d’Hydraulique de Blida (ENSH) pour leurs conseils et connaissances qu’ils m’ont prodigués, ainsi que leur bienveillances et motivations à mon endroit.
- le Laboratoire de Genie de l’Eau et de l’Environnement (GEE) de l’ENSH pour la mise à notre disposition du matériel et de l’équipement nécessaire pour les campagnes de terrain, pour l’analyse physique des sols ainsi que pour la rédaction de la thèse ;
- l’organisme International Intra-Africain African Water Resources Mobility Network (AWaRMN) dont le numéro de référence du projet est No. 2019-1973/004-001, pour m’avoir non seulement donné la possibilité de conduire cette belle histoire de doctorat jusqu’au bout à travers les moyens financiers mise à ma disposition ; mais aussi offerte la possibilité de connaître une autre culture que celle de mon pays le Cameroun.
- l’Office National de Météorologie (ONM), Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et la Direction des Services d’Agriculture (DSA) pour la mise à ma disposition des données me permettant de faciliter le travail
- mes collègues doctorants pour l’assistance dans la conduite des travaux sur le terrain mais aussi en laboratoire ;
- tous mes amis, en particulier ETTA ETI Prosper pour leur amitié, leurs encouragements et bons moments passés ensemble ;

Enfin, mes pensées s’adressent à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l’accomplissement de ce travail.

**DEDICACE**

**À**

Mon père KOPA David

Ma mère TCHAGNA Colette

Mes Sœurs et Frères

Au regretté mémoire MULOWAYI MUBULAYI Cédrick

*"L'irrigation dans beaucoup de pays est un art ancien aussi vieux que la civilisation, mais pour le monde entier c'est une science moderne ; la science de la survie", Nihalchand Dutt Gulhati.*

## ملخص

يقع سهل المتيجة في شمال الجزائر، وهو سهل غني و واسع يتميز بموارده من المياه الجوفية ودوره الزراعي. ومع ذلك، منذ الثمانينيات، شهد منسوب المياه الجوفية انخفاضًا كبيرًا (أكثر من 40 مترًا) نتيجة الجفاف والاستغلال المفرط للمياه لأغراض الري (1.3 مليون هكتار مروى). كما أن الإدارة العشوائية للري من قبل المزارعين تزيد من تفاقم الوضع.

يهدف تحسين أنظمة الري في سهل المتيجة وتوفير إدارة أفضل لموارد المياه من خلال تطوير أداة مساعدة في اتخاذ القرار للمزارعين، تم اقتراح إجراء دراسات فيزيائية للتربة وتسرب المياه في التربة؛ ثم من جهة، تحديد تأثير التغطية العضوية؛ ومن جهة أخرى، دراسة تأثير دمجها مع نظام الري بالتنقيط على أعماق مختلفة في زراعة الطماطم؛ وأخيرًا مقارنة أنظمة الري الأكثر كفاءة بهدف تحسين نمو النباتات وتوفير جزء كبير من كمية الري في زراعة البرتقال.

أظهرت نتائج أطروحتنا أن التربة التي زُرعت عليها الطماطم وأشجار البرتقال تتكون غالبًا من مادة الطمي؛ حيث تكون التربة أقل كثافة في المتوسط مع إمكانية انسداد للتربة التي لديها قيم أعلى. وُجد أن نموذج كوستياكوف المعدل هو الأكثر كفاءة في المنطقة المدروسة. بالإضافة إلى ذلك، أظهر تحليل مياه الري المستخدمة في الحقل أن المياه ذات جودة جيدة للنباتات.

بالنسبة لقطع أراضي الطماطم، تبين أن التغطية المكونة من خليط من نشارة الخشب وقش القمح بنسب متساوية كانت الأكثر احتفاظًا بالمياه على مدى عامين (37%-50%) وأقل حاجة للري. كما أظهرت مقارنة هذا الغطاء مع غطاء BRF (الذي أثبت فعاليته في الماضي) مع نظام الري بالتنقيط على السطح وعلى عمق 15 سم أن نفس الغطاء عند دمجه مع نظام الري الجوفي يوفر مياه بنسبة 29.6% ويزيد الإنتاج بنسبة 2.9%. وأكدت هذه الدراسة أيضًا تأثير الإضافات على الحفاظ على رطوبة التربة وتنظيم درجة الحرارة ودرجة حموضة التربة، مع استقرار ملوحة التربة بمرور الوقت. كما أظهرت هذه الطريقة في التغطية أهميتها في تحسين المادة العضوية في التربة بنسب تتراوح بين 0.86% - 1.35% في الكتلة A و 0.19% - 0.77% في الكتلة B للأغطية المدروسة.

فيما يتعلق بقطع أراضي البرتقال، تراوحت درجة حموضة التربة بين 6.63 و 7.36 على عمق متر واحد. بعد مقارنة أنظمة الري الثلاثة (S1)، S2، S3، وُجد أن نظام الري بالتنقيط على عمق 30 سم (S3) كان الأكثر توفيرًا للمياه، مما أدى إلى توفير المياه بنسبة تتراوح بين 14% (2022) و 32% (2023) مقارنة بنظام الري السطحي (S2) يعود قلة استهلاك المياه بشكل رئيسي إلى فقدان المياه بسبب الصرف أو التسرب خارج منطقة الجذور. تراوحت تركيز الجذور في أشجار البرتقال في المحطة بين 40 و 60 سم عمقًا. أظهرت أنظمة الري الجوفي على عمق 15 سم (S1) و 30 سم (S3) توافقًا أفضل مع KC و ETC، مما يشير إلى إدارة أكثر فعالية للمياه، وهو ما يمكن أن يكون مفيدًا بشكل خاص لتعظيم إنتاج البرتقال في سهل المتيجة.

**الكلمات المفتاحية:** الري الدقيق؛ توفير المياه؛ الطماطم؛ البرتقال؛ سهل المتيجة؛ الجزائر.

## RESUME

Située au Nord de l'Algérie, la Mitidja est une vaste plaine alluviale marquée par ses ressources en eaux souterraines et sa vocation agricole. Cependant, depuis les années 1980, la nappe phréatique a fortement diminué (de plus de 40 mètres) en raison de la sécheresse et de la surexploitation des eaux pour l'irrigation (1,3 Millions d'hectares irrigués). Une gestion aléatoire de l'irrigation par les agriculteurs aggrave la situation. C'est dans l'optique d'améliorer les systèmes d'irrigation présents dans la plaine de Mitidja et d'offrir une meilleure gestion des ressources en eau en réalisant un outil d'aide à la décision nécessaire aux agriculteurs que nous sommes proposés à la base, de réaliser des études physiques de sol et d'infiltration de l'eau dans le sol ; ensuite d'une part, de déterminer l'impact du paillage organique; puis son couplage au système d'irrigation goutte à goutte à différentes profondeurs d'autre part au sein des tomates ; enfin de comparer les systèmes d'irrigations les plus efficaces en vue d'optimiser leur croissance, tout en économisant une bonne partie de la dose d'irrigation au niveau des orangers.

Les résultats de nos travaux de thèse montrent que le support sur lequel les tomates et les arbres d'oranger ont été plantés possèdent majoritairement une matrice de limon ; dont les sols sont en moyenne moins dense avec des possibilités de colmatages pour les sols qui ont des valeurs plus élevées. Kostiakov modifié étant le modèle le plus performant repéré dans la zone d'étude. Par ailleurs, l'analyse physique de l'eau d'irrigation utilisée en champ a permis de dire que l'eau est de bonne qualité pour les plantes.

Pour les parcelles de tomates, le paillis mélange de copeau + sciure + paille de blé à égale proportions est celui qui a été relevé comme le plus conservateur d'eau sur deux ans (37% - 50 %) et le moins irrigué. Aussi, à la suite de la comparaison de ce paillage avec le BRF (qui lui aussi a fait ces preuves par le passé) couplé aux gouttes à gouttes de surface et de 15 cm de profondeur, il ressort que ce même paillis associé au système d'irrigation souterrain permet non seulement de mieux économiser de l'eau, à hauteur de 29.6% ; mais aussi d'augmenter le rendement de 2.9%. Aussi cette étude a permis de confirmer l'impact des ajouts dans la conservation et régulation de l'humidité, température du sol et du pH du sol ; tout en stabilisant sur la durée la salinité dans le sol. Cette méthode de paillage a également montré son importance dans l'amélioration de la matière organique du sol à hauteurs respectives de 0.86% - 1.35% au sein du bloc A et de 0.19% - 0.77% au niveau du bloc B ; pour les différents paillis étudiés.

Dans le cadre des parcelles d'oranger, l'étude du pH du sol varie de 6,63 à 7,36 sur un profil d'un mètre de profondeur. Suite à la comparaison des trois systèmes d'irrigation (S1, S2, S3), il se trouve que le goutte à goutte de 30 cm de profondeur (S3), est celui ayant reçu le moins d'eau irrigué, permettant une économie d'eau allant de 14 % (2022) à 32% (2023) par rapport au système d'irrigation localisé de surface (S2). L'absence de marche de consommation est due principalement au phénomène de drainage ou perte par percolation hors de la zone d'enracinement privilégiée. La concentration racinaire des orangers de la station varie entre 40 et 60 cm de profondeur. Les systèmes d'irrigation souterrain à 15 cm (S1) et à 30 cm (S3) montrent une meilleure correspondance avec le Kc et l'ETc, suggérant une gestion plus efficace de l'eau, qui pourrait être particulièrement bénéfique pour maximiser la production des orangers dans la plaine de Mitidja.

**Mots – clés :** Irrigation de précision ; Economie d'eau ; Tomates ; Orangers ; Plaine de Mitidja ; Algérie

## ABSTRACT

Located in northern Algeria, the Mitidja Plain is a vast alluvial region known for its groundwater resources and agricultural importance. However, since the 1980s, the water table has significantly dropped (by more than 40 meters) due to drought and the over-exploitation of water for irrigation (1.3 million hectares irrigated). Poor irrigation management by farmers has further worsened the situation.

To improve irrigation systems in the Mitidja Plain and provide better water management through a decision-support tool for farmers, we proposed conducting soil physical studies and water infiltration assessments. This involved determining the impact of organic mulching and studying its combination with drip irrigation systems at different depths for tomato crops. Finally, we compared the most efficient irrigation systems to optimize plant growth while conserving significant amounts of irrigation water for orange trees.

Our thesis results show that the soil where tomatoes and orange trees were planted mostly consists of silt, with generally less dense soil, but potential clogging in soils with higher density values. The modified Kostiakov model was the most efficient in the study area. Additionally, analysis of the irrigation water used in the field showed that it was of good quality for plants.

For the tomato plots, the mulch made of equal parts wood chips, sawdust, and wheat straw was the most water-conserving over two years (37% - 50%) and required the least irrigation. Furthermore, the comparison of this mulch with BRF (which had also proven effective in past studies), coupled with surface and 15 cm depth drip irrigation, revealed that this same mulch, when combined with subsurface irrigation, saved 29.6% of water and increased yield by 2.9%. The study also confirmed the impact of mulching on soil moisture retention, temperature regulation, and pH, while stabilizing soil salinity over time. This mulching method also showed its importance in improving soil organic matter, with increases of 0.86% - 1.35% in Block A and 0.19% - 0.77% in Block B across the different mulches studied.

For the orange tree plots, soil pH ranged from 6.63 to 7.36 over a one-meter depth profile. Comparing the three irrigation systems (S1, S2, S3) revealed that the 30 cm depth drip irrigation system (S3) was the most water-efficient, saving between 14% (2022) and 32% (2023) compared to the surface drip irrigation system (S2). The reduced water consumption was mainly due to drainage or percolation outside the root zone. Root concentration for the orange trees at the station ranged from 40 to 60 cm deep. The 15 cm (S1) and 30 cm (S3) subsurface irrigation systems showed better alignment with Kc and ETc, suggesting more efficient water management, which could be particularly beneficial for maximizing orange production in the Mitidja Plain.

**Keywords:** Precision irrigation; Water saving; Tomatoes; Orange trees; Mitidja Plain; Algeria.

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

<b>Abréviations</b>	<b>Significations</b>
1/A1	Année 2022
2/A2	Année 2023
A	Argile
ANRH	Agence Nationale de Recherche Hydraulique
Ap.P	Après paillage
Av.P	Avant paillage
BRF	Broyage de Résidus Forestiers
BRFU	Bas de la réserve facilement utilisable
CC	Capacité au Champ
CE	Conductivité Electrique
Cycle 1	Croissance de la plante
Cycle 2	Floraison de la plante
Cycle 3	Fructification de la plante
Cycle 4	Maturation + récolte de la plante
Da	Densité apparente
DIG	Système d'irrigation goutte à goutte souterrain
DIS	Système d'irrigation goutte à goutte de surface
DSA	Directrice de Service Agricole
Ea	Application Efficiency
ETA	Evapotranspiration actuelle
ETo	Evapotranspiration de référence
ETP	Evapotranspiration potentielle
ETR	Evapotranspiration réelle
FAO	Food and Agriculture Organization
Hrel	Humidité relative
IR	Irrigation
K	Kostiakov

Kc	Coefficient Cultural
KM	Kostiakov modifié
L	Limon
Lf	Limoneux fins
Lg	Limoneux grossiers
M.O	Matière Organique
Max	Maximale
Min	Minimale
Moy	Moyenne
P	Philip
P1	Parcelle du mélange (copeau de bois + Sciure de bois + paille de blé) irriguées par le goutte à goutte souterrain (10 cm de profondeur)
P1A	parcelle avec ajout de copeau de bois
P2	Parcelle témoin (sol nu) irriguée par le goutte à goutte souterrain (10 cm de profondeur)
P2A	Parcelle avec ajout de sciure de bois
P3	Parcelle du mélange (copeau de bois + Sciure de bois + paille de blé) irriguées par le goutte à goutte de surface
P3A	Parcelle avec ajout de paille de blé
P4	Parcelle témoin (sol nu) irriguée par le goutte à goutte de surface
P4A	Parcelle avec ajout du mélange à proportions égales de Copeau de bois + sciure de bois + paille de blé
P5	Parcelle de BRF (débris de bois et feuilles mortes) irriguée par le goutte à goutte de surface
P5A	Parcelle sans ajout (sol nu) dénommé témoin
P6	Parcelle de BRF (débris de bois et feuilles mortes) irriguée par le goutte à goutte souterrain (10 cm de profondeur)
PAF	Perte Au Feu
PBIAS	Percent Bias
PF	Point flétrissement
pH	potentiel Hydrogène
Pi	Précipitations
PVC	Polychlorure de Vinyle
R <sup>2</sup>	Régression linéaire

RFU	Réserve Facilement Utilisable
R <sub>G</sub>	Masse résiduelle après lavage
RMSE	Root Mean Square Error
S	Sables
SD	Standard Deviation
SDEC	Société de Diffusion et d'Exploitation de Capteurs
S <sub>G</sub>	Sables grossiers
Souterrain	Système d'irrigation localisé à 10 cm de profondeur
Surface	Système d'irrigation localisé en surface
SWC	Soil Water Content
T	Température
T1	Echantillons sols parcelles réservées pour copeau de bois et mélange souterrain
T2	Echantillons sols parcelles réservées pour sciure de bois et témoin souterrain
T3	Echantillons sols parcelles réservées pour paille de blé et mélange surface
T4	Echantillons sols parcelles réservées pour mélange et témoin surface
T5	Echantillons sols parcelles réservées pour témoin (sol nu) et BRF surface
T6	Echantillon sol parcelle réservée pour BRF souterrain
TDR	Time Domain Reflectometry
T <sub>max</sub>	Température maximale
T <sub>min</sub>	Température minimale
T <sub>moy</sub>	Température moyenne
USDA	United States Department of Agriculture
V	Volume
V <sub>vent</sub> / W1	Vitesse du vent
VWC	Volumetric Water Content
WUE	Water Use Efficiency
Y1/ R <sub>s</sub>	Rayonnement solaire

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Exemple d'une foggara en Algérie introduite au XI <sup>e</sup> et XII <sup>e</sup> siècle.....	33
Figure 2. Illustration du canal de la source El Khebir et le barrage au niveau de l'Oued .....	34
<b>Figure 3.</b> Exemples de capteurs d'humidité du sol .....	36
<b>Figure 4.</b> Exemples de systèmes d'irrigation actuels.....	36
Figure 5. Exemple d'étape de traitement d'une image satellitaire en vue d'une modélisation .....	37
Figure 6. Quelques exemples de types de paillage.....	38
Figure 7. Rendement sur 20 ans des agrumes de la plaine de la Mitidja.....	40
Figure 8. Cycle de vie de l'oranger. Etapes de croissance de la semence et de la germination à la plante adulte avec des fruits .....	49
Figure 9. Cycle de vie de la tomate. ....	51
Figure 10. Situation géographique de la plaine de la Mitidja.....	53
Figure 11. Données pluviométriques annuelles de la station de Soumaa.....	54
Figure 12. Chevelure hydrographique et stations météorologique.....	55
Figure 13. Carte pédologique réalisée par Ecrément et Seghir en 1972 à une échelle de 1/50000 .....	56
Figure 14. Carte géologique de la Mitidja.....	57
Figure 15. Localisation de la parcelle expérimentale et occupation des sols de la plaine de Mitidja ...	59
Figure 16. Illustration de l'arbre et fruits de la variété d'orange Thomson.....	60
Figure 17. Illustrations plante (gauche) et variété de fruits de tomates (droite).....	61
Figure 18. Station météorologique automatisée installée in – situ (à gauche), avec à droite, ses différents paramètres climatiques présentés et leurs lectures sur le site Aqualis .....	61
Figure 19. Sonde SENTEK installée en champ avec description de différents capteurs et suivi du pilotage d'irrigation à distance depuis son portable Android.....	62
Figure 20. Présentation et mesure de l'état du sol avec le TDR 150 aux pieds des tomates.....	63
<b>Figure 21.</b> Exemple de fenêtre de Irrimax, version 10.1.5 .....	64
<b>Figure 22.</b> Courbe montrant la fixation de la capacité au champ (CC) .....	64
Figure 23. Fixation du seuil de bas de la réserve facilement utilisable (RFU).....	65
Figure 24. Echantillonnage des sols sur le site expérimental .....	65
Figure 25. Différentes phases d'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	66
Figure 26. Mode opératoire de l'analyse granulométrique par sédimentométrie permettant de déterminer les différents pourcentages de sables, argiles et limons .....	69

Figure 27. Four à mouffles et échantillons disposés à l'intérieur pour l'analyse par perte au feu .....	71
Figure 28. Calibration et lecture du pH à travers le pH-mètre au laboratoire .....	72
Figure 29. Infiltromètre à double anneau (a), mode de fonctionnement (b) et autres matériels utilisés (c) .....	74
Figure 30. Feuille Excel de détermination des paramètres hydrauliques et critères de performance....	75
Figure 31. Taux d'infiltration vs. Temps transformés pour estimer les paramètres du modèle de Philip .....	75
Figure 32. Ln (f(t)) vs. Ln (t) transformée pour estimer les paramètres du modèle Kostiakov.....	76
Figure 33. Log (F/t-to) vs. Log (-t) de la parcelle mélange transformée pour estimer les paramètres du modèle de Kostiakov modifié.....	77
Figure 34. Analyse de l'eau via la sonde multiparamètre HI990 .....	81
Figure 35. Plan expérimental du bloc « A » avec exemple en images des paillis sélectionnés mise en place au pieds des plants de tomates .....	83
Figure 36. Plan expérimental du bloc B. ....	84
Figure 37. Quelques instruments installés en champ pour expérimentation .....	85
Figure 38. Détermination des différentes classes texturales via le diagramme textural USDA.....	87
Figure 39. Détermination des différentes classes texturales à (A) 30 cm et (B) 70 cm de profondeur via le diagramme textural USDA .....	88
Figure 40. Densité apparente de différentes parcelles .....	89
Figure 41. Densité apparente du sol à différentes profondeurs (30, 60 et 90 cm) et en moyenne sur 1m de profondeur, dans chaque sonde (1, 2 et 3).....	90
Figure 42. Analyse de la matière organique (M.O) dans les différentes parcelles sur deux (02) ans ...	92
Figure 43. Apport de la matière organique (M.O) sur deux ans par le paillage comparé au témoin (P5A) du bloc A .....	93
Figure 44. Analyse de la matière organique (M.O) dans les différentes parcelles du bloc B .....	95
Figure 45. Etude du pH du sol de différents traitements sur deux (02) ans .....	96
Figure 46. Etude du pH du sol de différents traitements uniquement en 2023 .....	97
Figure 47. Relation existante sur deux ans entre le type de paillage organique, la texture, le pH et la matière organique du sol dans le bloc A. ....	99
Figure 48. Relation existante sur un an entre le type de paillage organique, la texture, le pH, la matière organique du sol et le type de système d'irrigation dans le bloc B. ....	100
Figure 49. pH du sol à différentes profondeurs (30, 60 et 90 cm) et suivant chaque sonde (1, 2 et 3)	101
Figure 50. Comparaison du taux d'infiltration ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observé avant le semis des plants de tomate (en bleu), pendant la croissance des plants (en orange) et après la fructification des tomates (en gris) dans les paillis (copeaux de bois, sciure de bois, paille de blé, mélange de trois premiers paillis) et le sol nu (témoin) .....	103

Figure 51. Variation de la température moyenne de l'air sur deux ans durant la période expérimentale .....	114
Figure 52. Variation de l'humidité relative (Hr) moyenne de l'air sur deux ans durant la période expérimentale .....	115
Figure 53. Variation de la pluviométrie (Pi) sur deux ans, au cours de la période expérimentale .....	116
Figure 54. Variation de la vitesse moyenne du vent (km/h) sur deux ans durant la période expérimentale .....	117
Figure 55. Variation du rayonnement solaire (Rs) moyen ( $w/m^2$ ) sur deux ans pendant la période expérimentale .....	118
Figure 56. Variation hebdomadaire de la température du sol ( $^{\circ}C$ ) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans. ....	120
Figure 57. Variation de la conductivité électrique du sol ( $mS\ cm^{-1}$ ) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans. ....	127
Figure 58. Variation quotidienne de l'humidité du sol (%) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans. ....	132
Figure 59. Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P1A .....	138
Figure 60. Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P2A .....	140
Figure 61. Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P3A .....	142
Figure 62. Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P4 .....	144
Figure 63. Interaction entre le cumul d'humidité (%), de température ( $^{\circ}C$ ), conductivité électrique ( $mS/cm$ ) et évapotranspiration ( $mm/jour$ ) de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P5A .....	146
Figure 64. Corrélation entre les différents paramètres d'humidité (VWC), de température (T) et de conductivité électrique (CE) du sol à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de profondeurs dans différents parcelles (P1A, P2A, P3A, P4A et P5A) sur deux (02) ans .....	149
Figure 65. Nombre de tours irrigué au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans. ....	150
Figure 66. Durée établie du nombre de jours entre deux irrigations (nbre jours IR) dans chaque parcelle sur deux (02) ans.....	153
Figure 67. Volume d'irrigation (litre) au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans. ....	154

Figure 68. Comparaison de l'économie d'eau par rapport au témoin au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans.....	155
Figure 69. Evolution végétative de la culture de tomate dans chaque parcelle au cours de sa période de croissance sur deux ans. ....	156
Figure 70. Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture dans chaque parcelle, uniquement en 2023. ....	157
Figure 71. Durées et hauteurs moyennes des plantes par phase de développement en fonction du type de système d'irrigation et du traitement appliqué sur la culture de tomate. ....	162
Figure 72. Nombre de fruits, poids moyen de fruits et rendement de la culture. ....	164
Figure 73. Evaluation des paramètres d'humidité, température et de conductivité électrique du sol dans les parcelles à 5, 10, 15 et 20 cm de profondeurs.....	171
Figure 74. Relation existante entre la teneur en eau dans le sol (VWC), la température du sol (T) et la conductivité électrique du sol (CE) durant la période de croissance de la tomate à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de profondeur, uniquement dans P1. ....	173
Figure 75. Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P1.....	176
Figure 76. Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P3.....	179
Figure 77. Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P2.....	182
Figure 78. Evaluation de l'évapotranspiration (ETR) dans différentes parcelles.....	185
Figure 79. Relation entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et la taille des plantes dans différents traitements (paillis et témoins) .....	186
Figure 80. Fréquence d'irrigation de différents traitements en fonction de chaque phase de développement de la culture et du système d'irrigation appliqué. ....	188
Figure 81. Volume total d'irrigation obtenue dans les différentes parcelles à chaque phase de développement de la plante .....	189
Figure 82. Aperçu du gain en économie d'eau des paillis par rapport : a) au témoin de surface, b) témoin souterrain et c) uniquement du témoin de surface de tous paillis confondus .....	190
Figure 83. Relation entre le volume et le rendement obtenus dans différents traitements (paillis et témoins).....	190
Figure 84. Paramètres d'efficacité de l'eau dans différentes parcelles .....	192
Figure 85. Variations hebdomadaires des différents paramètres climatiques durant la période expérimentale 2022 .....	196
Figure 86. Variations hebdomadaires des différents paramètres climatiques durant la période expérimentale 2023 .....	198

Figure 87. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 1 sur deux ans.....	202
Figure 88. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'Août, dans la sonde 1 sur deux ans.....	203
Figure 89. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Septembre, dans la sonde 1 sur deux ans .....	204
Figure 90. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'octobre, dans la sonde 1 sur deux ans.....	205
Figure 91. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Novembre, dans la sonde 1 sur deux ans .....	206
Figure 92. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 2 sur deux ans.....	207
Figure 93. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'Août, dans la sonde 2 sur deux ans.....	208
Figure 94. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Septembre dans la sonde 2 sur deux ans .....	209
Figure 95. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'octobre, dans la sonde 2 sur deux ans.....	210
Figure 96. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Novembre, dans la sonde 2 sur deux ans .....	211
Figure 97. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 3 sur deux ans.....	212
Figure 98. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'Août, dans la sonde 3 sur deux ans.....	213
Figure 99. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Septembre, dans la sonde 3 sur deux ans .....	214
Figure 100. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'Octobre, dans la sonde 3 sur deux ans .....	215
Figure 101. Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Novembre dans la sonde 3 sur deux ans .....	216
Figure 102. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 1 sur deux ans.....	218
Figure 103. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d'Août, dans la sonde 1 sur deux ans.....	219
Figure 104. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 1 sur deux ans.....	220
Figure 105. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d'Octobre, dans la sonde 1 sur deux ans.....	221

Figure 106. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 1 sur deux ans.....	222
Figure 107. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 2 sur deux ans.....	223
Figure 108. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Août, dans la sonde 2 sur deux ans.....	224
Figure 109. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 2 sur deux ans.....	225
Figure 110. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Octobre, dans la sonde 2 sur deux ans.....	226
Figure 111. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 2 sur deux ans.....	227
Figure 112. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 3 sur deux ans.....	228
Figure 113. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Août, dans la sonde 3 sur deux ans.....	229
Figure 114. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 3 sur deux ans.....	230
Figure 115. Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Octobre, dans la sonde 3 sur deux ans.....	231
Figure 116. Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 3 sur deux ans.....	232
Figure 117. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 1 pendant deux saisons.....	234
Figure 118. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Août, dans la sonde 1 pendant deux saisons.....	235
Figure 119. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 1 pendant deux saisons.....	236
Figure 120. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Octobre, dans la sonde 1 pendant deux saisons.....	237
Figure 121. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 1 pendant deux saisons.....	238
Figure 122. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 2 pendant deux saisons.....	239
Figure 123. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Août, dans la sonde 2 pendant deux saisons.....	240
Figure 124. Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 2 pendant deux saisons.....	241

Figure 125. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois d'Octobre, dans la sonde 2 pendant deux saisons.....	242
Figure 126. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 2 pendant deux saisons.....	243
Figure 127. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 3 pendant deux saisons.....	244
Figure 128. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois d'Août, dans la sonde 3 pendant deux saisons.....	245
Figure 129. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 3 pendant deux saisons.....	246
Figure 130. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois d'Octobre, dans la sonde 3 pendant deux saisons.....	247
Figure 131. Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 3 pendant deux saisons.....	248
Figure 132. Comparaison de l'humidité du sol le long d'un profil de 85cm de profondeur de la sonde 1 suite aux apports d'eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023).....	250
Figure 133. Comparaison de l'humidité du sol le long d'un profil de 85cm de profondeur de la sonde 2 suite aux apports d'eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023).....	252
Figure 134. Comparaison de l'humidité du sol le long d'un profil de 85cm de profondeur de la sonde 3 suite aux apports d'eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023).....	254
Figure 135. Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ET <sub>o</sub> ) et apports d'eau au sein de la sonde 1 (S1) pendant deux ans .....	256
Figure 136. Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ET <sub>o</sub> ) et apports d'eau au sein de la sonde 2 (S2) pendant deux ans .....	257
Figure 137. Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ET <sub>o</sub> ) et apports d'eau au sein de la sonde 3 (S3) pendant deux ans .....	259
Figure 138. Evapotranspiration réelle de la culture (ET <sub>c</sub> ) à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) dans la sonde 1 .....	262
Figure 139. Evapotranspiration réelle de la culture (ET <sub>c</sub> ) à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) dans la sonde 2 .....	265
Figure 140. Evapotranspiration réelle de la culture (ET <sub>c</sub> ) à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) dans la sonde 3 .....	268
Figure 141. Coefficient cultural (K <sub>c</sub> ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) de la sonde 1 .....	274
Figure 142. Coefficient cultural (K <sub>c</sub> ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) dans la sonde 2 .....	277
Figure 143. Coefficient cultural (K <sub>c</sub> ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : <i>a</i> ) première saison (2022) et <i>b</i> ) deuxième saison (2023) dans la sonde 3 .....	280

Figure 144. Totaux de volumes d'eau (mm) obtenus par mois dans chaque système d'irrigation installé durant la première campagne 2022.....	284
Figure 145. Totaux de volumes d'eau (mm) obtenus par mois dans chaque système d'irrigation installé durant la deuxième campagne 2023 .....	285
Figure 146. Gain d'eau en pourcentage du système d'irrigation souterrain (30 cm de profondeur) par rapport à celui de surface sur 2 ans .....	286
Figure 147. Evolution du gabarit de l'oranger sur deux ans dans chaque système d'irrigation (S1, S2, S3) .....	288
Figure 148. Indice de rendement agricole par arbre obtenu par rapport à la moyenne suite à l'usage de chaque système d'irrigation uniquement à la fin de la campagne 2023 .....	289

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Lignes directrices pour la description du sol .....	73
<b>Tableau 2.</b> Gamme générale de performance recommandées en statistique .....	78
Tableau 3. Normes FAO de quelques paramètres physiques des eaux d'irrigation .....	81
Tableau 4. Analyse sédimentométrique des échantillons de sol de différentes parcelles.....	86
Tableau 5. Représentation des pourcentages argiles, sables et limons à 30 et 70 cm .....	87
Tableau 6. Paramètres hydrauliques des différents modèles avant le semis, pendant la croissance et après la maturation des plants de tomates .....	104
Tableau 7. Paramètres hydrauliques des différents modèles obtenus au niveau de la parcelle d'oranger .....	105
Tableau 8. Critères de performance et sélection du meilleur modèle dans chaque paillis (copeau de bois, sciure, paille de blé, mélange) et le témoin.....	107
Tableau 9. Critères de performance et sélection du meilleur modèle pour chaque point d'essai d'infiltration.....	109
Tableau 10. Analyse physique des eau utilisées pour irriguer les tomates et les orangers.....	111
Tableau 11. Données climatiques de la station agrométéorologique du site expérimental sur deux (02) ans pendant la période de croissance de la culture de tomates .....	118
Tableau 12. Moyennes et écart-types de la température du sol retenu dans différentes parcelles à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm).....	123
Tableau 13. Moyennes et écart-types de la conductivité du sol pour différentes parcelles (P1A, P2A, P3A, P4A et P5A) à des profondeurs de 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm.....	130
Tableau 14. Analyse descriptive de données de l'humidité du sol retenue dans différentes parcelles (P1A, P2A P3A, P4A, P5A), aux profondeurs 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm.....	135
Tableau 15. Volume d'eau (l) par kilogramme (kg) de fruits récoltés dans chaque parcelle .....	158
Tableau 16. Statistique descriptive des données climatiques obtenues pour les mois de juillet à novembre sur deux années .....	200
Tableau 17. Evapotranspiration réelle de la culture (ETc) par mois, obtenue en millimètres (mm) dans chaque sonde (S1, S2, S3), sur un profil pédologique de 85 cm pendant 2 ans .....	271
Tableau 18. Coefficient cultural (Kc) de la culture des orangers par mois, obtenue en millimètres (mm) dans chaque sonde (S1, S2, S3), sur un profil pédologique de 85 cm pendant 2 ans.....	282
Tableau 19. Analyse descriptive de l'évapotranspiration réelle de culture (ETc), du coefficient cultural (Kc) et des volumes d'irrigation obtenus par mois pour chaque système d'irrigation pendant deux campagnes (2022 2023).....	287

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	2
DEDICACE.....	3
ملخص.....	5
RESUME.....	6
ABSTRACT .....	7
LISTE DES ABREVIATIONS .....	8
LISTE DES FIGURES .....	11
LISTE DES TABLEAUX.....	19
TABLE DES MATIERES .....	20
INTRODUCTION GENERALE.....	26
I.1 Contexte .....	27
I.2 Problématique.....	28
I.3 Objectifs de l'étude .....	29
I.4 Structure de la thèse .....	30
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART .....	32
I.1 Principe de base de l'irrigation et son évolution .....	32
I.1.1 Antiquité et premières civilisations .....	32
I.1.2 Innovations médiévales et Renaissance.....	33
I.1.3 Révolution industrielle et modernisation.....	34
I.1.4 Défis contemporains et innovations .....	34
I.2 Etat actuel de l'irrigation de précision dans le secteur agricole.....	35
I.2.1 Applications de l'irrigation de précision.....	35
I.2.2 Situation de l'irrigation en général et de précision en particulier en Algérie, particulièrement dans la plaine de Mitidja.....	38
I.3 Impacts de l'irrigation de précision sur les rendements et la gestion des ressources en eau .....	39
I.3.1 Augmentation des rendements agricoles .....	39
I.3.2 Réduction de la consommation d'eau .....	40
I.3.3 Amélioration de la qualité des sols.....	40
I.3.4 Réduction des impacts environnementaux .....	41

I.3.5 Défis e l'irrigation de précision .....	41
I.4 Concepts fondamentaux des propriétés physiques du sol .....	41
I.4.1 Humidité du sol .....	42
I.4.2 Température du sol .....	43
I.4.3 Conductivité électrique du sol .....	44
I.4.4 Infiltration de l'eau dans le sol .....	45
I.5 Besoins en eau d'une culture.....	46
I.5.1 Définition et facteurs influencent les besoins en eau d'une culture .....	46
I.5.2 Besoins en eau des agrumes .....	48
1 Besoins en eau des orangers (Citrus sinensis) durant ses différentes phases de .....	48
I.5.3 Besoins en eau des cultures maraîchères .....	50
CHAPITRE II: METHODOLOGIE D'ETUDE .....	53
II.1 Présentation de la zone d'étude.....	53
II.1.1 Situation géographique.....	53
II.1.2 Climat .....	53
II.1.3 Hydrographie.....	54
II.1.4 Agronomie, topographie et sols.....	55
II.1.5 Végétation .....	56
II.1.6 Géologie et hydrogéologie .....	56
II.1.7 Aspect socio-économique .....	57
II.2 Matériels et méthodes .....	58
II.2.1 Choix du site d'étude.....	58
II.2.2 Description de la parcelle ainsi que des cultures sélectionnées .....	58
II.2.3 Instruments de mesure et technologies utilisées pour l'irrigation de précision au cours de l'étude .....	61
II.2.4 Analyse physique du sol.....	65
II.2.5 Test d'infiltration de l'eau dans le sol et simulation .....	73
II.2.6 Données météorologiques .....	78
II.2.7 Humidité, température et conductivité électrique du sol.....	79
II.2.8 Paramètres agronomiques .....	80
II.2.9 Analyse physique de l'eau d'irrigation utilisée pendant les campagnes .....	80

II.2.10 Protocole expérimentale .....	82
CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSIQUE DU SOL ET DE L'EAU AU NIVEAU DES PARCELLES DE TOMATE ET D'ORANGER .....	86
III.1 Texture du sol .....	86
III.2 Densité apparente du sol.....	89
III.3 Matière organique du sol .....	91
III.4 PH du sol .....	95
III.4.1 Parcelles de tomates.....	95
III.4.2 Orangers.....	100
III.5 Caractérisation de l'infiltration de l'eau dans le sol au niveau des parcelles de tomates et des orangers .....	101
III.5.1 Comparaison des taux d'infiltration de différents traitements uniquement au niveau des tomates .....	101
III.5.2 Détermination des paramètres hydrauliques de chaque modèle .....	104
III.5.3 Evaluation des critères de performances de chaque modèle et sélection du meilleur modèle du site .....	105
III.6 Caractérisation physique de l'eau irriguée au sein des parcelles de tomates et d'oranger .....	110
III.7 Conclusion .....	111
CHAPITRE IV: INFLUENCE DU PAILLAGE ORGANIQUE SUR LES PROPRIETES DU SOL ET DE L'IRRIGATION DANS LA CULTURE DE LA TOMATE .....	113
IV.1 Paramètres climatiques de la zone.....	113
IV.1.1 Température de l'air.....	113
IV.1.2 Humidité de l'air .....	114
IV.1.3 Pluviométrie.....	115
IV.1.4 Vitesse du vent.....	116
IV.1.5 Rayonnement solaire.....	117
IV.4 Impact du paillis organique sur les propriétés du sol .....	119
IV.4.1 Température du sol .....	119
IV.4.2 Conductivité électrique du sol .....	125
IV.4.3 Humidité du sol.....	131
IV.4.4 Interactions entre l'Humidité, la Température, la Conductivité Électrique du Sol et l'Évapotranspiration Réelle .....	136

IV.4.5	Corrélation de différents paramètres à différentes profondeurs dans différentes parcelles .....	147
IV.4	Influence du paillis organique sur l'eau irriguée et la plante .....	150
IV.4.1	Fréquence d'irrigation .....	150
IV.4.2	Volume d'irrigation .....	154
IV.4.3	Economie d'eau .....	154
IV.4.4	Evolution végétative de la culture .....	155
IV.4.5	Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture .....	156
IV.4.6	Analyse du volume d'eau par kilogramme de fruits récoltés .....	157
IV.5	Conclusion.....	158
<b>CHAPITRE V : OPTIMISATION DE L'EFFICACITE DE L'IRRIGATION DANS LA CULTURE DE LA TOMATE EN UTILISANT LE COUPLAGE GOUTTE A GOUTTE ET PAILLAGE .....</b>		
<b>160</b>		
V.1	Paramètres agronomiques .....	160
V.1.1	Durée et taille de chaque cycle de croissance de la plante.....	160
V.2.2	Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture.....	163
V.3	Caractérisation de l'humidité, température et conductivité électrique du sol .....	164
V.3.1	Phase de croissance .....	164
V.3.2	Phase de floraison .....	165
V.3.3	Phase de fructification.....	165
V.3.4	Phase de maturation .....	166
V.4	Statistiques descriptives des paramètres d'humidité, de température et de conductivité électrique du sol.....	172
V.4.1	Relation entre l'humidité, la température et la conductivité électrique du sol durant la phase de développement de la plante .....	172
V.4.2	Corrélation entre l'humidité du sol, la température du sol et la conductivité du sol durant la phase de développement de la plante.....	174
V.5	Caractérisation de l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture .....	183
V.5.1	Evaluation de l'ETR durant les phases de développement de la plante.....	183
V.5.2	Relation entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et la hauteur des plantes dans différentes parcelles .....	186
V.6	Paramètres d'irrigation .....	187
V.6.1	Fréquence d'irrigation.....	187

V.6.2	Volume total d'irrigation .....	188
V.6.3	Economie d'eau dans différentes parcelles suivant différents traitements .....	189
V.6.4	Relation entre les volumes d'eau et rendement dans différentes parcelles.....	190
V.7	Evaluation des indicateurs de performance de l'eau utilisée.....	191
V.7.1	Application efficace d'irrigation ( $e_a$ ) .....	191
V.7.2	Utilisation efficace de l'eau (WUE).....	192
V.6	Conclusion .....	193
CHAPITRES VI : ETUDE COMPARATIVE DES SYSTEMES D'IRRIGATION DANS L'OPTIMISATION DE LA CROISSANCE DES ORANGERS .....		194
VI.1	Conditions météorologiques durant les périodes de campagne.....	194
VI.1.1	Analyse de différents paramètres climatiques au cours de la première période de campagne (2022).....	194
VI.1.2	Analyse de différents paramètres météorologiques au cours de la deuxième période de campagne (2023).....	197
VI.1.3	Comparaison des paramètres météorologiques sur deux ans.....	199
VI.2	Caractérisation de l'état du sol et de la plante.....	201
VI.2.1	Evaluation de l'humidité du sol par mois sous chaque système d'irrigation.....	201
VI.2.2	Evaluation de la température dans le sol par mois.....	217
VI.2.3	Analyse journalière des totaux d'humidité et de température dans le sol .....	233
VI.2.4	Evaluation de l'humidité du sol de toute la saison .....	249
VI.3	Appréciation du taux de consommation quotidienne par la plante dans chaque sonde .....	255
VI.3.1	Etude relationnelle des paramètres SWC, T, $ET_o$ et apports d'eau au sein de la sonde 1 (S1) .....	255
VI.3.2	Etude relationnelle des paramètres SWC, T, $ET_o$ et irrigation (IR) au sein de la sonde 2 (S2) .....	256
VI.3.3	Etude relationnelle des paramètres SWC, T, $ET_o$ et irrigation (IR) au sein de la sonde 3 (S3) .....	258
VI.4	Caractérisation de l'évapotranspiration réelle dans le sol .....	259
VI.4.1	Caractérisation de l'évapotranspiration réelle de la culture ( $ET_c$ ) à différentes profondeurs dans le sol suivant chaque sonde .....	259
VI.4.2	Comparaison de l'évapotranspiration réelle de la culture ( $ET_c$ ) obtenu dans toutes les sondes installées .....	269
VI.5	Caractérisation du coefficient cultural ( $K_c$ ) de la culture des orangers .....	271

VI.5.1 Caractérisation du coefficient cultural ( $K_c$ ) à différentes profondeurs dans le sol suivant chaque sonde .....	271
VI.5.2 Comparaison du coefficient cultural ( $K_c$ ) de la culture obtenue dans toutes les sondes installées.....	281
VI.6 Analyse des apports d'eau et rendement dans chaque système d'irrigation .....	283
VI.6.1 Evaluation du volume d'irrigation de chaque système d'irrigation.....	283
VI.6.2 Relation existentielle entre les besoins et les apports d'eau dans chaque système d'irrigation pendant deux ans.....	286
VI.6.3 Evolution du gabarit de l'arbre d'oranger.....	288
VI.6.3 Rendement agricole obtenu par arbre d'oranger.....	289
VI.7 Conclusion.....	290
CONCLUSION GENERALE .....	291
RECOMMANDATIONS.....	295
PERSPECTIVES.....	296
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE .....	297

## **INTRODUCTION GENERALE**

## I.1 Contexte

L'eau, liquide si précieux à l'humanité, est étroitement liée à la santé, l'agriculture, l'énergie et la biodiversité. En d'autres termes, la vie telle que nous la concevons, n'est pas possible sans eau (Dekhil 1991). Comparativement au reste du monde, les pays africains font face à une pauvreté en matière d'eau (Denison 2020). En effet, l'Afrique en générale et les pays du pourtour méditerranéen en particulier, connaissent déjà une variabilité dans la pluviométrie en saisons sèche et humide, avec une désertification croissante (Chabaca 2007; Besada & Werner 2015; Batchelor & Schnetzer 2018). Cette situation entraîne une baisse des rendements agricoles (Alsulaimani 2017); ce qui, avec les besoins alimentaires liés à la démographie galopante, augmente la crise alimentaire et la pauvreté. Selon les estimations de l'Institut International de Gestion de l'Eau (Venot et al. 2021), une augmentation de 29 % des terres irriguées sera nécessaire d'ici l'an 2025 pour pérenniser la production vivrière et réduire la pauvreté sur le continent. Bien que 50 % de la production agricole mondiale proviennent de l'agriculture irriguée (Halilat 2004) et qu'environ 70% des prélèvements totaux en eau au niveau mondial sont alloués à l'irrigation (Alsulaimani 2017), il est nécessaire de s'intéresser à la gestion durable de l'eau pour l'irrigation. L'Algérie, qui est l'un des pays du Sud du bassin méditerranéen, connaît des pénuries d'eau d'une saison à une autre et d'une année à une autre (Meddi et al. 2014). Fortement dominée par l'agriculture depuis plus de deux mille ans, ce pays est marqué par un climat rude, méditerranéen et steppique, ainsi qu'une population sans cesse grandissante (Halilat 2004). Depuis les années 2000, l'Etat a mis sur pieds, plusieurs programmes dans l'optique d'assurer une sécurité alimentaire à toute la population (Chadou 2019). Cependant, la forte croissance démographique et l'urbanisation ont engendré une concentration importante de la population aux alentours de la capitale et par conséquent des besoins importants en eau potable (Meddi et al. 2015). A cet effet, la restructuration de l'agriculture a donné lieu à une augmentation des besoins en eaux d'irrigation (Meddi et al. 2015) et le recours à l'irrigation est devenu une nécessité étant donné l'importance du déficit climatique et l'intensification de l'activité agricole. Dans l'optique d'atteindre les cibles « 2 » et « 6 » des Objectifs du Développement Durable (ODD) (Denison 2020), il faudrait disposer annuellement de 15 à 20 milliards de m<sup>3</sup>, en allouant 70 % à l'agriculture, pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante (Chadou 2019); avec un objectif d'atteindre 2 millions d'hectares de terres irriguées d'ici peu (BNEDER 2015). Ce qui est surréaliste pour ce pays qui ne peut mobiliser à peine tout au plus 5 milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an (Chadou 2019). En réalité, les pratiques d'irrigation actuelles qui jadis

permettaient l'amélioration de la productivité, sont de nos jours obsolètes (Alsulaimani 2017), de par les prélèvements importants ayant entraînés un abaissement considérable de la nappe et la rareté de l'eau. Fort de ce constat, ce manque d'efficacité renvoi à l'urgence des systèmes d'irrigation qui seront à la fois plus productifs et équitables pour l'environnement. D'où le recours à l'irrigation de précision qui permettra d'augmenter le rendement ainsi que l'économie de l'eau et de l'énergie. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de notre thèse de doctorat pour souligner l'importance de l'optimisation de l'irrigation, afin de répondre aux défis majeurs liés à la sécurité alimentaire et hydrique ; dans un contexte de changement climatique et de demande croissante.

## **I.2 Problématique**

Située au Nord de l'Algérie, la Mitidja est une vaste plaine alluviale marquée par ses ressources en eaux souterraines et sa vocation agricole. Cette région est développée tant du point de vue agricole (agrumes, arboricultures, cultures maraîchères), industrielle (usines de papiers, jus de fruits, etc) que démographique (Imache et al. 2007). Cependant, depuis les années 1980, les données de l'Agence Nationale de Recherche Hydraulique (ANRH) (Baslimane 2012), montrent que la piézométrie de la Mitidja a beaucoup diminué ; d'où l'observation d'un rabattement très important et remarquable (de plus de 40 mètres) dans certaines zones de la nappe (Meddi et al. 2015). Cette baisse du niveau piézométrique peut être allouée principalement aux épisodes de sécheresse combinées à la surexploitation des eaux souterraines dans le domaine de l'irrigation principalement (1,3 Millions d'hectares irrigués) (Meddi et al. 2015). Toutefois, cette nappe est sollicitée pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation. D'après le Ministère de la Recherche en Eau (MRE), le volume extrait annuellement s'élève à près de 300 millions de m<sup>3</sup>. Ce qui entraîne une surexploitation des ressources en eau. Par ailleurs, la réalité du stress hydrique en augmentation, signifie que la gouvernance de l'eau, la planification intégrée et une meilleure productivité de l'utilisation de l'eau sont de grandes priorités pour l'avenir. Dans la même lancée, (Gendron 2017) met l'accent sur le fait que, l'utilisation rationnelle de l'eau devient donc une préoccupation croissante chez les producteurs pour satisfaire à la fois les besoins de la plante et les objectifs de réduction du gaspillage de l'eau. Un autre problème décelé est la gestion des plannings d'irrigation par les arboriculteurs. En effet, la majorité suit des plannings plus ou moins aléatoires, car ils ne se basent ni sur les conditions et caractéristiques du sol, ni sur les aléas climatiques et encore moins sur les ressources en eau disponibles. (Chenafi et al. 2013) précisent que pour utiliser les ressources en eau avec la meilleure efficacité possible,

l'irrigation doit être gérée de façon plus économe. Une irrigation de précision permet de mieux contrôler le régime d'irrigation, évitant ainsi le stress hydrique lors de la maturation des fruits. Éliminer le stress hydrique assure un rendement maximal.

Dans l'économie agricole algérienne, la tomate occupe une place prépondérante sur tout le territoire national, car près de 33 000 ha sont consacrés annuellement à cette culture (maraîchère et industrielle) ; donnant une production moyenne de 11 millions de quintaux et des rendements moyens d'environ 311 Qx/ha (MADR 2009, 2011) in (Tarchag 2020) et (Amichi et al. 2015). Cependant la qualité de la transformation des tomates dépend entièrement de leur degré Brix, qui est principalement influencé par la gestion de l'eau. D'après (Sharma et al. 2023), l'eau est l'un des éléments qui affectent directement la productivité des tomates. Hors en dehors de l'utilisation efficace de l'humidité du sol disponible, la lutte contre les mauvaises herbes, l'espacement, le moment de la plantation et l'application judicieuse de fumier et d'engrais sont tous des aspects qui influencent la réussite de la culture des tomates (Lamont 2005).

La Mitidja a déjà été sujet de plusieurs travaux de recherche et de projets d'amélioration dans le cadre de la gestion des ressources en eau et de l'irrigation (Imache et al. 2007; Imache et al. 2009; Djoudar D. 2011; Imache et al. 2011; Meddi et al. 2015; Mokadem 2016; Mehdi 2017) et aussi dans le cadre de l'étude et la valorisation des eaux usées en irrigation (Messahel 2013). Néanmoins très peu ont été effectués dans le cadre de l'irrigation de précision (Chabaca 2007). En effet, plusieurs chercheurs (Dukes et al. 2009; Darouich 2014; Alsulaimani 2017; Bourziza et al. 2017; da Silva 2017; Doeffinger et al. 2020; Canton 2021) , prônent l'idée selon laquelle l'irrigation de précision peut représenter une réponse rapide visant à réduire les conséquences de la sécheresse accrue et sévère. Cette nouvelle approche faciliterait l'intensification de l'agriculture, l'augmentation de la productivité agricole tout en préservant les ressources en eau, les terres et les cultures ; étant donné que l'apport de la technologie numérique dans les pratiques d'irrigation actuelles constitue en soi des systèmes innovants voire intelligents (Clint Richards 2018). De ces différents constats, il s'avère important de mener des travaux de recherche sur « l'irrigation de précision des agrumes et cultures maraichères : cas de la plaine de la Mitidja ».

### **I.3 Objectifs de l'étude**

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les systèmes d'irrigation présents dans la plaine de Mitidja et offrir une meilleure gestion des ressources en eau en réalisant un

outil d'aide à la décision nécessaire aux agriculteurs. Pour atteindre cet objectif principal, les objectifs spécifiques assignés à cette étude, sont les suivants :

- Caractériser les paramètres physiques du sol afin de comprendre les propriétés et le comportement du sol ; ce qui est considéré comme les entrées de base afin d'identifier le meilleur modèle d'infiltration qui s'adapte le mieux dans la zone d'étude ;
- Déterminer le meilleur paillis et système d'irrigation adapté dans la zone en ce qui concerne la culture de la tomate ;
- Comparer les systèmes d'irrigation récents les plus efficaces dans la culture des orangers de la Mitidja en vue d'optimiser leur croissance tout en économisant une bonne partie de la dose d'irrigation

#### **I.4 Structure de la thèse**

La présente thèse chapotée par une introduction générale est articulée autour de six chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art partant de l'historique de l'irrigation depuis les temps anciens à nos jours ; en parcourant les différentes techniques et technologies utilisées suivant ses époques tout en s'appuyant sur les recherches déjà effectuées dans le monde en général et dans le secteur d'étude en particulier.

Le deuxième chapitre s'appesantit sur la présentation du secteur d'étude ; suivit d'une méthodologie détaillée sur les instruments et méthodes utilisés pour traiter le sujet.

Le troisième chapitre traite des paramètres physiques du sol et de l'eau au sein des tomates et orangers en présentant les résultats de texture du sol, densité apparente du sol, matière organique, pH du sol, infiltration de l'eau dans le sol, pH de l'eau, température de l'eau et conductivité électrique de l'eau.

Le quatrième chapitre traite de l'étude comparative de plusieurs paillages organiques dans la croissance de la culture de tomates en présentant les résultats des paramètres météorologiques, agronomiques et pédologiques.

Le Cinquième chapitre traite de l'optimisation de l'irrigation dans la culture de la tomate en couplant le meilleur paillage obtenu précédemment et le système d'irrigation goutte à goutte. Tout en ajoutant un nouveau paillage organique. A cet effet, les résultats obtenus sont axés d'une part sur l'humidité, la température, la conductivité électrique du sol ; suivit des paramètres agronomiques et météorologiques.

Le sixième chapitre traite de l'étude comparative des systèmes d'irrigation localisés dans l'optimisation de la croissance des orangers à partir des résultats météorologiques, agronomiques, d'humidité et température du sol obtenues via les sondes capacitives SENTEK, obtenues suivant le logiciel IRRIMAX, version 10.1.5.

L'ensemble de cette rédaction s'achève par une conclusion générale, des recommandations et des perspectives

## **CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART**

### **I.1 Principe de base de l'irrigation et son évolution**

L'irrigation est une pratique essentielle dans l'agriculture qui remonte à des millénaires. (Neuvy 1991) *in* (Rivière-Honegger & Ruf 2000) définit ce processus vital tout simplement comme étant une technique d'apport d'eau aux plantes cultivées dans le but d'accroître le rendement. Mais de façon plus large, (Bouaroudj & Kadem 2012) le définit comme l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés, pour en augmenter la production et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique et un drainage excessif ou une baisse de nappe en particulière dans des zones arides et semi-arides. Au fil des siècles, l'irrigation a évolué de manière significative, influencée par des facteurs tels que les avancées technologiques, les changements climatiques et les besoins croissants en alimentation d'une population en expansion (Sojka et al. 2002).

#### **I.1 1 Antiquité et premières civilisations**

Dans les premières civilisations de l'Égypte ancienne, de la Mésopotamie (Irak et Iran actuels), de la vallée du fleuve Indus (dans l'ouest du sous-continent indien dénommé aujourd'hui Pakistan moderne et ses alentours) et de la Chine, l'irrigation était déjà une pratique bien établie (Sojka et al. 2002). Les agriculteurs utilisaient des techniques rudimentaires telles que l'irrigation par gravité, où l'eau était déviée des rivières et canaux vers les champs à l'aide de pentes naturelles. En Mésopotamie, des systèmes sophistiqués de canaux et de barrages ont été construits pour contrôler le débit de l'eau et irriguer de vastes étendues de terres agricoles, permettant ainsi le développement de sociétés agraires prospères (Hoffman 1990). En Égypte, les pharaons ont développé un système ingénieux d'irrigation basé sur les crues du Nil, utilisant des canaux de dérivation pour inonder les terres fertiles des vallées (Hoffman 1990; Hillel 1994). En Algérie, un système traditionnel de distribution d'eau très ancien datant d'environ 3000 ans s'y trouve. Il se nomme « Foggara » (Fig.1). D'après (Remini 2019), c'est un système de galeries souterraines (qanats) qui permet de capter l'eau des nappes phréatiques profondes. Selon ce dernier, l'eau est acheminée par gravité à travers ces tunnels vers les surfaces agricoles ou les villages. Ce système permet une

distribution contrôlée et régulière de l'eau, même dans les environnements très secs, en limitant l'évaporation grâce à l'écoulement souterrain.



**Source :** <https://www.salama-mag.com/salamamag/les-sept-fouggaras-dalgerie-la-plus-grande-de-timimoun/>

**Figure 1.** Exemple d'une foggara en Algérie introduite au XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècle

### **I.1.2 Innovations médiévales et Renaissance**

Pendant le Moyen Âge et la Renaissance en Europe, l'irrigation a continué à jouer un rôle crucial dans l'agriculture. Des techniques telles que les norias, des roues à aubes actionnées par le courant d'une rivière, ont été utilisées pour puiser de l'eau des cours d'eau et l'acheminer vers les terres agricoles en hauteur. En Espagne, les Maures ont introduit des systèmes d'irrigation sophistiqués tels que les acequias, des canaux d'irrigation communautaires qui ont permis de cultiver des terres arides et semi-arides avec succès. Pendant la Renaissance, des avancées dans la cartographie et l'ingénierie hydraulique ont conduit à la construction de systèmes d'irrigation plus élaborés, tels que les aqueducs romains restaurés pour approvisionner les villes en eau potable et irriguer les terres agricoles environnantes (White 1962). Des manuscrits tels que "L'Art de l'irrigation" d'Al-Jazari ont documenté des techniques avancées telles que les systèmes de pompage à base d'eau, les norias et les techniques d'irrigation par aspersion (Külcü 2023). Pendant ce temps, les systèmes d'irrigation souterrains ont prospéré dans les oasis du Moyen-Orient, permettant la culture de luxuriantes dans des environnements désertiques. Dans le cadre de l'Algérie, selon Jean Salvano, ce sont les maures venus d'Andalousie qui ont introduit les systèmes d'irrigation par rigoles dans la culture des agrumes ; c'est Ahmed EL-Khebir au 16<sup>-ème</sup> siècle qui a réalisé le canal de la source (Fig.2) qui porte son nom et qui a fondé la ville de blida.



**Source :** <https://www.blidanostalgie.fr/oued/oued.htm>

**Figure 2.** Illustration du canal de la source El Khebir et le barrage au niveau de l'Oued

### **I.1.3 Révolution industrielle et modernisation**

La révolution industrielle a apporté d'importantes avancées technologiques qui ont révolutionné l'irrigation. L'invention de la pompe à eau a permis de puiser l'eau des nappes phréatiques et de la distribuer efficacement aux terres agricoles, tandis que les systèmes de canaux et de réservoirs ont été modernisés pour répondre à la demande croissante en eau. L'invention du pivot central dans les années 1940 par l'ingénieur américain Frank Zybach a révolutionné l'agriculture en permettant une irrigation précise et efficace sur de vastes étendues de terres agricoles (Al-agele 2020). Cette technologie, combinée à des avancées dans les systèmes de pompage, les canaux de distribution et les méthodes de régulation de l'eau, a permis d'augmenter considérablement les rendements agricoles dans de nombreuses régions du monde. Au 20e siècle, l'utilisation de l'irrigation par aspersion et goutte à goutte s'est répandue, offrant une irrigation plus précise et économique, ainsi qu'une meilleure gestion des ressources en eau (Evet et al. 2020).

### **I.1.4 Défis contemporains et innovations**

Malgré ses nombreux avantages, l'irrigation est confrontée à des défis majeurs à l'heure actuelle. La surutilisation des ressources en eau, la dégradation des sols due à une irrigation excessive et les préoccupations environnementales telles que la salinisation des sols sont autant de problèmes qui nécessitent une attention urgente. Pour faire face à ces défis, de nouvelles innovations sont développées. L'irrigation de précision, qui utilise des capteurs, des

drones et des systèmes informatiques pour optimiser l'utilisation de l'eau en fonction des besoins des cultures, gagne en popularité (Shaheb et al. 2022). De plus, des approches durables telles que l'irrigation à faible volume et la réutilisation des eaux usées sont de plus en plus adoptées pour préserver les ressources en eau et protéger l'environnement (Dimane et al. 2016)

## **I.2 Etat actuel de l'irrigation de précision dans le secteur agricole**

L'irrigation de précision est devenue un domaine d'intérêt croissant dans le secteur agricole en raison de son potentiel à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, à optimiser les rendements des cultures et à réduire les impacts environnementaux (Elkassar 2022). Selon ce dernier, il n'existe pas de définition universelle. Pour (Evans et al. 2006), ce terme signifie une quantité précise d'eau appliquée et/ ou d'engrais au moment opportun, mais uniformément à travers le champ. (Elkassar 2022) précise qu'elle implique l'application précise et exacte d'eau pour répondre aux besoins spécifiques des plantes individuelles ou des unités de gestion et minimiser l'impact environnemental négatif. Cependant d'après ce dernier, la définition acceptée par la gestion des ressources en eau (GRE) consiste à appliquer l'eau à la culture au bon moment, en bonne quantité, au bon endroit et de la bonne manière, aidant ainsi à gérer la variabilité des champs en matière d'eau et, par conséquent, à augmenter la productivité des cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau tout en réduisant les coûts énergétiques de l'irrigation. Ce qui permettra aux agriculteurs irriguant d'optimiser l'utilisation de l'eau et d'irriguer uniquement là où et quand cela est nécessaire.

### **I.2.1 Applications de l'irrigation de précision**

L'irrigation de précision englobe une gamme de technologies et de techniques visant à fournir de l'eau aux cultures de manière précise et efficace. Quelques-uns peuvent être considérés parmi les principales applications de l'irrigation de précision.

#### **- L'utilisation de capteurs d'humidité du sol (Fig. 3)**

Ce sont des dispositifs utilisés pour surveiller en temps réel les niveaux d'humidité du sol. Ces capteurs sont souvent intégrés dans le système d'irrigation et fournissent des données précises sur les besoins en eau des cultures. Ils permettent aux agriculteurs de déterminer le moment optimal pour l'irrigation, réduisant ainsi les gaspillages d'eau et améliorant l'efficacité de l'irrigation. Cela contribue à maintenir la santé des plantes et à maximiser les rendements.



Sources : Irrrometer, Geneq

**Figure 3.** Exemples de capteurs d'humidité du sol

- **L'emploi de systèmes d'irrigation localisée, tels que l'irrigation au goutte-à-goutte et l'irrigation par micro-aspersion (Fig. 4)**

Les systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte fournissent de l'eau directement aux racines des plantes, ce qui permet une utilisation plus efficace de l'eau et réduit les pertes par évaporation. Ces systèmes peuvent être contrôlés automatiquement en fonction des besoins spécifiques des cultures, ce qui améliore la précision de l'irrigation et les rendements des cultures (Skhiri 2017). Ils sont particulièrement bénéfiques dans les environnements arides et semi-arides comme la Mitidja, où les ressources en eau sont limitées et où il est essentiel de maximiser l'efficacité de l'irrigation.

Les systèmes d'irrigation par micro-aspersion fournissent de l'eau sous forme de fines gouttelettes, permettant une distribution uniforme sur la surface du sol. Ce qui est particulièrement bénéfique dans les vergers denses. Ils permettent aussi une couverture complète des racines des arbres, favorisant ainsi une croissance saine et des rendements élevés. Ces systèmes sont particulièrement efficaces pour les cultures sensibles au stress hydrique et peuvent être utilisés pour fournir des nutriments et des produits chimiques directement aux racines des plantes.

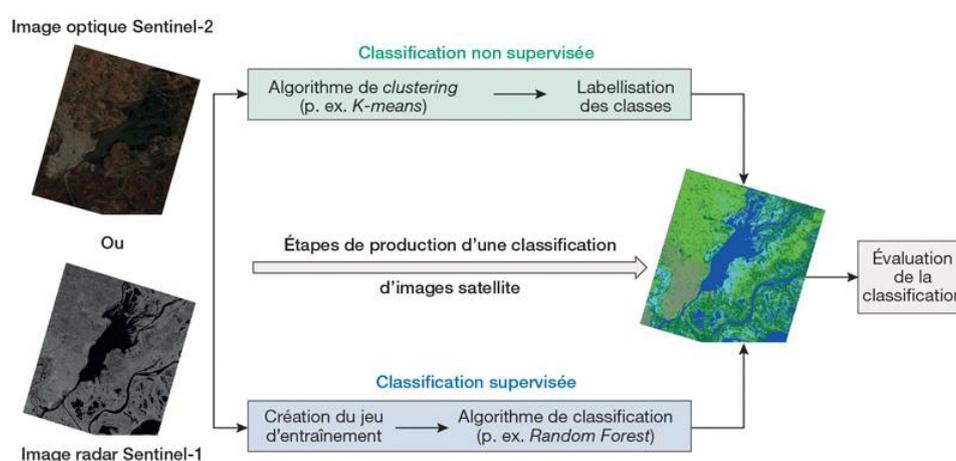


Sources: <https://fr.yby-irrigation.com/farm-irrigation-system/agriculture-drip-irrigation-pipe.html>; <https://www.adn-global.com/fr/services/le-systeme-darrosage-par-aspersion/>

**Figure 4.** Exemples de systèmes d'irrigation actuels

### - L'intégration de technologies de télédétection et de modélisation (Fig. 5)

La télédétection et la modélisation sont des technologies utilisées pour estimer les besoins en eau des cultures à partir de données météorologiques et de satellite. Ces techniques permettent aux agriculteurs de surveiller les conditions des cultures à grande échelle et de prendre des décisions éclairées en matière d'irrigation. En combinant ces données avec des modèles de croissance des cultures, il est possible de prédire les besoins en eau futurs et d'optimiser les stratégies d'irrigation.



Source : <https://books.openedition.org/quae/42759>

**Figure 5.** Exemple d'étape de traitement d'une image satellitaire en vue d'une modélisation

### - Techniques d'irrigation déficitaire contrôlé

Ce sont des techniques consistent à appliquer délibérément un stress hydrique contrôlé aux arbres pendant certaines périodes de leur cycle de croissance. Cela peut améliorer la qualité des fruits, augmenter la teneur en sucre, améliorer la résistance aux maladies, augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau tout en réduisant les coûts de production (Sabri et al. 2017; Morbidini et al. 2024).

### - Utilisation de techniques de paillage (Fig.6)

D'origine organique, minéral ou plastique, le paillage est une pratique courante dans de nombreuses cultures en général, et maraîchères en particulier à travers le monde. Cette technique consiste à couvrir le sol avec des matériaux organiques ou synthétiques pour réduire l'évaporation de l'eau, contrôler les mauvaises herbes et maintenir une température du sol plus stable (Telkar et al. 2017; Tankeuoo et al. 2023b, 2023a; Legba et al. 2024). Le paillage

contribue à économiser l'eau en réduisant les besoins en irrigation et en préservant l'humidité du sol, ce qui peut avoir un impact significatif sur les rendements et la qualité des cultures.



Sources :<https://atep-paysagiste.fr/paillage-vegetal-mineral.html>;

<https://blog.jardincouvert.com/paillage/quel-est-le-meilleur-paillage-pour-le-jardin/>

<https://elghallaplast.com/produits/paillage-agricole>

**Figure 6.** Quelques exemples de types de paillage

### **I.2.2 Situation de l'irrigation en général et de précision en particulier en Algérie, particulièrement dans la plaine de Mitidja**

D'après (Chabaca 2008), les modes gravitaire et localisé représentent les deux modes d'irrigation les plus répandus en Algérie dont celui localisé a connu un succès fulgurant à partir des années 2000. Le gravitaire prédomine sous une forme traditionnelle avec des micros raies de 5 à 10 m de long et des micros planches de 10 à 20 m<sup>2</sup> et des seguias (Chabaca 2004). Cependant dû au manque d'eau et d'une demande industrielle et urbaine accrue en eau, ce dernier est devenu défavorable (Imache et al. 2007). D'après (Chabaca 2008), peu de travaux ont été menés sur les performances des pratiques d'irrigation à l'échelle du périmètre, de l'exploitation et de la parcelle sur le plan technique et scientifique. Après avoir mené une étude sur la question dans la Mitidja Ouest, ce dernier à démontrer que ces deux modes sont exécutés de manière empirique. (RGA 2003) justifie d'une part son propos par le fait que plus de 60 % des chefs d'exploitations ont un faible niveau d'instruction. Aussi de cette même étude, il ressort que la gestion des ressources en eau dans la zone d'étude, est sujette à des contraintes techniques et organisationnelles liées à la conduite de l'irrigation. Malgré des infrastructures hydrauliques relativement récentes (mise en eau en 1986 pour le barrage Bouroumi), elle connaît des dysfonctionnements en matière de distribution vers les exploitations.

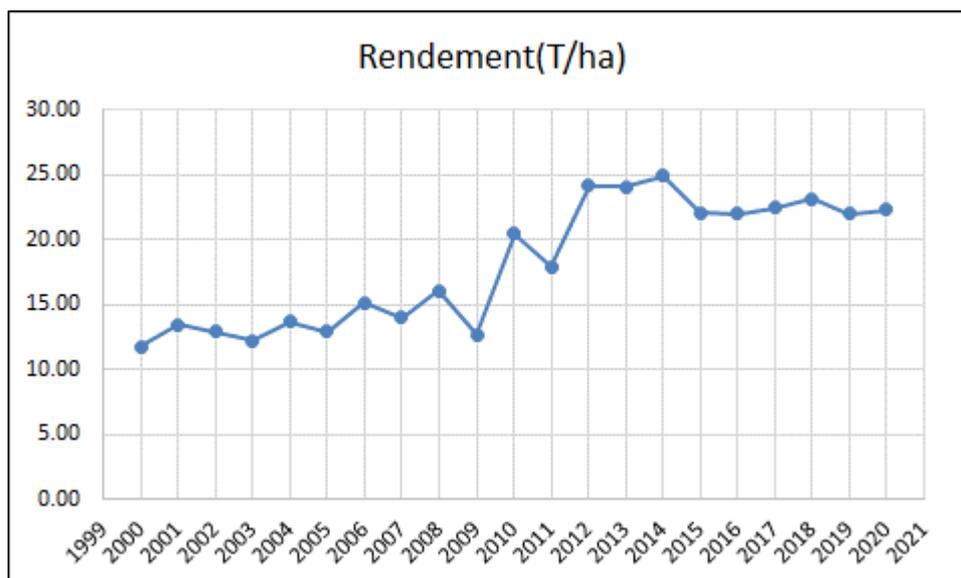
En Algérie, l'irrigation de précision est encore à un stade relativement précoce de développement, mais elle gagne en importance en raison de la nécessité croissante de maximiser l'utilisation efficace de l'eau dans l'agriculture. La plaine de la Mitidja, en raison de son importance agricole en tant que principal fournisseur de produits maraîchers pour les grandes villes algériennes, pourrait bénéficier de l'adoption de l'irrigation de précision. Les caractéristiques géographiques et climatiques de la région en font un candidat idéal pour l'utilisation de technologies telles que l'irrigation au goutte-à-goutte et la télédétection pour surveiller les besoins en eau des cultures de manière précise et efficace (Merdaci 2020)

### **I.3 Impacts de l'irrigation de précision sur les rendements et la gestion des ressources en eau**

L'irrigation de précision est devenue une pratique agricole de plus en plus répandue dans le monde entier, offrant de nombreux avantages en termes de rendements des cultures et de gestion efficace des ressources en eau.

#### **I.3.1 Augmentation des rendements agricoles**

L'adoption de techniques d'irrigation de précision a généralement entraîné une augmentation des rendements agricoles dans de nombreuses régions du monde. En fournissant aux cultures la quantité optimale d'eau au bon moment et au bon endroit. Les systèmes d'irrigation de précision permettent aux plantes de maximiser leur croissance et leur production de manière efficace. Des études ont montré que l'irrigation de précision peut augmenter les rendements des cultures de manière significative par rapport aux méthodes conventionnelles d'irrigation (Elkassar 2022; Yang et al. 2023). D'après la base de données de rendement de la Mitidja sur 20 ans (2000 – 2020) fournis par la DSA (Fig.7), les rendements sont compris entre 11.75 t/ha et 24, 93 t/ha.



Source : DSA

**Figure 7.** Rendement sur 20 ans des agrumes de la plaine de la Mitidja

### I.3.2 Réduction de la consommation d'eau

Un des avantages les plus importants de l'irrigation de précision est sa capacité à réduire la consommation d'eau tout en maintenant des rendements élevés. En fournissant de l'eau uniquement là où c'est nécessaire et en évitant les pertes par évaporation et le ruissellement, les systèmes d'irrigation de précision permettent une utilisation plus efficace de l'eau d'irrigation. Ce qui est particulièrement crucial dans les régions où les ressources en eau sont limitées ou menacées par la sécheresse, contribuant ainsi à assurer la durabilité de l'agriculture (Elkassar 2022; Yang et al. 2023).

### I.3.3 Amélioration de la qualité des sols

En plus d'optimiser l'utilisation de l'eau, l'irrigation de précision peut également contribuer à améliorer la santé et la qualité des sols agricoles. En évitant la sur-irrigation et le lessivage des nutriments, ces systèmes aident à prévenir la salinisation et l'accumulation de sels dans le sol, ce qui peut être néfaste pour la croissance des cultures. En conservant la structure du sol et en favorisant une meilleure infiltration de l'eau, l'irrigation de précision favorise un environnement plus propice à la croissance des plantes et la durabilité des terres agricoles (Elkassar 2022).

### **I.3.4 Réduction des impacts environnementaux**

En minimisant les pertes d'eau et en réduisant la dépendance aux ressources hydriques non renouvelables, l'irrigation de précision contribue à atténuer les impacts environnementaux associés à l'agriculture intensive, tels que la dégradation des sols, la déforestation et la surexploitation des ressources en eau. En adoptant des pratiques agricoles plus durables et économes en ressources, l'irrigation de précision joue un rôle crucial dans la préservation de l'environnement et la promotion de la durabilité agricole à l'échelle mondiale et locale (Evet et al. 2020; Elkassar 2022; Shaheb et al. 2022). Mais aussi sert à garantir la disponibilité continue des ressources naturelles pour les générations futures.

### **I.3.5 Défis e l'irrigation de précision**

Malgré ses nombreux avantages, l'adoption généralisée de l'irrigation de précision est confrontée à plusieurs défis. Quelques-uns sont illustrés par (Al-agele 2020):

- des coûts initiaux élevés associés à l'installation et à la maintenance des équipements d'irrigation de précision ;
- une courbe d'apprentissage pour les agriculteurs qui doivent s'adapter aux nouvelles technologies et aux changements dans leurs pratiques agricoles ;
- la nécessité d'une infrastructure de soutien, telle que des réseaux de communication et des centres de données, pour collecter, stocker et analyser les données sur l'irrigation.

## **I.4 Concepts fondamentaux des propriétés physiques du sol**

Plusieurs propriétés physiques du sol peuvent être considérées. Mais pour cette partie, quatre paramètres ont retenu notre attention, à savoir : l'humidité, la température, la conductivité électrique et l'infiltration de l'eau dans le sol. Ces paramètres sélectionnés ont un impact direct et immédiat sur la croissance des cultures et sur l'efficacité de l'irrigation. En effet, ils influencent directement la santé et la productivité des cultures. En plus, ces mesures sont souvent plus simples à surveiller et à corrélérer avec les pratiques agricoles, facilitant ainsi les ajustements en temps réel. Aussi dans un contexte d'irrigation, comprendre comment l'eau interagit avec le sol est crucial pour optimiser l'utilisation de l'eau et maximiser les rendements.

## **I.4.1 Humidité du sol**

### **1. Définition et importance de l'humidité du sol**

L'humidité du sol, également connue sous le nom de teneur en eau du sol, fait référence à la quantité d'eau présente dans le sol ou bien dans les pores du sol. Cette eau est cruciale pour la croissance des plantes, la régulation du climat et divers processus environnementaux. Elle influence également la structure et la composition du sol, ainsi que la biodiversité souterraine. C'est un élément clé pour surveiller la croissance de la végétation, prédire la production agricole et améliorer la gestion des ressources en eau (Zerouati 2014; Tankeuoo et al. 2022b). Sa mesure est une composante agronomique indispensable au suivi de la croissance des cultures, et est très utilisée en agriculture de précision (Camilli et al. 2007; Garcia-Sanchez et al. 2011; Thiébeau & Bertrand 2016). En effet, la connaissance précise de l'humidité du sol est essentielle pour optimiser l'irrigation, la fertilisation et la gestion des cultures. En utilisant des capteurs de sol et des techniques de télédétection, les agriculteurs peuvent cartographier les variations spatiales de l'humidité du sol et adapter leurs pratiques agricoles en conséquence, ce qui peut conduire à des économies d'eau, d'énergie et de ressources.

### **2. Processus et facteurs influant sur l'humidité du sol**

L'humidité du sol est influencée par plusieurs processus, notamment l'infiltration, la percolation, l'évaporation, la transpiration des plantes et le ruissellement. Les facteurs qui influent sur l'humidité du sol comprennent la texture du sol, la pente, la couverture végétale, le climat et les pratiques de gestion agricole.

### **3. Méthodes de mesure de l'humidité du Sol**

Plusieurs techniques sont utilisées pour mesurer l'humidité du sol, allant des méthodes traditionnelles telles que la pesée des échantillons de sol à des techniques avancées telles que la télédétection et les capteurs in situ. Les méthodes les plus couramment utilisées comprennent les sondes de capacitance, les tensiomètres, les neutromètres et les satellites radar. (Robinson et al. 2003) ont passé en revue les avancées dans la mesure de l'humidité du sol par réflectométrie temporelle. Les avancées récentes dans ce domaine comprennent l'utilisation de capteurs sans fil et de technologies de télédétection pour surveiller l'humidité du sol à distance (Zerouati 2014).

#### **4. Modélisation, prévision et implication de l'humidité du sol**

La modélisation de l'humidité du sol est essentielle pour la gestion des ressources en eau, la prévision des inondations et l'optimisation des pratiques agricoles. Des modèles numériques basés sur les équations de bilan hydrique du sol sont utilisés pour simuler et prévoir les variations spatiales et temporelles de l'humidité du sol. Par ailleurs, ce paramètre a des implications importantes pour la production agricole, la gestion des ressources en eau, la prévention des catastrophes naturelles et la conservation de l'environnement. Une gestion efficace de l'humidité du sol est cruciale pour assurer la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale.

##### **I.4.2 Température du sol**

###### **1. Définition et importance de la température du sol**

La température du sol est un paramètre fondamental qui influence de nombreux processus biophysiques et écologiques dans les écosystèmes terrestres. Elle se réfère à la mesure de la chaleur présente dans le sol à une profondeur donnée. Ce paramètre joue un rôle crucial dans la régulation des processus biologiques, chimiques et physiques du sol, notamment la croissance des plantes, la décomposition de la matière organique, et les réactions chimiques.

###### **2. Processus et facteurs influant sur la température du sol**

La température du sol est influencée par une variété de processus et de facteurs, notamment l'irradiation solaire, la couverture végétale, la texture du sol, la profondeur, la composition minérale, et la topographie. Des études telles que celles de (Cadavid et al. 1998; Valé 2007; Du et al. 2022) ont mis en évidence l'effet de la végétation et du paillage sur la régulation de la température du sol.

###### **3. Méthodes de mesure de la température du sol**

Plusieurs techniques sont utilisées pour mesurer la température du sol, allant des thermomètres manuels aux capteurs automatiques et aux méthodes de télédétection. Les thermistances et les thermocouples sont couramment utilisés pour les mesures in situ, tandis que les données satellitaires peuvent être utilisées pour estimer la température du sol à l'échelle régionale ou mondiale. Les développements récents incluent l'utilisation de réseaux de capteurs sans fil et de modèles de prévision météorologique pour surveiller et prédire les

variations de température du sol à l'échelle des exploitations agricoles. Ces approches permettent une prise de décision informée et réactive, favorisant ainsi une gestion efficace des cultures et des ressources.

#### **4. Implications de la température du sol**

La température du sol a des implications importantes pour de nombreux processus écologiques et agricoles, notamment la germination des graines, le développement des racines, et la disponibilité des nutriments pour les plantes. En agriculture de précision, la connaissance précise de la température du sol est essentielle pour optimiser les pratiques d'irrigation, en tenant compte des variations spatiales et temporelles de la température. Des études telles que celles de (Du et al. 2022) ont démontré l'impact de la température du sol sur l'efficacité de l'irrigation, soulignant l'importance de son suivi et de sa gestion.

##### **I.4.3 Conductivité électrique du sol**

#### **1. Définition et importance de la conductivité électrique du sol**

La conductivité électrique du sol est un paramètre important qui influence de nombreux processus physiques et chimiques dans les sols, ainsi que dans les domaines de l'agriculture, de l'environnement et de la géologie. La conductivité électrique du sol mesure la capacité du sol à conduire l'électricité. Elle dépend de la quantité d'eau, de la salinité, de la texture du sol et de la température. La conductivité électrique du sol est un indicateur important de la fertilité du sol, de sa salinité et de son état hydrique. Elle est largement utilisée dans l'agriculture de précision pour surveiller la disponibilité en eau, la salinité du sol et les propriétés chimiques du sol. Des travaux tels que ceux de (Costa et al. 2014) ont souligné l'importance de la conductivité électrique du sol dans la gestion de l'irrigation et la prévention de la salinisation des sols.

#### **2. Processus et facteurs influant sur la conductivité électrique du sol**

La conductivité électrique du sol est influencée par plusieurs facteurs, notamment la teneur en eau, la salinité, la texture du sol, la température et la présence de matière organique. Des études telles que celles de (Corwin & Lesch 2005) ont examiné les effets de la salinité du sol sur la conductivité électrique.

#### **3. Méthodes de mesure de la conductivité électrique du sol**

Il existe plusieurs techniques pour mesurer la conductivité électrique du sol, notamment les méthodes manuelles et les techniques instrumentales. Les méthodes manuelles

comprennent l'utilisation de sondes de conductivité et de kits de test de sol, tandis que les techniques instrumentales comprennent l'utilisation de capteurs électriques et de systèmes de cartographie géophysique. Des travaux tels que ceux de (Robinson et al. 2003) ont passé en revue les avancées dans la mesure de la conductivité électrique du sol par réflectométrie temporelle, tandis que (Corwin & Lesch 2005) ont comparé différentes méthodes de mesure de la salinité du sol. Les avancées récentes dans ce domaine comprennent le développement de capteurs innovants et de techniques de cartographie haute résolution pour évaluer la variabilité spatiale de la conductivité électrique du sol. Ces outils permettent une gestion précise de la salinité du sol, réduisant ainsi les pertes de rendement et les dommages aux cultures causés par le stress salin.

#### **4. Implications de la conductivité électrique du sol**

La conductivité électrique du sol a des implications importantes pour la gestion agricole, la protection de l'environnement et la géologie. En agriculture, elle est utilisée pour surveiller la disponibilité en eau, la salinité du sol et les besoins en fertilisation. En environnement, elle est utilisée pour surveiller la contamination des sols par des substances chimiques. En géologie, elle est utilisée pour étudier la composition et la structure des sols.

##### **I.4.4 Infiltration de l'eau dans le sol**

#### **1. Définition et importance de l'infiltration de l'eau dans le sol**

L'infiltration de l'eau dans le sol est un processus clé dans le cycle hydrologique qui influence la disponibilité en eau pour les plantes, la recharge des nappes phréatiques et le ruissellement. Elle se réfère à la pénétration de l'eau à travers la surface du sol. Sa caractérisation précise dans le sol est cruciale pour une gestion durable des ressources en eau et la prévention de l'érosion des sols. Selon (Philip 1957), l'infiltration du sol est un processus complexe influencé par la texture du sol, la structure, la pente et l'intensité des précipitations.

#### **2. Processus et facteurs influant sur l'infiltration de l'eau dans le sol**

L'infiltration de l'eau dans le sol est influencée par plusieurs facteurs, notamment la texture du sol, la structure, la couverture végétale, la pente du terrain et l'humidité antérieure du sol. L'infiltration est un processus important à prendre en compte en agriculture, car elle est l'une des composantes importantes du bilan hydrique du sol dans les zones semi-arides (Liao et al. 2021). En outre, des chercheurs (Oku & Aiyelari 2011) ont montré que les propriétés d'infiltration du sol peuvent être quantifiées en adaptant les données d'infiltration sur le terrain à l'infiltration modélisée. De même, une connaissance détaillée des taux et des

caractéristiques d'infiltration du sol peut accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation et réduire les pertes d'eau (Haghiabi et al. 2011).

### **3. Méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol**

Plusieurs techniques sont utilisées pour mesurer l'infiltration de l'eau dans le sol, allant des méthodes traditionnelles telles que les infiltromètres et les anneaux d'infiltration aux techniques avancées telles que la télédétection et la modélisation numérique. Les infiltromètres sont largement utilisés pour mesurer l'infiltration in situ (Tankeuoo et al. 2022a) tandis que les données satellitaires peuvent être utilisées pour estimer l'infiltration à grande échelle. Des travaux tels que ceux de (Mishra et al. 2003; Furman et al. 2006; Vand et al. 2018; Farid et al. 2019; Liao et al. 2021) ont développé plusieurs modèles pour déterminer le taux d'infiltration et ses caractéristiques. Des études récentes ont exploré l'utilisation de techniques avancées telles que la tomographie par résistivité électrique pour cartographier les propriétés hydrologiques du sol à différentes échelles spatiales. Ces approches permettent une évaluation détaillée de la distribution de l'eau dans le sol, facilitant ainsi la conception de pratiques d'irrigation et de conservation adaptées.

### **4. Implications de l'infiltration de l'eau dans le sol**

L'infiltration de l'eau dans le sol a des implications importantes pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture, l'ingénierie et l'environnement. En agriculture, elle influence le choix des pratiques d'irrigation et la planification des cultures. En ingénierie, elle affecte la stabilité des sols et la conception des ouvrages hydrauliques. Environnementalement, elle influence la recharge des nappes phréatiques et la qualité de l'eau des cours d'eau.

## **I.5 Besoins en eau d'une culture**

### **I.5.1 Définition et facteurs influencent les besoins en eau d'une culture**

Souvent appelé besoin hydrique, le besoin en eau d'une culture, représente la quantité d'eau nécessaire à une plante pour réaliser son cycle végétatif complet, de la germination à la récolte, dans des conditions climatiques données et en l'absence de stress hydrique (Skhiri 2017). Ce besoin est exprimé en millimètres (mm) et correspond à une hauteur d'eau évaporée et transpirée par la plante et le sol sur une surface donnée (FAO 1998; da Silva 2017). On parle d'évapotranspiration, qui se décompose en évaporation (perte d'eau du sol par évaporation directe) et transpiration (perte d'eau de la plante par les stomates des feuilles).

Il est important de noter que le besoin en eau d'une culture n'est pas une valeur fixe. En effet, plusieurs facteurs influencent sur sa valeur. Il s'agit entre autres du:

- type de plante ou chaque espèce a ses propres besoins en eau en fonction de sa physiologie et de son cycle de développement ;
- climat prenant en compte la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire influencent directement l'évapotranspiration ;
- stade de développement de la plante ou les besoins en eau sont plus importants pendant les phases de croissance végétative et de floraison ;
- type de sol constitué de la texture et la structure du sol influencent sa capacité à retenir l'eau ;
- pratiques culturales ou le travail du sol (labourage), le paillage ou encore la densité de plantation peuvent influencer l'évaporation et la transpiration.

D'après (Boudjelel A. 2006) le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration. Les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les engrais, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le taux d'évapotranspiration.

Le fait de connaître le besoin en eau d'une culture est essentiel pour l'optimisation de l'irrigation en apportant juste la quantité d'eau qu'il faut au bon moment en évitant le gaspillage ; l'amélioration des rendements tout en assurant un développement optimal des plantes et maximiser la production ; enfin préserver les ressources en eau en gérant l'eau de manière durable et responsable.

Différentes méthodes existent pour estimer le besoin en eau d'une culture, allant de méthodes expérimentales (Lysimètres, bac d'évaporation classe A, évaporomètre de Piche, débitmètre de sève, chambre de transpiration, capteurs d'humidité, tensiomètre, etc) aux modèles empiriques (méthode Penman Monteith, modèle FAO – 56, modèle de Blaney-Criddle, modèle Aquacrop, modèle CropSyst, etc). D'après (Merdaci 2020), la méthode expérimentale nécessite du matériel coûteux et parfois une certaine maîtrise pour aboutir à des résultats fiables. A côté de ces méthodes expérimentales de mesure, plusieurs méthodes (modèles) d'estimation ont été développées pour la détermination de l'évapotranspiration à l'échelle locale pour une surface homogène (en termes de culture, de conditions édaphiques et météorologiques). Dans le cadre de l'étude, l'approche analytique de Penman-Monteith couplé aux sondes capacitatives et TDR ont été employées.

La formule de Penman-Monteith, qui est la plus utilisée dans le monde, se distingue parmi les différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétal. Dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'experts opérants dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence.

### **I.5.2 Besoins en eau des agrumes**

Les agrumes font parties des cultures importantes dans l'agriculture mondiale, avec des besoins en eau spécifiques pour assurer leur croissance et leur rendement optimal. Les besoins en eau des agrumes varient selon les différentes variétés, mais les orangers (*Citrus sinensis*) sont parmi les espèces les plus importantes sur le plan économique dans de nombreuses régions du monde. Outre les orangers, d'autres agrumes comme les citrons (*Citrus limon*), les mandarines (*Citrus reticulata*), les pamplemousses (*Citrus paradisi*), et les citrons verts (*Citrus aurantiifolia*) ont également leurs propres besoins en eau distincts. Cependant, l'accent dans cette étude est mis sur les orangers spécifiquement.

#### **1 Besoins en eau des orangers (*Citrus sinensis*) durant ses différentes phases de développement**

D'après (Heitz et al. 2011), les besoins en eau des orangers varient au cours des différentes étapes de leur cycle de développement (Fig. 8).

- **Germination**

Les graines d'oranger nécessitent un sol constamment humide pour germer. L'humidité est cruciale pour permettre l'absorption de l'eau par les graines, favorisant ainsi la germination. A ce stade les besoins en eau sont élevés.

- **Plantule**

A ce stade, les plantules ont besoin d'un arrosage régulier pour soutenir la croissance des racines et des feuilles. Le sol doit être maintenu humide mais non détrempé pour éviter la pourriture des racines. Quant aux besoins en eau, ils sont modérés à élevés.

- **Jeune arbre**

Les jeunes arbres nécessitent un arrosage fréquent mais moins intensif que les plantules. Le sol doit être bien drainé pour éviter l'accumulation d'eau autour des racines. Une irrigation régulière est essentielle pour favoriser un bon enracinement et une croissance vigoureuse des jeunes arbres d'orangers.

- **Arbre mature**

Les arbres matures ont des systèmes racinaires plus développés et nécessitent un arrosage profond et régulier. Les besoins en eau sont modérés à élevés à ce stade. En effet, ils peuvent varier en fonction du stade de développement de l'arbre, de la variété, du climat et du type de sol

- **Floraison**

Pendant la floraison, les besoins en eau augmentent pour soutenir la production de fleurs et donc sont élevés. Un déficit hydrique à ce stade peut réduire la floraison et affecter la future production de fruits. Une irrigation adéquate est nécessaire pour soutenir la croissance des fruits et éviter le stress hydrique, qui peut entraîner une diminution de la production et une baisse de la qualité des fruits.

- **Fructification**

La période de développement des fruits nécessite un arrosage régulier et abondant pour assurer une bonne croissance des fruits et éviter leur chute prématurée

- **Récolte**

Juste avant la récolte, les besoins en eau peuvent être réduits légèrement pour améliorer la concentration des sucres dans les fruits, mais il est crucial d'éviter un stress hydrique excessif qui pourrait nuire à la qualité des fruits.

- **Repos végétatif**

Pendant la période de repos ou de croissance ralentie, les besoins en eau diminuent. Cependant, un arrosage léger et régulier est encore nécessaire pour maintenir la santé des racines et préparer l'arbre pour le prochain cycle de croissance.



**Source :** <https://www.shutterstock.com/fr/image-vector/life-cycle-orange-tree-stages-growth-1184487340>

**Figure 8.** Cycle de vie de l'oranger. Etapes de croissance de la semence et de la germination à la plante adulte avec des fruits

## **2. Facteurs influençant les besoins en eau des orangers**

- **Conditions environnementales**

Les conditions environnementales telles que la température, l'humidité relative, la luminosité et la disponibilité en eau dans le sol ont un impact significatif sur les besoins en eau des orangers. Par exemple, des températures élevées et une faible humidité peuvent augmenter l'évapotranspiration, ce qui entraîne une augmentation de la demande en eau de la plante. Aussi les orangers peuvent être sensibles à certaines maladies telles que le cancer des agrumes et la pourriture des racines, affectant la capacité des arbres à absorber l'eau. De plus, la salinité du sol peut également affecter la disponibilité en eau pour les orangers, en réduisant la capacité des plantes à absorber l'eau.

- **Type de sol**

La texture et la composition du sol affectent la capacité de rétention d'eau et la perméabilité, ce qui influence la disponibilité en eau pour les racines des orangers. Les sols sableux ont généralement une capacité de rétention d'eau plus faible que les sols argileux, ce qui peut nécessiter une irrigation plus fréquente.

- **Système racinaire**

La profondeur et la densité du système racinaire des orangers peuvent influencer leurs besoins en eau. Un système racinaire bien développé permet à la plante d'exploiter efficacement l'eau disponible dans le sol.

- **Variété**

Différentes variétés d'orangers peuvent présenter des profils de réponse à l'eau différents. Certaines variétés peuvent être plus tolérantes à la sécheresse que d'autres.

- **Pratiques de gestion agronomiques**

Des facteurs tels que la densité de plantation, la taille des arbres, la fertilisation et la gestion de l'irrigation peuvent également influencer les besoins en eau des orangers.

### **I.5.3 Besoins en eau des cultures maraîchères**

Les besoins en eau des cultures maraîchères, telles que les tomates, sont cruciaux pour assurer des rendements optimaux et une qualité de production élevée.

## 1. Besoins en eau des tomates

Selon (BEN HAMMADI et al. 2023), les besoins en eau des tomates évoluent au cours des différentes étapes de leur cycle de développement (Fig. 9).

### - Stade de la germination et de la croissance initiale

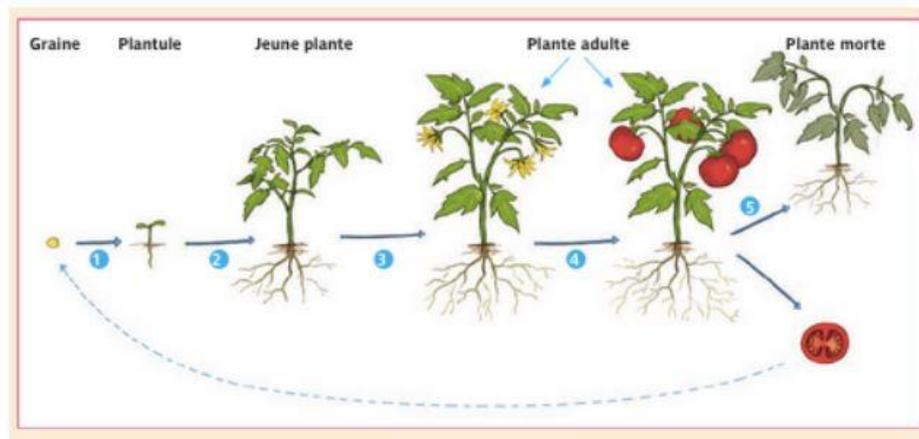
Pendant cette phase, les besoins en eau sont élevés pour soutenir l'établissement des racines et la croissance végétative. Une irrigation régulière et suffisante est essentielle pour assurer un bon enracinement et une croissance vigoureuse des plants de tomates.

### - Stade de la floraison

Au fur et à mesure que les plantes de tomates entrent dans la phase de floraison, les besoins en eau augmentent pour soutenir le développement des fleurs. Une irrigation adéquate est nécessaire pour garantir une pollinisation efficace et une formation de fruits optimale.

### - Stade de la fructification

La phase de fructification est une période critique pour les besoins en eau des tomates. Les plantes ont besoin d'une quantité suffisante d'eau pour soutenir la croissance et le développement des fruits. Un stress hydrique pendant cette période peut entraîner une diminution du rendement et une altération de la qualité des fruits.



**Source** :<https://bloc-note.ac-reunion.fr/9740338z/files/2020/04/Le-cycle-de-vie-des-ve%CC%81ge%CC%81taux.pdf>

**Figure 9.** Cycle de vie de la tomate.

## 2. Facteurs influençant sur les besoins en eau des tomates

Les besoins en eau des tomates sont influencés par plusieurs facteurs, qui peuvent être regroupés en facteurs environnementaux, génétiques et agronomiques.

- **Conditions environnementales**

Les conditions environnementales telles que la température, l'humidité relative, la luminosité et la disponibilité en eau dans le sol jouent un rôle crucial dans la détermination des besoins hydriques des tomates. Par exemple, les températures élevées peuvent accroître l'évapotranspiration des plantes, augmentant ainsi leurs besoins en eau. De même, une humidité relative basse peut entraîner une transpiration accrue des feuilles, nécessitant une augmentation de l'apport en eau pour maintenir l'homéostasie hydrique de la plante.

Les tomates peuvent être sensibles à différentes maladies et stress environnementaux, qui peuvent être exacerbés par un excès ou un déficit d'eau. Les maladies fongiques comme le mildiou peuvent se développer plus rapidement dans des conditions d'humidité élevée, ce qui peut affecter la capacité de la plante à absorber et à utiliser l'eau de manière efficace. Une gestion prudente de l'irrigation et des pratiques culturales peut contribuer à réduire le risque de maladies et à maintenir la santé des plantes.

- **Conditions génétiques**

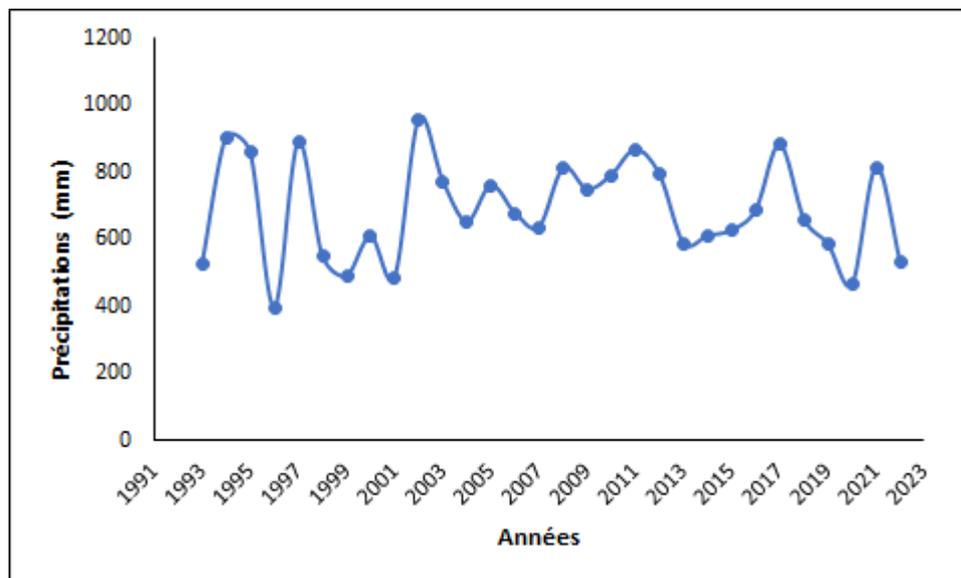
En ce qui concerne les facteurs génétiques, différentes variétés de tomates peuvent présenter des profils de réponse à l'eau différents. Certaines variétés peuvent être plus tolérantes à la sécheresse, tandis que d'autres peuvent être plus sensibles à un stress hydrique prolongé. Ces différences génétiques peuvent influencer la capacité des plantes à réguler leur utilisation de l'eau et donc leurs besoins en irrigation.

- **Conditions agronomiques**

Sur le plan agronomique, des pratiques de gestion telles que la densité de plantation, la fertilisation et la gestion de l'humidité du sol peuvent également influencer les besoins en eau des cultures de tomates. Par exemple, une densité de plantation plus élevée peut entraîner une compétition accrue pour les ressources hydriques entre les plantes, nécessitant ainsi une augmentation de l'irrigation pour compenser.



et à mesure que l'on s'éloigne du littoral, le climat devient de plus en plus continental et l'on enregistre une baisse sensible des températures. Les données climatiques (1971-2010) obtenues à partir de l'Agence Nationale de Recherche Hydraulique (ANRH 2015) *in* (Mokadem 2016) montrent que la zone d'étude reçoit une lame d'eau d'environ 616,1 mm par an, dont 84,7 % s'évaporent, 2,63% s'infiltrent et 12.67% s'écoulent. Les mois d'octobre à mars constituent la période la plus pluvieuse, tandis que les précipitations sont presque nulles pendant les trois mois d'été. La température moyenne annuelle varie de 16,1 à 18 °C. D'après les données de l'(ANRH 2012) *in* (Mokadem 2016), les valeurs maximales de température sont atteintes au mois de juillet et celles de l'humidité de sol au mois de septembre ; par ailleurs, décembre représente le mois où les valeurs de température et d'humidité sont minimales. Les données pluviométriques (1993 – 2022) traitées de la station de Soumaa uniquement (Fig.11) montrent que la pluviométrie moyenne annuelle est de 687,92 mm.



Source : ANRH

**Figure 11.** Données pluviométriques annuelles de la station de Soumaa

### II.1.3 Hydrographie

D'après (ANRH 2012, 2015) *in* (Mokadem 2016), la plaine de la Mitidja (Fig. 12) est traversée par six importants oueds qui assurent le drainage des bassins versants montagneux de la chaîne de l'Atlas. Nous rencontrons d'Est en Ouest les oueds : Hamiz, Djemaa, El Harrach, Chiffa, Bouroumi, Djer. En aval de la plaine de la Mitidja, l'oued Bouroumi et l'oued Chiffa confluent pour former l'oued Mazafran. L'oued Harrach rencontre l'oued Djemaa dans les environs de Baba Ali. A l'Est de l'oued Hamiz, s'écoule l'oued Reghaia qui est considéré

comme secondaire. Les oueds mentionnés ci-dessus sont en grande partie en liaison hydraulique avec la nappe de la Mitidja puisque leurs eaux peuvent s'infiltrer ou inversement drainer la nappe. La plaine est partagée en quatre bassins fluviaux : celui de l'oued Nador, de l'oued Mazafran, de l'oued Harrach et du Hamiz. Alors que la plaine s'allonge dans une direction d'Est - Ouest, ces derniers la traversent perpendiculairement selon des directions méridiennes.

La région qui encadre la plaine de la Mitidja est divisée en trois bassins versants principaux : le bassin Chellif à l'Ouest et au Sud, le bassin de l'oued Isser à l'Est et le bassin de la Mitidja au centre.

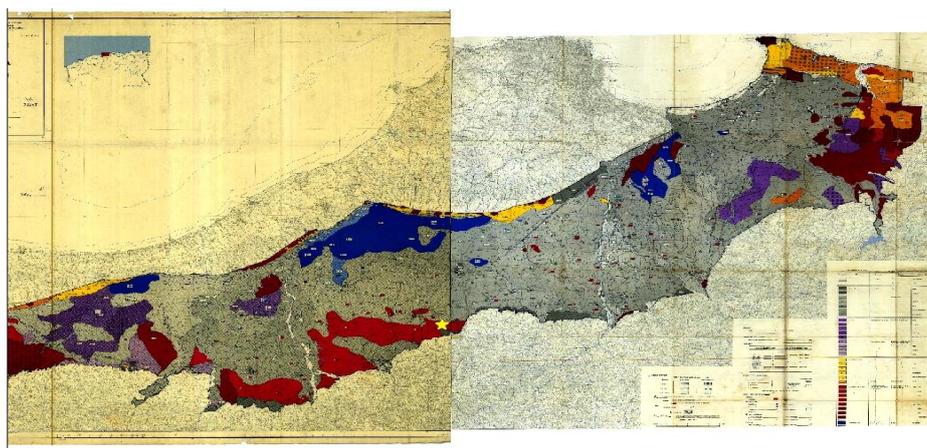


Source : ANRH, 2013 in Mokadem, 2016

Figure 12. Chevelure hydrographique et stations météorologique

#### II.1.4 Agronomie, topographie et sols

Le relief plat et les conditions climatiques très favorables en font une excellente région agricole d'une superficie de 129000 ha (Imache et al. 2007; Mokadem 2016). Cette dernière est considérée comme l'une des régions les plus fertiles d'Algérie, (Imache et al. 2007; Mokadem 2016). Elle est favorable aux différentes cultures telles que : agrumes, arbres fruitiers, maraîchages en terrains irrigués, vignes, tabac. La topographie est généralement plane, avec une pente faible d'environ 0,5%, et peut atteindre 2 à 5% sur les cônes de déjection (Djouadar - Hallal 2003). Dans cette plaine, les sols sont en grande majorité d'apport alluviaux et colluviaux (Chabaca 2007). Les études menées par plusieurs chercheurs (Ecrément 1971; Mutin 1977) ont permis de distinguer cinq (05) classes de sols (Fig.13). Il s'agit des sols bruns (71%), des sols à sesquioxyde de fer (14%), des sols hydromorphes (7%), des vertisols (6%) et des sols carbonatés (2%).



**Figure 13.** Carte pédologique réalisée par Ecrément et Seghir en 1972 à une échelle de 1/50000

### **II.1.5 Végétation**

Mitidja est une région agricole très intensive de l'Algérie, en raison de sa topographie et de sa fertilité (Mehdi 2017). Dans cette région, la végétation est dominée par de terres agricoles où prédominent l'arboriculture fruitière, la vigne, les maraîchages, les céréales, les légumes, les amandes, etc. Elle représente aussi le centre de production des fruits et légumes pour toute la capitale d'Alger (Imache et al. 2007). Au Sahel, on y trouve plusieurs forêts.

### **II.1.6 Géologie et hydrogéologie**

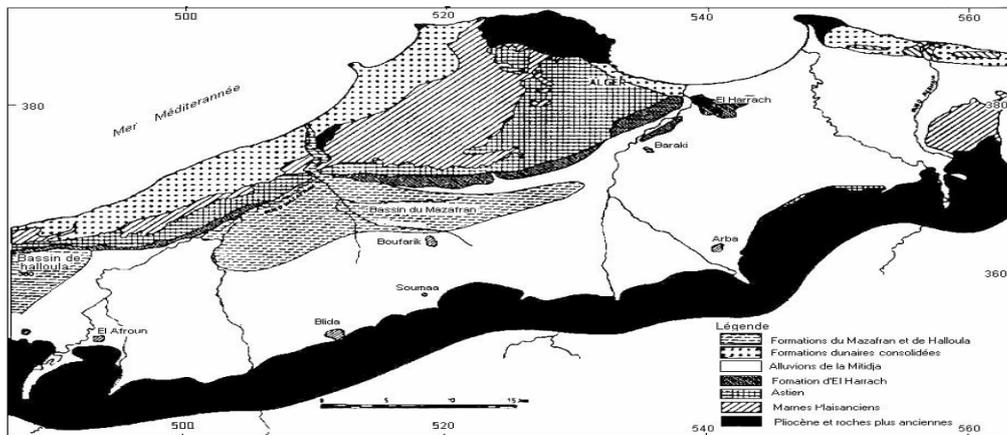
Des chercheurs (Coiffait 1992; Aris 1994) ont travaillé sur la géologie de l'Algérie et par la même occasion sur celle de la Mitidja. Il ressort qu'elle est divisée en deux unités tectoniques majeures, séparées par la faille Sud atlasique :

- le Nord de l'Algérie (domaine atlasique), qui a été fortement affecté par la tectonique alpine ;
- la plate-forme saharienne dans le Sud de l'Algérie (domaine saharien), relativement stable et où l'impact de la tectonique est moins prononcé.

Pour des raisons de site d'étude, nous allons se concentrer uniquement dans le domaine nord atlastique (Fig.14). Ce domaine est défini par les caractéristiques géologiques Ouest – Est suivantes :

- Au sud, la chaîne montagneuse de l'Atlas saharien d'origine alpine
- Au centre, les plate-formes, y compris la Meseta oranaise à l'Ouest et le Mole d'Ain Regada à l'Est

- Au nord, l'Atlas tellien, une zone complexe composée de nappes tectoniques mises en place pendant le Miocène. Des bassins sédimentaires néogènes tardifs, tels que le Chelif et le Hodna, se sont formés sur ces nappes tectoniques du Miocène.



**Source :** Mac Donald et Partners, 1992 *in* (Djouidar - Hallal 2003)

**Figure 14.** Carte géologique de la Mitidja

La synthèse des travaux hydrogéologiques effectuée par (Chabour et al. 2018) menée dans le domaine nord de l'Algérie révèle que l'histoire tectonique complexe a segmenté les principales unités géologiques du Mésozoïque au Cénozoïque, ce qui a donné lieu à un nombre important d'unités d'aquifères compartimentées relativement petites et spatialement limitées. Il existe trois principaux types d'aquifères : (1) les aquifères sédimentaires cénozoïques récents et quaternaires non consolidés dans la plaine côtière ; (2) les aquifères de grès et de calcaire mésozoïques-cénozoïques dans les zones montagneuses ; et (3) les aquifères alluviaux dans les vallées des rivières. Au niveau régional, les aquifères importants sont très fragmentés. Les aquifères les plus importants sont les aquifères du Hodna et Chott Chergui de l'Atlas Saharien et l'aquifère côtier de la Mitidja et Annaba-Bouteldja

### II.1.7 Aspect socio-économique

L'économie de la Mitidja est basée principalement sur les industries et l'agriculture. D'après le service pédologique (Mehdi 2017), les principales unités industrielles sont concentrées en grande partie dans les wilayas d'Alger (la plus dominante), de Blida et de Boumerdes et sont classées polluantes. L'activité industrielle est répartie principalement en : Agro-alimentaire, tabac, chimie plastique, pharmacie, matériaux de construction, construction mécanique, sidérurgie, métallurgie et textiles. La majorité des activités industrielles est regroupée au Centre et à l'Est de la plaine (l'Arbaa, Rouiba, Blida, El-Harrach, Boufarik)

avec des pôles industriels de Rouiba et de Réghaia. Quant'à la partie Ouest de la plaine, on constate la prédominance des activités agricoles et des animaux par rapport aux activités industrielles (Mehdi 2017). Rappelons que les activités agricoles les plus répandues sont l'arboriculture et les cultures maraîchères (Imache et al. 2007).

## **II.2 Matériels et méthodes**

Pour mener à bien cette étude, les travaux ont été menés aussi bien sur le site expérimental qu'en laboratoire en utilisant plusieurs méthodes et instruments.

### **II.2.1 Choix du site d'étude**

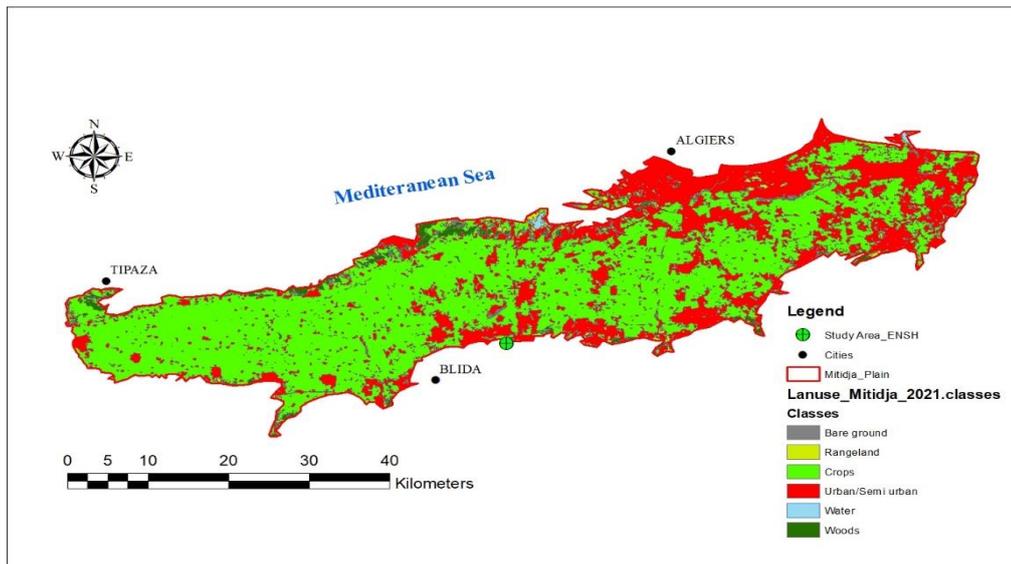
Le support principal de tout travail de recherche en irrigation est notamment le site d'étude. Il a pour objectif de nous orienter ou encore de nous fournir des limites par rapport à l'obtention des données sur le terrain. Le choix de ce site a été conditionné par les critères suivants la :

- présence d'une activité économique fortement dominé par l'agriculture ;
- fertilité de son sol ;
- proximité de la capitale, son accessibilité, et la facilité de transport de la marchandise grâce au réseau routier qui l'entoure ;
- Climat favorable aux cultures ;
- diminution de ses ressources en eau suite à la croissance démographique, l'augmentation des périmètres irrigués et les épisodes de sécheresse qui sont sans cesse grandissantes ;
- utilisation par les agriculteurs des films plastiques comme paillage au lieu du paillis organique ;
- diversité des cultures appliquées (agrumes, cultures maraîchères).

### **II.2.2 Description de la parcelle ainsi que des cultures sélectionnées**

La parcelle de cette étude est située dans l'enceinte de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH) de Blida, dans la plaine de la Mitidja (Fig.15). Cette localisation offre un environnement contrôlé et accessible pour mener des recherches sur l'agriculture et la gestion de l'eau. Réalisé en 1984, elle a une superficie totale de 6000 m<sup>2</sup> dont 240 m<sup>2</sup> est réservée à la serre. Elle comprend 180 arbres fruitiers dont 25 sont alloués aux orangers (*Citrus sinensis*). La variété d'oranger plantée dans le site est de type « Thomson » dont la

datation est inférieure à 6 ans. Pour ce qui est des tomates (*Solanum lycopersicum*), la variété plantée au cours de l'expérimentation est 'Bahdja F1'.



**Figure 15.** Localisation de la parcelle expérimentale et occupation des sols de la plaine de Mitidja

- **Orangers**

Dans la plaine de la Mitidja, plusieurs variétés d'oranger sont cultivées en raison de ses conditions climatiques favorables, dont les plus courantes sont notamment : Navel, Valencia, Bergamote, Thomson. Pour cette étude le choix s'est porté sur la dernière variété à savoir « Thomson ». Effectivement, la variété Thomson de l'orange, également connue sous le nom de « Thomson Navel », est une mutation de la célèbre « Washington Navel » découverte en Californie. Cet agrume de taille moyenne à grande produit des fruits ronds ou légèrement ovales, reconnaissables à leur écorce orange vif, épaisse et rugueuse, facile à peler (Fig.16). Les fruits de la Thomson Navel sont sans pépins, avec une pulpe juteuse et sucrée, offrant une saveur douce et bien équilibrée en acidité. Adaptée aux climats méditerranéens et subtropicaux, cette variété nécessite un sol bien drainé et une irrigation régulière. Très appréciée pour la consommation fraîche, la Thomson Navel est également idéale pour la production de jus, grâce à sa saveur riche et son abondance de jus.



**Figure 16.** Illustration de l'arbre et fruits de la variété d'orange Thomson

- **Tomate**

Plusieurs variétés de tomates sont cultivées en Algérie et plus précisément dans la plaine de la Mitidja parmi lesquelles on a peut citer par exemple celles de Toubkal, Cœur de Pigeon, Bahdja...Il faut dire que notre choix s'est porté sur la variété « Bahdja » pour des raisons d'ordre climatique et rendement principalement. En effet, la variété de tomate "Bahdja F1" (Fig.17) est une tomate hybride prisée pour sa robustesse et sa productivité élevée. Cet hybride se distingue par ses fruits de taille moyenne à grande, de forme ronde et de couleur rouge vif, uniformément répartis sur la plante. Les tomates Bahdja F1 sont appréciées pour leur goût sucré et légèrement acidulé, avec une texture ferme et juteuse. Adaptée à une large gamme de climats, cette variété montre une résistance notable à plusieurs maladies courantes des tomates, telles que le mildiou et la fusariose, ce qui en fait un choix fiable pour les jardiniers amateurs et les producteurs professionnels. Les plants de Bahdja F1 sont vigoureux, avec un feuillage dense qui protège bien les fruits du soleil, et ils nécessitent un soutien adéquat pour gérer la charge de leurs nombreuses grappes de tomates. Cette variété est idéale pour la consommation fraîche en salade, mais elle convient également parfaitement à la cuisson et à la transformation en sauces, grâce à sa chair savoureuse et à sa teneur équilibrée en jus.



Source : variété: <https://www.aci-algerie.com/tomate/>)

**Figure 17.** Illustrations plante (gauche) et variété de fruits de tomates (droite)

### II.2.3 Instruments de mesure et technologies utilisées pour l'irrigation de précision au cours de l'étude

#### 1. Station météorologique

Dans le site expérimental, une station météorologique automatique de marque Aquafox, entièrement équipée a été installée (Fig.18). Afin d'enregistrer les données climatiques de température, d'humidité de l'air, de pluviométrie, de vitesse du vent et de radiation solaire toutes les 10 min.

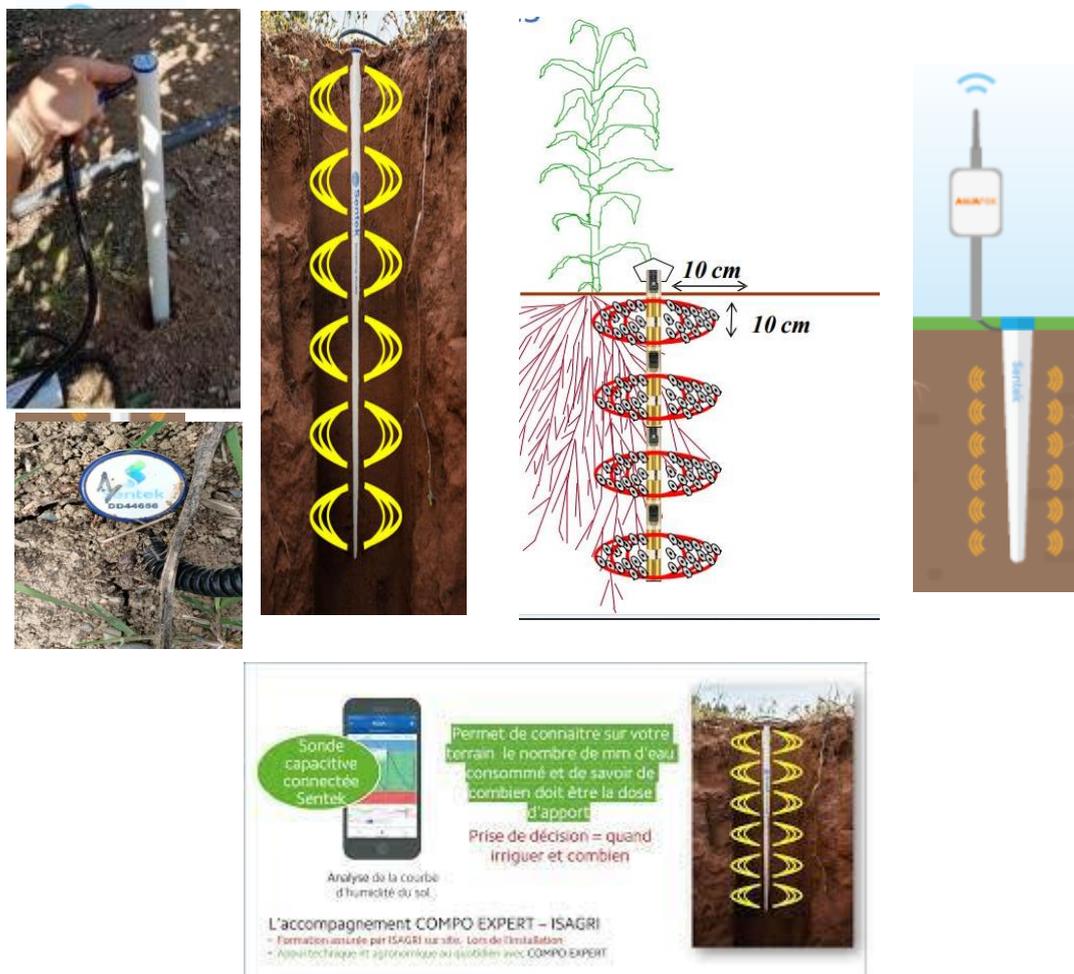


**Figure 18.** Station météorologique automatisée installée in – situ (à gauche), avec à droite, ses différents paramètres climatiques présentés et leurs lectures sur le site Aqualis

#### 2. Sondes capacitives

De marque SENTEK et de forme conique (Fig.19), ses sondes sont constituées de plusieurs capteurs. Elles mesurent à la fois directement en millimètres (mm), la teneur en eau

du sol (SWC) et la température dans le sol tous les 10 cm de profondeurs à chaque 10 min. Aussi, elles permettent de mesurer la consommation réelle de la plante toutes les 10 min. Ces sondes fonctionnent suivant le principe en relation avec la variation de la constante diélectrique. Dans le cadre de notre étude, ce sont les sondes de 85 cm de profondeur qui ont été installés à 25 cm d'écart entre la plante et la sonde au vu du type de système d'irrigation utilisé, le type d'arbre fruitier et du type de sol. Installer uniquement au sein des orangers, elles ont nécessité des trous d'environ 7 cm de diamètre permettant une installation facile en minimisant la perturbation du sol. Relier au boîtier de la station météorologique, ce dispositif permet de suivre la variation de l'eau et de la température en profondeur via l'application Aqualis développée par la société Agralis (Fig.19).



Source : Agralis

**Figure 19.** Sonde SENTEK installée en champ avec description de différents capteurs et suivi du pilotage d'irrigation à distance depuis son portable Android

### 3. TDR (Time Domain Reflectometer)

De marque Spectrum, le TDR 150 (Fig.20) est un appareil très utilisé en irrigation de précision pour mesurer principalement la teneur en eau volumique dans le sol (VWC) mais aussi la température (T) et la conductivité électrique du sol (CE) au même moment, à des profondeurs de 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm. Le principe de cet appareil consiste à mesurer le temps de parcours d'une onde électromagnétique le long d'un guide d'ondes. La vitesse de l'onde dans le sol dépend de la permittivité diélectrique globale ( $\epsilon$ ) de la matrice du sol. Le fait que l'eau ( $\epsilon = 80$ ) ait une constante diélectrique beaucoup plus élevée que l'air ( $\epsilon = 1$ ) ou les solides du sol ( $\epsilon = 3-7$ ) sont exploités pour déterminer la VWC, CE et T du sol. La valeur de chacun des paramètres mesurés par le TDR, est une moyenne sur la longueur du guide d'ondes.



**Figure 20.** Présentation et mesure de l'état du sol avec le TDR 150 aux pieds des tomates

### 4. Irrimax

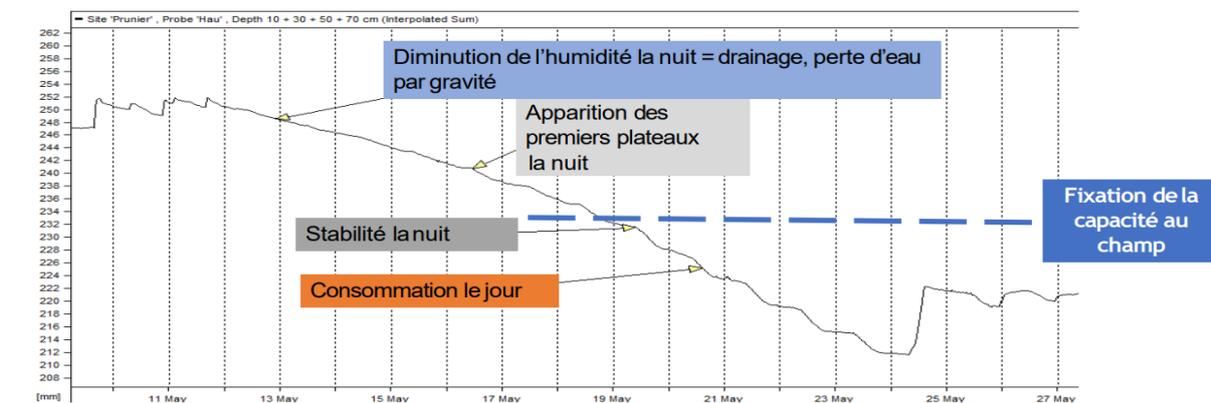
Développé par la société SENTEK, c'est un logiciel innovant (Fig.21) conçu pour optimiser la gestion de l'irrigation en fournissant des recommandations précises et personnalisées aux agriculteurs. En intégrant des données météorologiques, des données sur le sol et des données sur la culture, Irrimax permet aux agriculteurs de surveiller et de contrôler efficacement l'irrigation de leurs vergers. Grâce à des algorithmes avancés, le logiciel analyse en temps réel les besoins en eau des cultures et génère des programmes d'irrigation adaptés, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des ressources en eau et à des rendements agricoles accrus.



Source : Agralis

Figure 21. Exemple de fenêtre de Irrimax, version 10.1.5

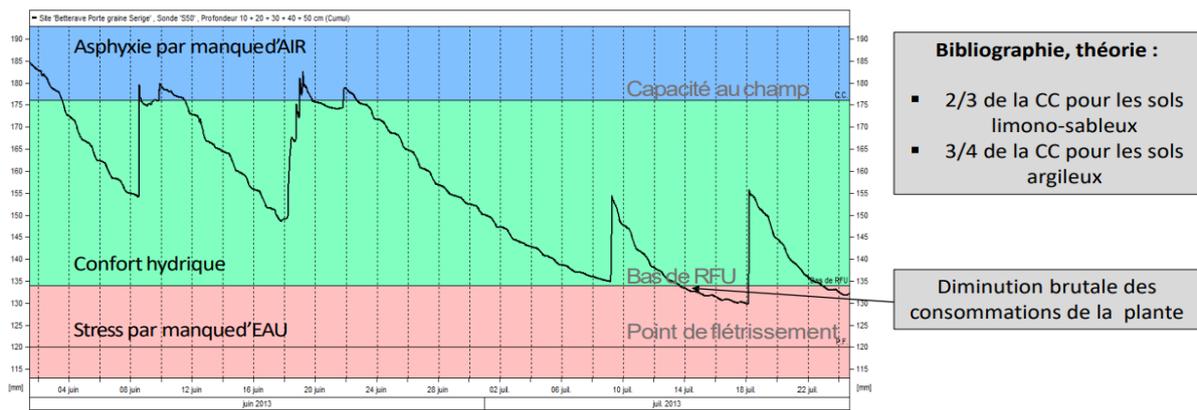
La fixation des seuils de capacité au champ (CC) et bas de la réserve facilement utilisable ( $B_{RFU}$ ) s'est effectuée par analyse des courbes (Fig.22). Cette analyse consiste à observer une stabilité de l'humidité dans le sol la nuit après une pluie ou une irrigation.



Source : Agralis

Figure 22. Courbe montrant la fixation de la capacité au champ (CC)

Le bas de la réserve facilement utilisable ( $B_{RFU}$ ) (Fig.23) a été effectif pour un début grâce à la littérature (2/3 de CC pour sol limoneux- sableux). Par la suite, elle a été recadrée en fonction des observations faites sur la courbe. Ses observations prennent en considération des diminutions brutales de la plante alors que la météo est la même et qu'on a une rupture de pente ; la courbe ayant tendance à s'aplatir (Fig.23).



Source : Agralis

Figure 23. Fixation du seuil de bas de la réserve facilement utilisable (RFU)

## II.2.4 Analyse physique du sol

### 1. Prélèvements échantillons de sols

Au sein du site expérimental de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH), des échantillons de sol ont été prélevés. A l'aide de tarières manuelles de marque SDEC, de 30 et 70 cm ainsi que des tubes PolyChlorure de Vinyl (PVC), le prélèvement a été effectué à 30 et 70 cm de profondeurs au niveau des orangers et 30 cm uniquement au niveau des tomates (Fig.24). Le choix des profondeurs au sein des plantes est fonction de la profondeur maximale du système racinaire. Au total, 18 points ont fait l'objet d'échantillonnage répartis comme suit : douze (12) au sein des parcelles d'orangers, six (06) coté parcelles de tomates. Deux types d'échantillons ont été prélevés à l'instar de ceux remaniés et non remaniés. Par la suite, des sachets en plastiques noirs au préalable étiquetés ont été utilisés pour l'ensachement des échantillons remaniés. L'ensemble de la collecte des échantillons a été acheminé au laboratoire d'agro-pédologie de l'ENSH pour analyses physiques sur les échantillons de sol prélevés.



Figure 24. Echantillonnage des sols sur le site expérimental

## 2. Textures des sols

Pour déterminer les textures de différents échantillons de sols prélevés en champ, l'analyse granulométrique par sédimentométrie a été réalisée au laboratoire pédologique de l'ENSH. Cette analyse s'est déroulée sur des échantillons de sols perturbés prélevés à la parcelle expérimentale (Fig.25). Le but de l'analyse est de séparer la partie minérale de la terre en catégories classées selon la dimension des particules minérales inférieures à 2 mm et à déterminer les proportions relatives à ces catégories, en pourcentage de la masse totale du sol. Le principe selon la méthode d'Afnor NFX31-100 consiste à:

- **préparer les échantillons de sol**

Cette étape consiste après réception et identification des échantillons bruts, de les désagréger, émietter et séchés à l'air libre au sein du laboratoire pendant une durée de 24 h. Il est recommandé de les étaler sur une bâche mais dans notre cas on a opté pour des formats A4 blancs du fait de son absence.

- **broyer et tamiser les échantillons de sols**

Cette phase s'effectue à l'aide d'un marteau et tamis suivant une maille de 2 mm afin d'obtenir une terre fine.

- **prétraiter le sol suivi de la destruction de la matière organique et dispersion.**

Cette phase comprend l'oxydation de la matière organique par l'eau oxygénée dosée et la décarbonation. Cependant, on a fait abstraction de la décarbonation vue qu'il n'y a pas de sols calcaires dans la zone d'étude.

- **fractionner et prélever**

Pour cette phase, la méthode internationale de Robinson a été utilisée. Cette méthode est constituée de quatre grandes étapes à savoir : l'agitation, l'ajustage, prélèvement proprement dit et la cotation.



**Figure 25.** Différentes phases d'analyse granulométrique par sédimentométrie

Le mode opératoire permettant de déterminer le pourcentage des sables, argiles et limons (Fig.26) après préparation des échantillons de sols, à partir de plusieurs étapes.

- 1) Peser 20g de terre et mettre dans l'erenmeyer de 500 ml + 50 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- 2) Attendre 12 h ou toute une nuit afin que l'effervescence soit complète
- 3) Ajouter 10 ml de solution d'hexamétaphosphate de sodium (NaPO<sub>3</sub>) +50 ml de KCl
- 4) Ajouter de l'eau distillée jusqu'à 400 ml ou 500 ml
- 5) Ajouter 1(2) baromet (s) à l'intérieur de l'erenmeyer pour faciliter la dispersion des flocculats
- 6) Porter le tout sur une plaque chauffante – agitatrice jusqu'à disparition de l'effervescence
- 7) Attendre pendant une heure
- 8) A la fin de l'opération, faire passer toute la terre dans une allonge de 1000 ml avec un jet de pissette d'eau distillée et un bécher sans dépasser le volume de 1000 ml
- 9) Agiter manuellement la solution à l'aide d'un agitateur pendant quelques minutes afin de l'homogénéiser
- 10) Au niveau du fractionnement, les différentes particules seront séparées les unes des autres grâce à leur vitesse de chute différente suivant leur taille. Cette vitesse de chute est donnée par la loi de stokes  $V = 2/9 \text{ gr}^2 (d-d')/v$
- 11) Le prélèvement des particules, s'est fait suivant la technique d'utilisation de la pipette de Robinson. Elle consiste à :
  - a. Fermer le robinet à 3 voies
  - b. Descendre la pipette jusqu'à ce que l'embout touche le niveau supérieur de la suspension et noter la position de l'index devant la règle graduée
  - c. Descendre la pipette dans la suspension à la profondeur de prélèvement 20 à 30 secondes avant la fin du temps de sédimentation T pour la fraction considérée, selon la température et la profondeur de prélèvement retenue
  - d. Ouvrir lentement le robinet au temps T et aspirer très régulièrement pour remplir la pipette (20 ml) en 20 secondes environ. Il faut à chaque fois agiter la solution avant le temps donné pour chaque particule. Ici, les temps sélectionnés sont les suivants :
    - 46'' pour argile + limon fin +limon grossier (A+Lf+Lg);
    - 4'48'' pour argile + limon fin (A+Lf)
    - soit 5h pour argile (A) à une profondeur de 6.2 cm, 6h pour une profondeur de 7.5 cm ou 8h pour 10 cm

- Après chaque prélèvement, mettre la capsule dans l'étuve et attendre 16 à 24 h et retirer.
  - A la suite du dernier prélèvement, jeter la solution sur deux tamis (de 0.2 mm et 0.063 mm) superposés par ordre décroissant.
  - A l'aide d'une pissette, nettoyer les particules jusqu'à ce que l'eau soit claire
- 12) Mettre dans les capsules en inox et porter à l'étuve à 105 °C pour 16 h à 24 h.
- 13) Après retrait de ses capsules, peser leurs masses et noter dans un carnet. Ensuite faire la différence entre ses masses pesées et capsules simples.
- 14) Après avoir obtenu la différence entre ses masses, il faut calculer le pourcentage de chaque prélèvement ( $A + L_f + L_g$  ;  $A + L_f$  et  $A$ ) via les formules suivantes :
- 15) Ensuite calculer le pourcentage d'Argile (A), Limon (L) et Sable (S).
- 16) Après obtention des différentes proportions, ploter le tout sur le triangle textural de USDA (1986) afin de déterminer la classe texturale de votre échantillon.

La formule utilisée dans notre étude pour calculer les pourcentages de chaque prélèvement sont les suivantes :

$$(M1 - P1 - X)g * \frac{1000}{20} ml * \frac{100}{20} g \quad (1)$$

avec X= poids du volume de NaPO<sub>3</sub> ; M1-P1= différence de masse entre celle de la capsule passé à l'étuve et celle pesée vide.

**Pour les sables, la formule est la suivante :**

$$(RG - SG) * \frac{100}{20} g \quad (2)$$

**Les formules de calcul de limons, sables et argiles sont les suivantes :**

$$S = SG + SF ; L = LF + LG ; A = A$$

Dans le cadre de ce travail, l'essai a été répété trois fois de suite jusqu'à obtenir un bon résultat (100+/- 2 %). Le travail s'est fait sur une prise de terre fine de 20 g pour les échantillons de 30 cm et 10 g pour ceux de 70 cm au vu de la quantité d'échantillon.

La représentation graphique de la composition granulométrique des trois fractions s'est fait en utilisant le logiciel Tridraw, version 2.6. Ce logiciel de dessin a été utilisé pour représenter graphiquement les pourcentages d'Argile, de Limons et Sables dans le triangle textural international de l'USDA.



**Figure 26.** Mode opératoire de l'analyse granulométrique par sédimentométrie permettant de déterminer les différents pourcentages de sables, argiles et limons

### 3. Analyse de la densité apparente ( $D_a$ )

Elle se réfère spécifiquement à la mesure de densité d'un matériau non tassé, incluant les espaces interstitiels entre les particules. La méthode utilisée pour déterminer ce paramètre est la « méthode de Coring (carottage) ». La procédure consiste à : (1) prendre un échantillon du matériau avec l'échantillonneur ; (2) déterminer le volume du cylindre échantillonneur, (3) peser l'échantillon pour obtenir sa masse et (4) calculer la densité apparente.

Ainsi après transport des échantillons de sols sceller dans des sacs de stockages en plastique, de la parcelle pour le laboratoire d'agro-pédologie, la pesée des échantillons a été effectif. Suivi de la détermination du volume du cylindre et du calcul de  $D_a$  via les formules suivantes :

- Volume du cylindre (V)

$$V = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * H \quad (3)$$

Où  $D$  = diamètre du cylindre (cm) ;  $H$  = hauteur du cylindre (cm) et  $V$  = volume du cylindre (cm<sup>3</sup>)

- Densité apparente (Da)

$$Da = M1/V \quad (4)$$

Où  $M1$  = masse de l'échantillon pesée directement après prélèvement pour éviter les variations dues à l'humidité (g) ;  $V$  = volume du cylindre (cm<sup>3</sup>) et  $Da$  = densité apparente (g/cm<sup>3</sup>)

#### 4. Analyse de la matière organique (M.O)

La détermination de la matière organique s'est opérée par la méthode de perte au feu (PAF) (Fig.27). C'est une méthode analytique utilisée pour déterminer la teneur en matières organiques et en substances volatiles dans un échantillon, principalement de sol ou de sédiment. Cette analyse permet d'évaluer la qualité des sols en estimant la matière organique pour des études agricoles ou environnementales. Son principe repose sur la mesure de la perte de poids d'un échantillon lorsqu'il est chauffé à des températures successives.

Pour cette étude, la procédure permettant de déterminer la matière organique s'est opérée en plusieurs étapes.

##### a) Préparation des échantillons

- Peser avec précision une capsule en porcelaine vide.
- Éliminer tout matériau non pertinent tel que les débris végétaux ou les roches.
- Transférer un échantillon de sol sec et broyé de 5g dans la capsule en porcelaine et peser à nouveau.
- Placer la capsule avec l'échantillon dans une étuve préchauffée à une température maximale de 220°C pendant une période de 24 h pour sécher l'échantillon et évaporer toute humidité résiduelle.

##### b) Analyse de la matière organique par perte au feu

- Après la période de séchage en étuve, transférer la capsule avec l'échantillon dans un four à mouffles préchauffé à une température maximale de 450°C.
- Chauffer la capsule avec l'échantillon à cette température pendant une période de 4 h.

- Après la période de chauffage, retirer la capsule du four à moufles et laisser refroidir à température ambiante.

- Peser à nouveau la capsule avec l'échantillon refroidi.

- La différence de poids avant et après la combustion représente la perte de poids due à la combustion de la matière organique.

### c) Calcul de la matière organique :

La formule suivante a été utilisée pour calculer la matière organique :

$$PAF (\%) = \frac{Masse\ initiale - Masse\ finale}{Masse\ initiale} * 100 \quad (5)$$

### d) Répéter l'analyse trois fois de suite afin de valider le résultat obtenu



**Figure 27.** Four à moufles et échantillons disposés à l'intérieur pour l'analyse par perte au feu

## 5. Analyse du pH du sol

La détermination du pH du sol a pour objectif de mesurer l'acidité ou l'alcalinité du sol, un facteur crucial influençant la disponibilité des nutriments pour les plantes, la structure du sol, l'activité microbienne, et la mobilité des contaminants. Le principe de la méthode repose sur l'utilisation d'un pH-mètre (Fig.28), qui mesure la concentration en ions hydrogène ( $H^+$ ) dans une solution. Le pH est une échelle logarithmique qui exprime l'acidité ou l'alcalinité d'une solution. La méthode consiste à mesurer le pH d'une suspension de sol dans de l'eau, représentatif de la capacité du sol à réagir avec les acides et les bases. Au laboratoire, la détermination de ce paramètre a suivi plusieurs étapes.

### a) Calibration du pH-mètre de marque Hanna

- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
- Allumer le pH-mètre Hanna et le calibrer suivant les instructions spécifiques de l'appareil
- Rincer l'électrode entre chaque solution tampon avec de l'eau distillée et sécher délicatement avec un papier absorbant sans frotter.

### **b) Préparation de l'échantillon de sol**

- Prélever un échantillon représentatif du sol à une profondeur appropriée
- Séchage : cette étape consiste à laisser l'échantillon de sol sécher à l'air libre s'il est trop humide. Ne pas utiliser de chaleur élevée pour le séchage car cela peut altérer le pH.
- Tamisage du sol à travers un tamis de 2 mm pour éliminer les débris grossiers.

### **c) Préparation de la suspension de sol**

- Pesée 10 g de sol tamisé.
- Préparer la suspension en mettant les 10 g de sol dans un bécher de 100 ml. Ajouter 25 ml d'eau distillée ou déionisée au sol.
- Agitation de la suspension pendant 5 minutes à l'aide d'une baguette agitatrice ou d'un agitateur magnétique pour obtenir une suspension homogène.
- Laisser la suspension reposer pendant environ 30 minutes pour que les particules plus grosses se déposent.

### **d) Mesure du pH de la suspension de sol**

- Rincer l'électrode et l'immerger dans la suspension de sol préparée.
- Veiller à ce que l'électrode soit complètement immergée dans la suspension sans toucher les parois ou le fond du bécher.
- Agiter doucement la suspension avec l'électrode pour assurer une lecture stable.
- Lire le pH directement sur le pH-mètre une fois que la valeur est stabilisée.
- Noter le pH mesuré dans le carnet de laboratoire.
- Après la mesure, rincer l'électrode avec de l'eau distillée



**Figure 28.** Calibration et lecture du pH à travers le pH-mètre au laboratoire

A la suite de différents résultats obtenus, les normes de la (FAO 2006) (Tab.1), ont été employés pour une évaluation judicieuse.

**Tableau 1.** Lignes directrices pour la description du sol

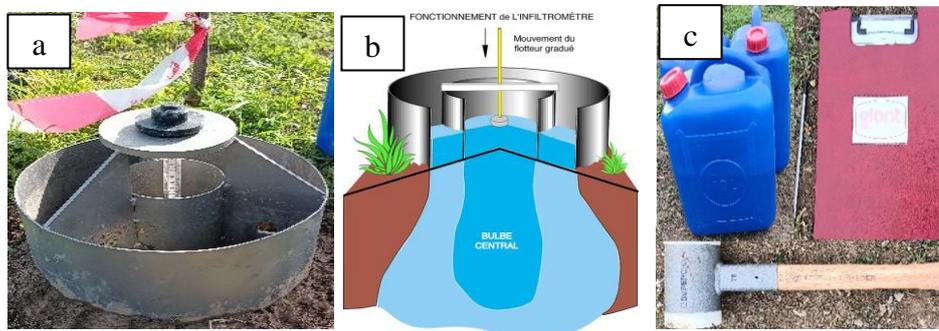
<b>Propriétés du sol</b>	<b>Normes FAO</b>	<b>Interprétation</b>
Texture du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sols limoneux : 10-20 % d'argile, 40-60 % de limon, 20-40 % de sable</li> <li>- Sols sableux : &lt;10 % d'argile, &lt;20 % de limon, &gt;70 % de sable</li> <li>- Sols argileux : &gt;35 % d'argile</li> </ul>	La texture affecte la capacité du sol à retenir l'eau, à drainer l'excès d'eau et à fournir un support aux plantes. Les sols limoneux sont souvent les plus favorables à l'agriculture
Densité apparente	1.1 - 1.6 g/cm <sup>3</sup>	Une densité apparente comprise entre 1.1 et 1.6 g/cm <sup>3</sup> est favorable. Des valeurs plus élevées (> 1.6 g/cm <sup>3</sup> ) peuvent indiquer une compaction excessive, limitant la croissance des racines.
Matière organique	2 - 6 % (poids sec)	Un pourcentage de matière organique de 2 à 6 % est considéré comme adéquat pour maintenir une bonne fertilité du sol. Des valeurs plus faibles peuvent nécessiter des amendements pour améliorer la fertilité.
pH du sol	6.0 - 7.5 (optimal), 5.5 - 8.0 (acceptable)	Un pH entre 6.0 et 7.5 est idéal pour la disponibilité des nutriments. Des valeurs trop acides (< 5.5) ou trop alcalines (> 8.0) peuvent limiter la croissance des plantes.

Source : FAO, 2006

### II.2.5 Test d'infiltration de l'eau dans le sol et simulation

Au cours de la première campagne déroulée en 2022, des tests d'infiltration se sont effectués au niveau des mêmes points de prélèvements de sol des orangers et tomates. Au sein des parcelles d'oranger, trois essais ont été réalisés par ligne avant de lancer les différentes campagnes d'irrigation. Par contre au niveau des tomates, le procédé a été légèrement différent. Les mesures d'infiltration réalisées au sein des tomates se sont faites avant le semis des plants de tomates sur sols nus de chaque parcelle ; pendant la période de croissance des plantes de tomates après installation du paillage et à la fin de la croissance de la culture (toujours avec paillage sur le sol), sur les mêmes points de prélèvement de sols. Cependant l'objectif a été le même lors des essais ; à savoir quantifier la variabilité spatiale du processus d'infiltration et étudier sa dynamique. Pour ce faire, l'infiltromètre à double anneau de marque SDEC, de diamètres externe 32 cm et interne 11 cm a été utilisé (Fig.29). Au cours de

notre campagne, cet appareil a été enfoncé dans le sol à une profondeur de 5 cm sur une surface plane. Le flotteur de mesure a été fixé à l'intérieur de l'anneau interne pour la lecture de la quantité d'eau infiltrée dans le sol. Les lectures ont été effectuées à un pas de temps d'une minute. L'expérience restant continue jusqu'à l'atteinte du taux d'infiltration à l'équilibre. Après avoir atteint cet équilibre du taux d'infiltration (mm/min) dans le sol, l'expérience a été arrêtée. Cette expérience a donc été répétée trois fois par parcelle au sein des tomates et trois fois par ligne au sein des orangers. Après obtention des données en champ, leurs traitements s'en sont suivis afin de déterminer les paramètres hydrauliques et meilleur modèle.

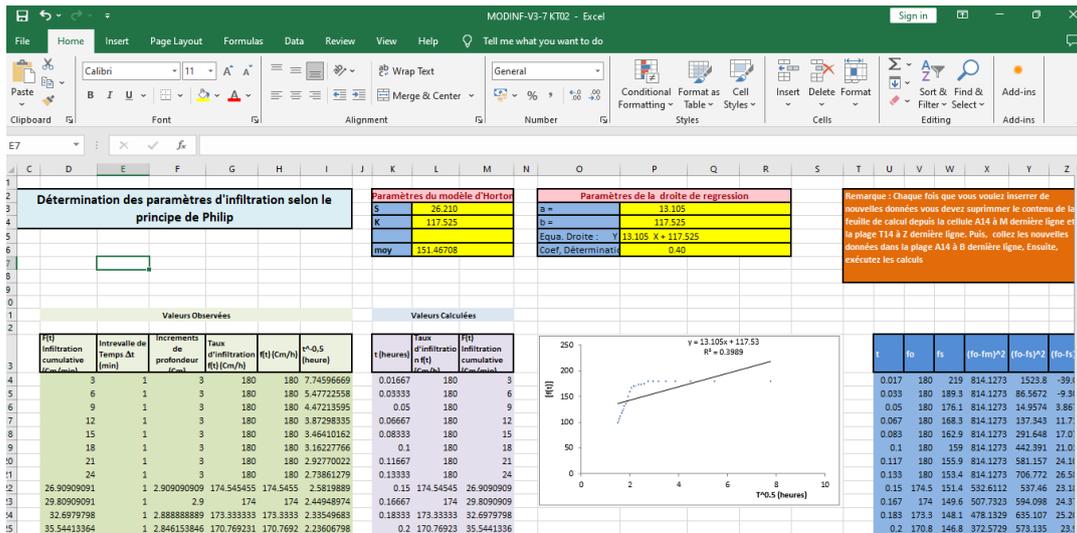


**Source mode de fonctionnement : SDEC**

**Figure 29.** Infiltromètre à double anneau (a), mode de fonctionnement (b) et autres matériels utilisés (c)

## 1 Détermination des paramètres de différents modèles d'infiltration

Dans la zone d'étude, les modèles tels que Philip, Kostiakov et Kostiakov modifié sont ceux sélectionnés en raison de leur popularité, leur efficacité et le type de sol présent dans la zone. Les données expérimentales de terrain ont été utilisées pour évaluer ces modèles d'infiltration et pour obtenir des valeurs numériques des paramètres hydrauliques du modèle. La détermination de paramètres hydrauliques de chaque modèle s'est faite via le logiciel Ms-EXCEL (Fig.30). La procédure a consisté tout d'abord à effectuer une programmation dans un classeur Excel sous forme de macro des paramètres hydrauliques de chaque modèle ; par la suite les valeurs d'infiltration obtenues en champ ont été introduites et ces paramètres ont été générés automatiquement ainsi que les valeurs des critères de sélection de modèles. Les équations utilisées pour chaque modèle sont décrites ci-dessous.



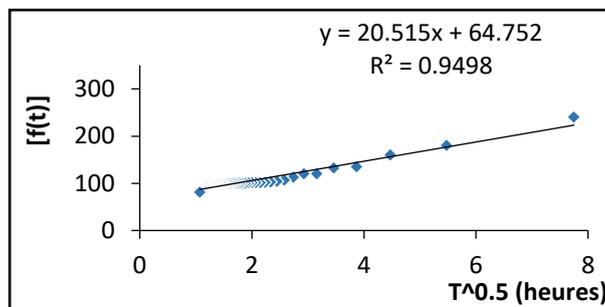
**Figure 30.** Feuille Excel de détermination des paramètres hydrauliques et critères de performance

- **Modèle Philips**

Ce modèle fait partis des modèles physiques communément utilisé pour estimer l'infiltration. Basé sur la loi de Darcy et la loi de conservation de masse (Philip 1957; Vand et al. 2018), il a pour équation :

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + K \quad (6)$$

Ou :  $f(t)$  est le taux d'infiltration au temps  $t$ ,  $S$  est la sorptivité du sol,  $K$  est la conductivité hydraulique du sol et  $t$  est le temps écoulé depuis le début de l'infiltration. Dans le cadre de cette étude, afin d'estimer les valeurs des paramètres  $S$  et  $K$ , les données de taux d'infiltration (mm/min) ont été ajustées en fonction du temps transformé par la régression des moindres carrées pour toutes les données obtenues avant le semis, pendant la croissance et à la fin de fructification sur les cinq points de tomates et au niveau des orangers et pourtour de la parcelle (Fig.31).



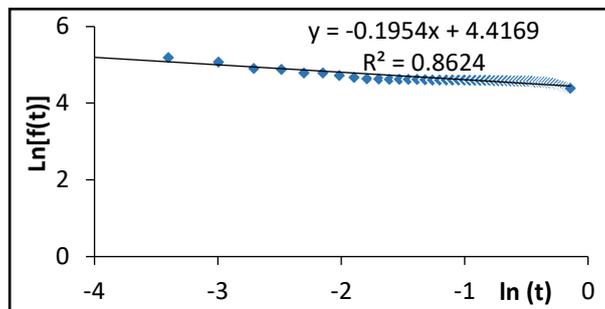
**Figure 31.** Taux d'infiltration vs. Temps transformés pour estimer les paramètres du modèle de Philip

- **Modèle Kostiakov**

Kostiakov est un modèle basé sur la collecte des données expérimentales obtenues en champ, de même qu'un laboratoire. Faisant partis des modèles empiriques, il permet d'estimer le taux d'infiltration suivant l'équation :

$$f(t) = At^{-B} \quad (7)$$

Ou  $f(t)$  est le taux d'infiltration au temps  $t$  ;  $A$  et  $B$  sont les paramètres de l'équation inconnus représentant les caractéristiques d'infiltration du sol, avec  $A$  la mesure initiale du taux d'infiltration et condition structurelle du sol, et  $B$  l'index de stabilité de la structure du sol,  $t$  le temps. Pour déterminer ses paramètres  $A$  et  $B$ , les logarithmes (ln) des mesures d'infiltration ( $f(t)$ ) et du temps ( $t$ ) ont été prises. Ln ( $f(t)$ ) a été ploté en fonction de Ln ( $t$ ) pour les différents points (Fig.32).



**Figure 32.** Ln ( $f(t)$ ) vs. Ln ( $t$ ) transformée pour estimer les paramètres du modèle Kostiakov

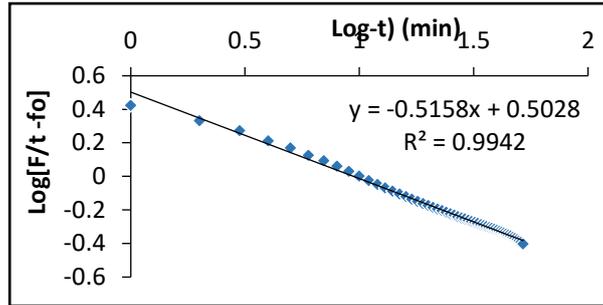
- **Modèle Kostiakov modifié**

Aussi connu sous le nom de Kostiakov-Lewis ou Mezencev il est communément utilisé dans la fonction d'infiltration pour des applications en irrigation de surface (Haverkamp et al. 1988; Furman et al. 2006). Son équation est la suivante :

$$F(t) = At^{-B} + f_c \quad (8)$$

Ou  $F(t)$  est le taux d'infiltration cumulé comme une fonction du temps ;  $A$  et  $B$  les paramètres hydrauliques de l'équation,  $t$  le temps et  $f_c$  le taux d'infiltration stable. Comme pour Kostiakov, les logarithmes (ln) des mesures d'infiltration ( $f(t)$ ) et du temps ( $t$ ) ont été utilisés pour déterminer les paramètres  $A$  et  $B$ . Les logs ( $F/t-f_0$ ) ont été plotés en fonction du log ( $-t$ ) pour les différents points (Fig.33).

Les paramètres des modèles d'infiltration estimés ont été incorporés dans les équations de différents modèles pour simuler les valeurs du taux d'infiltration cumulé dans chaque point. Les données de champs ont été comparées au modèle simulé d'infiltration cumulative.



**Figure 33.** Log (F/t-to) vs. Log (-t) de la parcelle mélange transformée pour estimer les paramètres du modèle de Kostiakov modifié

## 2 Sélection du modèle d'infiltration suivant les critères de performances

La comparaison entre les données simulées et mesurées en champ s'est effectuée suivant les critères de performances choisis avec pour but de déterminer le meilleur modèle qui s'adapte le mieux à la région. Les différents critères sélectionnés se sont basés sur la littérature, leur popularité et efficacité. Il s'agit entre autres dû :

- **Coefficient de Détermination ( $R^2$ )**

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (9)$$

- **L'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)**

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2)} \quad (10)$$

- **Erreur Index (PBIAS)**

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (X_i)} \quad (11)$$

où  $n$  est le nombre d' observations,  $x_i$  est la profondeur d'infiltration observée,  $y_i$  est la profondeur d'infiltration simulée et  $\bar{x}$  est la moyenne des données observées.

Le meilleur modèle ajusté a été choisi sur la base : du maximum du coefficient de détermination  $R^2$ , le minimum de l'erreur quadratique moyen (RMSE), ainsi que le tableau établit par (Moriassi et al. 2007) (Tab.2)

**Tableau 2.** Gamme générale de performance recommandées en statistique

Gamme de performance	PBIAIS	R <sup>2</sup>
Très bien	BIAIS ≤ ± 10	0,75 ≤ R <sup>2</sup> ≤ 1,00
Bien	±10 < BIAIS ≤ ± 15	0,65 ≤ R <sup>2</sup> ≤ 0,75
Satisfaisant	±15 < BIAIS ≤ ± 25	0,50 ≤ R <sup>2</sup> ≤ 0,65
Insatisfaisant	BIAIS ≥ 25	R <sup>2</sup> ≤ 0,50

**Source :** (Moriassi et al. 2007)

## II.2.6 Données météorologiques

Les données de température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, précipitations et rayonnement solaire enregistrées toutes les 10 min en champ par le boîtier Agralis, ont été téléchargées sur le site Agralis et traitées dans les logiciels Excel et Irrimax.

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP ou ETo) s'est effectué via la méthode Penman-Monteith (Allen et al., 1998) et celle actuelle/réelle (ETA ou ETc) en utilisant la méthode de la FAO - 56 de sur les données de la station météorologique récoltées couplées aux coefficients culturaux de la culture à différentes phases de développement. D'après (Allen et al., 1998), cette dernière méthode se rapproche étroitement de l'ETo de l'herbe à l'endroit évalué, qu'elle est basée sur la physique et qu'elle incorpore explicitement les paramètres physiologiques et aérodynamiques.

Le traitement s'est fait dans le logiciel Ms Excel. Au niveau des orangers, l'évapotranspiration potentielle et actuelle a été directement extraite en temps réel dans le logiciel Irrimax, version 10.1.5 à partir des données fournies par les sondes capacitatives en champ toutes les 10 min.

$$ETP = \frac{0.408 \Delta Rg_{net} + \gamma \frac{900}{T_{moy} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (12)$$

$$ETA = ETP * K \quad (13)$$

ou  $ETP/ETPo$  = évapotranspiration référentiel journalier (mm/jr) utilisant Penman-Monteith Method modifié (PM);

$K$  = coefficient cultural ;

$ETA/ETc$  = évapotranspiration actuel /réelle de la culture (mm/jr) ;

$R_g$  : rayonnement global ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jr}^{-1}$ ) ;  
 $\alpha$  : albedo, constante = 0.23 ;  
 $R_{g_{net}}$  : rayonnement global net ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{jr}^{-1}$ ) ;  
 $T_{moy}$  : température moyenne ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;  
 $e_s$  : pression de vapeur saturée à température moyenne (kPa) ;  
 $HR_{moy}$  : humidité relative moyenne (%) ;  
 $e_a$  : pression de vapeur effective (kPa) ;  
 $\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur saturée ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) ;  
 $P$  : pression atmosphérique (kPa)  
 $z$  : altitude (m),  
constante = 1 m ;  
 $\gamma$  : constante psychométrique ( $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

## **II.2.7 Humidité, température et conductivité électrique du sol**

### **a) Parcelles tomates**

La mesure de l'humidité, température et conductivité du sol a été réalisée tout au long de la période allant du semis des plants de tomates au stade d'arrière- saison dans chacune des parcelles. Elle a été réalisée pendant deux ans (2022-2023), principalement durant la période d'Eté. Durant l'étude, le TDR 150 a été utilisé en raison de son prix abordable, de sa fiabilité, de sa précision et de sa facilité d'utilisation. La particularité de cet appareil est qu'il peut mesurer l'humidité, la conductivité électrique et la température du sol à la même profondeur et à la même échelle de temps. Pour cette étude, tous les paramètres suscités ont été pris en compte, à juste titre de leur importance pour l'irrigation et la gestion des nutriments. Dans le champ, ses tiges ont été insérées à des profondeurs de 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm à côté des plants de tomates sélectionnés dans chaque parcelle. Les mesures ont été effectuées quotidiennement, à hauteur de trois répétitions par parcelle entre 17-20 heures (2022) et 7 - 9 heures (2023), puis reportées sur des fiches techniques. Les données obtenues ont ensuite été traitées sur Ms-Excel à différentes profondeurs suivant différentes phases de développement de la culture.

### **b) Parcelles orangers**

Les données d'humidité et de température du sol ont été obtenues toutes les 10 min durant les différentes campagnes (2022-2023) à partir des sondes SENTEK installées en

champ. Ces données enregistrées par le boîtier Agralis en champ ont été téléchargées via la plateforme SENTEK et traitées dans le logiciel Irrimax version 10.1.5. Le traitement à consister à ressortir sous forme de graphes le cumul de la quantité d'eau et température présente dans le sol ainsi qu'à tous les 10 cm de profondeur.

### **II.2.8 Paramètres agronomiques**

Les paramètres agronomiques pris en considération dans cette étude sont constitués d'une part, du nombre de fruits, poids des fruits et rendement de la culture pour les orangers et d'autre part couplé à la hauteur des plantes pour les tomates. La prise de la taille des plantes uniquement au niveau des tomates s'est effectuée à chaque phase de développement de la plante. A la récolte des tomates et orangers, un dénombrement des fruits par parcelle et rampe s'est opéré afin de déterminer le nombre de fruits par parcelle et rampe. Ses fruits ont ensuite été pesés en kilogramme à l'aide d'une balance électronique puis divisé par le nombre de plantes pour obtention de leurs poids moyens. Enfin le calcul du rendement des plantes s'est fait en divisant les différents poids moyens obtenus par la superficie du terrain, puis converti à l'hectare.

### **II.2.9 Analyse physique de l'eau d'irrigation utilisée pendant les campagnes**

Les différentes paramètres pris en considération lors de cette analyse sont les suivants : le pH, la conductivité électrique et la température. Ces derniers ont été sélectionnés parce qu'ils font parties des meilleurs critères d'évaluation physique de l'eau irriguée.

- **pH (potentiel d'hydrogène) de l'eau**

Par définition, c'est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau. Il affecte la disponibilité des nutriments pour les plantes et la solubilité des minéraux. Ce paramètre est exprimé sur une échelle logarithmique allant de 0 à 14, où 7 représente un pH neutre. Les valeurs inférieures à 7 indiquent une acidité croissante, tandis que les valeurs supérieures à 7 indiquent une alcalinité croissante.

- **Conductivité électrique de l'eau (CE)**

Exprimée en millisiemens par centimètre (mS/cm), elle se définit comme la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, directement lié à la concentration des sels dissous (minéraux ionisés) dans l'eau. Ce paramètre s'utilise en irrigation pour évaluer la salinité de l'eau irriguée.

- **Température de l'eau**

Exprimée en degré Celsius (°C), elle mesure la chaleur de l'eau. Elle influence divers processus physico-chimiques dans l'eau et en irrigation, affecte la croissance des plantes ainsi que la capacité d'absorption des racines.

Pour mener à bien cette analyse physique, la sonde multiparamètre HI990 de marque HANAA (Fig.34) a été utilisée sur le site expérimental pour la prise directe des mesures. Après calibration de l'appareil via les consignes fournies par la société, la procédure consiste à verser l'eau à analyser dans un récipient ; puis plonger et immerger complètement la sonde dans l'eau. Lorsque la valeur se stabilise à l'écran, le résultat est noté. Cette analyse a eu lieu au niveau des parcelles de tomates et d'oranger.



**Figure 34.** Analyse de l'eau via la sonde multiparamètre HI990

A la suite des résultats obtenus, les normes de la (FAO 2008) (Tab.3) ont été utilisées afin de mieux les apprécier.

**Tableau 3.** Normes FAO de quelques paramètres physiques des eaux d'irrigation

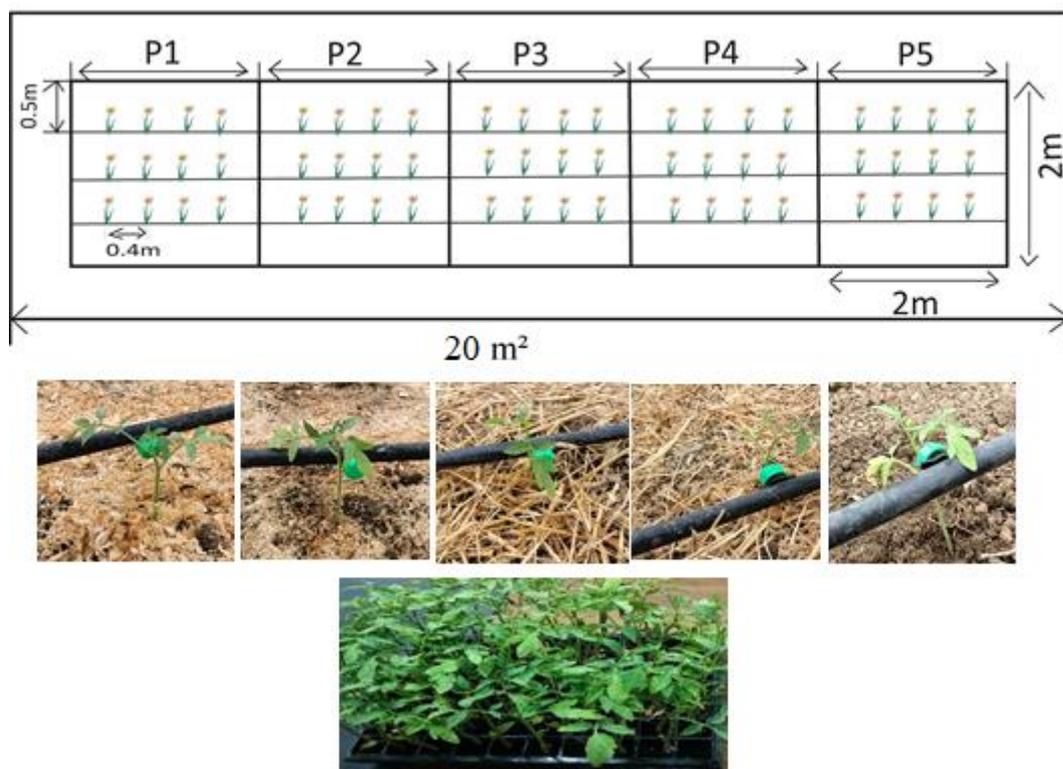
Paramètre	Normes	Interprétation
Température (°C)	20 - 30	Température optimale pour la plupart des cultures.
pH	6.5 - 8.4	Plage acceptable pour la plupart des cultures.
Conductivité électrique (µS/cm)	< 700 - Faible	Pas de risque de salinité pour les cultures
	700 - 3000 - Modérée	Certaines cultures sensibles peuvent être affectées
	3000 - 7500 - Élevée	Seules les cultures tolérantes à la salinité peuvent être cultivées.
	> 7500 - Très élevée	Généralement inappropriée pour la plupart des cultures.

Source : FAO, 2008

## **II.2.10 Protocole expérimentale**

### **1 Parcelles tomates**

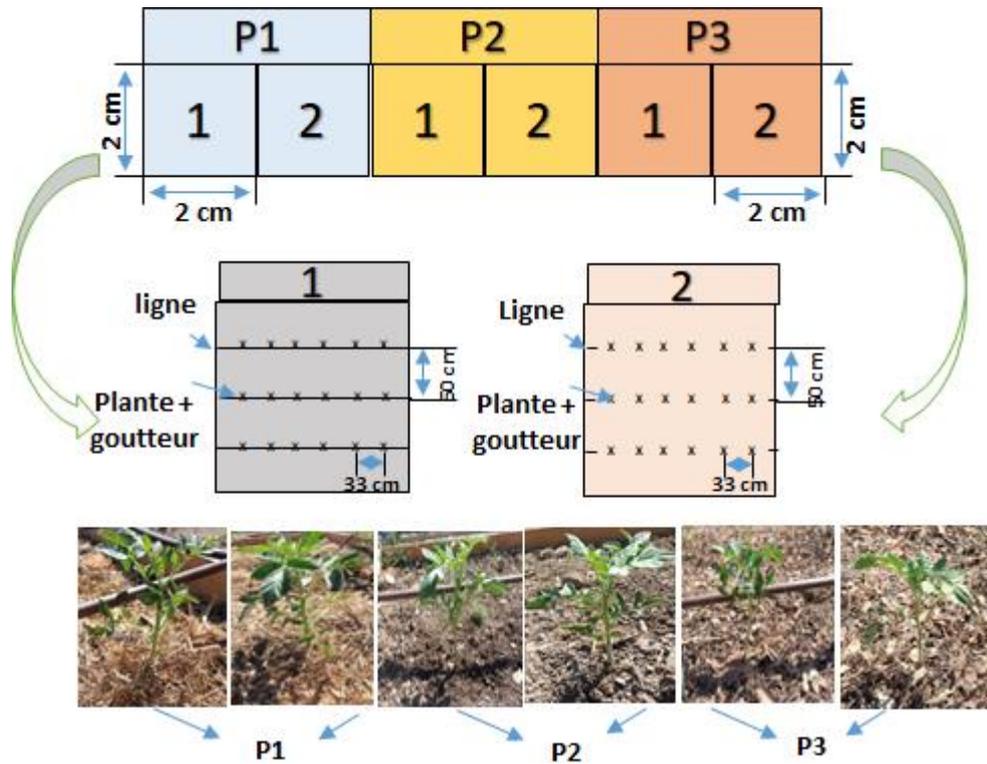
Durant l'année 2022 -2023, un bloc dénommé « A » de cinq parcelles de 4m<sup>2</sup> a été construit (Fig.35). Dans chacune des parcelles, des ajouts respectifs de paillis d'écorce de bois blancs grossiers (copeau) et fins (sciure), de pailles de blé (découpés environ 5 cm), le mélange des trois premiers paillis et le sol nu (ici dénommé témoin) ont été intégrés. Le choix de ses paillis s'est porté sur la disponibilité des matériaux locaux à faible coût, en abondance et efficaces. Dans ses parcelles, des pieds de tomates datant de 3 semaines ont été plantés pour le suivi de l'humidité jusqu'à son stade de fructification + récolte. L'écartement étant de 50 cm entre les rampes et de 40 cm respectivement pour les plants de tomates et goutteurs. De type autorégulant, chaque goutteur a été placé au pied de chaque plante. Au total, on a eu par parcelle, 12 pieds de plants de tomates et par ricochet 12 goutteurs. Les plantes ont été irriguées au pas de temps d'une heure (1h) en soirée au système goutte à goutte de surface au cours de l'année 2022 ; puis en matinée en 2023 du fait des conditions climatiques. Pour le contrôle de l'irrigation, en plus de la littérature, la fiche fournie par la société de fabrication de l'appareil TDR 150 a été utilisée pour visualiser la délimitation de l'humidité au point de flétrissement (PF) et à la capacité du champ (CC) pour chaque type de sol. Dans notre cas, la capacité au champ varie de 32-38% et le point de flétrissement entre 14-17 %. Durant cette période d'irrigation, le débit moyen utilisé a été de 7.72 l/h.



**Figure 35.** Plan expérimental du bloc « A » avec exemple en images des paillis sélectionnés mise en place au pieds des plants de tomates

Au cours de l'année 2023, un autre bloc dénommé « B » a été ajouté. La parcelle expérimentale a été légèrement labourée et hersée, puis l'ensemencement a été effectué. Il y'a eu au total 6 parcelles avec deux répétitions. Chaque répétition est composée de deux parcelles dont l'une ayant pour système d'irrigation localisée de surface et l'autre souterraine (10 cm de profondeur). Chaque traitement a été appliqué dans une parcelle de 2m\*2m (4m<sup>2</sup>) pour une surface totale de 24 m<sup>2</sup> (Fig.36). Chacune des parcelles contenant 18 plantes au-pieds desquelles 18 goutteurs ont été installés. Les différents traitements utilisés sont constitués : du mélange de paille + sciure + copeau de bois (à proportions identiques), du BRF (constitués de débris de bois et feuilles mortes) et du sol nu (sans ajout appelé témoin). Le choix des paillis est conditionné par les éléments mentionnés plus haut. Pour cette expérience, la même variété de tomate que celle mentionné plus haut a été semée dans ces parcelles. La distance entre les rampes étant de 50 cm et de 33 cm respectivement pour les plants de tomates et les goutteurs. Le dispositif expérimental mis en place sur le site est de type carré latin, utilisant deux systèmes d'irrigation goutte à goutte : celui de surface et souterrain (à 10 cm de profondeur). L'irrigation s'est effectuée à intervalle de temps (2h) régulier et débit

constant (2,3 l/h). Le créneau horaire de l'irrigation variant de 4-7 heures du matin. La même procédure de contrôle d'irrigation a été employée que celle décrite plus haut.



**Figure 36.** Plan expérimental du bloc B.

**P1** = parcelles mélange à proportions égales de copeau + sciure + paille ; **P2** = parcelles témoin (sol nu) ; **P3** = parcelles BRF (débris de bois et feuilles mortes). **1** = système d'irrigation localisé en surface ; **2**= système d'irrigation localisé à 10 cm de profondeur.

## 2 Orangers

Durant l'année 2022-2023, trois expériences ont été menées dans la parcelle expérimentale dans l'objectif de comparer le système d'irrigation goutte à goutte de surface, à 15 cm et 30 cm de profondeur. A cet effet, un arsenal de matériels (Fig.37) composé de : station météorologique ; sondes capacitatives ; électrovannes ; compteurs d'eau ; réservoir d'eau ; pompes hydrauliques et manomètres s'est avéré nécessaire. Pour distribuer l'eau sans pertes notables, la parcelle a été équipée d'autres accessoires tels que des tuyaux en polyéthylène, des raccords, des adaptateurs, des sprinklers (goutteurs), des filtres à graviers et à disques.



**Figure 37.** Quelques instruments installés en champ pour expérimentation

La première concerne les tuyaux avec goutteurs intégrés enfouies à 15 et 30 cm de profondeur (sous la surface du sol). Le débit moyen des goutteurs était de  $2,3 \text{ l.h}^{-1}$  à une pression de 1bar, avec un espacement entre les goutteurs de 33 cm. La seconde expérience est toujours presque dans les mêmes conditions. A la différence de la profondeur d'enfouissement n'étant uniquement à 15 cm. La troisième expérience a été réalisée avec les tuyaux installées sur la surface du sol dont le débit moyen des goutteurs est de  $7.1 \text{ l.h}^{-1}$ . L'espacement entre les goutteurs étant de 40 cm. Pour les systèmes souterrains (15 et 30 cm de profondeur), l'installation de deux tuyaux et 6 goutteurs au niveau de chaque arbre (dont 3 goutteurs à gauches et trois autres à droite) a été effectuée ; contre 2 tuyaux et quatre goutteurs pour le système de surface. La période d'expérimentation a été effectif uniquement en Eté. Pendant toute cette période, les doses d'irrigation ont été les mêmes pour le goutte à goutte de surface et souterrain.

Le dispositif expérimental mit en place pour mener à bien les différentes irrigations a consisté à ouvrir la vanne principale situé au niveau du réservoir d'eau principal, ensuite celles situées au sein de chaque système d'irrigation relié à chaque compteur ; ensuite piloter l'irrigation depuis l'application Aqualis en ligne à partir des courbes ; arrêter dès que la courbe a atteint/ presque la ligne de saturation. Recommencer/ répéter l'irrigation à chaque fois que la plante en a besoin. Notons que le besoin s'identifie à partir de l'application Agralis, lorsque la courbe est /presque dans le rouge (zone de stress hydrique).

## CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSIQUE DU SOL ET DE L'EAU AU NIVEAU DES PARCELLES DE TOMATE ET D'ORANGER

Cette section vise à analyser quelques propriétés essentielles telles que la texture, la densité apparente, la matière organique et le pH du sol d'une part ; puis la qualité de l'eau ainsi que le meilleur modèle d'infiltration de l'eau qui s'adapte le mieux dans la zone d'autre part. Dans le but de mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur la croissance des cultures et l'efficacité de l'irrigation.

### III.1 Texture du sol

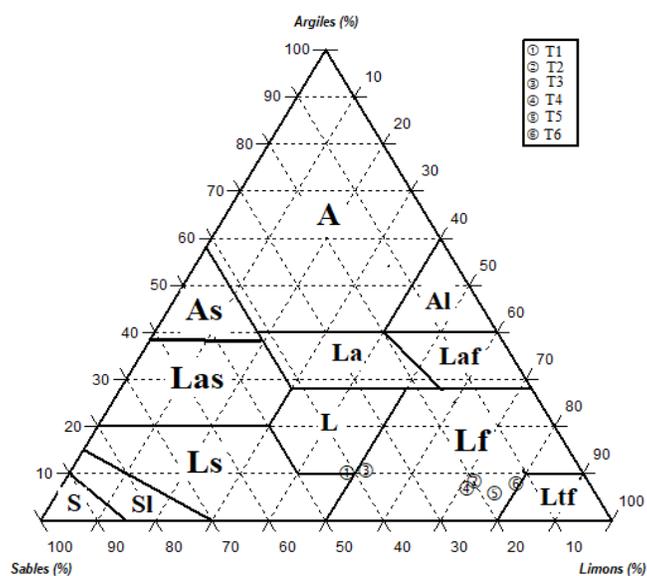
L'analyse granulométrique par sédimentométrie réalisée en utilisant la méthode de Robinson sur les échantillons de sols, a permis d'obtenir les pourcentages de particules de sables (%S), limons (%L) et argiles (%A) à 30 cm uniquement au sein des tomates (Tab.4) ; 30 à 70 cm au sein des orangers (Tab.5).

L'observation du tableau des pourcentages de différentes particules au sein des tomates permet de constater que les limons constituent la matrice principale de ses sols.

**Tableau 4.** Analyse sédimentométrique des échantillons de sol de différentes parcelles

Echantillons	Sables (%)	Argiles (%)	Limons (%)
T1	41.7	10.3	49
T2	19.9	8.5	71.5
T3	38.1	11	52
T4	21.9	7	70.5
T5	17.5	6	76.3
T6	12.9	8	79

L'analyse du diagramme texturale identifie la texture limoneuse fine comme celle majeure (Fig.38).



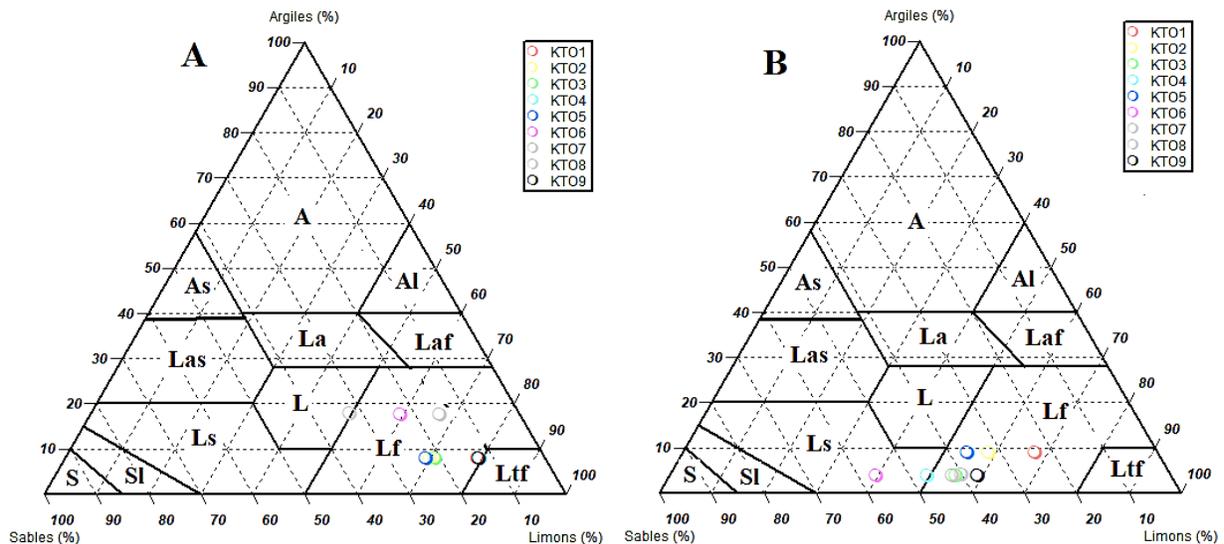
**Figure 38.** Détermination des différentes classes texturales via le diagramme textural USDA

L'observation du tableau d'orange (Tab.5) permet de constater également qu'il y'a une prédominance de limons et très peu d'argile. Cependant sur certains points de 70 cm, on observe une légère tendance du sable à être plus concentré même si leur valeur est toujours inférieure à celle du limon.

**Tableau 5.** Représentation des pourcentages argiles, sables et limons à 30 et 70 cm

ECHANTILLONS	%S		%A		%L	
	30 cm	70 cm	30 cm	70 cm	30 cm	70 cm
<b>KTO1</b>	13,34	23,98	8	9	80	68
<b>KTO2</b>	22,13	32,58	8	9	70	60
<b>KTO3</b>	20,96	41,63	8	4	70	55
<b>KTO4</b>	12,66	47,83	8	4	80	50
<b>KTO5</b>	23,36	37,18	8	9	70	55
<b>KTO6</b>	23,26	57,33	18	4	60	40
<b>KTO7</b>	15,76	39,63	18	4	68	55
<b>KTO8</b>	32,96	42,63	18	4	50	55
<b>KTO9</b>	12,96	37,88	8	4	80	60

Les résultats obtenus montrent que la majorité des sols est de type limoneux fin (soit plus de 50 %). Par définition, c'est une terre riche en limons qui contient moins de 20 % d'argile (FAO 2006). De caractéristiques léger, doux au toucher, poudreux quand il est sec, ce type de sol a pour avantages qu'il est facile à travailler, riche et fertile, perméable à l'eau et l'air, et se réchauffe vite dès les premiers ensoleillements printaniers. Cependant il pour inconvénient principale sa fragilité dû au fait qu'ils ne comprennent que très peu d'argile et de sables. On observe aussi sur le triangle textural de 30 cm (Fig.39), des sols à la frontière « limoneux - limoneux fins » (KT07) et aussi des sols à la frontière limoneux fin – limoneux très fin (KT01 et KT09). Le diagramme réalisé à 70 cm montre les sols de type : « limoneux sableux (KTO6) et des sols situés à la frontière limoneux sableux - limoneux fin (KT04).



**Figure 39.** Détermination des différentes classes texturales à (A) 30 cm et (B) 70 cm de profondeur via le diagramme textural USDA

D'après la carte pédologique de la plaine de la Mitidja élaborée par Ecrement et Seghir au 1/50000, les différentes textures obtenues sont qualifiées d'équilibrées. En effet, elles sont situées entre 30 et 80 cm. Cette carte nous renseigne également sur le fait que les textures obtenues à 30

cm sont moyennes tandis que celles de 70 cm sont plutôt légères à moyennes (Ls et L). Cette carte montre que le sol de l'étude est enterré, chevauchant entre deux classes de profondeur (2/3). Pour la (FAO 1998), ce sol est classé comme fluvisol, qui est un sol peu évolué d'apport fluviaux à fort potentiel agricole. Cependant selon cette organisation il peut présenter des menaces telles que les inondations et saturation en eau lorsqu'il est soumis à l'urbanisation et au colmatage. D'après normes de la (FAO 2006), la texture des sols de tomates et d'oranger est limoneuse et donc favorables à l'agriculture.

### III.2 Densité apparente du sol

L'analyse de la densité apparente ( $D_a$ ) a été réalisée au laboratoire aussi bien sur les échantillons de sols prélevés au niveau des parcelles de tomates que sur celles d'oranger. Les résultats obtenus au sein des parcelles de tomates présentent des valeurs comprises entre 1.18 et 1.67  $\text{g/cm}^3$  (Fig. 40), avec une moyenne de 1.38  $\text{g/cm}^3$ . Ces valeurs sont respectivement attribuées à la parcelle T4 (la moins dense) et T5 (la plus dense). D'après les normes (FAO 2006), la valeur obtenue à T4 est proche de la limite inférieure de la norme recommandée ; indiquant un sol bien aéré et peu compacté, favorable à la croissance des racines. Par contre la valeur de  $D_a$  obtenu à T5, dépasse légèrement la limite supérieure de la norme FAO. Indiquant une possibilité de compaction du sol. Ce qui pourrait réduire la porosité, limiter la pénétration des racines et entraver l'infiltration de l'eau. Dans l'ensemble, la moyenne de  $D_a$  au sein de différentes parcelles témoigne d'une bonne qualité du sol, avec une aération adéquate et une structure suffisamment lâche pour permettre une bonne croissance des racines.

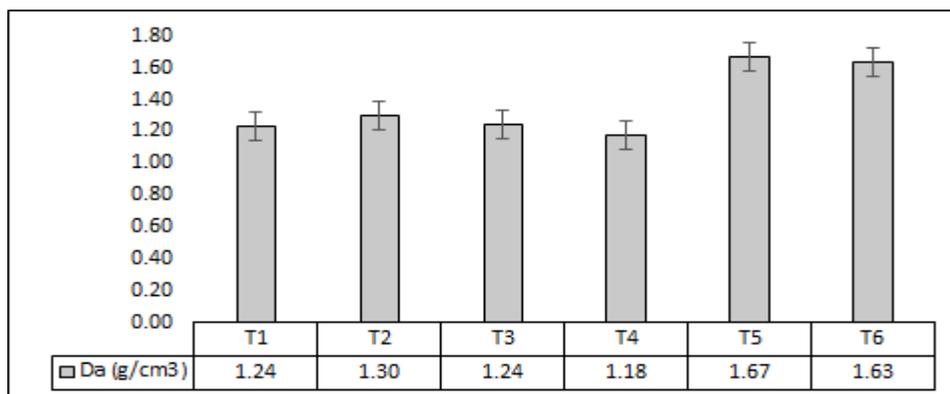
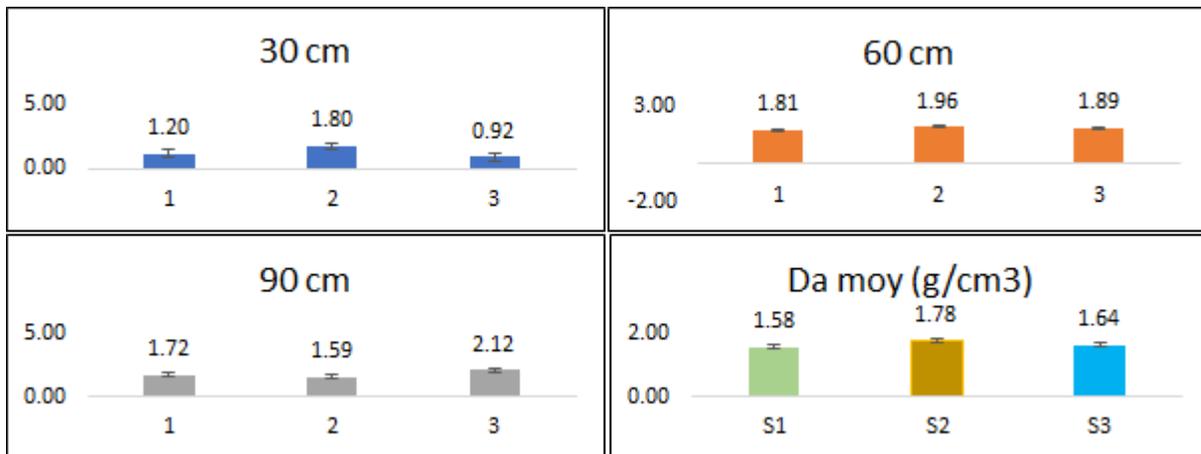


Figure 40. Densité apparente de différentes parcelles

Dans le cadre des orangers, au regard des valeurs obtenues (Fig.41), les résultats révèlent que les moyennes de Da sur le profil pédologique d'un mètre mettent en exergue le comportement du sol plus lourd au niveau de S2 et plus léger au sein de S1. La classification générale établie par profondeur étant la suivante : S2 > S1 > S3 (30 cm) ; S2 > S3 > S1 (60 cm) ; S3 > S1 > S2 (90 cm). De ces différents classements, il ressort que plus on va en profondeur, plus le sol au sein de S2 devient moins dense contrairement à celui de S3, qui lui devient plutôt lourd. Par contre au sein de S1, on peut dire qu'en subsurface, Da est moins lourde qu'en profondeur.



**Figure 41.** Densité apparente du sol à différentes profondeurs (30, 60 et 90 cm) et en moyenne sur 1m de profondeur, dans chaque sonde (1, 2 et 3)

A 30 cm de profondeur, les valeurs de Da, sont conformes avec les normes (FAO 2006) pour la limite inférieure. Transmettant un sol aéré, léger, favorable à la croissance des racines mais potentiellement moins stable au sujet de la faible rétention d'eau. Tandis que pour la limite supérieure, elle dépasse celle recommandée par la (FAO 2006). Suggérant une compaction significative du sol qui peut entrainer une limite dans la croissance racinaire de la plante.

A 60 cm de profondeur, les valeurs de Da obtenues sont au-dessus de la norme recommandée de la (FAO 2006). Suggérant une compaction importante du sol, elle peut entraver l'accès des racines à l'eau et aux nutriments ; ainsi qu'également affecter le drainage du sol.

A 90 cm de profondeur, la plage obtenue de  $D_a$  est acceptable pour la (FAO 2006) dans le cadre de la limite inférieure. Par contre elle dépasse la norme recommandée pour la limite supérieure. De ce fait, à cette profondeur, les valeurs obtenues peuvent indiquer un fort degré de compaction ( $2.12 \text{ g/cm}^3$ ), pouvant limiter la croissance des racines profondes et la percolation de l'eau.

La moyenne de  $D_a$  obtenue sur tout le profil d'un mètre de profondeur du sol est acceptable pour S1. Quant'à S3, elle est légèrement au-dessus de la norme recommandée. Mais au niveau de S2, elle dépasse la limite recommandée.

Dans l'ensemble, les valeurs de densité apparente obtenues aussi bien dans les parcelles de tomates que d'oranger sont inférieurs à  $2.65 \text{ g/cm}^3$ . D'après la (FAO 2006) sur l'étude des propriétés du sol, les sols en deçà de cette dernière ont une bonne structure, mais avec une possibilité de compaction pour les valeurs élevées

### **III.3 Matière organique du sol**

L'analyse de la matière organique (M.O.) a été réalisée en laboratoire sur des échantillons de sol prélevés avant (Av P) et après le paillage (Ap P) de la période 2022-2023, à différentes phases de croissance des tomates uniquement dans le bloc A et B. En 2023, cette analyse a aussi été effectuée pour le bloc B.

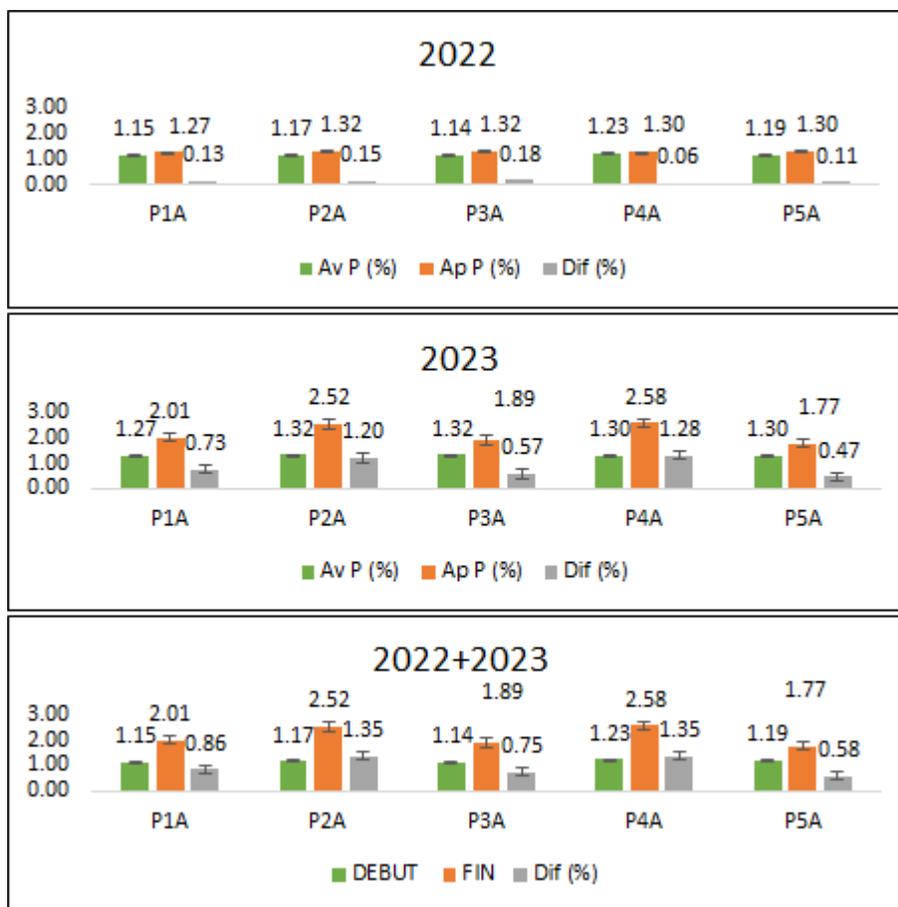
#### **a) Bloc A**

La comparaison des échantillons prélevés en 2022 avant (Av P) et après le paillage (Ap P) des parcelles (Fig.42) révèle une augmentation de la matière organique dans les parcelles paillées (P1-P4) par rapport à la parcelle non paillée (P5). Dans la parcelle P4, l'Av P est plus riche en M.O (1,23 %) que dans les autres parcelles. Cependant, après paillage, ce sont les parcelles P2 et P3 qui enregistrent les taux les plus élevés (1,32 %). La différence entre ces deux phases (Av P et Ap P) est plus marquée dans la parcelle P3, avec une augmentation de 0,18 %.

En 2023, l'impact du paillage s'est révélé beaucoup plus significatif dans les parcelles paillées que dans la parcelle témoin (sol nu) avec une nette amélioration de la matière organique.

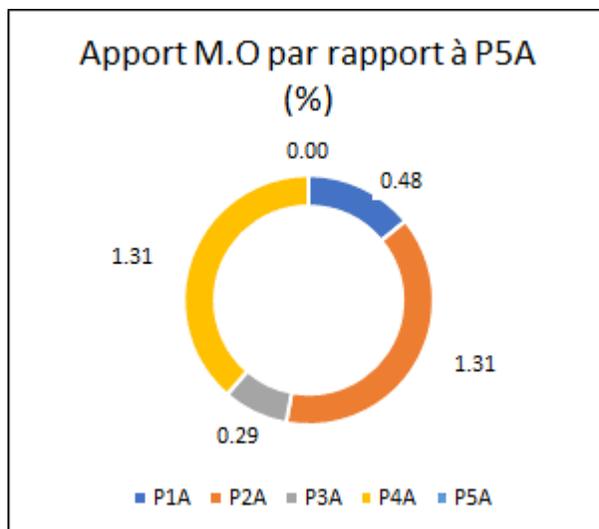
La parcelle P4 a enregistré une différence notable de 1,28 %, contrairement à 2022 où c'était la parcelle P2 qui montrait la plus grande variation.

Sur deux ans (Fig.42), le bilan montre que les parcelles paillées ont bénéficié d'une amélioration conséquente de la matière organique, contrairement à la parcelle témoin. Cette amélioration est particulièrement marquée dans la parcelle P4. En se basant sur les différences observées entre le début (Av P) et la fin (Ap P) des campagnes expérimentales, la classification suivante a été établie : P4A (1,35 %) ≥ P2A (1,35 %) > P1A (0,86 %) > P3A (0,75 %) > P5A (0,58 %). Cette classification montre que sur la durée, le paillage organique contribue à augmenter la matière organique dans le sol, jouant ainsi un rôle positif sur la qualité du sol.



**Figure 42.** Analyse de la matière organique (M.O) dans les différentes parcelles sur deux (02) ans

La figure 43 démontre que par rapport à la parcelle témoin (P5A), le paillage a permis une augmentation significative de la matière organique sur deux ans, variant de 0,29 % (P3A) à 1,31 % (P2A et P4A).



**Figure 43.** Apport de la matière organique (M.O) sur deux ans par le paillage comparé au témoin (P5A) du bloc A

Les résultats montrent clairement que l'utilisation de paillages organiques a un effet bénéfique significatif sur la matière organique du sol, surtout sur la durée. Les parcelles paillées ont non seulement maintenu mais aussi amélioré la teneur en matière organique, contrairement à la parcelle témoin. Soulignant l'efficacité du paillage dans l'enrichissement du sol en matière organique, améliorant la fertilité, la rétention d'eau et la structure du sol, tout en soutenant l'activité microbienne, ce qui est essentiel pour la santé et la productivité à long terme des sols agricoles. Plusieurs chercheurs (Simsek et al. 2017; Telkar et al. 2017; Tswanya et al. 2017; Admasu & Tamiru 2019; Sharma et al. 2023) ont montré que le paillage avec un accent plus prononcé pour l'organique, joue un rôle crucial dans l'augmentation de la matière organique dans le sol. Les résultats obtenus dans la zone d'étude sont en adéquation avec les propos de ces derniers.

D'après la (FAO 2006), un pourcentage de M.O compris entre 2 – 6 % est idéale pour maintenir une bonne fertilité du sol. Suite à l'observation des valeurs de ce paramètre, il

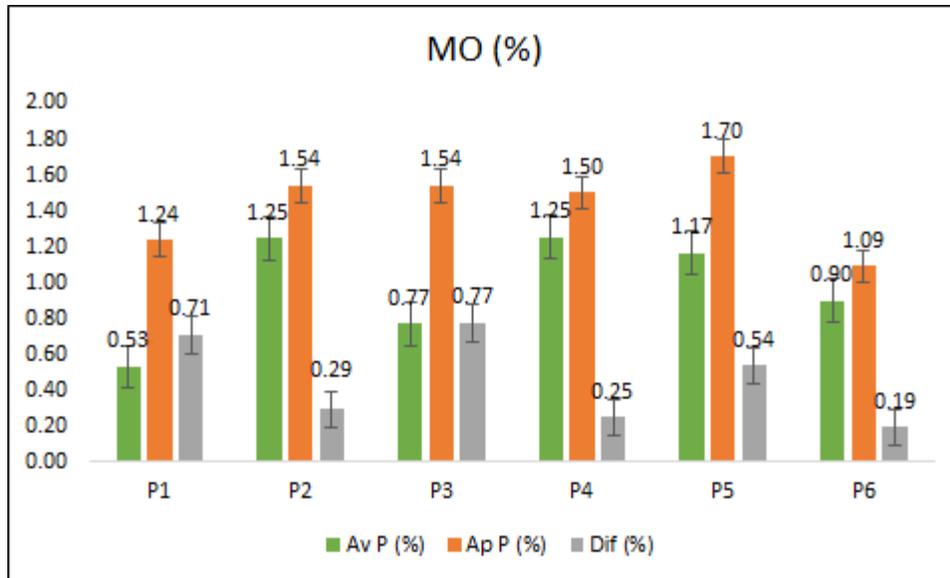
ressort que les valeurs de M.O obtenues sur deux ans cadrent bien avec la gamme proposée par cet organisme pour les parcelles P1, P2 et P4 principalement.

### **b) Bloc B**

L'observation de la figure 44 en 2023 montre que la matière organique (M.O) est nettement plus significative dans les parcelles paillées (P1, P3, P5 et P6) que dans les parcelles non paillées (P2 et P4). Mais aussi met en évidence l'aspect positif de l'ajout en comparant les valeurs de M.O avant le paillage (Av P) et après le paillage (Ap P). Il est également à noter que les parcelles paillées et irriguées par un système d'irrigation de surface (P3 et P5) présentent une teneur en matière organique plus élevée que celles irriguées par un système d'irrigation souterrain (P1, P6).

Dans les parcelles étudiées (P3 et P5), les niveaux de matière organique sont plus élevés après l'application de paillages et d'irrigation de surface, atteignant jusqu'à 1,70 %. Cela indique que l'irrigation de surface aide à maximiser les bénéfices du paillage sur la matière organique. Par contre dans les parcelles P1 et P6, bien que la matière organique ait augmenté après le paillage, les valeurs sont inférieures à celles observées avec l'irrigation de surface. Ainsi, l'irrigation goutte à goutte de surface semble favoriser une augmentation plus significative de la matière organique du sol lorsqu'elle est combinée avec le paillage organique, par rapport à l'irrigation souterraine. Cela est probablement dû à une meilleure répartition de l'eau en surface, ce qui améliore la décomposition et l'incorporation des paillages organiques.

D'après les normes de la (FAO 2006), la parcelle P5 est celle dont la valeur de M.O (1.70%) se rapproche le plus de la limite inférieure recommandée par la FAO ; contrairement aux autres dont M.O est inférieure.



**Figure 44.** Analyse de la matière organique (M.O) dans les différentes parcelles du bloc B

### III.4 PH du sol

#### III.4.1 Parcelles de tomates

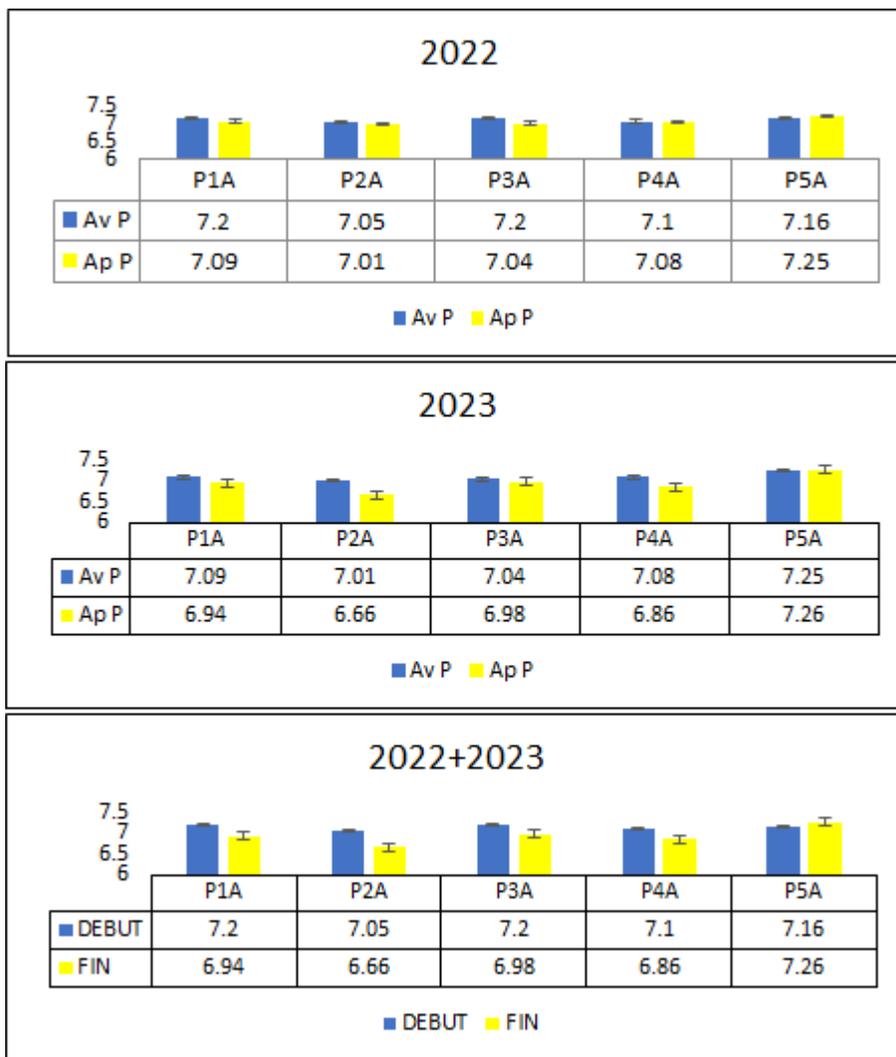
L'analyse de ce paramètre s'est effectuée dans les blocs A et B. Précision que l'étude s'est faite sur deux ans au sein du bloc A et uniquement en 2023 au sein du bloc B.

##### a) Bloc A

La figure 45 illustre l'évolution du pH du sol dans les parcelles paillées versus parcelle témoin au cours des différentes périodes de la campagne. Sur une période de deux ans, il a été observé que le pH du sol est passé de neutre à légèrement alcalin (2022) – légèrement acide à neutre (2023). Les différentes parcelles présentent une différence du pH de 0,26 (P1A), 0,39 (P2A), 0,22 (P3A), 0,24 (P4A) et 0,1 (P5A).

Le pH du sol dans le bloc A a diminué légèrement après l'application des paillages organiques, passant de légèrement alcalin à une gamme plus neutre, voire légèrement acide. Cette diminution peut être attribuée à la décomposition de la matière organique (copeaux de bois, sciure, paille), qui peut libérer des acides organiques, abaissant ainsi le pH du sol. L'organisme

international (FAO, 1986) recommande pour les tomates, un pH légèrement acide à neutre (5.5 à 7.5). Démontrant que ce changement de pH pourrait être bénéfique pour la croissance des tomates. De ce fait, le paillage avec des copeaux de bois, sciure et paille a contribué à une légère acidification du sol, rendant le pH plus favorable pour la culture des tomates. En effet, le pH après paillage (6,66 à 7,26) est plus proche de la gamme idéale proposée par la (FAO 2006). En somme, le paillage organique a aidé à ajuster le pH du sol dans une gamme plus propice à la croissance des tomates.

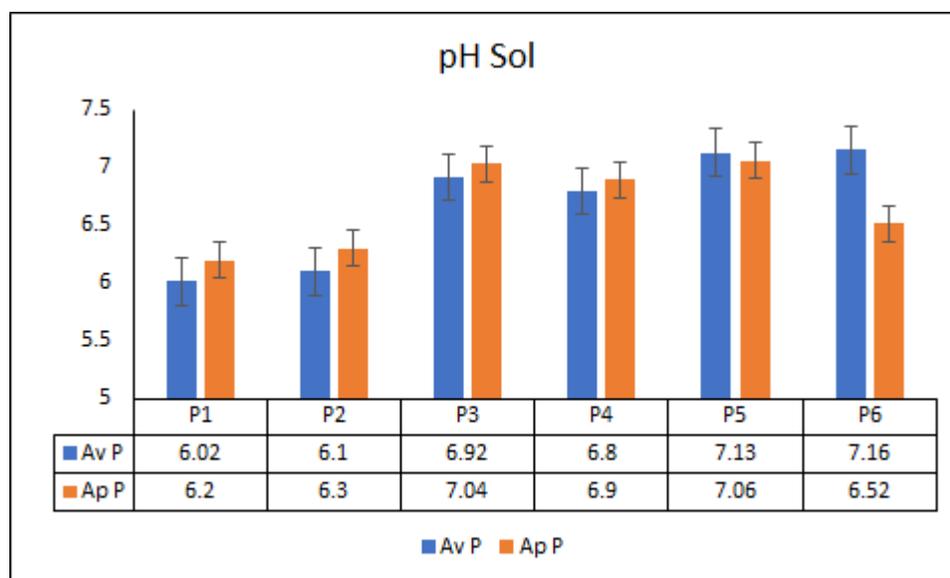


**Figure 45.** Etude du pH du sol de différents traitements sur deux (02) ans

## b) Bloc B

La figure 46 illustre l'évolution du pH du sol dans les parcelles paillées et celles témoins durant la campagne 2023 au sein du bloc B. Le regard de différentes valeurs traduit l'acidité du mélange en souterrain et la stabilité du BRF en surface et souterrain. Dans ce bloc, le pH du sol a montré une légère diminution après l'application des paillages (mélange et BRF), mais est resté globalement dans la même gamme (6.2 à 7.06), légèrement acide à neutre. Cette gamme de pH s'inscrit dans celle proposée par la (FAO 1986). De ce fait, elle est également favorable pour la culture de tomates.

Ainsi, les paillages organiques et les systèmes d'irrigation influencent le pH du sol de manière différente. Dans les deux blocs, les pratiques de paillage ont eu un effet bénéfique sur le pH du sol, le maintenant dans une gamme propice à la culture des tomates. Encore plus au sein du bloc B avec le couplage paillage mélange et irrigation goutte à goutte souterrain.

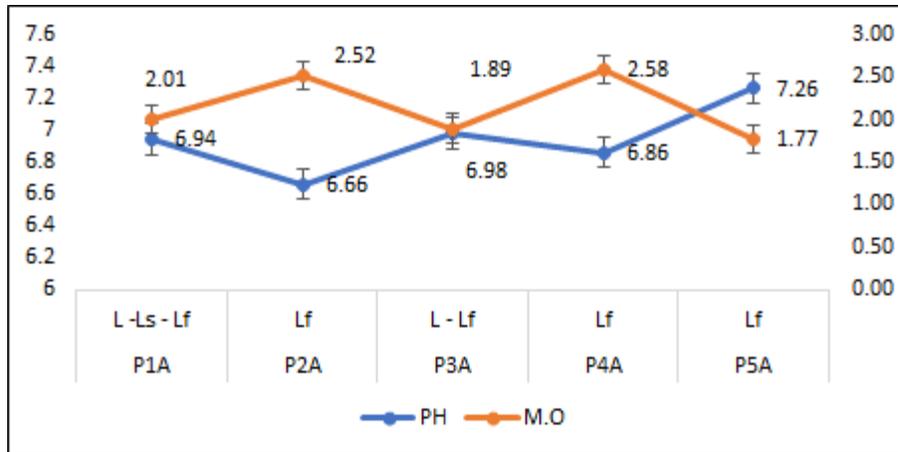


**Figure 46.** Etude du pH du sol de différents traitements uniquement en 2023

D'après certains chercheurs (Simsek et al. 2017; Stelli et al. 2018), le paillage en général et organique en particulier améliore les propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol parmi lesquelles le pH du sol. Par contre (Simsek et al. 2017) a plutôt montré que l'application du

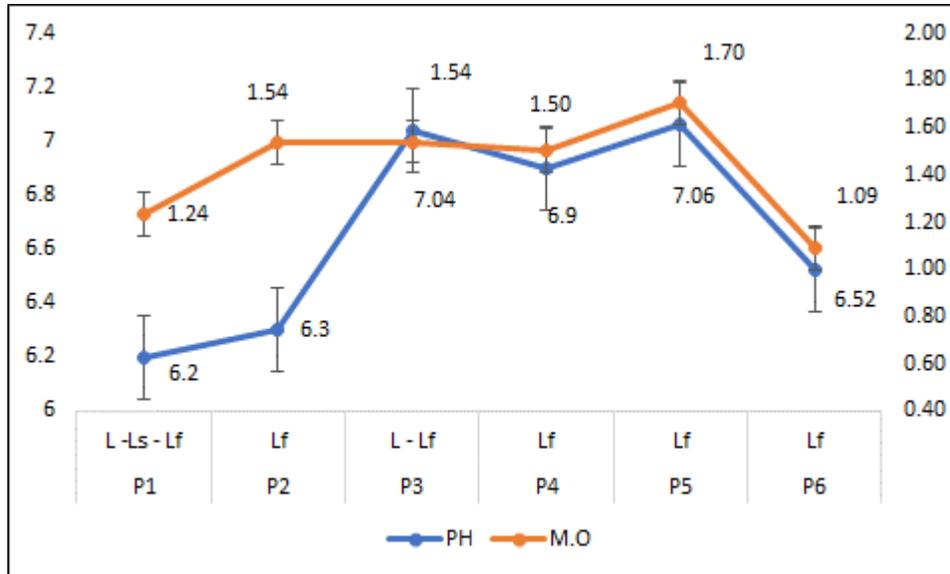
paillage n'affecte pas le pH du sol. Dans l'étude menée, il est clair que le paillage affecte directement le pH du sol. Cadrant ainsi avec les résultats obtenus par (Telkar et al. 2017; Stelli et al. 2018). Aussi la FAO précise que pour le maintien de la stabilité du pH du sol, il faut aussi considérer la qualité de l'eau, les méthodes d'irrigation appropriées, le drainage et accumulation des sels. Au de cela, il ressort que le goutte à goutte souterrain, semble idéal pour maintenir la stabilité de ce paramètre dans la zone d'étude.

La figure 47 illustre la relation existante sur deux ans entre le type de paillage organique, la texture, le pH et la matière organique du sol dans le bloc A. L'aperçu de ce graphe démontre que tous les paramètres suscités sont étroitement liés. Les paillages organiques, tels que les copeaux de bois, la sciure de bois, la paille de blé et le mélange, influencent significativement le pH et la matière organique du sol. Les sols paillés tendent à être légèrement acidifiés, avec la sciure de bois (P2A) ayant l'effet le plus prononcé (pH 6.66), tandis que la parcelle témoin non paillée (P5A) reste la plus alcaline (pH 7.26). En termes de matière organique, le mélange (P4A) et la sciure de bois (P2) augmentent significativement la teneur en matière organique (2.58 % et 2.52 % respectivement), comparé à la parcelle témoin (1.77 %). La texture du sol joue également un rôle crucial ; car les sols limoneux fins (Lf) dans les parcelles P2A, P4A et P5A retiennent mieux la matière organique que les sols avec des textures plus complexes (P1A et P3A). De ce fait, le paillage organique améliore la qualité du sol en augmentant la matière organique et en ajustant le pH, avec une efficacité accrue dans les sols limoneux fins.



**Figure 47.** Relation existante sur deux ans entre le type de paillage organique, la texture, le pH et la matière organique du sol dans le bloc A.

Utilisant uniquement les données sur une durée d'un an, la figure 48 présente sous forme de graphique, la relation existante entre le paillage, la texture du sol, le pH, la matière organique (M.O.) et le type d'irrigation. Les parcelles paillées (P1, P3, P5, P6) présentent des variations distinctes par rapport à celles témoins (P2, P4). En effet, les parcelles P1 et P3, indiquent une bonne rétention de M.O avec une légère acidité et un pH neutre sous irrigation souterraine et de surface. Les parcelles P5 et P6, montrent que l'irrigation de surface favorise un pH légèrement alcalin et une meilleure M.O comparé à l'irrigation souterraine. En comparaison, les parcelles témoins P2 et P4, soulignent que sans paillage, l'acidité et la matière organique sont modérément élevées. La texture limoneuse fine (Lf) favorise globalement la rétention de matière organique, surtout lorsqu'elle est combinée avec le paillage. En résumé, le paillage organique, surtout avec l'irrigation de surface, améliore la qualité du sol en augmentant la matière organique et en ajustant le pH du sol.

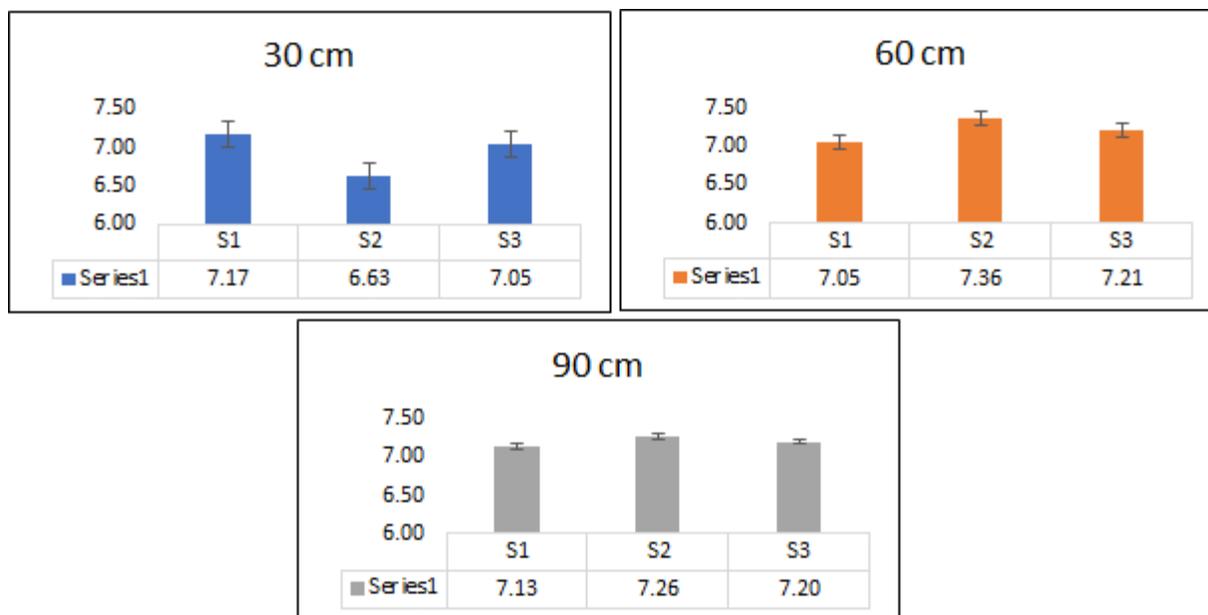


**Figure 48.** Relation existante sur un an entre le type de paillage organique, la texture, le pH, la matière organique du sol et le type de système d’irrigation dans le bloc B.

Ainsi, le paillage organique améliore les différentes propriétés physiques et chimiques du sol. Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus par (Telkar et al. 2017; Du et al. 2022).

### III.4.2 Orangers

Le pH du sol a été déterminée au laboratoire sur des échantillons de sol de 30, 60 et 90 cm de profondeur (Fig.49). Son analyse globale montre que le pH du sol varie de 6.63 à 7.36 sur un profil d’un mètre de profondeur. S2 a un pH du sol plus élevé parmi les sondes et S1 le plus faible à 60 et 90 cm de profondeur. Par contre à 30 cm, le contraire est plutôt observé. Selon la (FAO 2006), les différents résultats obtenus montrent que le pH du sol est favorable à l’agriculture ; avec des variations mineures entre les différentes sondes et profondeurs. Le sol reste dans une plage acceptable pour la plupart des cultures, bien que S2 montre une tendance vers un pH légèrement plus élevé en profondeur, ce qui pourrait nécessiter une gestion attentive à long terme.



**Figure 49.** pH du sol à différentes profondeurs (30, 60 et 90 cm) et suivant chaque sonde (1, 2 et 3)

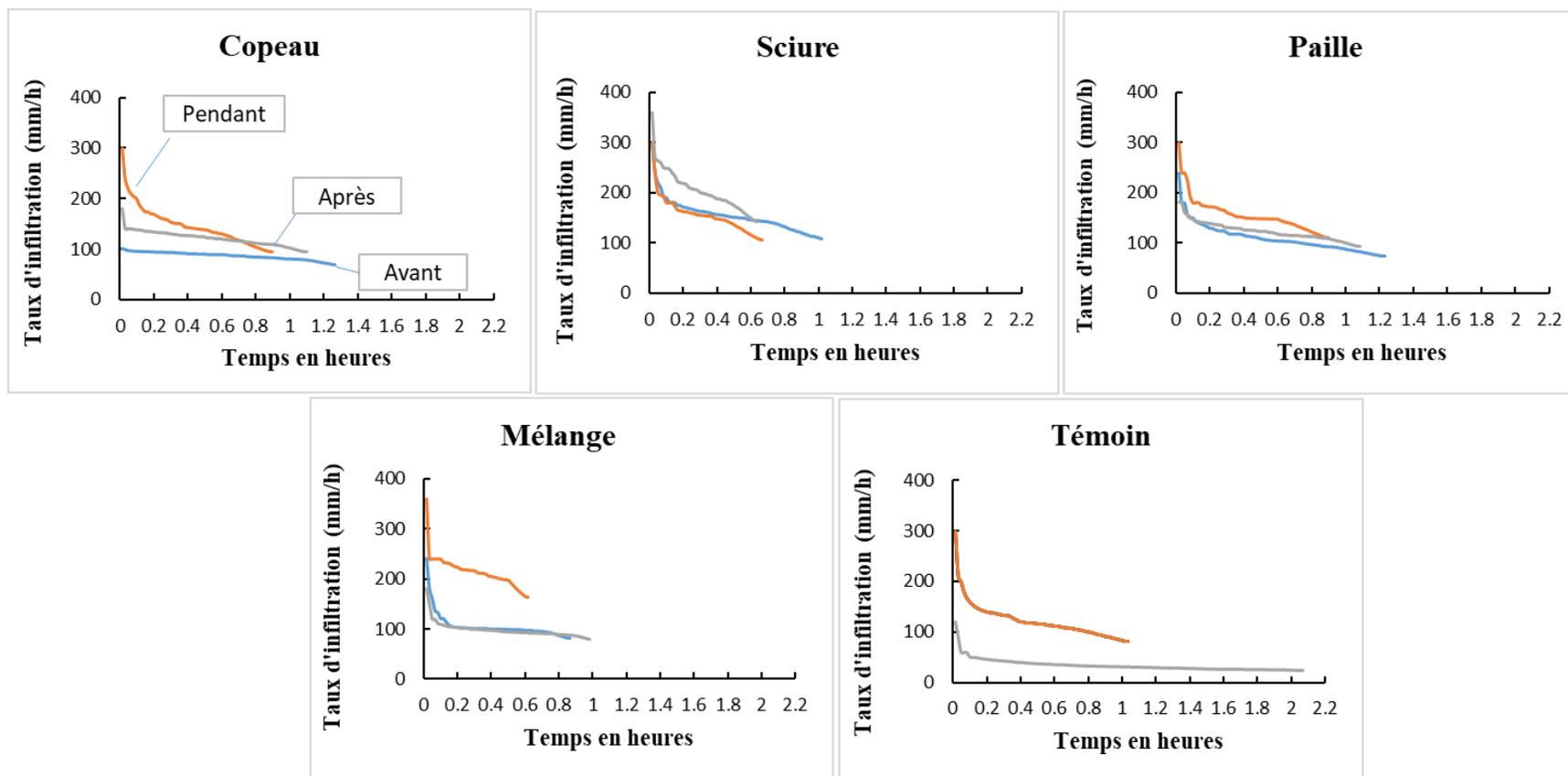
### III.5 Caractérisation de l'infiltration de l'eau dans le sol au niveau des parcelles de tomates et des orangers

#### III.5.1 Comparaison des taux d'infiltration de différents traitements uniquement au niveau des tomates

La figure 50 montre l'évolution du taux d'infiltration observé en champ dans chaque paillis et sol nu, avant le semis (sols non paillés), pendant la croissance sous-sols paillés et après maturation des plants de tomates (toujours sous les mêmes paillis). L'observation générale de ces graphes permet de constater que pendant la période de croissance de la plante, l'infiltration de l'eau dans le sol se fait plus rapidement avant semis ou encore après maturation de la tomate. Ce phénomène s'observe dans tous les paillis et sol nu (témoin). Cependant, un examen plus attentif du graphique de la sciure montre que le taux d'infiltration est légèrement plus élevé après la phase de fructification. En bref, il évolue à travers les différentes phases. Sur la base de cette

observation, nous pouvons en déduire que ce paillis améliore l'humidité du sol au fil du temps, contrairement à d'autres paillis. En effet, après la phase de croissance et de fructification, le comportement d'infiltration d'eau dans le sol avec d'autres paillis tend à être similaire à celui observé lors de la phase de pré-semis des plants de tomate. Ce comportement est mieux illustré dans le mélange. Dans ce contexte, des facteurs tels que le labourage du sol, la décomposition du paillis et le développement du système racinaire doivent être pris en considération pour expliquer l'évolution de l'humidité.

L'observation générale des graphiques montrant l'évolution du taux d'infiltration observée sur le terrain pour chaque paillis et pour le sol nu, avant le semis, pendant la croissance et après la maturation des plants de tomate, nous permet de constater que l'infiltration de l'eau dans le sol est plus rapide pendant la période de croissance des plantes. Ce phénomène est observé dans tous les paillis et dans le sol nu (témoin). Cela peut s'expliquer, d'une part, par le paillage de la surface du sol et, d'autre part, par le labourage du sol avant le semis, en plus du développement racinaire de la plante pendant cette période. Plusieurs chercheurs (Farid et al. 2019; Liao et al. 2021) indiquent que le paillage faciliterait l'infiltration après l'irrigation ou des précipitations très importantes.



**Figure 50.** Comparaison du taux d'infiltration ( $\text{mm h}^{-1}$ ) observé avant le semis des plants de tomate (en bleu), pendant la croissance des plants (en orange) et après la fructification des tomates (en gris) dans les paillis (copeaux de bois, sciure de bois, paille de blé, mélange de trois premiers paillis) et le sol nu (témoin)

### III.5.2 Détermination des paramètres hydrauliques de chaque modèle

#### 1) Tomates

Les tableaux 6 et 7 présentent les paramètres hydrauliques de chaque modèle obtenu au niveau des parcelles de tomates et d'orangers. Le tableau 6 montre que la conductivité hydraulique simulée est élevée dans chaque modèle d'infiltration. Par ailleurs, durant les trois phases de la culture de tomates (avant semis, pendant la croissance et après maturation), particulièrement pendant la phase de développement des plantes, les valeurs de conductivité hydrauliques sont plus élevées dans les parcelles.

**Tableau 6.** Paramètres hydrauliques des différents modèles avant le semis, pendant la croissance et après la maturation des plants de tomates

Parcelle	Période	P			K			KM		
		S (mm h <sup>-1</sup> )	K (mm h <sup>-1</sup> )	Moy	A (mm h <sup>-1</sup> )	B	Moy	A (mm h <sup>-1</sup> )	B	Moy
Copeau de bois	Avant	9.27	80.07	87.65	82.47	0.07	87.65	0.63	0.85	1.46
	Pendant	61.73	87.12	146.03	106.87	0.26	146.03	4.19	0.64	2.43
	Après	21.35	102.16	120.77	108.34	0.11	120.77	1.41	0.75	2.01
Sciure	Avant	53.13	105.47	153.45	124.22	0.2	153.45	3.68	0.64	2.55
	Pendant	53.54	96.93	155.34	111.34	0.23	155.34	3.59	0.63	2.58
	Après	60.81	136.7	204.57	148.65	0.21	204.57	3.98	0.66	3.4
Paille de blé	Avant	47.9	68.78	108.4	87.94	0.24	108.4	3.39	0.62	1.8
	Pendant	54.62	103.57	155.69	122.01	0.21	155.69	3.81	0.62	2.59
	Après	28.73	97.16	122.38	105.96	0.15	122.38	1.93	0.7	2.03
Mélange	Avant	41.03	64.75	104.57	82.83	0.19	104.57	3.18	0.48	1.74
	Pendant	44.02	164.69	214.4	173.55	0.14	214.4	2.95	0.67	3.57
	Après	25.05	75.54	98.52	85.52	0.13	98.52	1.84	0.57	1.64
Témoin	Avant	59.07	69.5	122.46	93.11	0.26	122.46	4.23	0.58	2.04
	Pendant	59.07	69.5	122.46	93.11	0.26	122.46	4.23	0.58	2.04
	Après	24.83	18.38	34.56	31.05	0.27	34.56	2.11	0.5	0.57
<b>Min</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Max</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Moy</b>		42.94	89.35	130.08	103.80	0.20	130.08	3.01	0.63	2.16

Tout comme au sein des parcelles de tomates, l'analyse générale du tableau 7, montre que les valeurs de conductivité hydraulique simulée sont élevées dans chaque modèle d'infiltration dans les parcelles d'oranger.

**Tableau 7.** Paramètres hydrauliques des différents modèles obtenus au niveau de la parcelle d'oranger

Echantillon	P			K			KM		
	S (mm/h)	K (mm/h)	Moy	A (mm/h)	B	Moy	A (mm/h)	B	Moy
KTO1	23.00	48.61	73.70	53.45	0.22	73.70	1.51	0.65	1.23
KTO2	6.04	109.72	116.31	108.59	0.05	116.31	0.61	0.94	1.94
KTO3	22.72	122.82	144.14	126.02	0.12	144.14	1.48	0.82	2.40
KTO4	22.19	37.58	53.56	46.76	0.24	53.56	1.52	0.66	0.89
KTO5	11.64	40.84	52.89	43.48	0.15	52.89	0.79	0.64	0.88
KTO6	4.92	34.93	39.08	36.87	0.07	39.08	0.38	0.79	0.65
KTO7	31.24	30.06	54.18	42.24	0.33	54.18	2.19	0.63	0.90
KTO8	15.01	53.85	63.12	61.34	0.14	63.12	0.96	0.78	1.05
KTO9	81.45	142.62	251.64	133.65	0.33	251.64	4.62	0.78	4.19
<b>Min</b>	<b>4.92</b>	<b>30.06</b>	<b>39.08</b>	<b>36.87</b>	<b>0.05</b>	<b>39.08</b>	<b>0.38</b>	<b>0.63</b>	<b>0.65</b>
<b>Max</b>	<b>81.45</b>	<b>142.62</b>	<b>251.64</b>	<b>133.65</b>	<b>0.33</b>	<b>251.64</b>	<b>4.62</b>	<b>0.94</b>	<b>4.19</b>
<b>Moyenne</b>	<b>24.25</b>	<b>69.00</b>	<b>94.29</b>	<b>72.49</b>	<b>0.18</b>	<b>94.29</b>	<b>1.56</b>	<b>0.74</b>	<b>1.57</b>

### III.5.3 Evaluation des critères de performances de chaque modèle et sélection du meilleur modèle du site

Les tableaux 8 et 9 présentent les différents critères de performance utilisés pour déterminer le meilleur modèle pour chaque type de paillis (tomates) et pour chaque point d'essai (orangers) dans la zone d'étude.

En examinant les valeurs obtenues pour les différents critères de performance des divers modèles appliqués à chaque paillis (Tab.8) , nous constatons que le modèle de Kostiakov modifié

est le meilleur pour cette zone. Nous remarquons également que le modèle de Philip a la plus faible valeur de PBIAS, mais, il affiche des valeurs de RMSE élevées contrairement au modèle de Kostiakov. En résumé, bien que ces trois modèles soient applicables dans la région, le modèle de Kostiakov modifié se révèle être le plus performant des trois. Les paramètres hydrauliques de chaque modèle, observés pour chaque paillis avant le semis, pendant la croissance et après la maturation de la culture de tomate, montrent que des valeurs élevées de conductivité hydraulique simulée sont enregistrées pour chaque modèle au cours des trois phases de développement des plantes. Le mélange, utilisé comme paillis, enregistre les valeurs les plus élevées par rapport aux autres traitements. Certains chercheurs attribuent cette augmentation au paillage de la surface du sol, qui améliore, voire augmente, le taux de conductivité hydraulique du sol (Simsek et al. 2017; Stelli et al. 2018; Mkhabela et al. 2019). Pour les valeurs élevées du mélange, selon (Bear 1972), elles s'expliquent par la grande capacité du sol sous ce paillis à laisser passer l'eau, contrairement aux autres paillis.

**Tableau 8.** Critères de performance et sélection du meilleur modèle dans chaque paillis (copeau de bois, sciure, paille de blé, mélange) et le témoin

Plot	Texture sol	Période	R <sup>2</sup>			RMSE			PBIAIS			Meilleure modèle
			P	K	KM	P	K	KM	P	K	KM	
Copeau de bois	L-Ls	Avant	0.48	0.70	0.83	5.27	4.03	1.03	0.00	8.33	-13.33	Kostiakov modifié
		Pendant	0.90	0.92	0.96	12.27	8.96	2.21	0.00	3.92	-19.35	
		Après	0.70	0.81	0.94	7.82	6.07	1.24	0.00	12.47	-9.57	
Sciure de bois	Lf	Avant	0.90	0.91	0.98	9.83	7.82	1.61	0.00	15.42	-12.91	Kostiakov modifié
		Pendant	0.91	0.90	0.98	10.55	9.36	1.11	0.00	23.28	-7.23	
		Après	0.87	0.91	0.96	15.05	11.63	1.75	0.00	17.53	-13.29	
Paille de blé	Lf	Avant	0.91	0.94	0.97	7.88	5.39	1.93	0.00	3.36	-17.24	Kostiakov modifié
		Pendant	0.92	0.92	0.98	9.61	7.85	1.37	0.00	17.35	-12.69	
		Après	0.81	0.91	0.94	7.95	5.01	1.45	0.00	5.80	-16.70	
Mélange	Lf	Avant	0.94	0.86	0.99	5.72	10.13	0.28	0.00	45.45	-2.01	Kostiakov modifié
		Pendant	0.79	0.79	0.98	14.42	14.51	0.82	0.00	42.23	-0.30	
		Après	0.95	0.90	0.99	3.24	5.27	0.30	0.00	12.66	-2.04	
Témoin	Lf	Avant	0.95	0.95	0.98	7.69	6.96	1.63	0.00	12.22	-12.06	Kostiakov modifié
		Pendant	0.95	0.95	0.98	7.69	6.96	1.63	0.00	12.22	-12.06	
		Après	0.96	0.97	0.98	2.17	2.88	1.06	0.00	7.27	-6.60	
Moyenne			0.86	0.89	0.96	8.48	7.52	1.30	0.00	15.97	-10.49	
Min			0.48	0.70	0.83	2.17	2.88	0.28	0.00	3.36	-19.35	
Max			0.96	0.97	0.99	15.05	14.51	2.21	0.00	45.45	-0.30	

L'analyse des valeurs obtenues pour les différents critères de performance de divers modèles appliqués à chaque point des parcelles d'oranger (Tab.9), montre que le modèle Kostiakov modifié est le meilleur pour cette zone. La remarque mentionne aussi que le modèle Philip a la plus faible valeur de PBIAS par rapport à Kostiakov, mais il affiche des valeurs de RMSE élevées par rapport au modèle Kostiakov, En résumé, bien que ces trois modèles soient applicables dans la région, le modèle de Kostiakov modifié se révèle être le plus performant des trois modèles.

**Tableau 9.** Critères de performance et sélection du meilleur modèle pour chaque point d'essai d'infiltration

Echantillon	R <sup>2</sup>			RMSE			PBIAIS			Meilleur modèle
	P	K	KM	P	K	KM	P	K	KM	
KTO1	0.88	0.94	0.94	5.48	3.71	0.74	0.00	0.02	-0.07	<b>KM</b>
KTO2	0.31	0.45	0.73	5.83	5.11	0.47	0.00	0.12	-0.06	
KTO3	0.57	0.75	0.85	11.76	9.11	1.79	0.00	0.23	-0.20	
KTO4	0.75	0.93	0.87	6.57	4.63	2.17	0.00	0.00	-0.24	
KTO5	0.89	0.95	0.95	2.62	1.75	0.39	0.00	0.02	-0.03	
KTO6	0.64	0.57	0.94	2.06	2.21	0.18	0.00	0.06	0.04	
KTO7	0.80	0.93	0.89	8.22	7.17	2.52	0.00	-0.07	-0.21	
KTO8	0.61	0.81	0.90	5.60	3.93	1.96	0.00	0.08	-0.27	
KTO9	0.60	0.74	0.72	47.04	46.38	4.14	0.00	1.68	-0.31	
<b>Moyenne</b>	<b>0.67</b>	<b>0.79</b>	<b>0.87</b>	<b>10.58</b>	<b>9.33</b>	<b>1.60</b>	<b>0.00</b>	<b>0.24</b>	<b>-0.15</b>	
<b>Min</b>	<b>0.31</b>	<b>0.45</b>	<b>0.72</b>	<b>2.06</b>	<b>1.75</b>	<b>0.18</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.31</b>	
<b>Max</b>	<b>0.89</b>	<b>0.95</b>	<b>0.95</b>	<b>47.04</b>	<b>46.38</b>	<b>4.14</b>	<b>0.00</b>	<b>1.68</b>	<b>0.04</b>	

Sur la base de l'évaluation des critères de performance sélectionnés, le modèle de Kostiakov modifié s'est révélé être le meilleur dans la zone d'étude ; aussi bien au sein des parcelles de tomates que d'oranger. Selon plusieurs chercheurs (Yuemei et al. 2008; Vand et al. 2018; Niyazi et al. 2022), le meilleur modèle est celui qui présente un RMSE et un PBIAS minimaux, ainsi qu'un  $R^2$  maximum. Dans notre étude, le modèle de Kostiakov modifié est le meilleur avec en moyenne d'un côté  $R^2$  de 0,96, RMSE de 1.30, PBIAS de -10.49 pour les tomates et de l'autre côté :  $R^2$  de 0,87, RMSE de 1.60, PBIAS de -0.15 pour les orangers

Globalement, ces trois modèles sont applicables sur le terrain, le modèle de Kostiakov modifié étant le meilleur. Ce résultat est similaire à celui obtenu par (Smerdon & Blair 1988), qui ont démontré que le modèle de Kostiakov modifié est l'un des meilleurs modèles à appliquer pour l'irrigation de surface. Ainsi, selon ces critères de performance, nous pouvons établir le classement suivant : Kostiakov modifié > Kostiakov  $\geq$  Philip. La recherche menée par (Zolfaghari 2012) sur sept modèles d'infiltration révèle que les modèles de Kostiakov modifié et Kostiakov sont les mieux classés. (Mirzaee et al. 2014) affirment que le modèle de Kostiakov modifié est le meilleur pour les sols limoneux fins et fait partie des meilleurs modèles pour les sols limoneux, limono-argileux et argilo-limoneux.

### **III.6 Caractérisation physique de l'eau irriguée au sein des parcelles de tomates et d'oranger**

Le tableau 10 présente quelques paramètres physiques de l'eau analysés au niveau des parcelles de tomates et d'oranger. Lesquelles ont été comparés aux normes (FAO 2008).

Les valeurs de pH concernant les deux cultures (7,30 pour les tomates et 7.09 pour les orangers), se situent dans les normes proposées par la FAO. Légèrement au - dessus de la neutralité, ce paramètre indiquant une légère alcalinité, nécessite une surveillance et gestion des conditions du sol et de la nutrition des plantes pour assurer une croissance saine

Pour les deux cultures, les valeurs de CE sont inférieures à 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce qui les place dans la catégorie de "faible salinité" selon les normes FAO. Traduisant une faible concentration de sels dissous dans l'eau. Ce qui est favorable pour les tomates et les orangers dans leurs croissances car il n'y a pas de risque significatif de stress salin ou d'accumulation de sels dans le sol,

Les valeurs de température obtenues dans les deux cultures, sont légèrement en dessous de la plage optimale recommandée par la FAO (20 - 30 °C). Ce qui peut quelque part

impacter sur les processus physiologiques des plantes (absorption de l'eau, nutriments, croissance).

Ainsi, des résultats obtenus, il ressort que l'eau analysée peut globalement être qualifiée d'adaptée à l'irrigation des cultures de tomates et d'oranger.

**Tableau 10.** Analyse physique des eau utilisées pour irriguer les tomates et les orangers

<b>Paramètres</b>	<b>Tomates</b>	<b>Orangers</b>	<b>Normes FAO (2008)</b>
<b>pH</b>	7.30	7.09	6.5 - 8.4
<b>EC(<math>\mu</math>S/cm)</b>	699	619	< 700 - Faible
<b>T (<math>^{\circ}</math>C)</b>	19.42	19.48	20 - 30

### III.7 Conclusion

Les études des sols montrent tout d'abord que le support sur lequel les tomates et les arbres d'oranger ont été plantés, objet de ce travail, possède majoritairement une matrice de limon. La densité apparente varie de 1,18 à 1,67 g/cm<sup>3</sup>, avec une moyenne de 1,38 g/cm<sup>3</sup> pour les tomates ; de 1,58 à 1,78 g/cm<sup>3</sup> dont la moyenne est de 1,66 g/cm<sup>3</sup> pour les orangers.

Avant le paillage, la matière organique varie de 1,14 à 1,23 % au sein du bloc A ; de 0,53 à 1,25 % au sein du bloc B. Quant au pH du sol, il varie de 7,05 à 7,2 pour le bloc A et de 6,02 à 7,16 pour le bloc B au niveau des tomates. Après le paillage, la matière organique est comprise entre 1,77 et 2,58 % pour le bloc A ; de 1,09 à 1,70 % pour le bloc B. En ce qui concerne le pH du sol, il est compris entre 6,66 et 7,26 pour le bloc A ; 6,2 et 7,06 pour le bloc B. Côté Orangers, le pH du sol varie plutôt 6,63 à 7,36 sur un profil d'un mètre de profondeur.

Le traitement des données d'infiltration obtenues in situ aussi bien dans les parcelles de tomates que celles des orangers montre globalement que le modèle de Kostiakov modifié est le meilleur du point de vue applicabilité et vérification mathématique. En effet, ce modèle présente comme critères de performance en moyens d'une part  $R^2 = 0,96$ , RMSE = 1.30, PBIAS = -10.49 pour les tomates ; d'autre part :  $R^2 = 0,87$ , RMSE = 1.60, PBIAS = -0.15 pour les orangers.

L'analyse de l'eau irriguée au sein des parcelles de tomates présente un pH de 7.30, une conductivité électrique de 699  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et une température de 19,42 °C. Côté orangers, l'analyse montre que le pH est de 7,09 ; la conductivité électrique est de 619  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et la température est de 19,48 °C. Indiquant d'après la FAO que la qualité de l'eau est bonne pour l'irrigation.

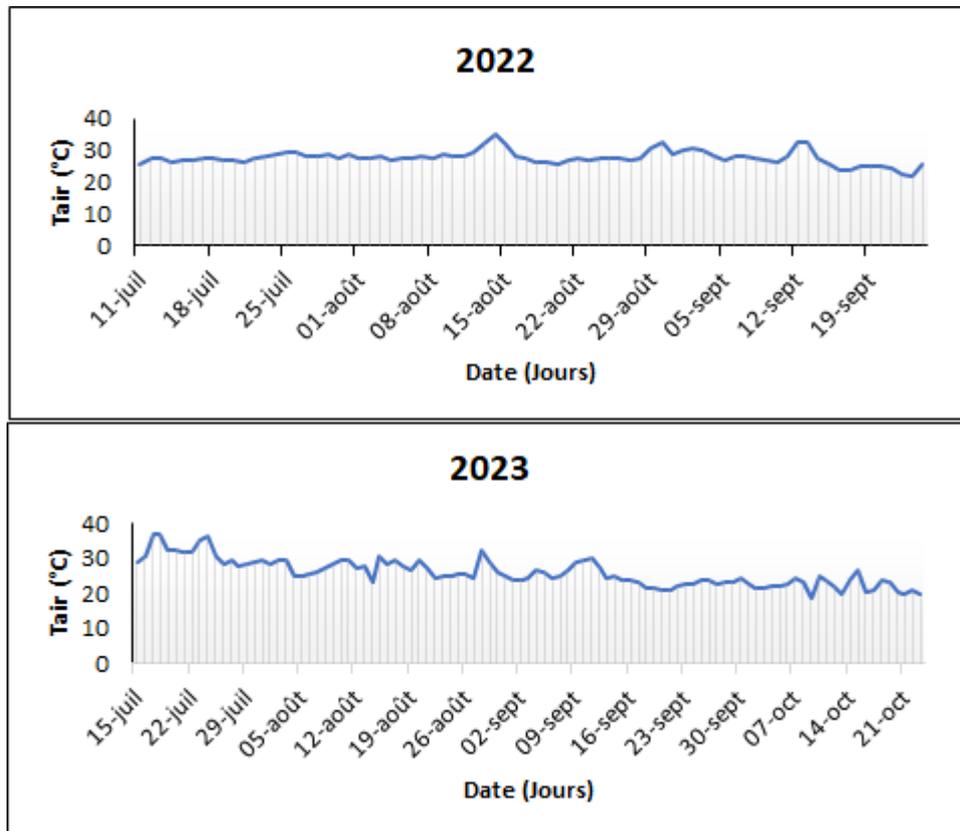
## **CHAPITRE IV: INFLUENCE DU PAILLAGE ORGANIQUE SUR LES PROPRIETES DU SOL ET DE L'IRRIGATION DANS LA CULTURE DE LA TOMATE**

Pour examiner les effets du paillage organique sur la qualité du sol et l'efficacité de l'irrigation, nous avons tenu compte de l'interaction entre l'humidité, la température et la conductivité du sol, l'eau irriguée, la croissance des plants de tomates et le rendement dans les conditions climatiques de cultures spécifiques. L'objectif principal étant d'identifier le meilleur paillis organique qui améliore la structure du sol et influence l'efficacité de l'irrigation.

### **IV.1 Paramètres climatiques de la zone**

#### **IV.1.1 Température de l'air**

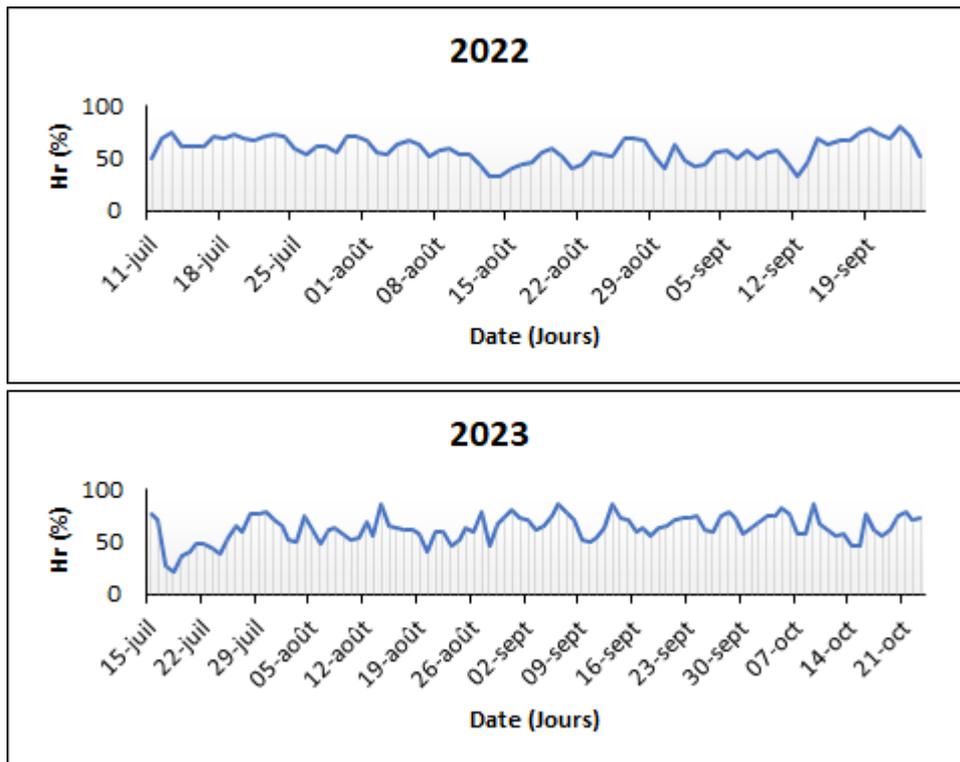
Exprimée en degrés Celsius (°C), ce paramètre ( $T_{\text{air}}$ ) mesure la chaleur ou le froid dans l'atmosphère. Mais aussi influence directement les conditions météorologiques, la croissance des plantes et le confort humain. Les variations de température ont été relevées quotidiennement toutes les dix (10) min via la station météorologique installée en champ au cours de la période de campagnes pendant deux ans. La figure 51 présente des fluctuations de températures moyennes durant ces périodes. L'examen de cette figure permet d'apercevoir des pics maximums le 14 Août 2022 et le 18 Juillet 2023. L'allure général des courbes montre qu'en 2022, la température de l'air a tendance à légèrement augmenter tout au long de la saison ; les valeurs varient de 21.98 °C (23 Septembre 2022) à 35.16 °C (14 Août 2022). A la deuxième année, le constat effectué tout le long de la période montre que la température de l'air diminue au fur et à mesure. Les valeurs se situent entre 18.47 °C (09 Octobre 2023) et 40.68°C (11 Juillet 2023).



**Figure 51.** Variation de la température moyenne de l’air sur deux ans durant la période expérimentale

#### IV.1.2 Humidité de l’air

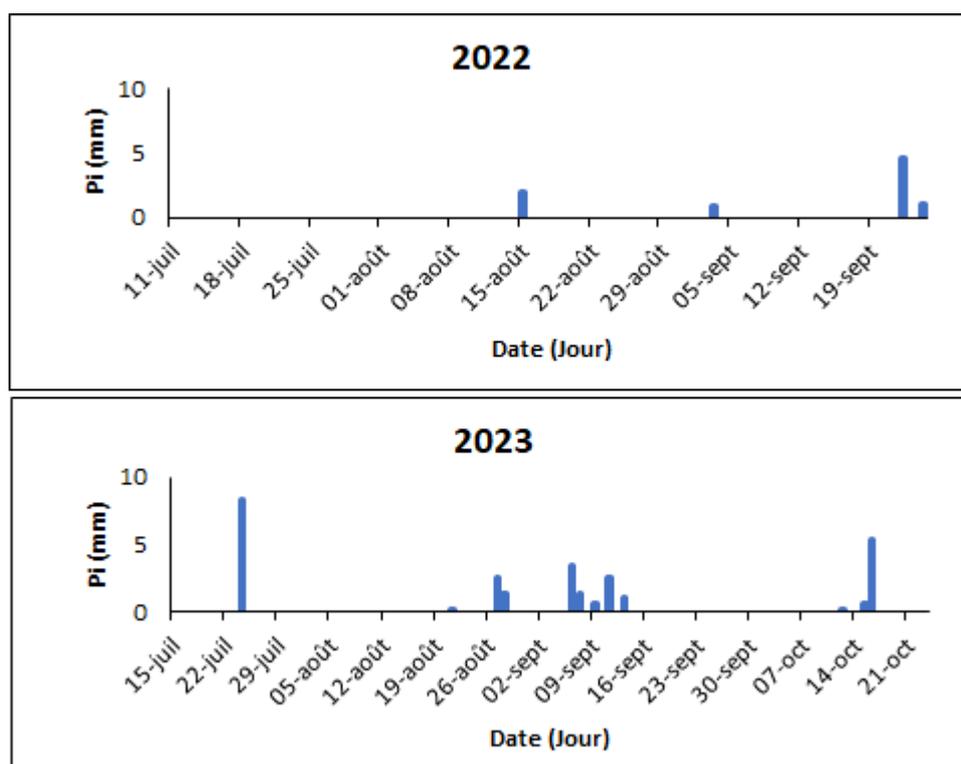
C’est la mesure du rapport de la quantité d’eau effectivement contenue dans l’air et la capacité d’absorption dans les conditions de sa saturation à la température donnée. La figure 52 présente en moyennes les données d’humidité relatives (Hr) quotidiennes relevées durant la saison de croissance de la plante sur deux (02) ans. L’allure général des courbes montre qu’en 2022, les fluctuations d’humidité de l’air varient de 31.66 % (13 Août 2022) à 80.17 % (22 Septembre 2022). A la deuxième année, le constat effectué tout le long de la période montre que les valeurs d’humidité de l’air oscillent entre 19.54 % (11 Juillet 2023) et 86.48 % (09 Octobre 2023).



**Figure 52.** Variation de l’humidité relative (Hr) moyenne de l’air sur deux ans durant la période expérimentale

#### IV.1.3 Pluviométrie

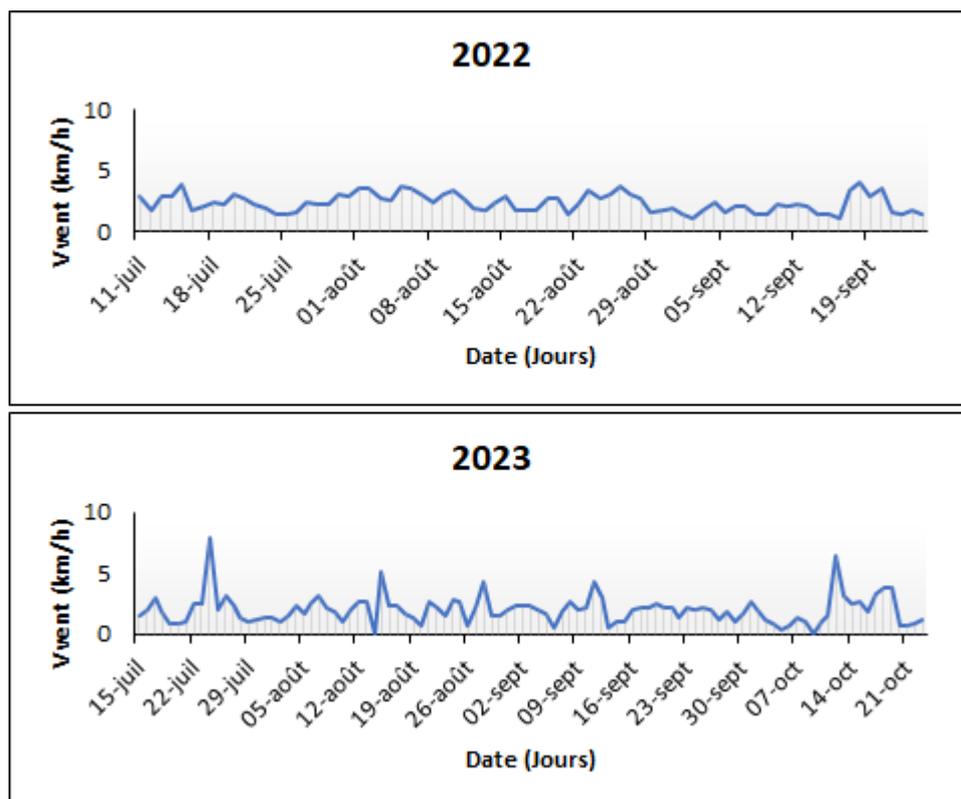
Exprimée en millimètres (mm), il s’agit des gouttelettes d’eau qui tombent du ciel sous forme de pluie, de neige, grêle ou brouillard. La figure 53 présente les précipitations relevées durant les mêmes périodes des année 2022 et 2023. L’examen de ce graphique mentionne une pluviométrie irrégulière avec un pic maximum de 4.60 mm enregistré le 22 Septembre 2022 et un autre en 2023, de 8.40 mm enregistré le 24 Juillet 2023.



**Figure 53.** Variation de la pluviométrie (Pi) sur deux ans, au cours de la période expérimentale

#### IV.1.4 Vitesse du vent

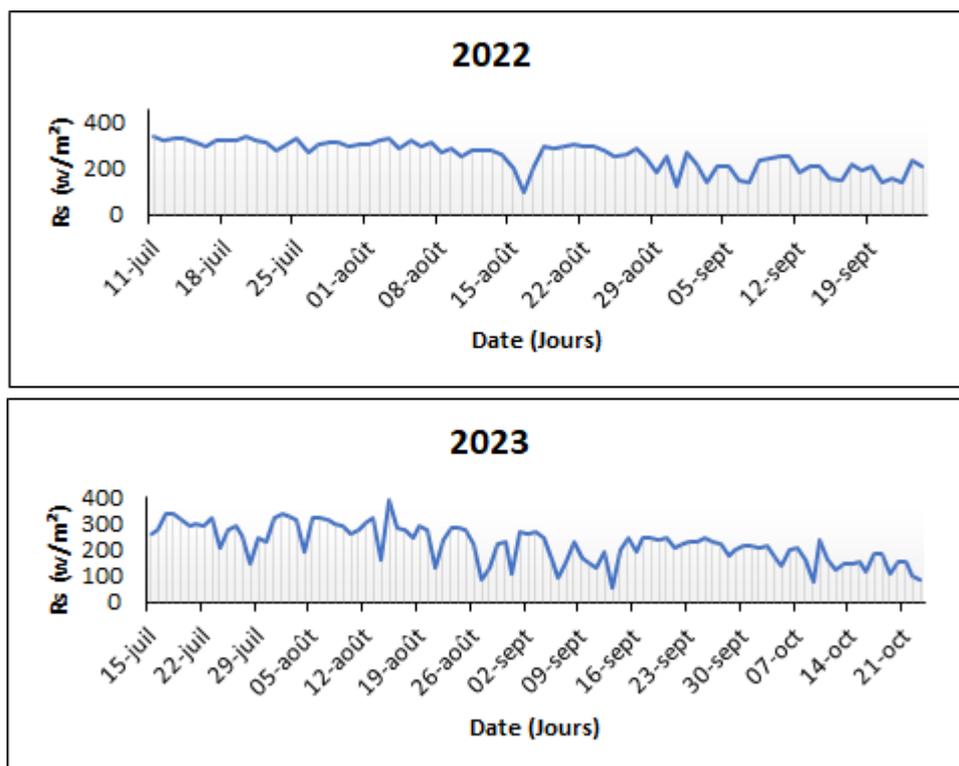
Exprimé en Kilomètres par heures (km/h), ce paramètre mesure la rapidité avec laquelle l'air se déplace dans l'atmosphère. Ces données ont été relevées quotidiennement grâce à la station météorologique installée en champ. La figure 54 traduit le comportement quotidien de la vitesse du vent ( $V_{vent}$ ) en moyenne sur une période de deux (02) ans lors du développement de la culture. Suivant la comparaison des deux années de ce paramètre, les fluctuations de vitesse du vent ont tendance à être plus élevées en 2023 qu'en 2022. A cet effet, elles varient de 1.02 km/h (16 Septembre 2022) à 4.05 km/h (18 Septembre 2022) durant la première année ; et de 0 km/h (14 Août 2023) à 7.82 km/h (24 Juillet 2023) durant la seconde année.



**Figure 54.** Variation de la vitesse moyenne du vent (km/h) sur deux ans durant la période expérimentale

#### IV.1.5 Rayonnement solaire

Exprimé en watt par mètre carré ( $w/m^2$ ), il représente l'énergie du soleil qui atteint la surface de la Terre sous forme de lumière et de chaleur. Ce paramètre a été mesuré toutes les 10 min directement par le pyranomètre installé sur la station météorologique présente en champ. La figure 55 présente l'évolution de ce paramètre ( $R_s$ ) sur deux (02) ans au cours de la période de croissance de la plante. L'examen de cette figure montre que ce paramètre varie de  $97.21 w/m^2$  (16 Août 2022) à  $337.10 w/m^2$  (11 Juillet 2022) la première année ; puis de  $52.93 w/m^2$  (13 Septembre 2023) à  $392.38 w/m^2$  (15 Août 2023) la seconde année. Mettant en exergue l'augmentation du rayonnement solaire un peu plus prononcé en 2023 qu'en 2022.



**Figure 55.** Variation du rayonnement solaire ( $R_s$ ) moyen ( $w/m^2$ ) sur deux ans pendant la période expérimentale

Le tableau 11 présente la synthèse moyenne sur deux (02) ans des données climatiques obtenus au cours de la période de croissance de la culture de tomate. Son observation générale met en exergue des précipitations plus élevées en l’an 2023 que 2022 ; pour des températures de différence de  $1^\circ C$  entre les deux années dont 2022 est celui ayant enregistré ce plus. Suit de l’humidité de l’air plus élevé en 2023 que 2022. Quant à la vitesse de vent et rayonnement solaire, 2022 est celle ayant enregistrée le plus. Pour de besoins en eau légèrement plus important en 2022 que 2023.

**Tableau 11.** Données climatiques de la station agrométéorologique du site expérimental sur deux (02) ans pendant la période de croissance de la culture de tomates

Année	Pi (mm)	Tair min ( $^\circ C$ )	Tair max ( $^\circ C$ )	Tair moy ( $^\circ C$ )	H.Rel (%)	Vvent (Km/h)	Rs ( $w/m^2$ )	ETPo (mm/jr)
2022	8.4	21.65	35.00	27.71	58.11	2.33	253.64	3.82
2023	22.4	20.47	33.31	26.31	62.40	1.97	227.04	3.17

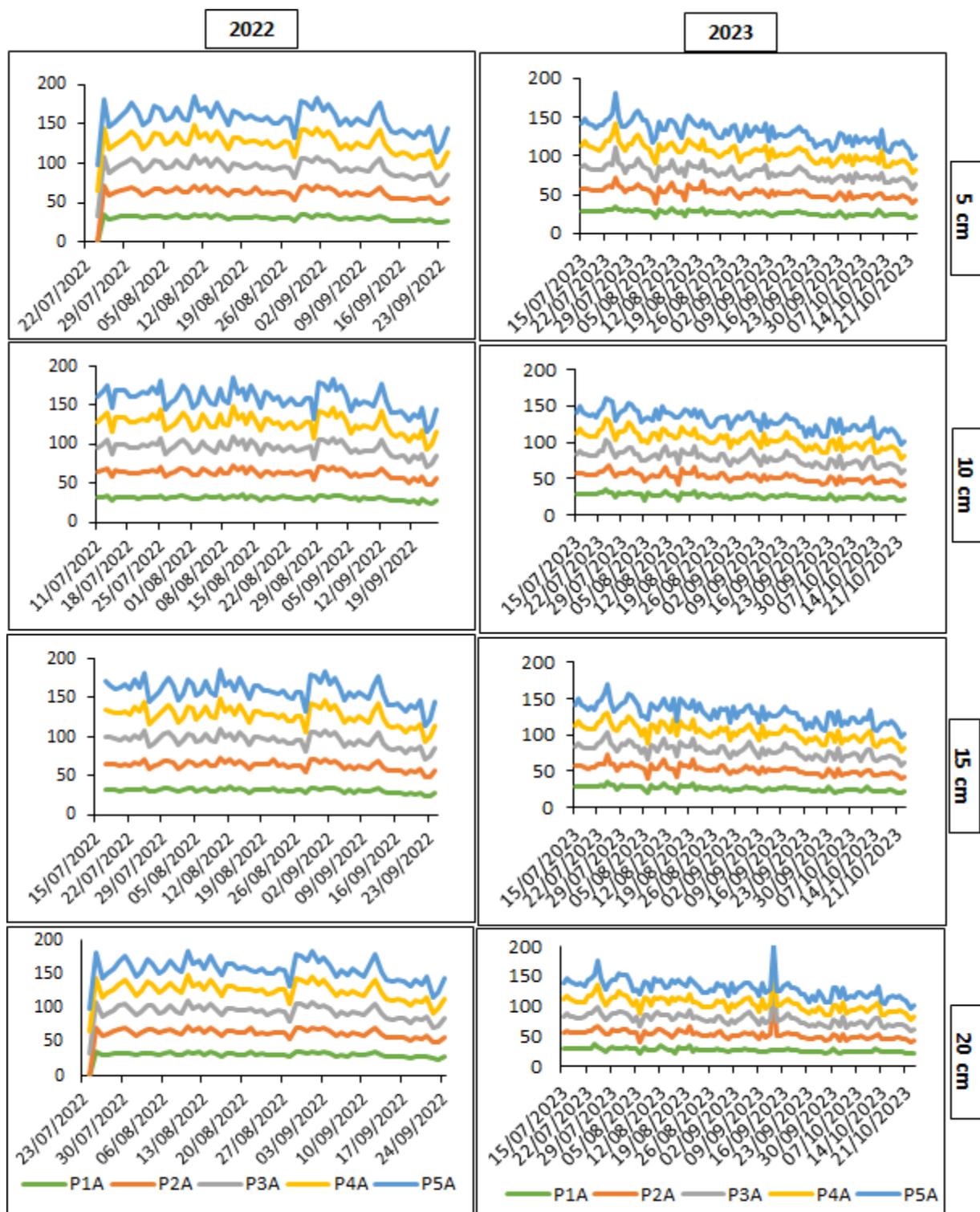
#### **IV.4 Impact du paillis organique sur les propriétés du sol**

Dans cette section, il est question d'étudier l'influence du paillis organique sur la température, humidité et conductivité électrique dans le sol, à différentes profondeurs.

##### **IV.4.1 Température du sol**

Les données de température du sol ont été prises chaque jour, dans l'après-midi (2022) et en matinée (2023) durant la période de croissance de la culture sous différents paillis, à 5cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de profondeur. La figure 56 présente sous forme graphique les résultats de ces données durant deux (02) ans.

La comparaison de la température sur deux (02) traduit un comportement dans l'ensemble différent pendant tous les stades de développement de la plante dans différentes parcelles. De façon générale en 2022, certaines parcelles comme par exemple P1A ont tendances à stabiliser la température pendant que d'autres sont plutôt dans les extrêmes. Par contre en 2023, une même tendance est observée dans toutes les parcelles dans les trois premières profondeurs. Il s'agit entre autres de la décroissance de la température au fur et à mesure de la saison. Seulement à la profondeur 20 cm, en dehors du comportement marqué par un pic élevé de température entre le 09/09/2023 et le 16/09/2023 dans les différentes parcelles mentionnées, la température a plutôt tendance à se stabiliser. Un autre élément important à souligner est l'allure presque identique de la température dans la parcelle P1A sur deux (02) ans. De ces différentes observations sur deux ans, il découle que la température a tendance à migrer du rôle de régulateur, au rôle de réduction de la température au fil des années. Ce qui par ailleurs, montre l'impact de l'utilisation du paillis dans la culture sur une longue période. D'après les recherches menées par (Chandra & Rustgi 1998), la réduction de la température du sol est toujours réalisée sous paillis biodégradable parce que ses matériaux ont une grande perméabilité, ce qui permet un bon échange de gaz avec l'ouverture de l'air. Justifiant de ce fait, la réduction de température observée sur la durée. Le comportement observé à 20 cm de profondeur, peut suggérer qu'à cette profondeur, les conditions de sol sont peut-être influencées par l'humidité du sol, la densité du sol ou encore les interactions biologiques



**Figure 56.** Variation hebdomadaire de la température du sol (°C) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans.

Le tableau 12 présente l'analyse descriptive des données de températures du sol obtenues dans chaque parcelle à différentes profondeurs sur deux ans.

En 2022, la parcelle P2A (32°C), est celle qui a enregistré le taux le plus élevé de température et la parcelle P5A (31.1°C), le plus faible. Par contre en 2023, la parcelle P1A (26.4°C) est celle qui a enregistré le fort taux de température et P4A (25.6°C) le plus bas taux. Suivant les moyennes de température observées dans chaque parcelle, deux classifications en découle :

- $P2A > P3A > P4A \geq P1A > P5A$  (2022)
- $P2A > P1A > P5A > P3A > P4A$  (2023)

Le classement de 2022 montre clairement que la température est plus élevée dans les parcelles paillées et moindre dans le témoin (sol nu). Cependant en 2023, le constat du classement fait mention de certaines parcelles paillées ayant des températures plus élevées que le témoin et d'autres plus faibles que ce dernier. Laissant transparaître le rôle régulateur du paillage au sein de la température. Aussi fort est de constater que les paillis qui augmente la température en 2023 ont pour source le bois contrairement à la paille qui elle diminue plutôt. Ce constat peut s'expliquer d'une part par la capacité d'absorption de la chaleur de la sciure et copeau de bois et l'activité microbienne générée lors de leur décomposition. D'autre part par le fait que la paille de blé tend à abaisser la température du sol en reflétant la lumière solaire ; tout en permettant une meilleure circulation de l'air et en favorisant une humidité plus stable.

La comparaison sur deux ans de l'écart de moyennes de température des parcelles paillées par rapport à celle nu varie entre +0.2 (P1A, P4A) à +0.9°C (P2A) en 2022 et de -0.1°C (P1A) à -1.3°C (P4A) en 2023. De ce constat, il découle que la sciure permet d'augmenter la température dans le sol en 2022. Par contre en 2023, le mélange permet de diminuer considérablement la température dans le sol.

Suivant les deux années, l'aperçu des moyennes de températures dans chaque parcelle montre clairement :

- des températures plus faibles en 2023 qu'en 2022 dans le sol
- le taux élevé de température a été relevé dans la parcelle P2A en 2022 et P1A en 2023 ; dont le matériel de paillage source commune est le bois ;
- en 2022, les parcelles paillées ont enregistrées les taux les plus élevés de température dans le sol par rapport au témoin. Par contre en 2023, ce résultat a été partagé car certains ont enregistré des taux plus élevés de température et d'autres moins par rapport au témoin.

Traduisant ainsi le rôle d'augmentation, puis régulateur du paillage sur la température dans le sol.

L'observation de la moyenne de température dans chaque profondeur sur 2 ans montre que :

- 10 cm représente la profondeur où la température dans le sol est plus élevée (31.7°C) en 2022 ; par contre en 2023, c'est plutôt 8'' (26.1°C)
- En 2023, une valeur constante de moyenne de température est observée au cours des trois (03) premières profondeurs (26.0°C) et légèrement différente à 20 cm (26.1°C) ; contrairement en 2022, où il y a une augmentation dans les deux (02) premières profondeurs (5 cm et 10 cm) suivies d'une diminution dans les deux dernières profondeurs (15 cm et 20 cm)

Les valeurs d'écart – type obtenues sur deux (02) ans sont homogènes aussi bien dans les différentes parcelles que profondeurs car elles sont inférieures à 3%.

L'observation des valeurs minimales permet d'identifier P5A comme étant celle ayant enregistré la plus faible valeur en 2022, P3A et P4A en 2023. Aussi 8'' est considérée comme étant la profondeur ayant relevé la valeur minimale en 2022 ; par contre en 2023, la valeur minimale s'est relevée à 10 cm, 15 cm et 20 cm.

La valeur maximale a été relevée dans la parcelle P2A en 2022 et 2023. Tout comme les profondeurs 15 cm et 20 cm respectivement en 2022 et 2023.

**Tableau 12.** Moyennes et écart-types de la température du sol retenu dans différentes parcelles à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm)

Parcelles	Moyennes de la température du sol + écart-type (%)															
	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm		Moy		SD		Min		Max	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
P1A	31.3	26.5	31.5	26.5	31.5	26.4	31.4	26.4	<b>31.4</b>	<b>26.4</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>31.3</b>	<b>26.4</b>	<b>31.5</b>	<b>26.5</b>
P2A	31.9	26.0	31.9	26.0	32.1	25.9	31.9	26.6	<b>32.0</b>	<b>26.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>31.9</b>	<b>25.9</b>	<b>32.1</b>	<b>26.6</b>
P3A	31.8	25.7	32.0	25.8	31.8	25.8	31.6	25.6	<b>31.8</b>	<b>25.7</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>31.6</b>	<b>25.6</b>	<b>32.0</b>	<b>25.8</b>
P4A	31.3	25.7	31.6	25.6	31.5	25.6	31.2	25.7	<b>31.4</b>	<b>25.6</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>31.2</b>	<b>25.6</b>	<b>31.6</b>	<b>25.7</b>
P5A	31.0	26.2	31.4	26.3	31.2	26.3	30.9	26.2	<b>31.1</b>	<b>26.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>30.9</b>	<b>26.2</b>	<b>31.4</b>	<b>26.3</b>
<b>Moy</b>	<b>31.5</b>	<b>26.0</b>	<b>31.7</b>	<b>26.0</b>	<b>31.6</b>	<b>26.0</b>	<b>31.4</b>	<b>26.1</b>								
<b>SD</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>								
<b>Min</b>	<b>31.0</b>	<b>25.7</b>	<b>31.4</b>	<b>25.6</b>	<b>31.2</b>	<b>25.6</b>	<b>30.9</b>	<b>25.6</b>								
<b>Max</b>	<b>31.9</b>	<b>26.5</b>	<b>32.0</b>	<b>26.5</b>	<b>32.1</b>	<b>26.4</b>	<b>31.9</b>	<b>26.6</b>								

Suite aux moyennes de température de sol obtenues pour chaque parcelle sur deux ans, les classements ont été les suivants:  $P2A > P3A > P4A \geq P1A > P5A$  (2022) et  $P2A > P1A > P5A > P3A > P4A$  (2023). De ces classements, il découle le fait que la température serait dans l'ensemble plus élevée au sein des parcelles paillées que celle témoin en 2022 ; mais par contre en 2023 certaines parcelles paillées ont des températures plus élevées que le témoin et d'autres plus faibles que ce dernier. Laissant transparaître sur deux ans, le rôle de régulateur du paillage au sein de la température dans le sol. Rappelons que (Du et al. 2022) définit la température du sol comme celle présente dans la zone de croissance racinaire. Cet auteur souligne que ce paramètre lié à la croissance de la racine est généralement affecté par la météorologie, l'humidité du sol, la topographie et les conditions de cultures. (Gan et al. 2013) soulignent que généralement le témoin (sol nu) a une température plus élevée qui change contrairement aux sols couverts (paillés) qui réduisent l'échange d'humidité entre le sol et l'air.(Du et al. 2022) continuent suivant leur logique en disant que généralement on estime que le paillage des terres agricoles agit comme une barrière thermique partielle qui peut empêcher les rayons ultraviolets et réduire la perte de chaleur. Toutefois selon (Iqbal et al. 2020), différents types de paillages ont des effets différents sur la température du sol. Certains paillis augmentent la température du sol par rapport au sol stérile ou aux paillis vivants (Montague & Kjelgren 2004; Zegada-Lizarazu & Berliner 2011) en raison de l'absorption des radiations solaires. De même, (Van Nierop & White 1958) a indiqué que l'application de paillis lourd ou épais a un impact plus positif sur le maintien de la température que l'application de paillis minces à la surface du sol. (Gan et al. 2013) terminent en disant que le paillage joue le rôle d'équilibre dans le sol. L'observation journalière des données met bien en exergue le rôle de régulateur ou encore d'équilibre joué par les paillis. En effet, comme le souligne d'ailleurs (Cadavid et al. 1998; Singer & Martin 2008; Safari et al. 2021) quand la température ambiante est élevée, la température dans le sol diminue sous- sols paillés et vis-versa. Selon (Du et al. 2022), la température à la surface du sol augmente avec l'épaisseur de la couche de paillage. Les résultats obtenus dans notre étude traduit en effet dans l'ensemble ses différents rôles du paillage. Rejoignant ainsi les thèses des auteurs mentionnés plus haut. le fait que le paillage augmenterait et régulerait la température. Le fait que la température soit plus élevée au niveau de la parcelle paillée avec la sciure (2022) et celle paillée avec le copeau (2023) que du reste des paillis peut s'expliquer par la relation existante entre l'humidité et la température du sol à travers la vitesse de minéralisation de l'azote dans le sol. En effet, selon certains chercheurs (Valé 2007), la vitesse de minéralisation de l'azote dans les

sols augmente avec la température, justifiant ainsi l'élévation de la température. Par contre, en la deuxième année le phénomène est différent. En effet, (Eissenstat et al. 2018) a montré qu'une augmentation de l'humidité dans le sol et une diminution de température sont observés presque systématiquement. Ce résultat permet de comprendre le comportement du copeau et de la paille. Nous remarquons aussi suite aux résultats de température, que le mélange a tendance à plus épouser les caractéristiques du copeau (2022) et de la paille (2023) à différentes profondeurs car ayant presque les mêmes valeurs de température. Ceci est dû à la faible vitesse de minéralisation du copeau et de la paille contrairement à la sciure entraînant une faible, voire lente décomposition de la matière.

L'écart de moyennes de température des parcelles paillées par rapport à celle nu est de l'ordre de + 0.9°C (P2A) en 2022 contre - 1.3 °C (P4A) en 2023. D'après les recherches menées par Goel *et al.*, 2020 sur les tomates en climat subhumide, tous les paillis réduisent la température dans un ordre en moyenne de 3,3°C. Dans le cadre de notre étude, les écarts enregistrés sont inférieurs à celui obtenu par l'auteur.

Le fait que 10 cm et 20 cm soient respectivement la profondeur ayant enregistrée les valeurs de températures les plus élevées en 2022 et 2023 peut s'expliquer par l'absorption directe de la chaleur du soleil et d'une moindre isolation par rapport aux couches plus profondes. Cette inversion par rapport à 2022 pourrait être due par exemple à des changements de conditions climatiques ou une accumulation de chaleur à cette profondeur spécifique en raison d'une meilleure isolation et de rétention de chaleur dans le sol.

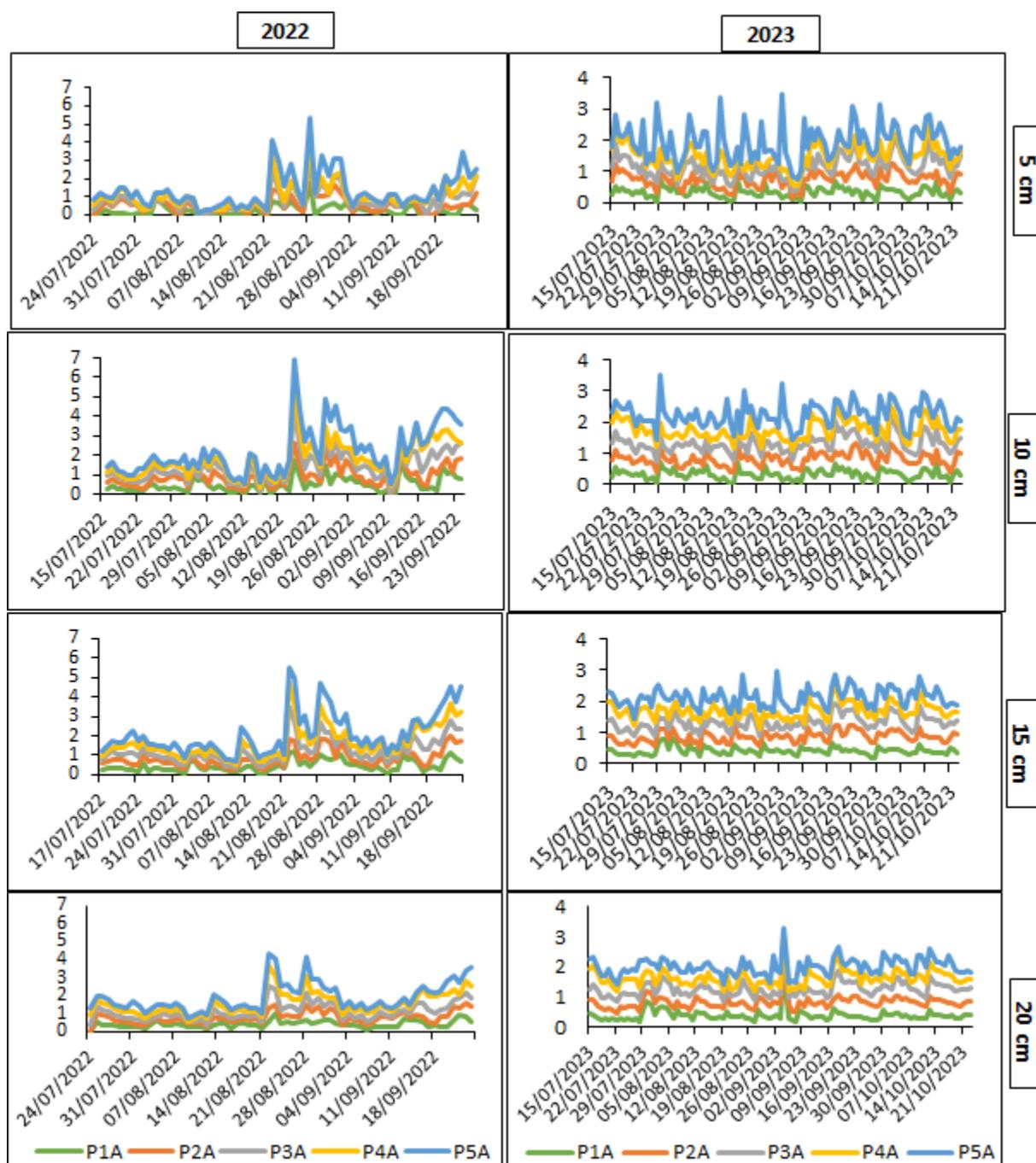
#### **IV.4.2 Conductivité électrique du sol**

Les données de conductivité électrique du sol (CE) ont été relevées quotidiennement dans chaque parcelle à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) durant la période de croissance de la culture sur deux (02) ans.

Sur deux (02) ans, l'examen des courbes (Fig. 57) affiche clairement la tendance de CE à augmenter dans la parcelle témoin (P5A) et à diminuer dans les parcelles paillées (P1A, P2A, P3A, P4A). Démontrant ainsi l'impact positif du paillis sur la réduction de la salinité du sol. En effet en 2023, le constat fait mention des valeurs de CE qui ont tendance à diminuer avec la profondeur dont la parcelle P5A est celle qui enregistre les plus forts taux dans ces différentes profondeurs. Tout comme, c'est dans les parcelles paillées, que de pics minimums de CE sont observés à différentes profondeurs. Cependant en 2022, une variation notable est observée, notamment dans les parcelles P1A et P2A entre 22/08/2022 et 01/09/2022, ainsi que

dans P5A entre 16/09/2022 et 26/09/2022, où l'on observe un pic de conductivité à 5 cm de profondeur, contrairement aux autres parcelles.

La conductivité électrique est un paramètre très important en agriculture. Elle est principalement utilisée pour déterminer la salinité du sol, mais peut également être utilisée pour estimer d'autres propriétés du sol (contenu en eau du sol, température du sol, pH du sol, texture du sol, matière organique, concentration ionique de la solution, etc.) au niveau des sols non salins (Corwin & Lesch 2005). Selon la fourchette suggérée par le Manuel de l'Enquête sur les Sols du NRCS, nous commençons à avoir un sol salin lorsque la valeur de la conductivité est supérieure à  $2 \text{ dS cm}^{-1}$  et un sol non salin lorsque la valeur de la conductivité est inférieure à  $2 \text{ dS cm}^{-1}$ . Les valeurs obtenues dans notre étude sont bien en dessous de la fourchette suggérée par ce dernier pour les sols non salins. C'est une assurance que la qualité du sol est idéale pour l'agriculture.



**Figure 57.** Variation de la conductivité électrique du sol ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans.

Le tableau 13 présente une brève analyse descriptive des moyennes de CE sur deux (02) ans à différentes profondeurs dans différentes parcelles.

L'observation générale des moyennes de CE dans chaque parcelle montre qu'en 2022, P1A ( $0.41 \text{ mS/cm}$ ) est la parcelle qui a enregistré le plus fort taux et P4A ( $0.36 \text{ mS/cm}$ ), le plus faible taux. Par contre en 2023,  $0.45 \text{ mS/cm}$  a été la valeur la plus élevée enregistrée au sein de P2A et P3A ;  $0.38 \text{ mS/cm}$  est celle enregistrée dans la parcelle P4A. Au fil des deux

(02) ans, le taux de CE a augmenté dans presque toutes les parcelles sauf au niveau de P1A, où elle est restée constante. Les parcelles P2A et P3A ont gardé par année, les mêmes valeurs à savoir : 0.37 mS/cm (2022) et 0.45 mS/cm (2023). La parcelle P4A représente la parcelle ayant enregistré la plus faible valeur durant les deux (02) ans.

L'observation des moyennes de CE dans chaque profondeur identifie :

- 10 cm comme étant la profondeur qui enregistre le plus fort taux en 2022 (0.44 mS/cm) et en 2023 (0.48 mS/cm) ;
- 5 cm (0.27 mS/cm) comme étant la profondeur qui enregistre le plus bas taux en 2022 contre 20 cm en 2023 (0.39 mS/cm) ;
- 15 cm (0.42 mS/cm) comme étant la profondeur où les valeurs de CE sont restées stables dans l'ensemble en 2022 et 2023.

Les différentes valeurs d'écart – type obtenues dans différentes parcelles et à différentes profondeurs traduisent une homogénéité et fiabilité des données car elles sont inférieures à 3%.

La plus petite valeur minimale a été relevée en 2022 dans P4A (0.20 mS/cm) et en 2023 dans P1A (0.33 mS/cm) suivant les différentes parcelles. Ces valeurs ont également été relevées suivant les profondeurs respectivement en 2022 et 2023 à la profondeur 5 cm.

La plus grande valeur maximale de 0.50 mS/cm a été relevée en 2022 et 2023 respectivement dans P1A et P3A suivant les différentes parcelles. Cette valeur a également été relevée suivant les profondeurs respectivement en 2022 et 2023 à la profondeur 10 cm. Suivant les valeurs de CE dans les parcelles sur deux ans permettent d'établir les classements ci-après : P1A > P5A > P2A ≥ P3A > P4A (2022) et P2A ≥ P3A > P5A > P1A > P4A (2023). Suivant les profondeurs, les classements suivants ci-après sont établis : 10 cm > 15 cm > 20 cm > 5 cm (2022) et 10 cm > 15 cm > 20 cm ≥ 5 cm (2023).

Ainsi durant les deux (02) ans, CE a tendance à augmenter de 5 cm à 10 cm, puis à diminuer de 15 cm à 20 cm. Traduisant ainsi une augmentation de la CE en surface suivie d'une diminution en profondeur.

Certains auteurs (Simsek et al. 2017) ont montré que le paillage n'affecte pas le pH, la conductivité électrique, la densité apparente et la teneur en carbonate dans le sol. En revanche, d'autres ont montré que tous les types de paillis ont un effet beaucoup plus positif car ils réduisent au maximum la conductivité électrique parmi les propriétés du sol (Kumar & Lal 2012). Selon nos résultats, nous remarquons que la conductivité électrique augmente dans presque toutes les parcelles paillées, sauf au niveau de la parcelle mélange, où elle diminue par rapport au témoin. Les faibles valeurs enregistrées au niveau du mélange par rapport au

témoin est en effet cohérente avec les résultats des auteurs mentionnés ci-dessus. En revanche, le phénomène inverse (augmentation de la conductivité) observé dans les autres paillis peut être dû, selon certains chercheurs (Chalker-Scott 2007; Pakdel et al. 2013; Sadek et al. 2019), à la décomposition du paillis organique sous l'effet de nutriments appropriés libérés dans le sol, qui deviennent disponibles pour les plantes. Mais aussi à la texture et à d'autres propriétés du sol, que nous n'avons malheureusement pas pu étudier. Par exemple, le niveau de phosphore dans le sol, comme l'ont souligné (Donagemma et al. 2008). Les pics de conductivité observés pourraient être dus à l'influence de l'humidité du sol. Selon le travail de (Costa et al. 2014), la conductivité électrique est fortement influencée par l'humidité du sol. Cela est similaire au résultat obtenu dans notre étude pendant cette période. En effet, nous avons constaté au cours de la même période une augmentation de l'humidité du sol. La diminution de la conductivité électrique du sol à 5 cm, peut s'expliquer par le phénomène de lessivage des sels pour des couches plus profondes ou encore la variation de l'humidité dans le sol sans oublier l'activité microbienne à travers la décomposition de la matière organique. Quant à son légerement plus prononcée à une profondeur de 10 cm, elle peut être due au développement racinaire des plantes et à la texture du sol.

**Tableau 13.** Moyennes et écart-types de la conductivité du sol pour différentes parcelles (P1A, P2A, P3A, P4A et P5A) à des profondeurs de 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm

Parcelles	Moyennes de la conductivité électrique du sol + écart-type (%)															
	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm		Moy		SD		Min		Max	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
P1A	0.24	0.33	0.50	0.48	0.46	0.42	0.43	0.40	<b>0.41</b>	<b>0.41</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.24</b>	<b>0.33</b>	<b>0.50</b>	<b>0.48</b>
P2A	0.32	0.42	0.41	0.49	0.38	0.45	0.37	0.43	<b>0.37</b>	<b>0.45</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.32</b>	<b>0.42</b>	<b>0.41</b>	<b>0.49</b>
P3A	0.26	0.40	0.48	0.50	0.41	0.45	0.34	0.44	<b>0.37</b>	<b>0.45</b>	<b>0.08</b>	<b>0.03</b>	<b>0.26</b>	<b>0.40</b>	<b>0.48</b>	<b>0.50</b>
P4A	0.20	0.36	0.39	0.43	0.43	0.38	0.43	0.37	<b>0.36</b>	<b>0.38</b>	<b>0.09</b>	<b>0.03</b>	<b>0.20</b>	<b>0.36</b>	<b>0.43</b>	<b>0.43</b>
P5A	0.31	0.49	0.44	0.49	0.44	0.42	0.35	0.37	<b>0.38</b>	<b>0.44</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.31</b>	<b>0.37</b>	<b>0.44</b>	<b>0.49</b>
<b>Moy</b>	<b>0.27</b>	<b>0.40</b>	<b>0.44</b>	<b>0.48</b>	<b>0.42</b>	<b>0.42</b>	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>								
<b>SD</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>								
<b>Min</b>	<b>0.20</b>	<b>0.33</b>	<b>0.39</b>	<b>0.43</b>	<b>0.38</b>	<b>0.38</b>	<b>0.34</b>	<b>0.37</b>								
<b>Max</b>	<b>0.32</b>	<b>0.49</b>	<b>0.50</b>	<b>0.50</b>	<b>0.46</b>	<b>0.45</b>	<b>0.43</b>	<b>0.44</b>								

#### IV.4.3 Humidité du sol

Les données d'humidité du sol (VWC) ont été obtenus à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de profondeur de façon journalière dans chaque parcelle (P1A, P2A, P3A, P4A et P5A) durant deux ans.

La représentation graphique de VWC (Fig.58) à 5 cm de profondeur, est presque identique. La remarque fait mention en 2022, du pic maximum (57.6%) observé le 28/08/2022. Par contre en 2023, ce pic maximum est plutôt observé le 25/09/2023 dans la parcelle P4A. Un comportement commun décroissant de VWC est observé en 2022 entre 21/08/2022 – 28/08/2022 et en 2023 entre 26/08/2023 – 09/09/2023.

Le comportement général de différentes courbes de VWC à 10 cm de profondeur est pareil ; à savoir diminution de l'humidité suivit d'une stabilité. De plus près, cette stabilité est plus prononcée en 2023 qu'en 2022 dans les différentes parcelles.

L'observation à 15 cm des courbes de VWC en 2022 mentionne des pics minimums le 02/08/2022 au sein de la parcelle P4A (22%) ; le 16/08/2022 au niveau de P1A (17.2%) ; le 27/08/2022 au niveau de la parcelle P2A (16.4%) et le 18/09/2022 dans la parcelle P5A (25.2%). Aussi de cette observation, il ressort une tendance d'équilibre entre 17/07/2022 – 07/08/2022, suivi des pics élevés dont le maximum est enregistré le 28/08/2022. Par contre en 2023, les pics minimums s'observent le 09/09/2023 au niveau de P4A (21.40%) et le 29/09/2023 au niveau de P1A (21.93%). Pas de pics maximums sont observés. Les courbes de parcelles ont tendance à s'équilibrer durant toute la saison de croissance de la culture.

L'observation graphique à 20 cm permet d'apercevoir en 2022, une diminution de VWC dans toutes parcelles avec un accent plus important au sein du témoin entre le 21/08/2022- 28/08/2022. Un pic minimum de P5A (13.4%) est observé le 18/03/2022 et un autre le 27/08/2022 au niveau de P2A (13.6%). Par contre en 2023, des pics maximums sont observés dans différentes parcelles entre 22/07/2023 – 05/08/2023 avec en tête P5A (42.13%) enregistré le 28/07/2023. Quant 'au pic minimum, il s'observe le 10/08/2023 uniquement dans P2A (22.7%).



**Figure 58.** Variation quotidienne de l’humidité du sol (%) dans les différentes parcelles (avec ajouts et sans ajout) à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm) sur deux ans.

Le tableau 14 présente une brève analyse descriptive des moyennes de VWC sur deux (02) ans à différentes profondeurs dans différentes parcelles.

L’observation des moyennes de VWC dans chaque parcelle montre qu’en 2022, la parcelle P2A (33.5%) a enregistré le fort taux de VWC et P5A (31.0%) le plus bas taux. Entraînant la classification suivante : P2A (33.5%) > P3A (32.2%) > P4A (31.7%) > P1A (31.3%) > P5A (31.0%). En 2023, la parcelle P2A (30.8%) a enregistré le fort taux de VWC et P5A, la parcelle dont le plus faible taux (27.9%). Donnant lieu au classement suivant : P2A (30.8%) > P3A (29.8%) > P4A (29.3%) > P1A (28.8%) > P5A (27.9%). En comparant les deux

années, P2A est la parcelle qui retient le plus d'humidité et P5A celle qui en retient moins. Aussi le même comportement à travers la classification des parcelles est observé.

L'observation des moyennes de VWC dans chaque profondeur, identifie 15 cm comme étant la profondeur qui a enregistré le plus fort taux de VWC en 2022 (39.7%) et en 2023 (38.4%). 5 cm quant à lui représente la profondeur qui a enregistré le plus faible taux en 2022 (31.4%) et 2023 (19.7%). Donnant lieu aux classifications suivantes des deux (02) années :

- 15 cm (39.7%) > 20 cm (33.5%) > 10 cm (32.9%) > 5 cm (31.4 %) (2022)
- 15 cm (38.4%) > 20 cm (30.8%) > 10 cm (28.5%) > 5 cm (19.7%) (2023)

Suite à l'analyse des données de VWC de 2022 à 2023, le constat mentionne qu'au fil des deux (02) années, VWC a légèrement diminué. En comparant les parcelles P2A à P5A dans chaque année, l'écart de rétention de VWC est de 2.5% en 2022 contre 2.9% en 2023 avec une différence entre année de 0.4%. Ce résultat montre qu'avec le temps, le paillage en général, et la sciure en particulier permet une meilleure rétention de VWC.

L'observation de l'écart – type sur deux (02) ans des valeurs de VWC, montre qu'il varie de 5.6 à 7.6% dans les parcelles et de 0.4 à 2.2% dans les profondeurs. Traduisant ainsi une homogénéité de ces données car les valeurs sont inférieures à 8%.

La plus petite valeur minimale a été relevée en 2022 dans P4A (29.3%) et en 2023 dans P1A (17.5%) suivant les différentes parcelles. Ces valeurs ont également été relevées suivant les profondeurs respectivement en 2022 à 5 cm (16.8%) et 2023 à la profondeur 15 cm (39%).

La plus grande valeur maximale de 40.4% a été relevée en 2022 contre 39.7% en 2023 dans P2A suivant les différentes parcelles. Cette valeur a également été relevée suivant les profondeurs 5 cm (22.9 %) et 15 cm (40.4%) respectivement en 2022 et 2023.

Les résultats obtenus sur VWC ci-dessus dans l'ensemble mettent en exergue le fait que les parcelles paillées retiendraient plus l'humidité dans le sol que celle témoin. Ce résultat est conforme aux recherches de (Telkar et al. 2017) et (Mkhabela et al. 2019) qui ont indiqué que l'humidité du sol est retenue sous le paillis. Ils ont également indiqué que le pourcentage d'eau stockée dans le sol est plus élevé sous le paillis que sous le sol nu. Ce qui cadre avec les résultats obtenus sur deux ans.

Dans l'étude, la profondeur idéale de rétention observée est 15 cm. Selon (Wanniarachchi et al. 2019) et (Adams 1966) dans les zones arides ou semi-arides, le paillage

augmenterait la rétention d'eau dans le sol de 0 à 40 cm de profondeur. Cependant, (Stagnari et al. 2014) indiquent que dans un environnement méditerranéen, le paillage en général, et la paille en particulier, augmenterait la rétention d'eau dans le sol de 5 à 15 cm de profondeur. Selon une expérience menée sur différents paillis organiques et inorganiques (Safari et al. 2021), la profondeur idéale est de 15 cm avec une augmentation variant de 2 à 5 % par rapport au témoin sur un sol nu. La profondeur idéale identifiée dans la zone d'étude est conforme à la fourchette suggérée par les auteurs mentionnés précédemment. Cependant, le taux enregistré par (Safari et al. 2021) est principalement cohérent avec celui de la sciure.

**Tableau 14.** Analyse descriptive de données de l'humidité du sol retenue dans différentes parcelles (P1A, P2A P3A, P4A, P5A), aux profondeurs 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm

Parcelles	Moyenne de l'humidité du sol + écart - type (%)															
	5 cm		10 cm		15 cm		20 cm		Moy		SD		Min		Max	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
P1A	29.6	17.5	31.6	28.3	39.0	38.6	34.5	30.9	<b>31.3</b>	<b>28.8</b>	<b>6.8</b>	<b>7.6</b>	<b>29.6</b>	<b>17.5</b>	<b>39.0</b>	<b>38.6</b>
P2A	34.3	22.9	34.5	29.5	40.4	39.7	33.1	31.2	<b>33.5</b>	<b>30.8</b>	<b>5.6</b>	<b>6.0</b>	<b>33.1</b>	<b>22.9</b>	<b>40.4</b>	<b>39.7</b>
P3A	32.4	20.2	32.5	28.9	40.3	38.9	32.1	31.3	<b>32.2</b>	<b>29.8</b>	<b>6.2</b>	<b>6.7</b>	<b>32.1</b>	<b>20.2</b>	<b>40.3</b>	<b>38.9</b>
P4A	29.3	21.0	31.5	28.3	39.6	37.5	34.9	30.5	<b>31.7</b>	<b>29.3</b>	<b>5.8</b>	<b>5.9</b>	<b>29.3</b>	<b>21.0</b>	<b>39.6</b>	<b>37.5</b>
P5A	31.6	16.8	31.4	27.3	39.4	37.2	33.0	30.2	<b>31.0</b>	<b>27.9</b>	<b>6.9</b>	<b>7.3</b>	<b>31.4</b>	<b>16.8</b>	<b>39.4</b>	<b>37.2</b>
<b>Moy</b>	<b>31.4</b>	<b>19.7</b>	<b>32.3</b>	<b>28.5</b>	<b>39.7</b>	<b>38.4</b>	<b>33.5</b>	<b>30.8</b>								
<b>SD</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>1.2</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>0.4</b>								
<b>Min</b>	<b>29.3</b>	<b>16.8</b>	<b>31.4</b>	<b>27.3</b>	<b>39.0</b>	<b>37.2</b>	<b>32.1</b>	<b>30.2</b>								
<b>Max</b>	<b>34.3</b>	<b>22.9</b>	<b>34.5</b>	<b>29.5</b>	<b>40.4</b>	<b>39.7</b>	<b>34.9</b>	<b>31.3</b>								

#### **IV.4.4 Interactions entre l'Humidité, la Température, la Conductivité Électrique du Sol et l'Évapotranspiration Réelle**

Dans l'optique de mieux apprécier les paramètres d'humidité du sol (VWC), température du sol (T), conductivité électrique du sol (CE) et évapotranspiration réelle (ETR) au même moment dans chaque parcelle suivant chaque cycle, des graphes en général de cumul de ses paramètres ont été réalisés sur un profil de 20 cm. Il faut noter qu'à la première année suite à certains soucis l'expérimentation a démarré un peu tard. Tout comme, le fait que le cycle 4 est plus long en 2023 qu'en 2022 est dû au fait qu'il regroupe à la fois la maturation + la récolte.

##### **1 Parcelle copeau de bois (P1A)**

La figure 59 traduit l'interaction du cumul sur un profil de 20 cm entre chaque paramètre analysé durant deux (02) ans par cycle de croissance de la plante. L'observation de cette figure identifie de prime à bord le cycle 3 comme étant celui qui a le plus durée sur les deux ans en général mais beaucoup plus en 2022 en particulier. Ainsi, par cycle de développement de la plante, des notes peuvent être effectuées.

- **Cycle de croissance (1),**

Ce cycle a duré 4 jours en 2022 contre 16 jours en 2023. Dans ce cycle, ETR et VWC croissent pendant que T et CE restent stables en 2022. Par contre en 2023, pendant que VWC et EC décroissent, T croît légèrement et ETR oscille.

- **Cycle de floraison (2)**

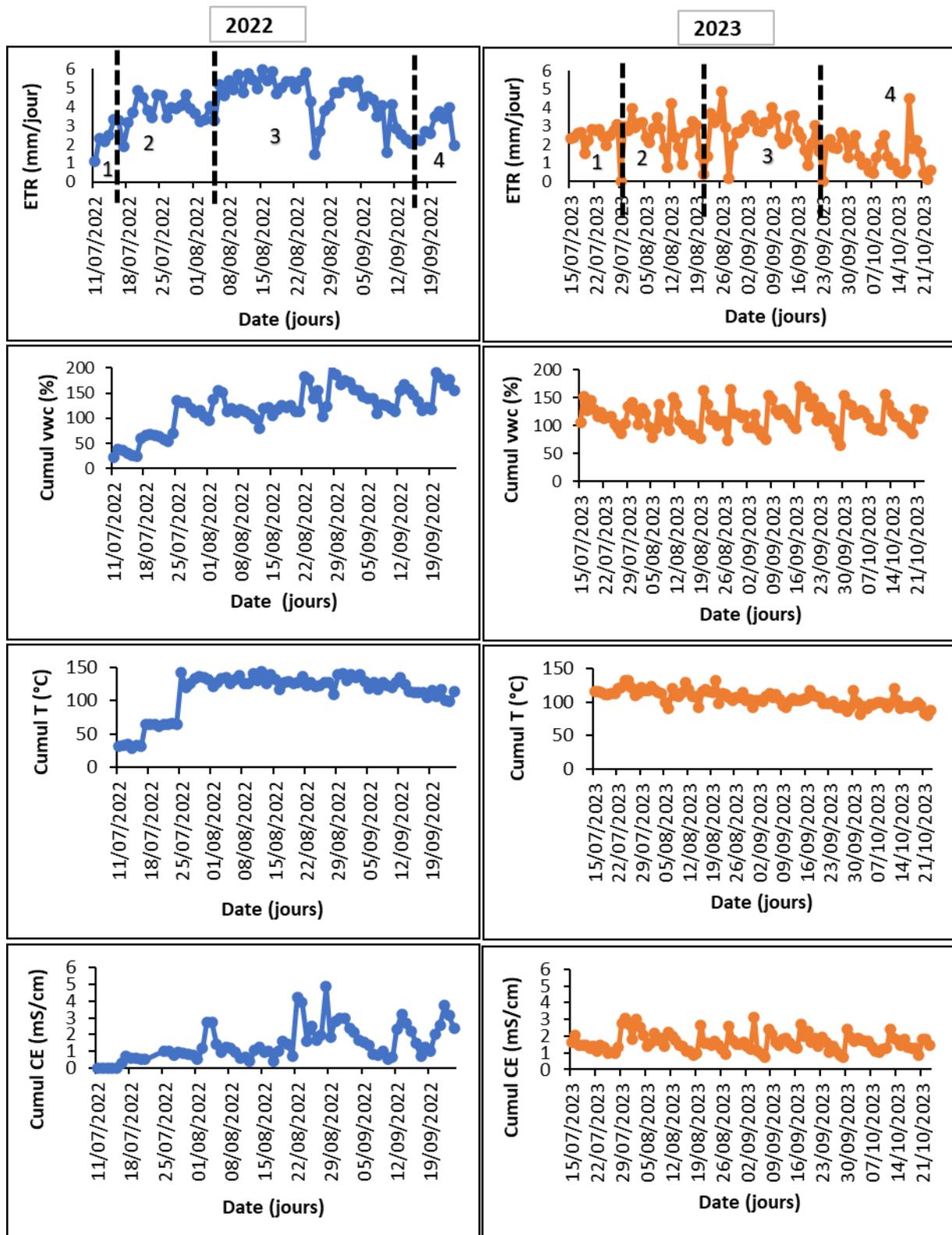
Il a duré 20 jours en 2022 et 21 en 2023. Au sein de ce dernier, tous les paramètres croissent en 2022. Un pic maximum est observé au niveau de CE entre 25/07/2022 – 01/08/2022. En 2023, ETR oscille pendant que T et CE croissent, VWC tend à se stabiliser.

- **Cycle de fructification (3)**

Ce cycle a duré 38 jours en 2022 et 30 en 2023. Durant les deux ans, ETR a tendance à diminuer progressivement jusqu'à atteindre le pic minimum entre 22/08/2022 - 29/08/2022 et entre 26/08/2023 – 02/09/2023. VWC a tendance à croître quand T est stable et CE croît en 2022. D'ailleurs un pic maximum est observé le 29/08/2022. En 2023, ETR décroît. Un pic minimum s'identifie entre 26/08/2023 – 02/09/2023. Par ailleurs, VWC croît avec CE pendant que T diminue.

- **Cycle de maturation (4)**

Ce cycle a duré 10 jours en 2022 et 30 jours en 2023. Durant la première année (2022), lorsque ETR fluctue avec VWC, T et CE décroissent. Par contre en 2023, quand ETR oscille avec un pic maximum entre 14/10/2023 – 21/10/2023, VWC oscille aussi avec CE et T diminue dans l'ensemble. Mais deux pics maximums sont enregistrés le 30/09/2023 et le 14/10/2023.



**Figure 59.** Interaction entre le cumul d’humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P1A

## **2 Parcelle sciure de bois (P2A)**

La figure 60 traduit l'interaction du cumul sur un profil de 20 cm entre chaque paramètre analysé durant deux (02) ans par cycle de croissance de la plante. L'observation de cette figure identifie de prime à bords le cycle 3 comme étant celui qui a le plus durée sur les deux ans en général mais beaucoup plus en 2022 en particulier. Ainsi, par cycle de développement de la plante, des notes peuvent être effectuées.

- **Cycle de croissance (1)**

Ce cycle a perduré 4 jours en 2022 contre 16 jours en 2023. Dans ce cycle, tous les paramètres (ETR, VWC, T et CE) croissent au même moment en 2022. Par contre en 2023, pendant que ETR a tendance à osciller, VWC décroît avec CE et T augmenter légèrement.

- **Cycle de floraison (2)**

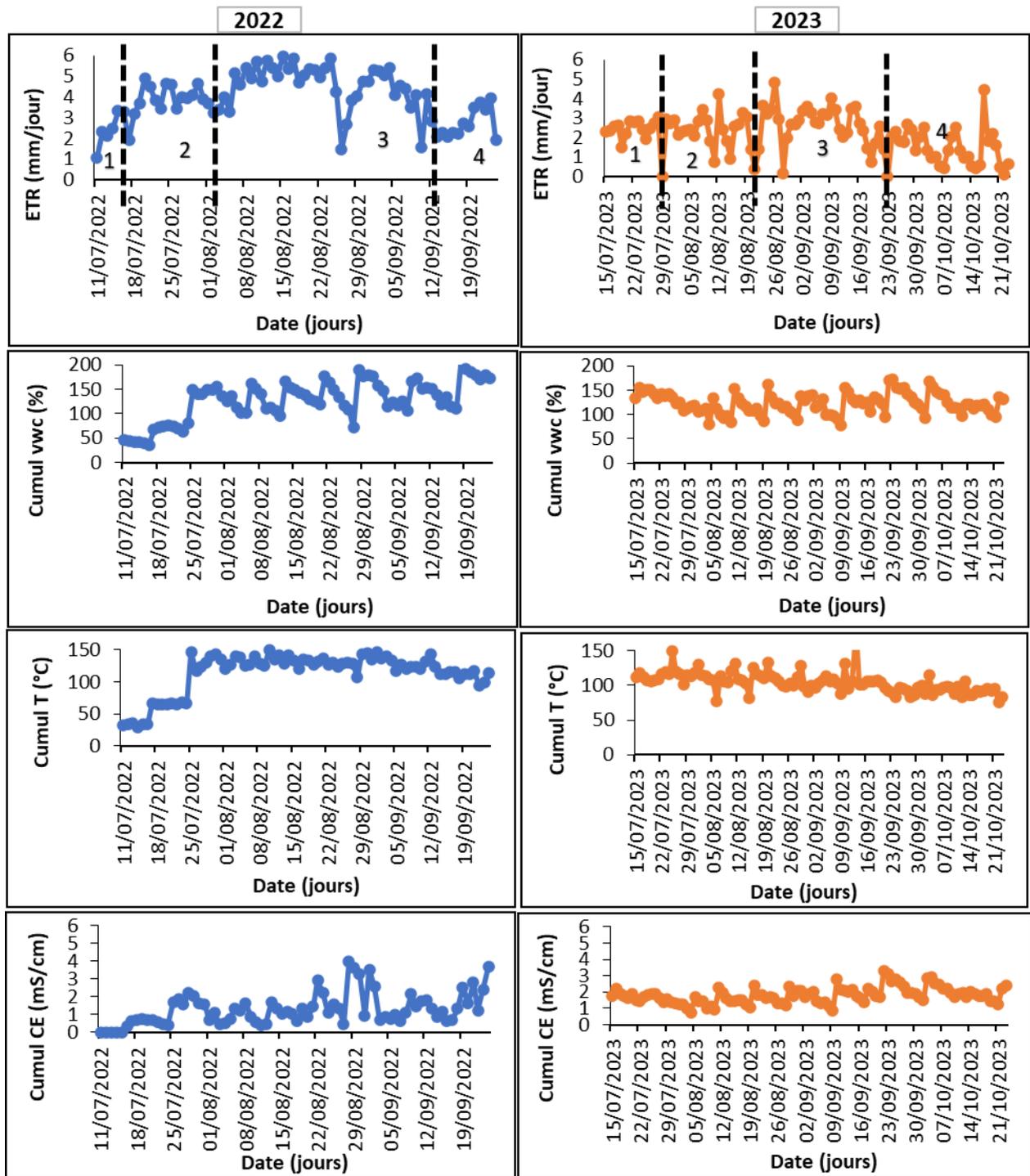
Il a persisté 20 jours en 2022 et 21 jours en 2023. Au sein de ce dernier, ETR croît avec VWC pendant que T a tendance à se stabiliser et CE légèrement diminuer en 2022. En 2023, ce même comportement est vérifié pour VWC et CE. Par contre T a tendance à décroître. Au niveau de ETR, les valeurs sont un peu faibles entre 12/08/2023 – 19/08/2023.

- **Cycle de fructification (3)**

Cette phase a subsisté pendant 37 jours en 2022 et 30 jours en 2023. Durant les deux ans, ETR a tendance à diminuer progressivement jusqu'à atteindre le pic minimum entre 22/08/2022 - 29/08/2022 et entre 26/08/2023 – 02/09/2023. VWC a tendance à croître légèrement malgré le pic minimum observé à la même date que ETR ; quand T est stable et CE croît en 2022. En 2023, la tendance est légèrement croissante pour VWC et CE. Par contre, T décroît malgré le pic maximum observé entre 09/09/2023 – 16/09/2023.

- **Cycle de maturation (4)**

Il a persisté 11 jours en 2022 et 30 jours en 2023. Durant la première année (2022), lorsque ETR croît progressivement, VWC avec CE croissent aussi ; pendant que T décroît. Par contre en 2023, quand ETR oscille avec un pic maximum entre 14/10/2023 – 21/10/2023, VWC oscille aussi avec CE et T diminue plutôt.



**Figure 60.** Interaction entre le cumul d’humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P2A

### 3 Parcelle paille de blé (P3A)

La figure 61 illustre l’interaction du cumul sur un profil de 20 cm entre chaque paramètre analysé durant deux (02) ans par cycle de croissance de la plante suite à l’ajout de paille.

- **Cycle de croissance (1)**

Ce cycle a duré 4 jours en 2022 contre 20 jours en 2023. Dans ce cycle, tous les paramètres (ETR, VWC, T et CE) croissent au même moment en 2022. Cependant le même comportement n'est pas observé en 2023 car lorsque ETR tend à diminuer jusqu'à atteindre le pic minimum de 0 mm/jr le 29/07/2023 ; VWC et CE décroissent aussi. Seulement au niveau de T, le phénomène opposé est observé car il croît malgré le pic minimum observé le 29/07/2023.

- **Cycle de floraison (2)**

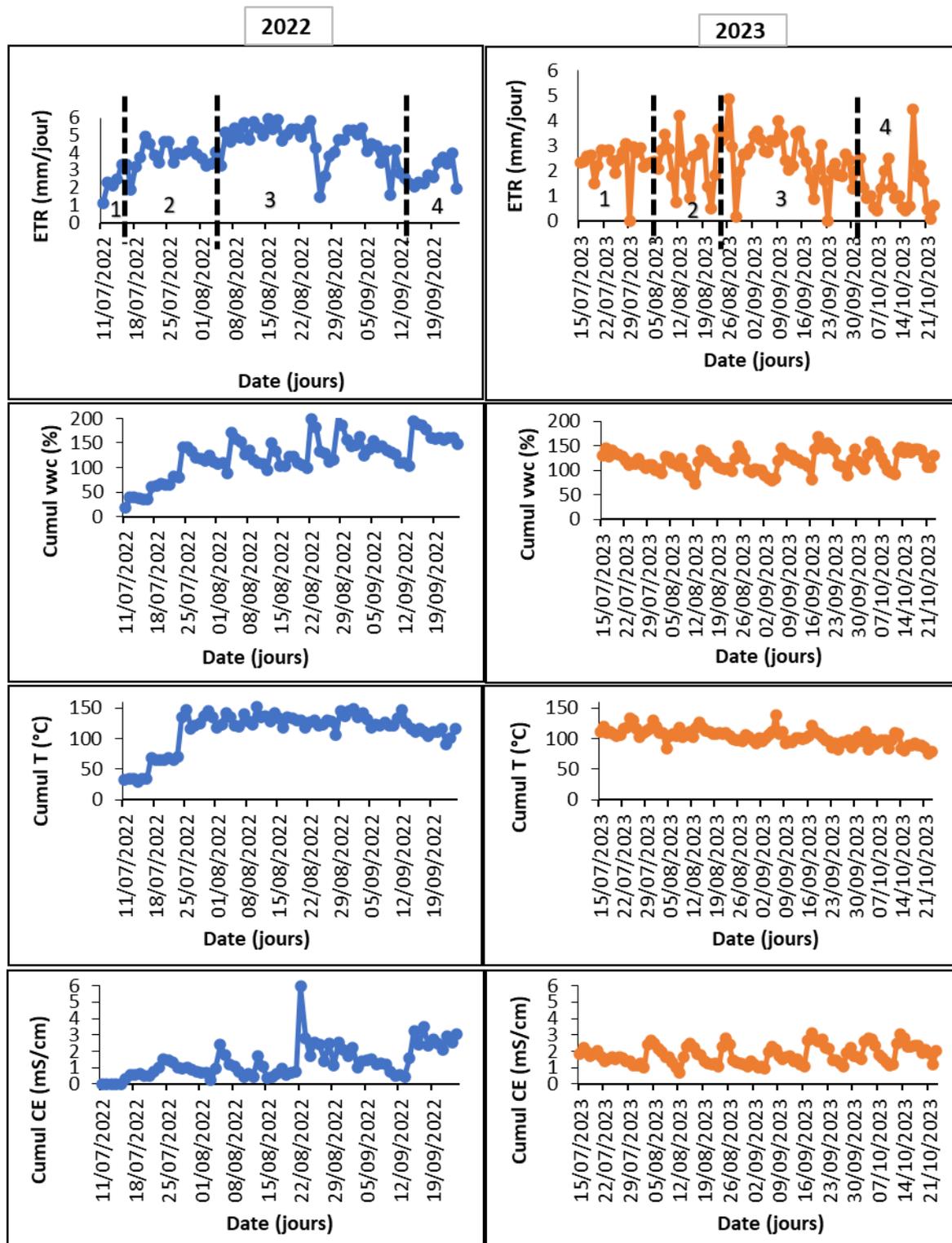
Cette phase a perduré 20 jours en 2022 et 15 jours en 2023. En 2022, lorsque ETR croît avec VWC, T a tendance à croître puis s'équilibrer ; CE décroît puis augmente légèrement. Par contre en 2023, lorsque ETR a tendance à être faible, VWC augmente avec T et CE.

- **Cycle de fructification (3)**

Ce stade s'est prolongé de 38 jours en 2022 et 32 jours en 2023. Durant les deux ans, ETR a tendance à diminuer progressivement. Le pic minimum étant observé entre 22/08/2022 – 29/08/2022 et le 23/09/2023. Pendant ce temps, VWC et CE augmentent progressivement. Contrairement à T qui lui diminue plutôt progressivement au cours des deux ans. Cependant en 2022, un pic minimum de T est observé le 29/08/2022 contrairement en 2023 où c'est plutôt un pic maximum observé 09/09/2023. Quant 'au CE, le pic maximum est observé le 22/08/2022.

- **Cycle de maturation (4)**

Il a persisté 10 jours en 2022 et 30 jours en 2023. Pendant que ETR tend à augmenter puis décroître dans les deux années, VWC et CE adoptent le même comportement. Cependant, T décroît au cours de ses deux (02) ans.



**Figure 61.** Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P3A

#### **4 Parcelle mélange (P4A)**

La figure 62 met en exergue l'interaction du cumul sur un profil de 20 cm entre chaque paramètre analysé durant deux (02) ans par cycle de croissance de la plante, sous ajout de mélange.

- **Cycle de croissance (1)**

Il a continué 4 jours en 2022 contre 11 jours en 2023. Dans ce cycle, tous les paramètres (ETR, VWC, T et CE) croissent au même moment en 2022. Par contre en 2023, lorsque ETR et T croissent, VWC et CE décroissent.

- **Cycle de floraison (2)**

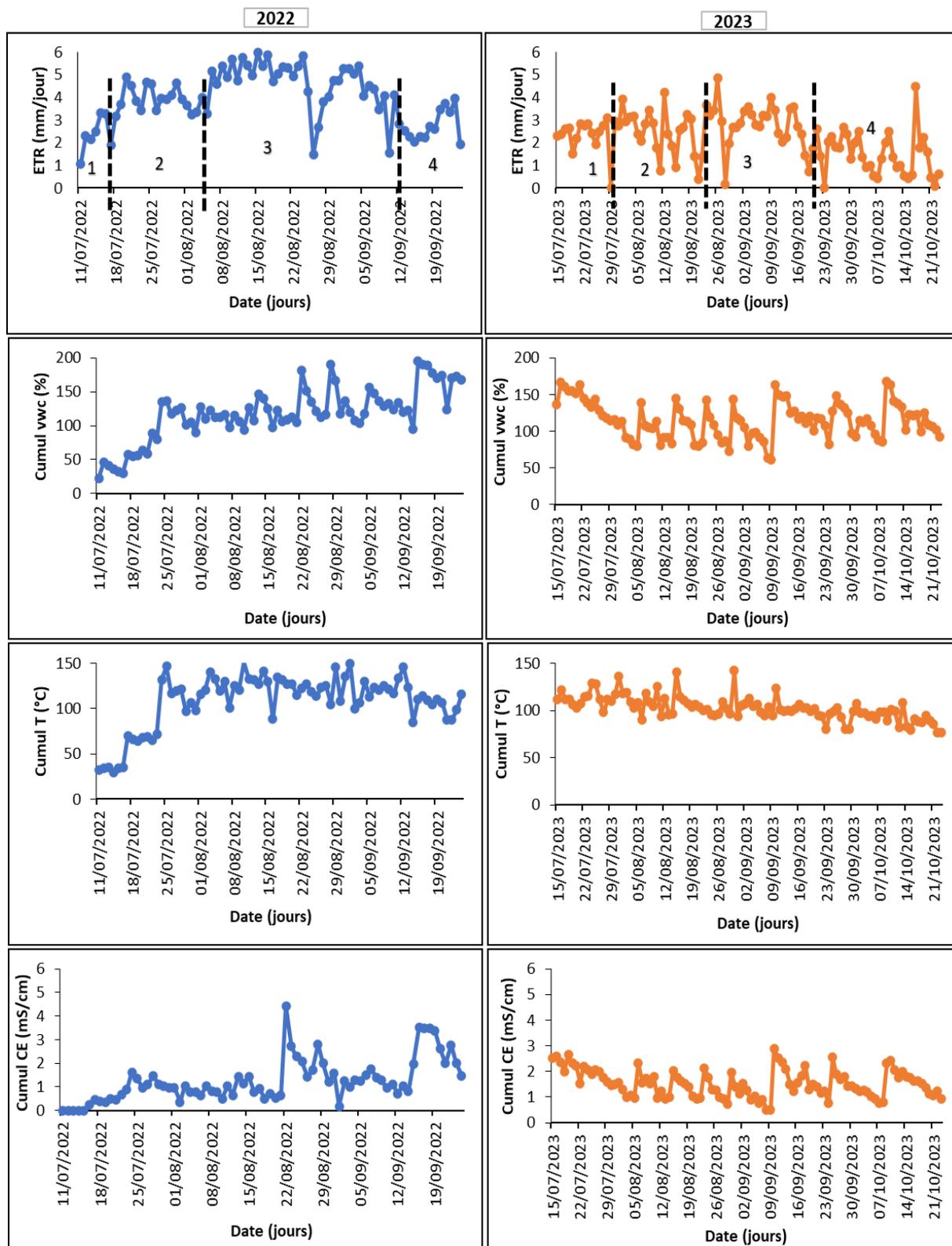
Ce stade s'est prolongé de 20 jours en 2022 et 22 jours en 2023. Dans l'ensemble, tous les paramètres croissent aussi bien en 2022 qu'en 2023.

- **Cycle de fructification (3)**

Ce cycle a subsisté 38 jours en 2022 et 25 jours en 2023. Durant les deux ans, deux (02) pics minimums sont observés au sein de l'ETR par an. En 2022, entre 22/08/2022 – 29/08/2022 et 05/09/2022 – 12/09/2022. En 2023, le 26/08/2023 – 02/09/2023 et 16/09/2023 – 23/09/2023. L'observation mentionne aussi l'augmentation progressive de VWC et CE durant les 2 ans. Au niveau de T, il a tendance à s'équilibrer sur les deux ans. Cependant un pic minimum est observé en 2022 entre 15/08/2022 – 22/08/2022. Par contre, un pic maximum est observé en 2023 le 02/09/2023. Quant au CE, le pic maximum est observé en 2022 le 22/08/2022 et entre 09/09/2023 -16/09/2023 en 2023. Le pic minimum est observé uniquement en 2022 entre 29/08/2022 – 05/09/2022.

- **Cycle de maturation (4)**

Il a perduré 10 jours en 2022 et 35 jours en 2023. Durant la première année (2022), ETR, VWC et EC croissent pendant que T décroît. Par contre en 2023, pendant que ETR, VWC et EC tendent à s'équilibrer, T décroît. Notons qu'un pic maximum de l'ETR est observé entre 14/10/2023 – 21/10/2023.



**Figure 62.** Interaction entre le cumul d'humidité, de température, conductivité électrique et évapotranspiration de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P4

## 5 Parcelle témoin (P5A)

La figure 63 présente l'interaction du cumul sur un profil de 20 cm entre chaque paramètre analysé durant deux (02) ans par cycle de croissance de la plante, sans ajout.

- **Cycle de croissance (1)**

Il a persisté 4 jours en 2022 contre 33 jours en 2023. Dans ce cycle, tous les paramètres (ETR, VWC, T et CE) croissent au même moment en 2022. Tandis qu' en 2023, en dehors du pic minimum observé le 29/07/2023 au sein de l'ETR, une diminution progressive est observée. T a tendance à s'équilibrer. Au niveau de CE, le pic maximum est observé entre le 22/07/2023 – 29/07/2023. Aussi une augmentation progressive suivie d'une stabilité est observée. Pour ce qui est de VWC, une légère augmentation est observée.

- **Cycle de floraison (2)**

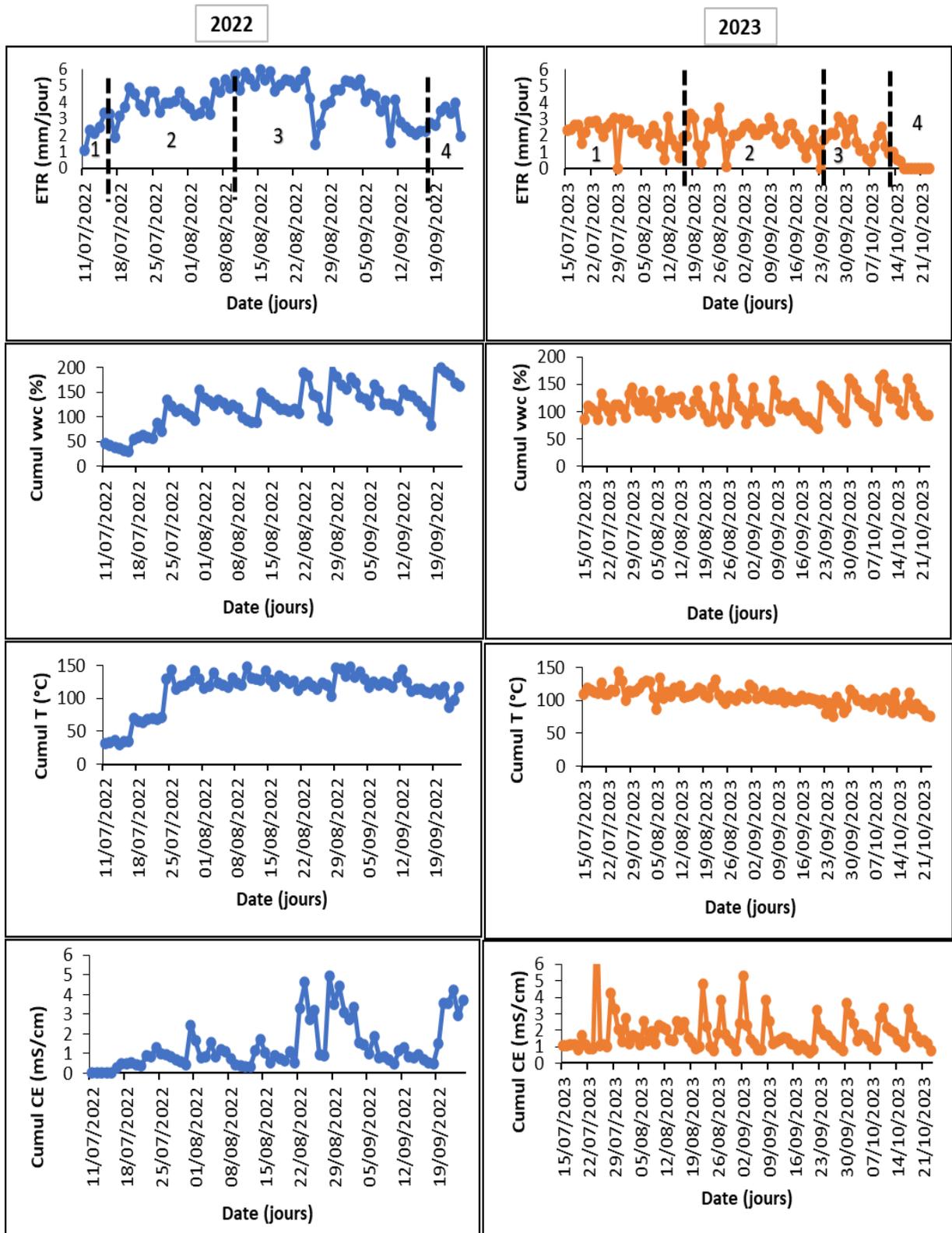
Ce cycle s'est prolongé de 20 jours en 2022 et 38 jours en 2023. Au sein de ce dernier, ETR croît avec VWC et CE pendant que T a tendance à se stabiliser en 2022. En 2023, ce même comportement est vérifié pour VWC et CE. Par contre T a tendance à décroître avec ETR. Au niveau de ETR, deux pics minimums sont observés entre 26/08/2023 – 02/09/2023 et le 23/09/2023.

- **Cycle de fructification (3)**

Cette phase a subsisté pendant 38 jours en 2022 contre 18 jours en 2023. Au cours de la première année, ETR décroît et un pic minimum est observé entre 22/08/2022 et le 29/08/2022. Aussi, un autre pic minimum est observé le 07/10/2023 à la deuxième année. VWC croît aussi bien en 2022 qu'en 2023. Tout comme CE à tendance à s'équilibrer aussi bien en 2022 qu'en 2023. Par contre T s'équilibre en 2022 et diminue en 2023.

- **Cycle de maturation (4)**

Il a duré 10 jours en 2022 et 8 jours en 2023. Durant ce cycle, tous les paramètres croissent aussi bien en 2022 qu'en 2023.



**Figure 63.** Interaction entre le cumul d'humidité (%), de température (°C), conductivité électrique (mS/cm) et évapotranspiration (mm/jour) de la culture sur un profil de 20 cm de profondeur pendant deux (02) ans dans la parcelle P5A

L'examen de différents graphiques dans chaque parcelle montre de façon générale que les parcelles paillées ont presque les mêmes tendances pour différents paramètres sur deux ans. En effet, il s'agit de : l'ETR plus élevé 2022 qu'en 2023 ; VWC plus élevée en 2022 et beaucoup plus stable en 2023 ; T stable en 2022 et diminue au fur et à mesure en 2023 et CE qui fluctue en 2022 et tend à être stable en 2023. Par contre dans la parcelle non paillée, le comportement est presque pareil pour ETR, opposé pour CE et beaucoup moins prononcé pour T. Quant à VWC, il fluctue légèrement en 2023. Aussi le cycle 3 a été identifié dans l'ensemble comme étant celui qui dure le plus sur deux (02) ans. Cependant, il est important de noter quelques spécificités par rapport à son comportement dans les parcelles et sur les deux ans. Ainsi, ce cycle a moins durée en 2023 qu'en 2022. En effet, la différence entre le nombre de jours obtenus en 2022 et celui obtenu en 2023 dans les parcelles paillées est de : 8 jours à P1A, 7 jours à P2A, 6 jours à P3A ; 13 jours à P4A. Par contre dans celle nu, la différence est de 20 jours. Un dernier constat effectué est la durée moins prolongée en 2023 de tous les cycles dans presque toutes les parcelles. En effet, au sein de la parcelle P3A, la durée du cycle 2 est moindre plutôt en 2022 qu'en 2023 contrairement aux autres cycles dans les autres parcelles. Traduisant ainsi l'impact du paillage sur la durée de chaque cycle au fil des ans. Ce phénomène positif du paillage sur la durée de chaque cycle peut s'expliquer par l'optimisation de la rétention de l'humidité dans le sol, la régulation thermique, la suppression des mauvaises herbes et l'amélioration de la structure du sol favorisant un environnement propice au développement de la plante.

#### **IV.4.5 Corrélation de différents paramètres à différentes profondeurs dans différentes parcelles**

La figure 64 présente différentes matrices de corrélation ( $R^2$ ) entre les données récoltées d'humidité (VWC), température (T) et conductivité électrique (CE) du sol à différentes profondeurs (5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm), dans différentes parcelles (P1A, P2A, P3A, P4A, P5A) sur deux (02) ans. L'objectif étant d'examiner les différentes corrélations possibles entre les paramètres suscités ; mais aussi déterminer à quelle profondeur précisément, la corrélation est plus forte. Globalement, ses matrices montrent que la conductivité est fortement liée à la teneur en eau dans le sol, tandis que la température a un effet inverse mais faible sur la teneur en eau et la conductivité.

De plus près, les différentes matrices de corrélation réalisées mettent en exergue une corrélation importante entre deux paramètres à savoir : l'humidité (VWC) et la conductivité électrique du sol (CE). En effet au niveau de la parcelle :

- P1A,  $R^2$  est significatif à toutes les profondeurs en 2022 et uniquement dans les trois premières profondeurs en 2023 ; 15 cm ( $R^2 = 0.81$ ) représente la profondeur où  $R^2$  est très significatif en 2022 entre VWC et EC contrairement en 2023 où c'est plutôt 10 cm ( $R^2=0.84$ ) ;
- P2A,  $R^2$  est significatif dans les trois premières profondeurs en 2022 et à toutes les profondeurs en 2023 ; 15 cm ( $R^2 = 0.66$ ) étant la profondeur où la corrélation est forte contrairement en 2023 où c'est plutôt 5 cm de profondeur ( $R^2 = 0.90$ ) où la corrélation est hautement significative ;
- P3A,  $R^2$  est significatif aussi bien en 2022 qu'en 2023 à toutes les profondeurs ; tout comme 10 cm est la profondeur où la corrélation est plus forte aussi bien en 2022 ( $R^2 = 0.75$ ) qu'en 2023 ( $R^2 = 0.92$ ) ;
- P4A,  $R^2$  est forte en 2022 comme en 2023 à toutes les profondeurs ; particulièrement à 15 cm en 2022 ( $R^2 = 0.83$ ) contre 10 cm en 2023 ( $R^2 = 0.90$ ) ;
- P5A,  $R^2$  est significatif en 2022 à toutes les profondeurs et uniquement dans les trois premières profondeurs en 2023 ; précisément à 15 cm de profondeur en 2022 ( $R^2 = 0.81$ ) contre 10 cm de profondeur en 2023 ( $R^2 = 0.91$ ).

Les différentes unités expérimentales montrent que les ajouts de paillis influencent significativement les relations entre l'humidité et la conductivité électrique du sol, en fonction de la profondeur et de l'année. Les variations de profondeur optimale entre 2022 et 2023 suggèrent que les conditions environnementales et la décomposition des matériaux organiques ont un impact sur ces relations. Les unités avec paillis ont tendance à présenter des corrélations plus fortes à certaines profondeurs, ce qui montre leur effet modérateur sur l'humidité et la salinité du sol. De manière générale, les paillis permettent de mieux gérer l'humidité et les sels dans le sol, mais leur efficacité peut varier en fonction des types de matériaux utilisés et de leur degré de décomposition.

2022

2023

P1A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	-0.25	1.00										
CE	<b>0.62</b>	-0.22	1.00									
VWC	0.82	-0.17	0.49	1.00								
T	-0.25	0.97	-0.15	-0.19	1.00							
CE	0.73	-0.24	0.51	<b>0.79</b>	-0.26	1.00						
VWC	0.59	-0.29	0.54	0.54	-0.21	0.55	1.00					
T	-0.24	0.99	-0.21	-0.17	0.97	-0.22	-0.28	1.00				
CE	0.61	-0.22	0.64	0.57	-0.13	0.62	<b>0.81</b>	-0.20	1.00			
VWC	0.70	-0.24	0.44	0.79	-0.25	0.72	0.59	-0.22	0.64	1.00		
T	-0.25	0.99	-0.22	-0.16	0.97	-0.21	-0.28	1.00	-0.21	-0.23	1.00	
CE	0.49	-0.28	0.53	0.53	-0.18	0.50	0.75	-0.26	0.86	<b>0.56</b>	-0.27	1.00

P2A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	-0.08	1.00										
CE	0.41	0.11	1.00									
VWC	0.81	-0.20	0.37	1.00								
T	-0.22	0.91	0.18	-0.27	1.00							
CE	0.60	0.05	0.44	<b>0.60</b>	-0.14	1.00						
VWC	0.76	-0.27	0.42	0.79	-0.31	0.57	1.00					
T	-0.10	0.99	0.10	-0.22	0.91	0.02	-0.28	1.00				
CE	0.52	-0.27	0.56	0.59	-0.16	0.53	<b>0.66</b>	-0.27	1.00			
VWC	0.69	-0.21	0.38	0.71	-0.28	0.52	0.80	-0.20	0.46	1.00		
T	-0.10	1.00	0.11	-0.21	0.91	0.05	-0.28	1.00	-0.27	-0.20	1.00	
CE	0.51	-0.18	0.61	0.60	-0.10	0.51	0.60	-0.18	0.87	<b>0.59</b>	-0.18	1.00

P3A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	-0.27	1.00										
CE	<b>0.53</b>	-0.37	1.00									
VWC	0.64	-0.51	0.40	1.00								
T	-0.30	0.98	-0.34	-0.48	1.00							
CE	0.70	-0.40	0.65	<b>0.75</b>	-0.44	1.00						
VWC	0.84	-0.40	0.39	0.74	-0.42	0.71	1.00					
T	-0.25	0.99	-0.38	-0.48	0.98	-0.43	-0.39	1.00				
CE	0.61	-0.45	0.58	0.67	-0.41	0.79	<b>0.73</b>	-0.43	1.00			
VWC	0.68	-0.20	0.28	0.67	-0.22	0.67	0.84	-0.18	0.65	1.00		
T	-0.25	1.00	-0.36	-0.50	0.98	-0.39	-0.39	0.99	-0.44	-0.19	1.00	
CE	0.56	-0.36	0.59	0.64	-0.32	0.79	0.65	-0.36	0.95	<b>0.66</b>	-0.35	1.00

P4A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	-0.30	1.00										
CE	<b>0.70</b>	-0.39	1.00									
VWC	0.82	-0.48	0.57	1.00								
T	-0.31	0.98	-0.38	-0.41	1.00							
CE	0.61	-0.47	0.62	<b>0.71</b>	-0.47	1.00						
VWC	0.68	-0.52	0.57	0.80	-0.49	0.72	1.00					
T	-0.27	1.00	-0.39	-0.44	0.98	-0.45	-0.48	1.00				
CE	0.60	-0.50	0.70	0.73	-0.48	0.71	<b>0.83</b>	-0.49	1.00			
VWC	0.71	-0.41	0.54	0.77	-0.42	0.64	0.72	-0.39	0.65	1.00		
T	-0.26	0.99	-0.38	-0.45	0.98	-0.44	-0.48	0.99	-0.48	-0.38	1.00	
CE	0.51	-0.36	0.54	0.67	-0.33	0.63	0.73	-0.35	0.88	<b>0.66</b>	-0.34	1.00

P5A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	-0.07	1.00										
CE	<b>0.65</b>	-0.18	1.00									
VWC	0.72	-0.33	0.48	1.00								
T	-0.09	0.99	-0.16	-0.28	1.00							
CE	0.84	-0.09	0.74	<b>0.65</b>	-0.16	1.00						
VWC	0.86	-0.15	0.71	0.73	-0.16	0.90	1.00					
T	-0.06	1.00	-0.19	-0.32	0.98	-0.13	-0.16	1.00				
CE	0.67	-0.10	0.75	0.54	-0.10	0.83	<b>0.81</b>	-0.12	1.00			
VWC	0.82	-0.13	0.56	0.77	-0.15	0.80	0.87	-0.12	0.69	1.00		
T	-0.06	1.00	-0.18	-0.31	0.99	-0.08	-0.14	1.00	-0.09	-0.12	1.00	
CE	0.62	-0.20	0.73	0.54	-0.18	0.81	0.77	-0.20	0.94	<b>0.66</b>	-0.20	1.00

P1A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	0.11	1.00										
CE	<b>0.81</b>	0.17	1.00									
VWC	0.76	0.12	0.68	1.00								
T	0.10	0.86	0.19	0.27	1.00							
CE	0.52	0.18	0.66	<b>0.84</b>	0.29	1.00						
VWC	0.76	0.27	0.73	0.76	0.23	0.66	1.00					
T	0.15	0.98	0.23	0.11	0.83	0.16	0.31	1.00				
CE	0.50	0.23	0.69	0.64	0.22	0.82	<b>0.78</b>	0.26	1.00			
VWC	0.53	0.11	0.58	0.55	0.07	0.59	0.77	0.14	0.70	1.00		
T	0.12	0.83	0.21	0.18	0.77	0.28	0.33	0.82	0.34	0.21	1.00	
CE	0.21	0.11	0.28	0.30	0.09	0.41	0.40	0.13	0.53	0.43	0.17	1.00

P2A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	0.02	1.00										
CE	<b>0.90</b>	-0.15	1.00									
VWC	0.82	0.07	0.78	1.00								
T	0.01	1.00	-0.16	0.07	1.00							
CE	0.75	-0.12	0.83	<b>0.89</b>	-0.12	1.00						
VWC	0.75	0.10	0.68	0.88	0.10	0.77	1.00					
T	0.01	1.00	-0.15	0.07	1.00	-0.12	0.10	1.00				
CE	0.57	-0.18	0.68	0.70	-0.18	0.86	<b>0.76</b>	-0.17	1.00			
VWC	0.62	0.11	0.54	0.65	0.10	0.53	0.77	0.10	0.49	1.00		
T	0.04	0.38	-0.02	0.04	0.38	-0.01	0.03	0.39	-0.02	0.01	1.00	
CE	0.54	-0.21	0.63	0.62	-0.22	0.77	0.71	-0.21	0.90	<b>0.57</b>	-0.06	1.00

P3A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	0.01	1.00										
CE	<b>0.90</b>	-0.07	1.00									
VWC	0.37	-0.07	0.40	1.00								
T	-0.29	0.51	-0.32	0.06	1.00							
CE	0.36	-0.04	0.46	<b>0.92</b>	0.03	1.00						
VWC	0.36	0.00	0.37	0.91	0.09	0.80	1.00					
T	-0.30	0.50	-0.32	0.07	1.00	0.04	0.10	1.00				
CE	0.34	-0.03	0.44	0.89	0.04	0.95	<b>0.84</b>	0.05	1.00			
VWC	0.28	0.00	0.27	0.76	0.07	0.69	0.86	0.07	0.73	1.00		
T	-0.33	0.50	-0.34	0.09	0.96	0.07	0.12	0.96	0.06	0.08	1.00	
CE	0.31	-0.06	0.41	0.82	0.04	0.89	0.79	0.04	0.94	<b>0.73</b>	0.03	1.00

P4A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	0.23	1.00										
CE	<b>0.87</b>	0.34	1.00									
VWC	0.91	0.24	0.84	1.00								
T	0.22	0.95	0.32	0.21	1.00							
CE	0.84	0.26	0.86	<b>0.90</b>	0.25	1.00						
VWC	0.78	0.13	0.67	0.86	0.13	0.76	1.00					
T	0.09	0.78	0.18	0.10	0.78	0.21	0.13	1.00				
CE	0.74	0.24	0.77	0.79	0.23	0.84	<b>0.82</b>	0.29	1.00			
VWC	0.63	0.04	0.54	0.69	0.02	0.58	0.73	-0.08	0.51	1.00		
T	0.22	0.95	0.31	0.23	0.97	0.23	0.15	0.75	0.25	0.04	1.00	
CE	0.89	0.25	0.86	0.87	0.24	0.90	0.75	0.15	0.87	<b>0.63</b>	0.25	1.00

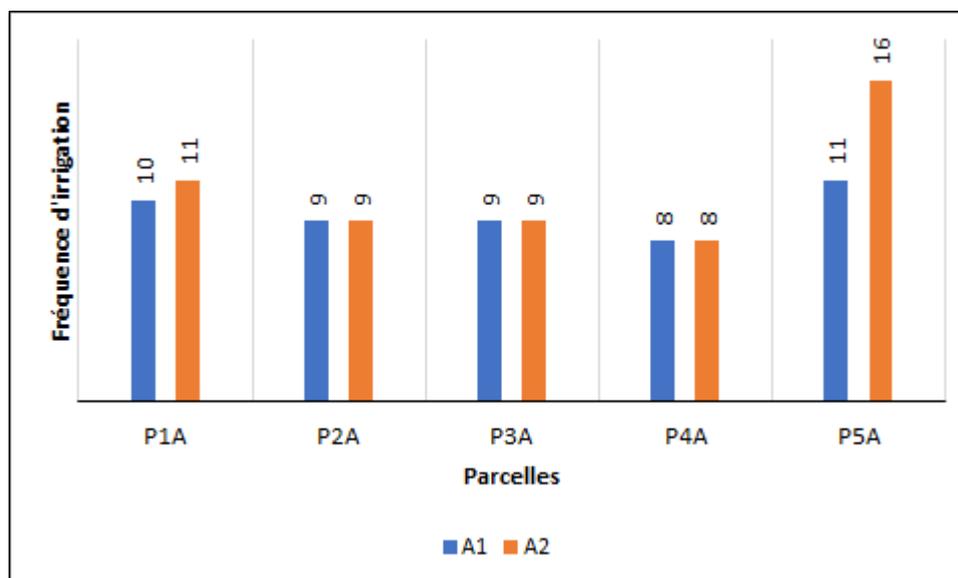
P5A	5cm			10cm			15cm			20cm		
	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE	VWC	T	CE
VWC	1.00											
T	0.19	1.00										
CE	0.34	0.24	1.00									
VWC	0.59	0.18	0.19	1.00								
T	0.00	0.69	0.18	0.32	1.00							
CE	0.51	0.29	0.25	<b>0.91</b>	0.37	1.00						
VWC	0.73	0.28	0.39	0.51								

#### IV.4 Influence du paillis organique sur l'eau irriguée et la plante

Le paillis organique joue un rôle important dans la gestion de l'eau d'irrigation et le développement des cultures ; en particulier en milieu aride et semi – aride. Cette section explore l'impact de cette pratique sur la fréquence et volume d'irrigation, l'évolution végétative ainsi que le rendement de la plante.

##### IV.4.1 Fréquence d'irrigation

La figure 65 présente le nombre de tours irriguée par parcelle au cours de la période de croissance de la plante sur deux (02) ans. Son observation identifie P4A comme la parcelle la moins irriguée dont le nombre de tours irrigués est de 8 tours. Le nombre de tours irrigués à savoir 9 est identique au niveau des parcelles P2A et P3A sur 2 ans. L'écart entre le nombre de tours sur deux (02) ans au niveau de la parcelle P5A, est de cinq (05) tours. La comparaison de la parcelle P5A avec celle P4A, permet de s'apercevoir qu'en 2023, P5A a reçu deux (02) fois le nombre de tours d'eau de la parcelle P4A. Ainsi de cette figure, le classement suivant en découle :  $P5A > P1A > P2A \geq P3A > P4A$ . De ce classement, la conclusion fait état du fait qu'au fil de 2 ans, les parcelles paillées en général et P4A en particulier, ont été beaucoup moins irriguées que la parcelle témoin.



**Figure 65.** Nombre de tours irrigués au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans.

Le fait que le nombre de tours d'irrigation soit plus faible dans les parcelles paillées que pour celle témoin en général et de P4A en particulier permet de dire que le paillis utilisé

réduit la fréquence d'irrigation. Ce résultat est conforme aux recherches menées par certains scientifiques (Rasmussen 1999; Chalker-Scott 2007; Ahmad et al. 2020). Ces derniers soulignent que l'application de paillis peut réduire significativement la fréquence d'irrigation voire éliminer le besoin d'irrigation. Le choix du paillis est crucial car certains réduiront l'irrigation plus que d'autres, comme nous l'avons observé avec les paillis utilisés dans l'étude.

L'élaboration des graphes sur deux (02) ans (Fig.66) dans chaque parcelle de la durée du nombre de jours entre deux tours d'irrigation montre que :

- La parcelle P4A a conservé plus d'eau dans le sol par rapport aux autres parcelles car en 2022, elle a mis au maximum 22 jours avant d'être à nouveau irriguée contre 21 jours en 2023 ;
- Les parcelles P2A et P3A ont pratiquement eu le même nombre de jours maximum de conservation de l'eau dans le sol, à savoir 13 jours en 2022 et 20 jours en 2023 ; traduisant une meilleure conservation en 2023 de l'eau ;
- La parcelle P1A a mis 15 jours de conservation de l'eau dans le sol contre 13 jours en 2023 ; laissant transparaître moins de conservation de l'eau dans le sol en 2023 qu'à 2022
- La parcelle P5A a maintenu le nombre de jours maximum à 13 ; aussi bien en 2022 qu'en 2023

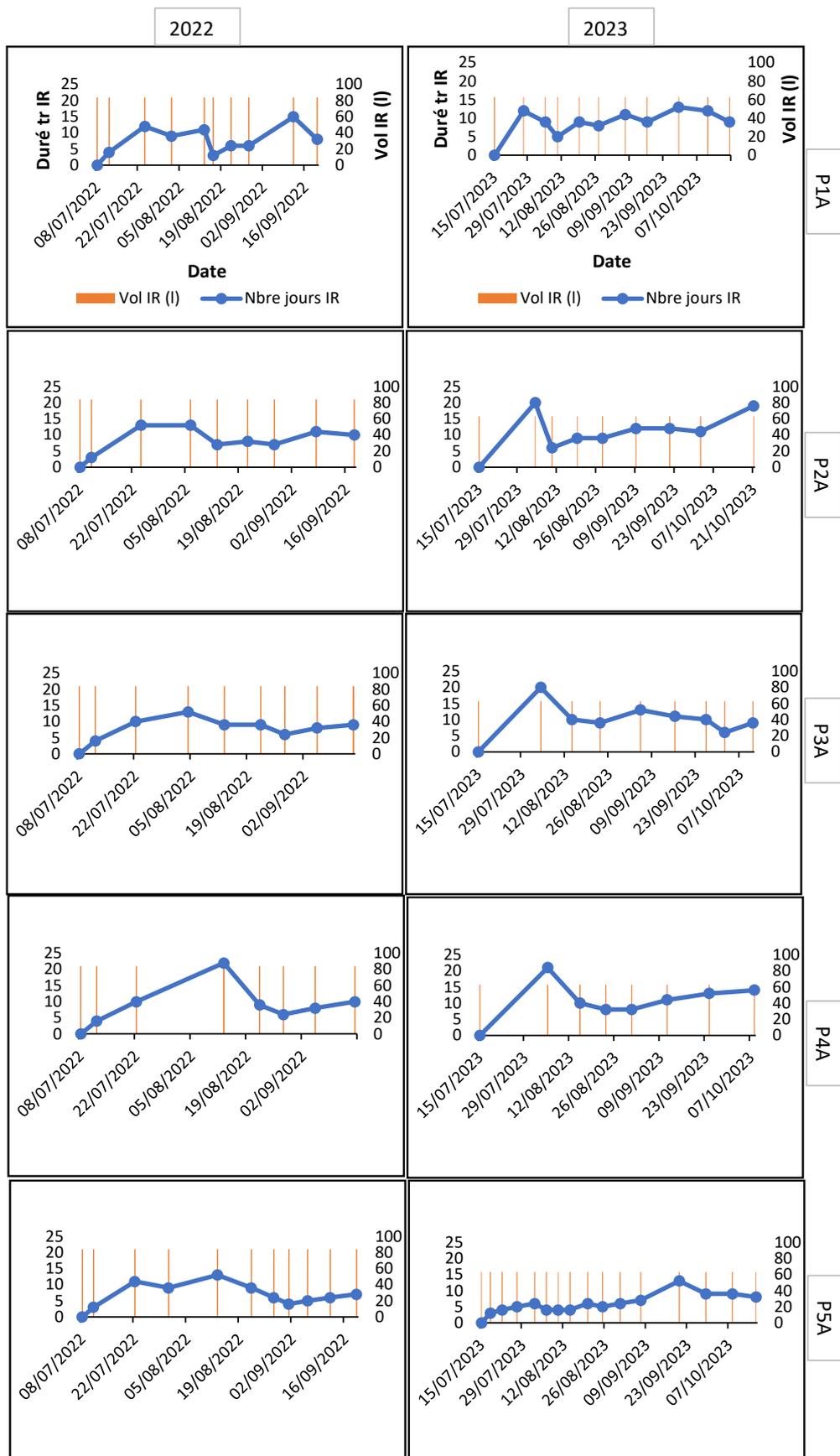
Des résultats obtenus, les classements ci-après ont été établis par an :

- P4A (22 jours) > P1A (15 jours) > P2A (13 jours) ≥ P3A (13 jours) ≥ P5A (13 jours) (2022) ;
- P4A (21 jours) > P2A (20 jours) ≥ P3A (20 jours) > P1A (13 jours) ≥ P5A (13 jours) (2023)

(Kumar & Dey 2011) nous rappellent que l'utilisation de paillis en surface du sol augmenterait la diffusion de l'eau sous le gradient de vapeur pendant la saison de croissance. Ils ajoutent que ce facteur augmenterait l'absorption maximale d'eau sous le paillis. Dans le cadre de l'étude, la parcelle mélange a été moins irriguée que les autres parcelles paillées. Mais aussi a conservé plus d'eau dans le sol par rapport aux autres parcelles.

Le travail de (Kaboneka et al. 2021) et (Boyer 2021) souligne le fait que les paillis issus du bois (copeau et sciure) ont en commun une décomposition très lente. En fait, selon les études menées au Burundi par (Kaboneka et al. 2021) sur la décomposition de la paille de blé, il apparaît que ce paillis est caractérisé par une prédominance de substances résistantes à la décomposition (cellulose, hémicellulose, lignine) et par un rapport carbone/azote (C/N) très

élevé (76,4), soit trois fois plus élevé que le standard (25) idéal pour la minéralisation de l'azote et la libération rapide des nutriments contenus dans les matières organiques. De même, l'étude de (Boyer 2021) menée au Québec sur la recherche bibliographique de l'utilisation potentielle des paillis organiques, a montré que le rapport C/N des copeaux de bois est d'environ 39,2, soit légèrement supérieur au standard établi. De plus, (Nicolardot et al. 2001) soulignent que ce rapport est considéré comme l'indicateur biochimique le plus simple de la qualité de la matière organique, de sa décomposabilité et du potentiel de libération de nutriments. Selon (Kaboneka et al. 2021) sa valeur indique si un substrat organique est rapidement ou lentement décomposable. Ainsi, la comparaison des ratios des valeurs obtenues par leurs auteurs montre que la paille de blé met effectivement plus de temps à commencer à se décomposer que le bois. Traduisant le comportement du mélange a plus conservé l'eau dans les deux années. Mais aussi la place interchangeable occupée par le copeau et la sciure de bois sur deux ans. Pour ce qui est des différences existantes entre les parcelles paillées avec le copeau de bois et la sciure en termes de rétention de conservation d'eau et du nombre de cycles d'arrosage, l'explication plausible peut – être le broyage du bois. En effet, plus le bois est finement broyé, plus il retient d'eau dans le sol.



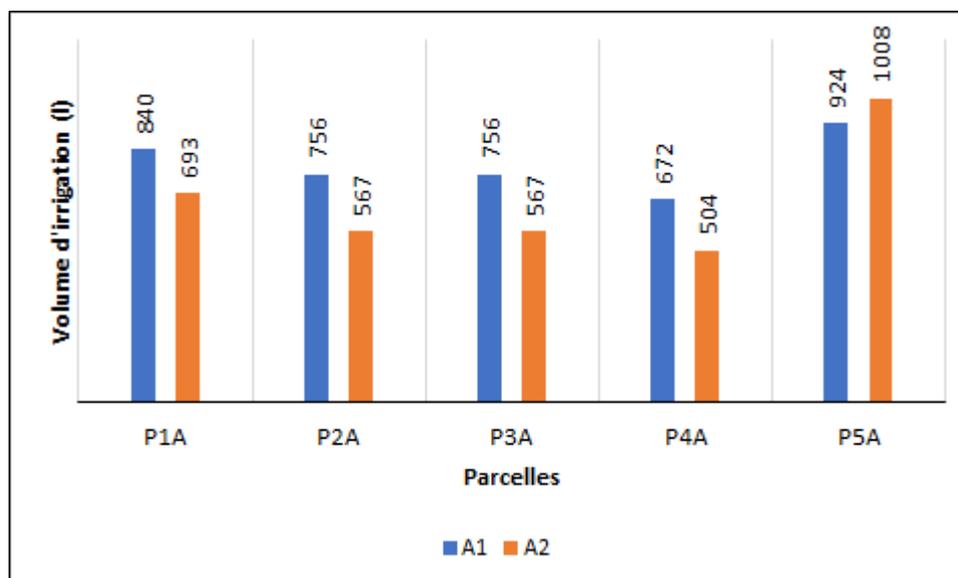
**Figure 66.** Durée établie du nombre de jours entre deux irrigations (nbre jours IR) dans chaque parcelle sur deux (02) ans

#### IV.4.2 Volume d'irrigation

La représentation graphique (Fig.67) de différents volumes d'irrigation utilisés durant les deux (02) ans de campagne permet de noter que :

- P4A est la parcelle ayant reçu le moins de volume d'eau (672 – 504) ;
- P5A, celle ayant reçu le plus de volume d'eau (924 – 1008);
- Dans les parcelles, au fil du temps, le volume d'eau utilisé pour irriguer a diminué contrairement à celle témoin (sol nu) ou il a plutôt augmenté.

Le classement suivant est établi :  $P5A > P1A > P2A \geq P3A > P4A$ . De ce classement, il ressort que l'utilisation du paillage, permet de moins irriguer le sol. Ce résultat cadre avec les recherches effectuées de (Kumar & Dey 2011).

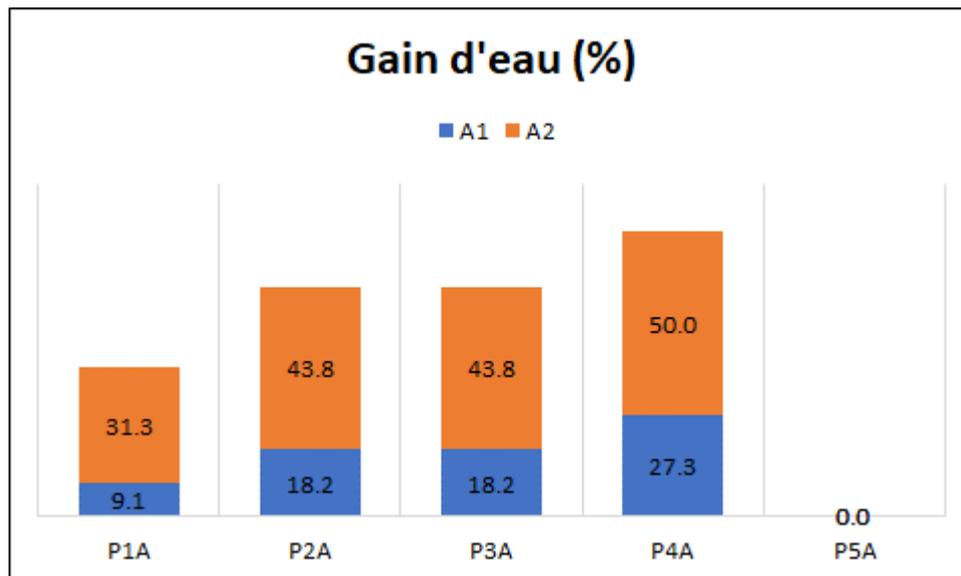


**Figure 67.** Volume d'irrigation (litre) au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans.

#### IV.4.3 Economie d'eau

La comparaison de l'économie d'eau s'est effectuée au cours de la période de croissance de la culture dans les différentes parcelles paillées par rapport au témoin sur deux (02) ans (Fig.68). Elle identifie P4A comme étant la parcelle permettant un grand gain en économie d'eau contrairement aux autres parcelles. Passant de 27.3 % (2022) à 50% (2023). Soit plus de deux (02) fois la valeur enregistrée en 2022. Ainsi le paillage en général permet de faire de gain en eau de 9.1 à 27.3% en 2022 contre 31.3% à 50% en 2023. Traduisant l'énorme gain enregistré au fil des deux ans.

L'énorme gain en eau enregistré par la parcelle P4A paillée avec le mélange sur deux ans peut être attribué à l'amélioration continue de la structure du sol, à une meilleure rétention d'humidité, à la réduction des mauvaises herbes, à la protection contre l'érosion, à l'effet synergique des matériaux de paillage et à l'effet cumulatif des micro-organismes et de l'humidité. Ces facteurs combinés créent un environnement de sol de plus en plus favorable à la rétention d'eau au fil du temps. Ces propos sont d'ailleurs confirmés par (Zegada-Lizarazu & Berliner 2011) et (Stelli et al. 2018).

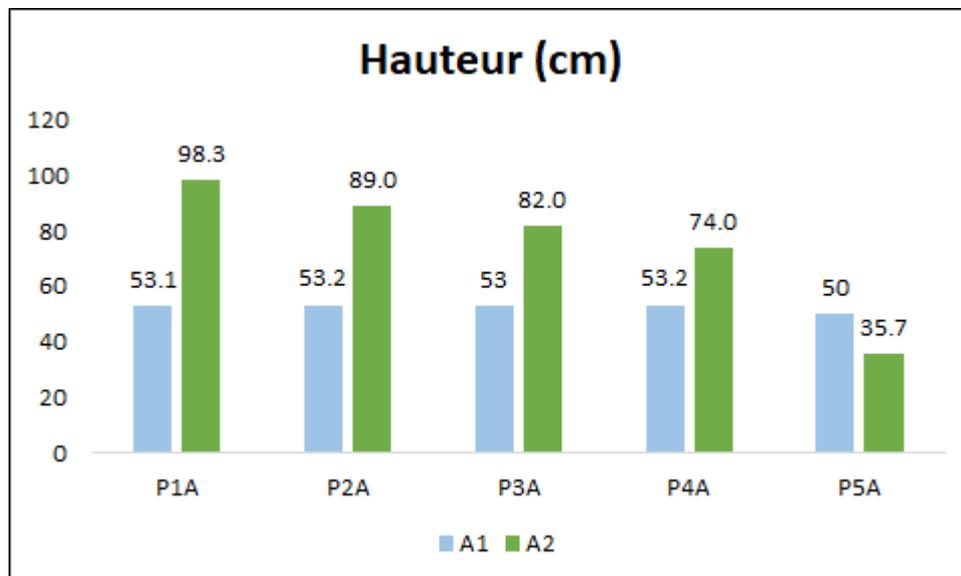


**Figure 68.** Comparaison de l'économie d'eau par rapport au témoin au cours de la période de croissance de la tomate dans chaque parcelle sur deux ans.

#### IV.4.4 Evolution végétative de la culture

L'évolution végétative de la culture dans chaque parcelle au cours de sa période de croissance (Fig.69) sur deux (02) ans montre qu'en 2022, les tailles de plantes dans chaque parcelle est presque identique. Démontrant ainsi l'absence de différence significative dans l'évolution végétative de la culture de tomate entre les parcelles paillées et celle témoin. En revanche en 2023, une différence largement significative est observée entre les parcelles paillées et le témoin. En effet P1A est la parcelle dont les plantes ont atteint une hauteur maximale et P5A, une hauteur minimale. Entraînant le classement ci - après : P1A > P2A > P3A > P4A > P5A. Ainsi, le paillage organique en général et le bois en particulier améliore l'évolution végétative de la culture à long terme qu'à court terme. Les différents comportements observés sur deux (02) ans peuvent – être dû à la robustesse des plantes de tomate qui ont cette facilité d'adaptation dans le milieu qu'elles s'épanouissent, l'effet à long

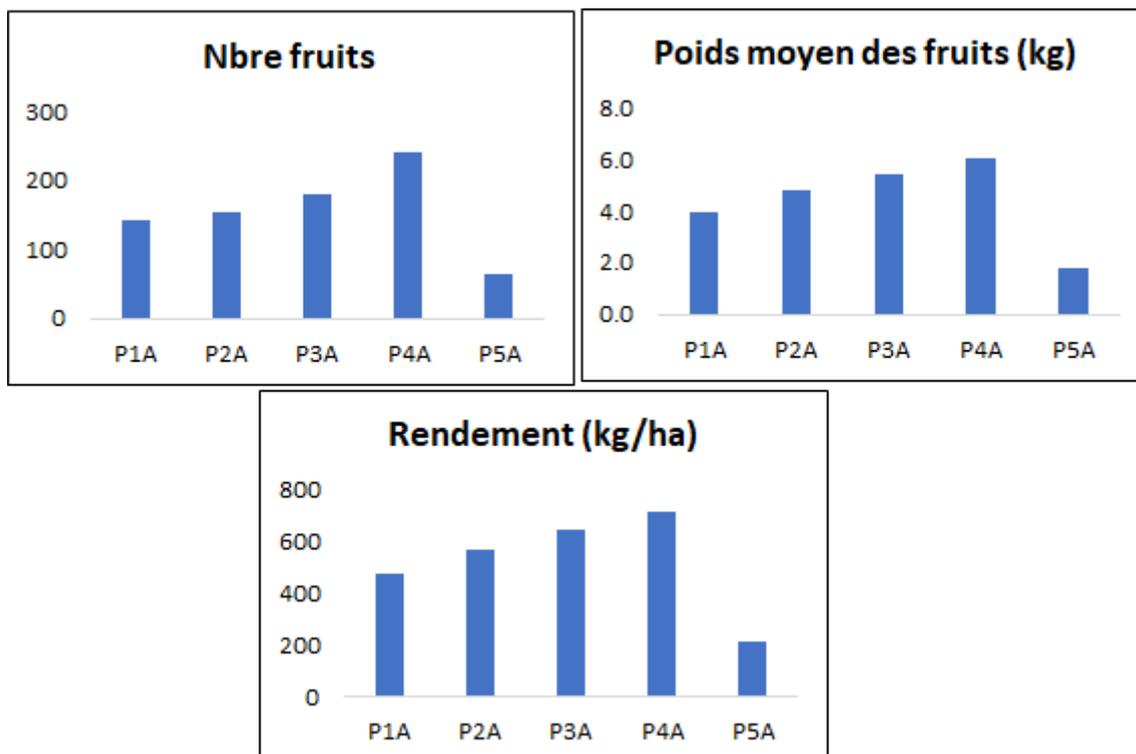
terme des paillis sélectionnés et leurs propriétés spécifiques qui auront cette tendance à améliorer progressivement la structure du sol et à libérer lentement les nutriments. Mais aussi à un contrôle efficace des mauvaises herbes.



**Figure 69.** Evolution végétative de la culture de tomate dans chaque parcelle au cours de sa période de croissance sur deux ans.

#### IV.4.5 Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture

La représentation graphique (Fig.70) sur le nombre et poids moyen de fruits ainsi que du rendement de la culture s'est effectuée uniquement à la deuxième année. De cette illustration, l'identification de P4A est faite comme étant la parcelle ayant obtenu le plus de fruits de tomate, avec un poids moyen maximal et un meilleur rendement. Ce qui n'est pas le cas pour la parcelle témoin ou c'est plutôt le contraire. Le classement étant le suivant : P4A > P3A > P2A > P1A > P5A. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce classement. Les copeaux de bois et la sciure offrent une bonne rétention d'humidité et une libération progressive de nutriments, tandis que la paille de blé aide à maintenir une meilleure température du sol et à décomposer plus rapidement pour fournir des nutriments à court terme. La combinaison donc de ses matériaux crée un équilibre optimal en termes de rétention d'humidité, d'aération du sol, de suppression des mauvaises herbes, et de disponibilité des nutriments. Permettant une amélioration significative du nombre de fruits, du poids moyen des fruits et du rendement agricole. Ce résultat cadre avec les recherches menées par (Telkar et al. 2017) et (Sharma et al. 2023). En effet, selon ces derniers, le paillage suite à ses nombreux avantages participerait à l'augmentation du rendement agricole sans destruction de la structure du sol.



**Figure 70.** Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture dans chaque parcelle, uniquement en 2023.

#### IV.4.6 Analyse du volume d'eau par kilogramme de fruits récoltés

Afin d'évaluer l'efficacité de l'irrigation dans la production de la tomate, nous avons déterminé le taux de consommation d'eau dans chaque parcelle, par kilogramme de fruits récolté (Tab.15). Il ressort que le paillage semble avoir un impact positif sur la production de tomates, réduisant la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un kilogramme de fruits. Cela peut être attribué à une meilleure conservation de l'humidité dans le sol, à la réduction de l'évaporation et à l'amélioration des conditions du sol. La parcelle P1A nécessite 174.51 l/kg, tandis que P2A et P3A montrent une réduction supplémentaire avec respectivement 117.96 et 104.38 l/kg, démontrant l'effet cumulatif positif du paillage. La parcelle P5A, qui est la parcelle témoin sans paillage, a le volume d'eau le plus élevé (1008 l) pour le plus faible poids moyen de fruits (1,79 kg). Cela signifie que le paillage pourrait être essentiel pour améliorer la productivité et l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans la culture de tomates. Ainsi, les volumes d'eau utilisés dans les parcelles paillées diminuent au fur et à mesure que le poids moyen des fruits augmente. Montrant une relation inverse entre le volume d'eau nécessaire et le rendement, ce qui est un indicateur positif pour l'utilisation du paillage.

**Tableau 15.** Volume d'eau (l) par kilogramme (kg) de fruits récoltés dans chaque parcelle

Parcelle	Volume (l)	Poids moyen des fruits (kg)	Volume/kg
P1A	693	3.97	174.51
P2A	567	4.81	117.96
P3A	567	5.43	104.38
P4A	504	6.03	83.64
P5A	1008	1.79	563.60

#### IV.5 Conclusion

L'étude de l'impact du paillage sur la température du sol met en exergue le rôle régulateur ou encore d'équilibre joué par les paillis. En effet, en 2022, la sciure permettait d'augmenter la température dans le sol ; par contre en 2023, le mélange permet plutôt de diminuer considérablement la température dans le sol. Notons qu'au sein de ce paramètre, l'écart de moyennes dans les parcelles paillées est de l'ordre de + 0.9°C (parcelle sciure) en 2022 contre - 1.3 °C (parcelle mixte) en 2023. Avec 10 cm et 20 cm étant respectivement les profondeurs ayant enregistré les valeurs de températures les plus élevées en 2022 et 2023.

Cette étude a également montré l'impact positif du paillis sur la stabilité de la salinité du sol ; mettant en exergue l'augmentation de la conductivité électrique en surface, suivie d'une diminution en profondeur. Par ailleurs, 10 cm est la profondeur qui a enregistré le plus fort taux de conductivité électrique en 2022 (0.44 mS/cm) et en 2023 (0.48 mS/cm). La parcelle mélange représente la parcelle ayant enregistré les plus faibles valeurs durant les deux (02) ans.

Pour ce qui est de l'impact du paillis sur l'humidité du sol, il montre qu'avec le temps, le paillage en général et la sciure en particulier permettent une meilleure rétention de l'humidité dans le sol de l'ordre de 2,5 % en 2022 contre 2,9 % en 2023 que le témoin. 15 cm étant la profondeur idéale de rétention sur deux ans suite au taux d'évaporation élevé en surface, le système racinaire de la plante et les remontées capillaires en profondeur. Il faut aussi noter l'impact positif du paillage sur la durée de chaque cycle de croissance de la plante ; identifiant de ce fait le cycle 3 comme étant celui qui a duré le plus sur deux ans dans chaque parcelle paillée.

L'établissement de corrélation entre les trois paramètres étudiés (humidité, température et conductivité du sol) identifie 10 cm et 15 cm, sur deux ans, comme étant celles où l'humidité du sol a beaucoup influencé la conductivité électrique du sol.

L'influence du paillage organique sur l'irrigation identifié, sur deux ans, un nombre de tours d'irrigation plus faible dans les parcelles paillées que dans celle témoin. Mais aussi montre des parcelles paillées moins irriguées que celle témoin. La parcelle mélange étant celle la moins irriguée dont le nombre de tours est de 8. Par ailleurs, elle est celle qui a conservé le plus d'eau dans le sol par rapport aux autres parcelles car en 2022, elle a mis au maximum 22 jours avant d'être à nouveau irriguée contre 21 jours en 2023. Tout comme, elle représente la parcelle qui a reçu le moins de volume d'eau sur deux ans (672 – 504 l). Permettant un énorme gain d'eau de l'ordre de 27,3 % (2022) à 50 % (2023) ; contrairement au reste de parcelles paillées.

Pour ce qui est de l'évolution végétative, le paillage améliore son évolution à long terme qu'à court terme. La parcelle mélange est identifiée comme celle ayant obtenu le plus de fruits de tomate, avec un poids moyen maximal et un meilleur rendement par rapport aux autres parcelles. Par ailleurs, il faut noter que les rendements obtenus sont comparés par rapport à la parcelle témoin. De ce fait, afin d'être comparé à une culture de grande envergure, les mêmes conditions, traitements et méthodes de l'étude devront être appliquées.

## **CHAPITRE V : OPTIMISATION DE L'EFFICACITE DE L'IRRIGATION DANS LA CULTURE DE LA TOMATE EN UTILISANT LE COUPLAGE GOUTTE A GOUTTE ET PAILLAGE**

Cette partie est consacré à l'effet du meilleur paillage organique et du BRF (qui lui aussi à déjà fait ses preuves en termes d'efficacité dans la région), couplé aux systèmes d'irrigation goutte à goutte (surface et 15 cm de profondeur) à différentes phases de développement de la culture de tomate. Le but étant de dénicher le meilleur assemblage paillis organique plus système d'irrigation localisé. Pour ce faire ces derniers ont été comparer suivant plusieurs paramètres.

### **V.1 Paramètres agronomiques**

#### **V.1.1 Durée et taille de chaque cycle de croissance de la plante**

La figure 71 présente la durée et la hauteur des plantes à chaque phase de développement dans chaque parcelle (paillée et nue).

À la phase de croissance des plantes, P3 prend plus de jours dans les deux systèmes d'irrigation. De plus, c'est dans cette même parcelle que les plantes atteignent la plus grande taille.

Pendant la floraison, P2 requiert davantage de jours dans les deux systèmes d'irrigation. En ce qui concerne la taille, elle est plus grande à P1 sous irrigation de surface (DIS) et à P2 sous irrigation souterraine (DIG).

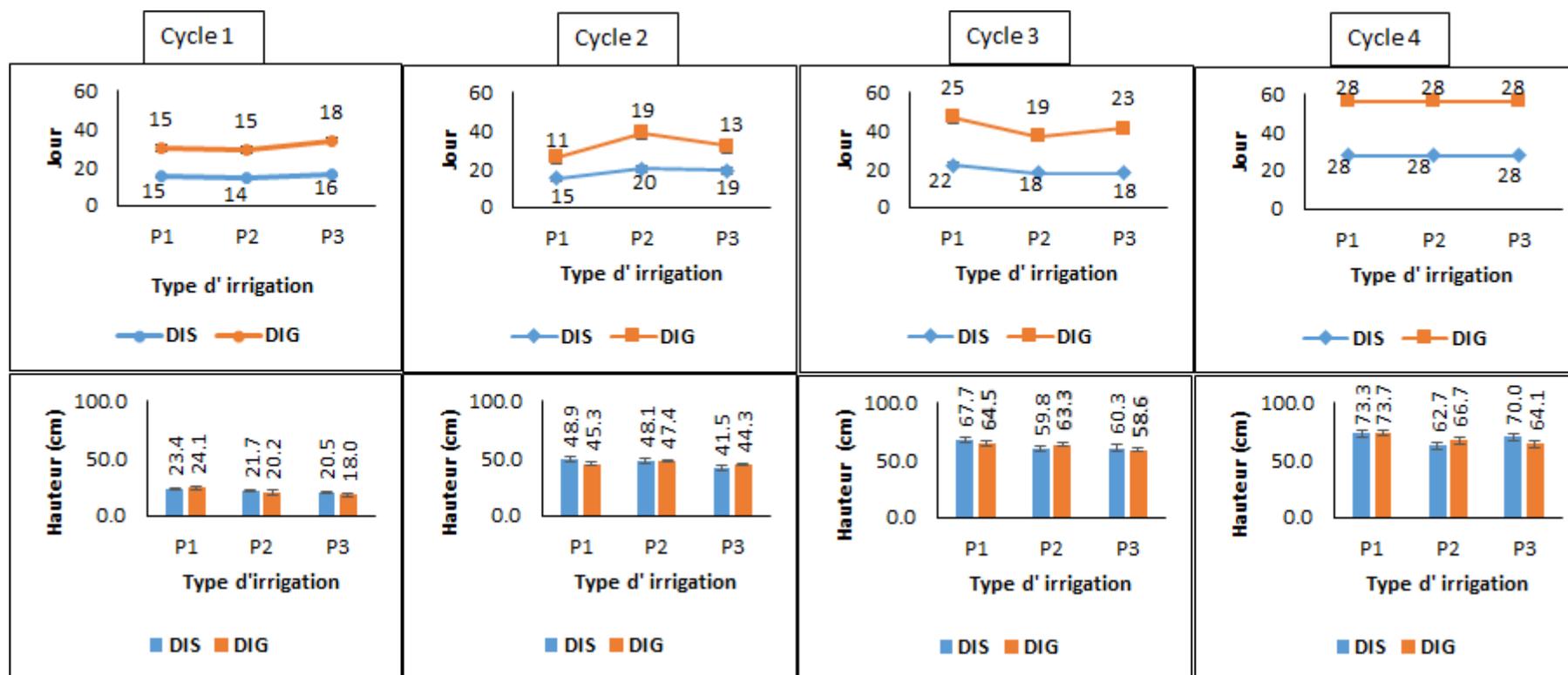
Durant la fructification, P1 nécessite plus de temps dans les deux systèmes. En ce qui concerne la taille, P1 enregistre également la plus grande dans les deux systèmes d'irrigation.

À la maturation et lors de la récolte, le nombre de jours reste constant dans les deux systèmes d'irrigation et dans les différentes parcelles. Cependant, la taille est plus grande à P1, aussi bien en surface qu'en profondeur.

Dans l'ensemble, l'observation de cette figure montre que les parcelles paillées ont de meilleurs résultats en termes de hauteur de plantes et de stades de développement de la culture ; encore plus au sein des parcelles dont le paillis est le mélange (P1) que celles dont le paillis est le BRF (P3). Cette observation fait également mention d'une meilleure appréciation de ses paramètres suscités sous système d'irrigation localisé souterraine pour ce qui est de P1 et P2 ; moindre pour P3. Ce qui est le contraire sous système d'irrigation localisé de surface.

Cela signifie que le paillis BRF appliqué en surface favorise davantage le développement des plantes dans le système d'irrigation goutte à goutte de surface que celui souterrain. En revanche, le phénomène est inverse pour le paillis mélange.

Ainsi le paillage influence positivement sur les différentes phases de développement de la plante et leurs tailles, dans les deux systèmes d'irrigation localisé. Selon (Liasu & Achakzai 2007; Tswana et al. 2017), les plants de tomates soumis au paillage présentent des hauteurs plus élevées par rapport au contrôle. (Wood 1991) appui cette idée en mettant un accent prononcé sur le paillage organique comme étant celui qui a un effet de croissance significatif. En plus, (Abou Zakhem et al. 2019; Yang et al. 2023) soulignent que la technologie de l'irrigation goutte à goutte est efficace pour améliorer la croissance des cultures. Le résultat obtenu dans le cadre de notre étude rejoint les propos des auteurs suscités.



**Figure 71.** Durées et hauteurs moyennes des plantes par phase de développement en fonction du type de système d'irrigation et du traitement appliqué sur la culture de tomate.

### **V.2.2 Nombre de fruits, poids moyen des fruits et rendement de la culture**

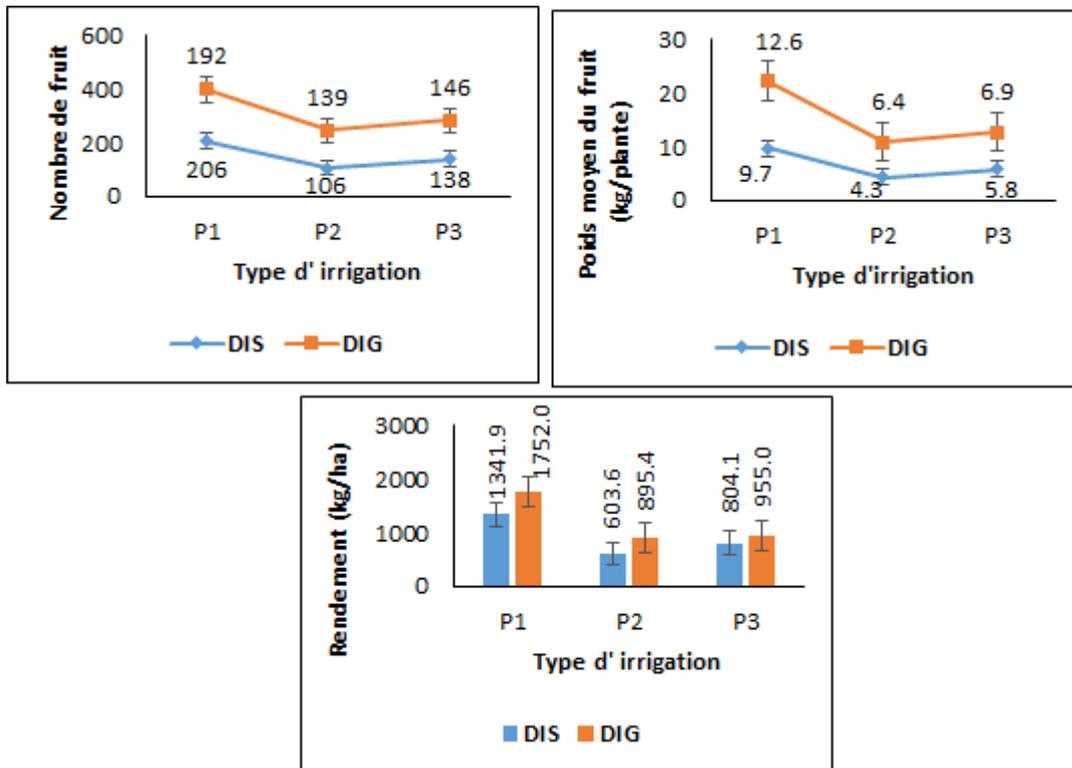
La figure 72 met en exergue le nombre de fruits, le poids moyen des fruits et rendement des plantes obtenus dans chaque parcelle (paillage ou témoin) sous différents systèmes d'irrigation localisé.

Dans les parcelles ayant été irriguées avec le système localisé de surface, la visualisation fait mention d'un nombre de fruits plus important à P1 (206) et moindre à P2 (106), un poids moyen plus grand à P1 (9,7 kg) et moindre à P2 (5,8 kg) pour un rendement respectif de 1341,9 kg/ha (P1) et de 603,6 kg/ha (P2).

Au sein de l'irrigation localisée souterraine, le nombre de fruits est plus important à P1 (192) et moindre à P2 (139), un poids moyen plus grand à P1 (12,6 kg) et moindre à P2 (6,5 kg) pour un rendement respectif de 1752 kg/ha à P1 et 895,4 kg/ha à P2.

La comparaison suivant les deux systèmes d'irrigation souligne de meilleurs résultats au sein de l'irrigation localisée souterraine que de surface. C'est dire que le type de système d'irrigation a un impact significatif sur le nombre de fruit, le poids du fruit et le rendement de la culture. Ce résultat rejoint les mêmes observations effectuées par plusieurs chercheurs (Gebremeskel et al. 2018; Abou Zakhem et al. 2019). En effet, ces derniers soulignent que ce système permet une augmentation homogène du rendement en plus d'améliorer la qualité de croissance de la plante. Que ce soit sous système d'irrigation localisé de surface ou bien souterrain, les parcelles recouvertes avec les paillages ont d'excellents résultats de rendement, de nombre et poids de fruits que celles non paillées. Notons que parmi les paillis en question, le mélange est meilleur dans les deux systèmes que le BRF. Montrant ainsi une interaction entre le type de système utilisé et le type de paillage. Ce résultat est partagé par plusieurs chercheurs. (Admasu & Tamiru 2019) pense qu'il n'y a carrément pas d'interaction entre le type de système d'irrigation utilisé et le paillage utilisé. Par contre, d'autres chercheurs (Li et al. 2016; Jia & Fu 2020) ont démontré que l'association du paillage et l'irrigation goutte à goutte augmente la croissance des plantes, ainsi que leur rendement de pratiquement 14,6 à 19,6%. (Akhtar et al. 2001) a indiqué que les paillis naturels tels que les feuilles, la paille de riz, les feuilles mortes et le compost sont utilisés depuis des siècles pour augmenter le nombre de fruits par plante, la longueur des fruits, la taille des fruits, le poids moyen des fruits et le rendement. Les résultats de cette étude sont également en accord avec ceux de (Kayum et al.

2008; Tswanya et al. 2017; Admasu & Tamiru 2019), qui ont déclaré que le type de paillage avait un effet significatif sur la croissance, les composantes du rendement et donc sur le rendement de la tomate. Cependant quant aux pourcentages obtenus par, (Li et al. 2016; Jia & Fu 2020) dont la différence est de 5% en général, il est supérieur à celui obtenu dans notre étude. En effet, le nôtre étant de 2,9% dans le meilleur paillis et système d'irrigation localisé.



**Figure 72.** Nombre de fruits, poids moyen de fruits et rendement de la culture.

### V.3 Caractérisation de l'humidité, température et conductivité électrique du sol

#### V.3.1 Phase de croissance

La visualisation de la figure 73a montre qu'au niveau du:

- système d'irrigation localisé de surface (DIS), le paillis diminue l'humidité du sol dans les différentes parcelles paillées ; spécialement au sein de P1 à 15 et 20 cm de profondeur. Par contre à P3, le phénomène contraire s'observe plutôt à 5 et 10 cm de profondeur. Le paillis diminue plus la température dans les parcelles paillées que le témoin. De ce fait, P1 est la parcelle qui enregistre le plus bas taux. Enfin le paillis diminue la conductivité du sol dans les parcelles paillées à toutes les profondeurs dont P1 est la parcelle qui enregistre le plus bas taux parmi les deux parcelles paillées.

- système d'irrigation localisée souterraine (DIG), le paillis à la fois augmente (P3) et diminue (P1) l'humidité du sol à 5cm de profondeur, puis l'augmente totalement à 10 cm (P1 et P3), enfin la diminue totalement à 15 et 20 cm de profondeur (P1 et P3). De ce fait, il joue le rôle de régulateur. Le paillis augmente la température dans toutes les parcelles paillées que le témoin. Avec P3 étant celle qui a une augmentation significative. Le paillis augmente la conductivité électrique du sol dans les parcelles paillées à 5 et 10 cm de profondeur et la diminue dans les parcelles paillées à 15 et 20 cm de profondeurs. D'où le rôle de régulateur.

### **V.3.2 Phase de floraison**

L'observation de la figure 73b identifie au sein de:

- DIS, les parcelles paillées comme celles ayant des valeurs de l'humidité du sol inférieures à celle non paillée à différentes profondeurs, dont P3 à des valeurs inférieures que P1. Au niveau de la température du sol, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures au témoin avec P1 étant celle où on enregistre le plus bas taux. Dans le cadre de la conductivité électrique du sol, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures par rapport au témoin avec P3 inférieur à P1 à 5 cm et P1 inférieure à P3 dans toutes les autres profondeurs.
- DIG, les parcelles paillées ont des valeurs de l'humidité du sol inférieures au témoin à différentes profondeurs dont P3 à des valeurs plus basses que P1. Les parcelles paillées ont valeurs de température de sol à la fois supérieures (P3) et inférieures (P1) au témoin (P2) avec P1 étant celle où on enregistre le plus bas taux. Au sein de la conductivité électrique du sol, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures à 5, 15 et 20 cm de profondeur par rapport au témoin avec P3 inférieur à P1 à 15 et 20 cm, P1 inférieure à P3 à 5 cm de profondeur. Cependant à 10 cm, les parcelles paillées à la fois augmente (P3) et diminue (P1) la conductivité par rapport au témoin.

### **V.3.3 Phase de fructification**

L'analyse de la figure 73c mentionne dans le cadre de la:

- DIS, les parcelles paillées qui ont des valeurs de l'humidité du sol inférieures au témoin à différentes profondeurs ; P3 à des valeurs supérieures à celles de P1. Pour la température de sol, les parcelles paillées ont valeurs inférieures au témoin avec P1 étant celle où on enregistre le plus bas taux. En ce qui concerne la conductivité électrique du sol, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures par rapport au témoin.

- DIG, les parcelles paillées qui ont des valeurs d'humidité du sol inférieures au témoin à différentes profondeurs ; P3 à des valeurs supérieures à celles de P1 à partir de 10 cm mais à 5 cm c'est plutôt le phénomène contraire. Pour la température de sol, les parcelles paillées jouent le rôle de régulateur car elles augmentent (P3) et diminuent (P1) la température dans le sol par rapport au témoin à différentes profondeurs. Au sein de la conductivité électrique du sol, les valeurs sont à la fois inférieures (P1) et supérieures (P3) par rapport au témoin à 5 et 10 cm de profondeur. A 15 cm de profondeur, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures au témoin dont P1 a des valeurs moins élevées que P3 et inversement à 20 cm de profondeur.

#### **V.3.4 Phase de maturation**

La figure 73d relève au sein de la :

- DIS, les parcelles paillées qui ont des valeurs d'humidité du sol inférieures à celle non paillé à différentes profondeurs dont P3 à des valeurs supérieures à P1. Pour la température du sol, elles ont plutôt des valeurs à la fois inférieures (P1) et supérieures (P3) par rapport au témoin. Au sein de la conductivité électrique du sol, les parcelles paillées ont des valeurs inférieures par rapport au témoin avec P3 supérieur à P1 dans toutes les profondeurs.
- DIG, les parcelles paillées ont des valeurs d'humidité du sol inférieures à celle non paillé à différentes profondeurs dont P1 à des valeurs inférieures à P3 à 5 cm et 20 cm de profondeur. A 5, 15 et 20 cm de profondeur, les parcelles paillées augmentent la température de sol, puis la diminue à 10 cm de profondeur par rapport au témoin ; dont P3 est celui qui l'augmente le plus. Pour la conductivité électrique du sol, les parcelles paillées ont des valeurs à la fois inférieures (P1) et supérieures (P3) à 5 cm par rapport au témoin ; à 10 cm de profondeur, ses valeurs sont supérieures au témoin ; à 15 et 20 cm de profondeur, elles sont inférieures par rapport au témoin ; avec P3 supérieur à P1 (15 cm) et inversement à 20 cm de profondeur.

En résumé, les parcelles paillées présentent généralement des taux d'humidité relativement faibles dans la plupart des cycles, même si l'on observe parfois des taux élevés. De plus, on observe à la fois des températures et des conductivités électriques du sol élevées et faibles dans tous les cycles. Cela suggère que le paillis, dans l'ensemble, régule l'humidité, la température et la conductivité du sol irrigué par les deux systèmes d'irrigation.

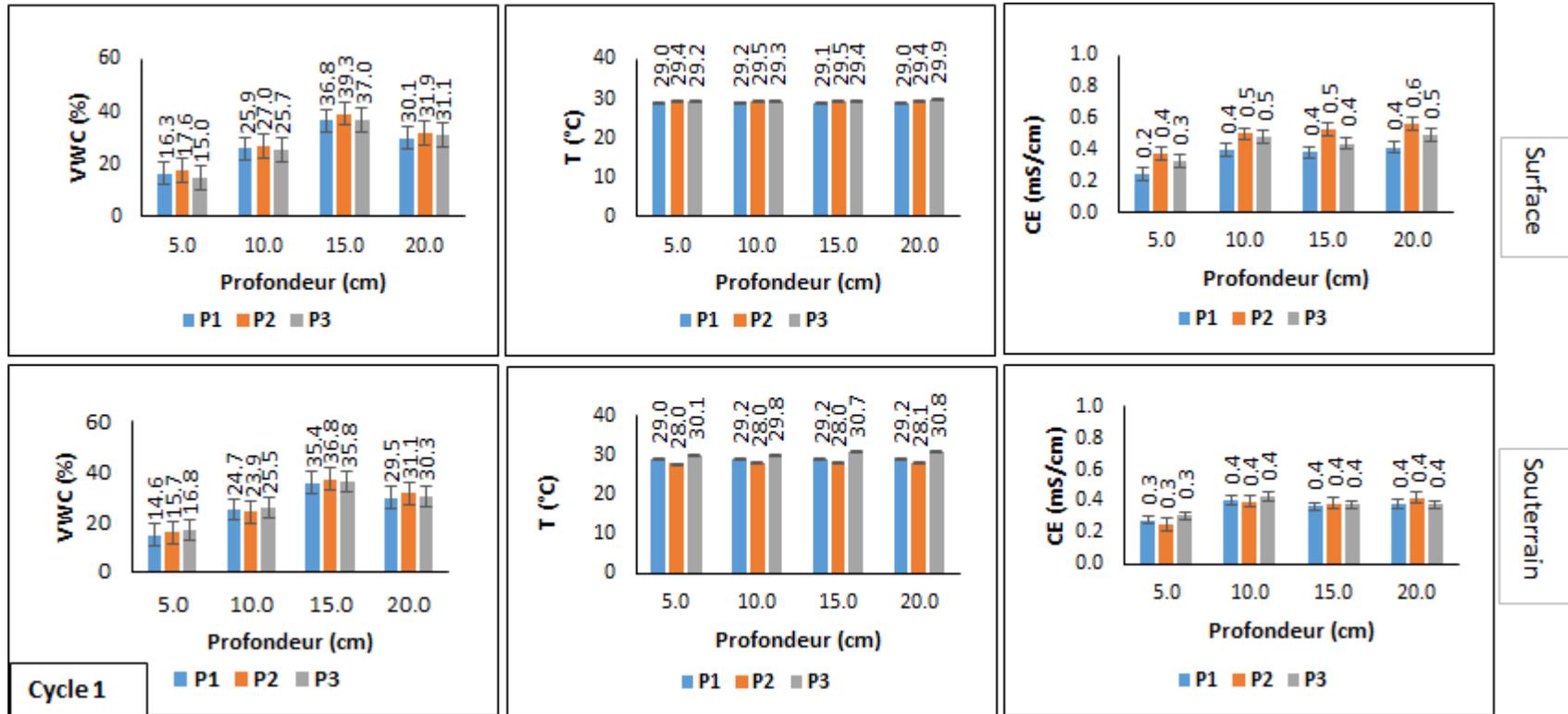
Les parcelles paillées ont légèrement un taux moindre d'humidité que celles non paillées. Cette différence peut être un indicateur que le paillage contribue à la conservation de l'humidité du sol, même si elle n'est pas nécessairement significative. D'après les chercheurs (Stelli et al. 2018; Du et al. 2022) le paillage permet d'ajuster ou encore d'améliorer l'humidité dans le sol. Ainsi, il sert à maintenir des niveaux d'humidité plus stables dans le sol.

Les valeurs de température du sol sont à la fois moindres et élevées dans les parcelles paillées que non paillées dans presque tous les cycles. De ce fait le paillis régule la température dans le sol. (Gan et al. 2013) soulignent que généralement le témoin (sol nu) a une température plus élevée qui change contrairement aux sols couverts (paillés) qui réduisent l'échange d'humidité entre le sol et l'air. (Du et al. 2022) continuent suivant leur logique en montrant que généralement on estime que le paillage des terres agricoles agit comme une barrière thermique partielle qui peut empêcher les rayons ultraviolets et réduire la perte de chaleur. Toutefois selon (Iqbal et al. 2020), différents types de paillages ont des effets différents sur la température du sol. Certains paillis augmentent la température du sol par rapport au sol stérile ou aux paillis vivants (Zegada-Lizarazu & Berliner 2011) en raison de l'absorption des radiations solaires. (Gan et al. 2013) terminent en disant que le paillage joue le rôle d'équilibre dans le sol. L'observation journalière de nos données met bien en exergue le rôle de régulateur ou encore d'équilibre joué par les paillis dans les deux systèmes d'irrigation. En effet, comme le souligne (Safari et al. 2021), quand la température ambiante est élevée, la température dans le sol diminue sous- sols paillés et vis-versa.

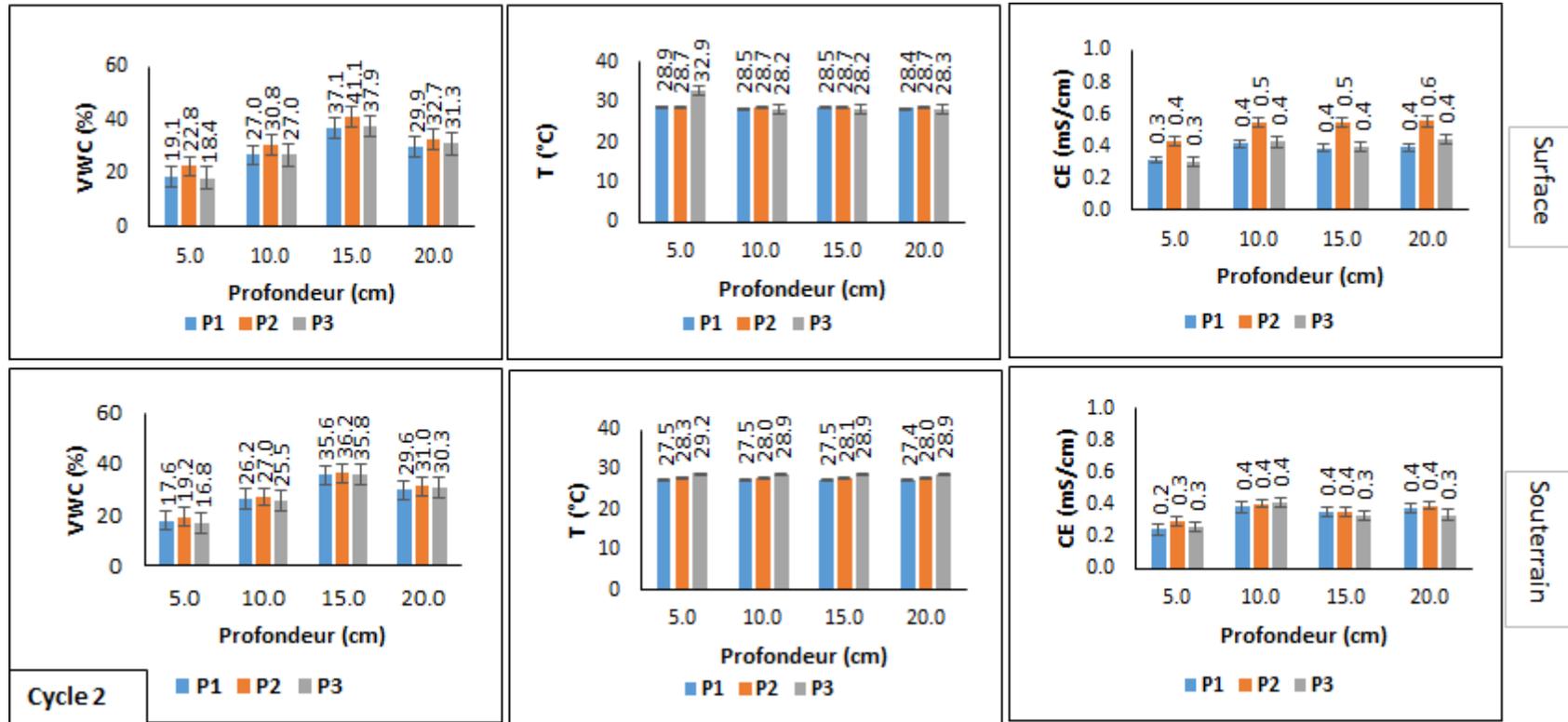
Les moyennes de conductivité électrique de sol sont moindres dans les parcelles paillées que sols nus. (Kumar & Lal 2012) ont démontré que tous les types de paillage ont un impact beaucoup plus positif car ils diminuent au maximum la conductivité électrique au sein des propriétés du sol. C'est dire que le paillage diminue la salinisation dans le sol. En effet selon (Telkar et al. 2017), les paillis organiques peuvent accélérer activement la désalinisation des sols. Ces résultats cadrent avec ceux obtenus dans l'étude.

Le paillage en général et le mélange en particulier influence dans l'ensemble positivement l'humidité, la température et la conductivité électrique dans le sol irrigué via les deux systèmes d'irrigation localisée.

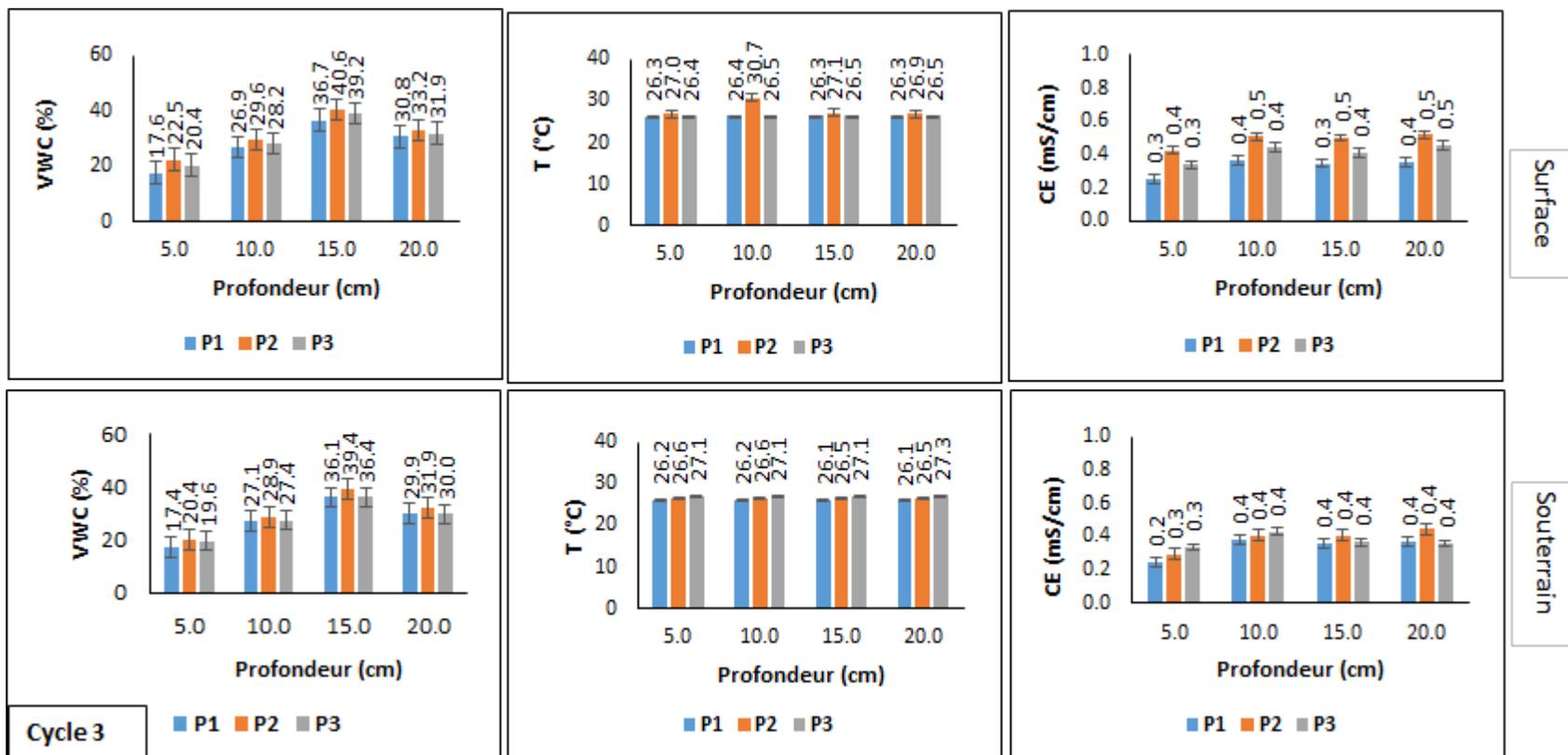
a)



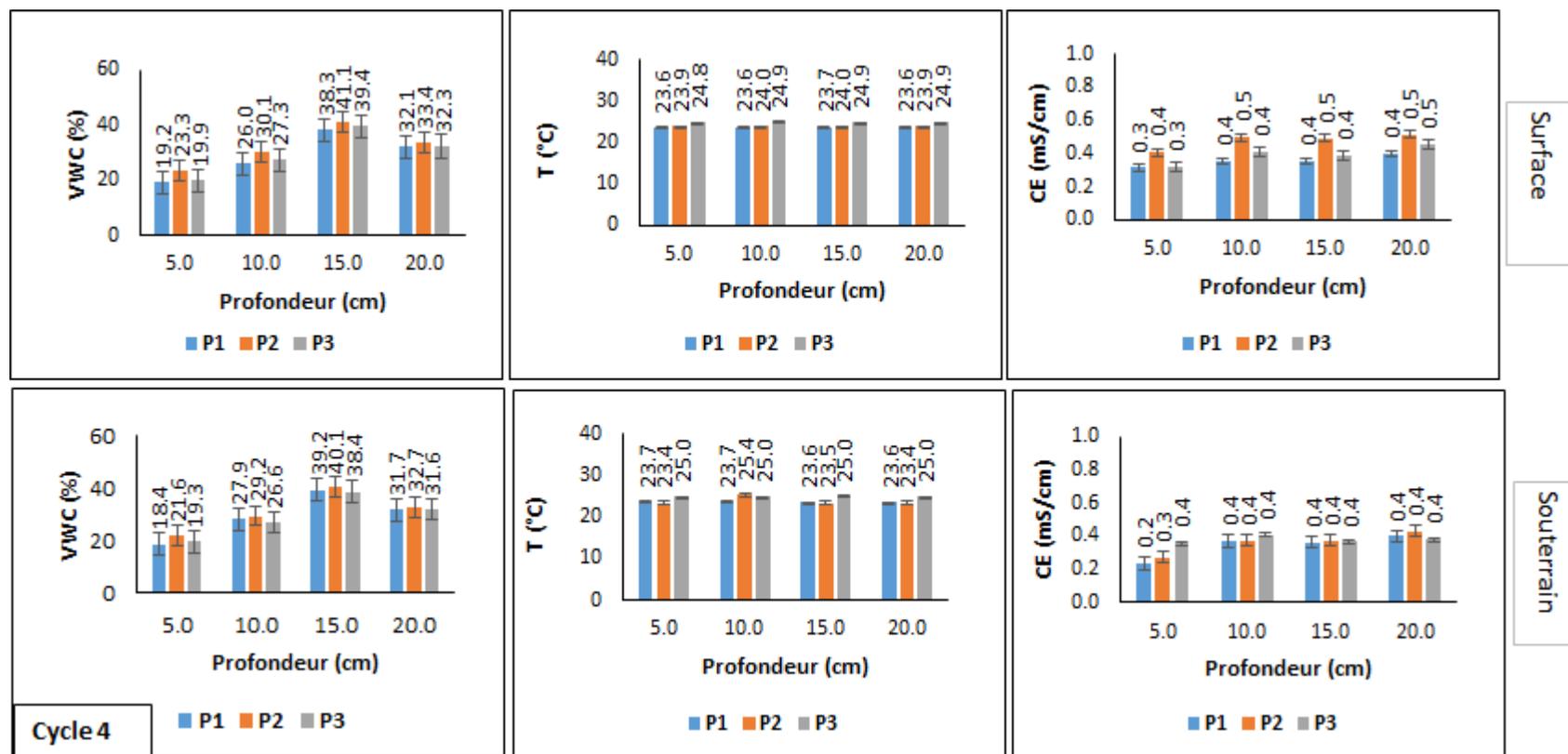
b)



c)



d)



**Figure 73.** Evaluation des paramètres d'humidité, température et de conductivité électrique du sol dans les parcelles à 5, 10, 15 et 20 cm de profondeurs.

*P1* = parcelle mélange à proportions égales de copeau + sciure + paille ; *P2* = parcelle témoin (sol nu) ; *P3* = parcelle BRF (débris de bois et feuilles mortes). *a)* croissance, *b)* floraison, *c)* fructification et *d)* maturation + récolte de la plante

## **V.4 Statistiques descriptives des paramètres d'humidité, de température et de conductivité électrique du sol**

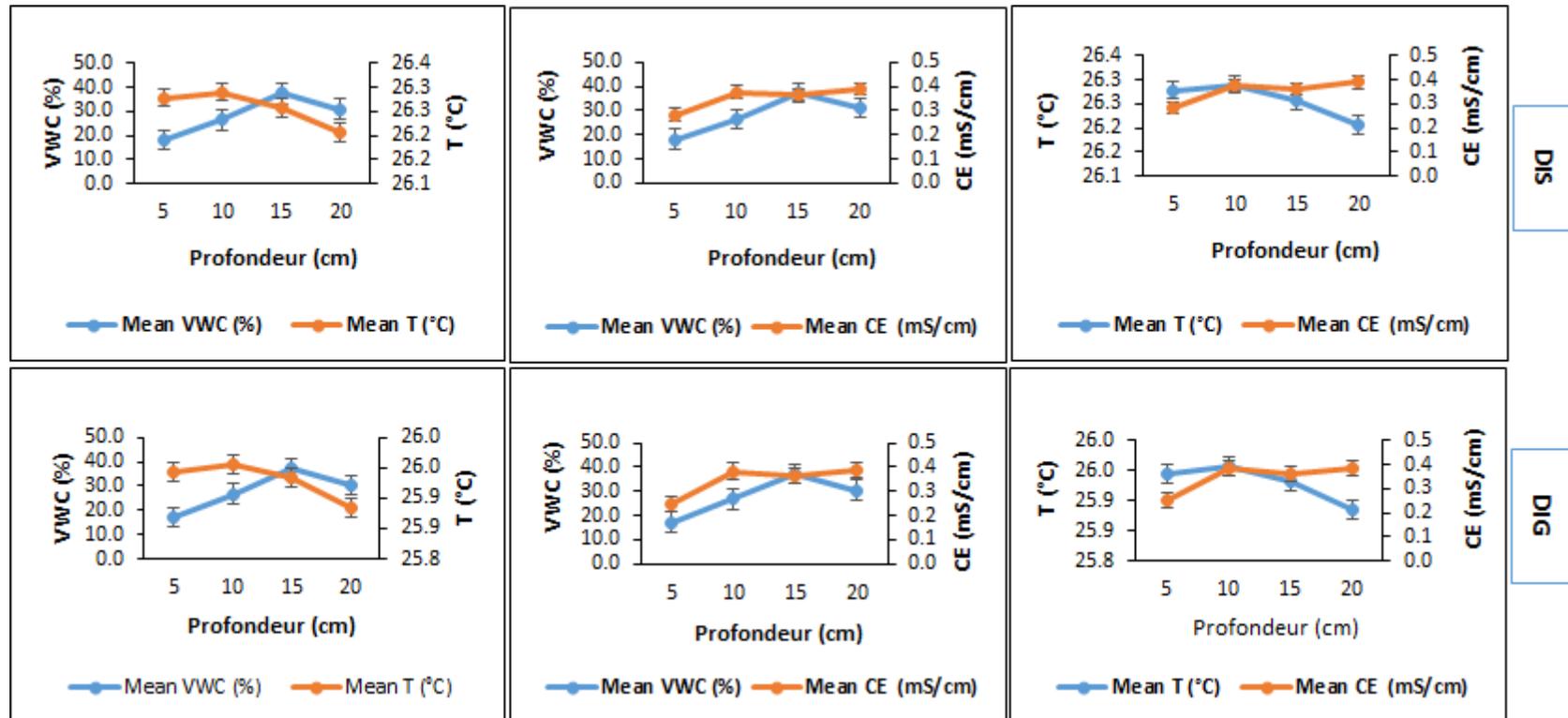
### **V.4.1 Relation entre l'humidité, la température et la conductivité électrique du sol durant la phase de développement de la plante**

La figure 74 présente les moyennes d'humidité, de température et de conductivité électrique du sol à différentes profondeurs suivant les deux systèmes d'irrigation. A titre d'exemple, le cas de la parcelle P1 a été traité uniquement suivant les deux systèmes d'irrigation localisés de surface et souterrain. Sa visualisation identifie un même comportement dans les deux systèmes d'irrigation pour les différents paramètres.

La relation entre l'humidité et la température du sol (VWC – T) montre que la tendance de changement de l'humidité et de la température du sol est en direction opposée dans les deux systèmes d'irrigation. En effet, la valeur maximale de la température du sol correspond à la valeur minimale de l'humidité du sol, et vis-versa.

Entre l'humidité et la conductivité électrique du sol (VWC – CE), dans les dix premiers centimètres de profondeur du sol, ses paramètres évoluent de manière conjointe. En effet, les deux paramètres croissent ensemble au même moment. Cela peut être dû au fait que cette partie supérieure du sol est plus influencée par les processus de surface, tels que l'irrigation et l'évaporation, qui affectent à la fois l'humidité et la conductivité électrique du sol. Cependant à partir de 15 cm la tendance est opposée car les deux paramètres évoluent dans les directions différentes. L'évolution opposée de la VWC et de la CE à des profondeurs plus importantes peut être due à une combinaison de facteurs, tels que la distribution hétérogène de l'eau et la composition du sol.

La tendance entre la température et la conductivité électrique montre que les paramètres évoluent en étroite opposition. En effet lorsque T augmente en profondeur, CE diminue automatiquement. Laissant transparaître le comportement d'un sol normal. Ce qui peut être dû à l'évaporation accrue de l'eau et des changements dans la structure et la composition chimique du sol.



**Figure 74.** Relation existante entre la teneur en eau dans le sol (VWC), la température du sol (T) et la conductivité électrique du sol (CE) durant la période de croissance de la tomate à 5 cm, 10 cm, 15 cm et 20 cm de profondeur, uniquement dans P1.

## **V.4.2 Corrélation entre l'humidité du sol, la température du sol et la conductivité du sol durant la phase de développement de la plante**

### **1 Paillis mélange (P1)**

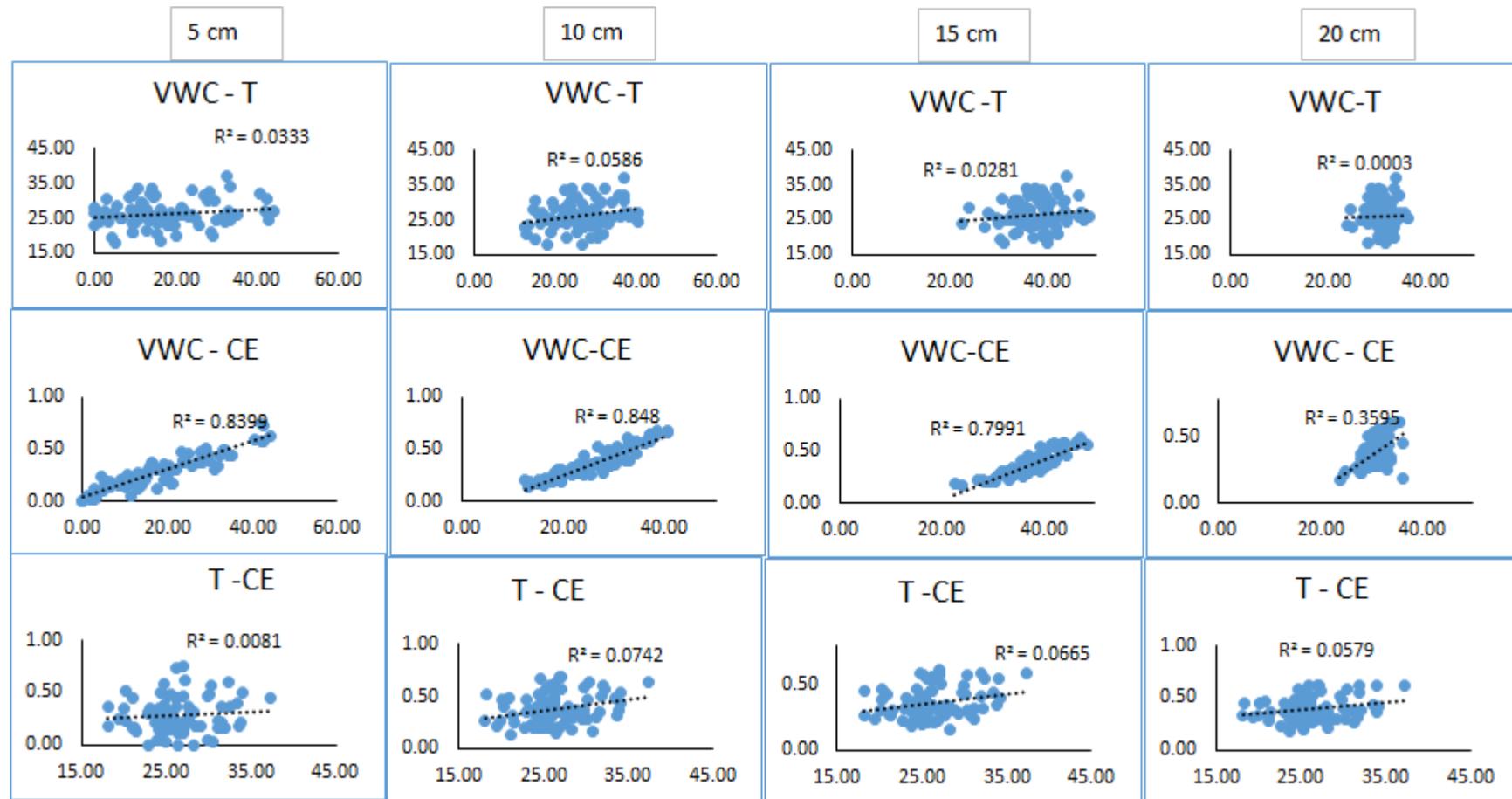
La figure 75 présente la corrélation existante entre l'humidité (VWC), la température (T) et la conductivité électrique (CE) du sol à différentes profondeurs suivant les deux systèmes d'irrigation.

L'observation de cette figure montre à différentes profondeurs qu'il y'a pas de corrélation linéaire entre VWC et T dans différentes profondeurs. Aussi bien dans le système d'irrigation localisé de surface que souterrain car  $R < 0,5$ . Signifiant de ce fait qu'il n'existe pas de liaison entre ses deux paramètres sous ses deux systèmes d'irrigation. L'explication plausible est la présence du paillage, l'effet d'irrigation et la composition du sol.

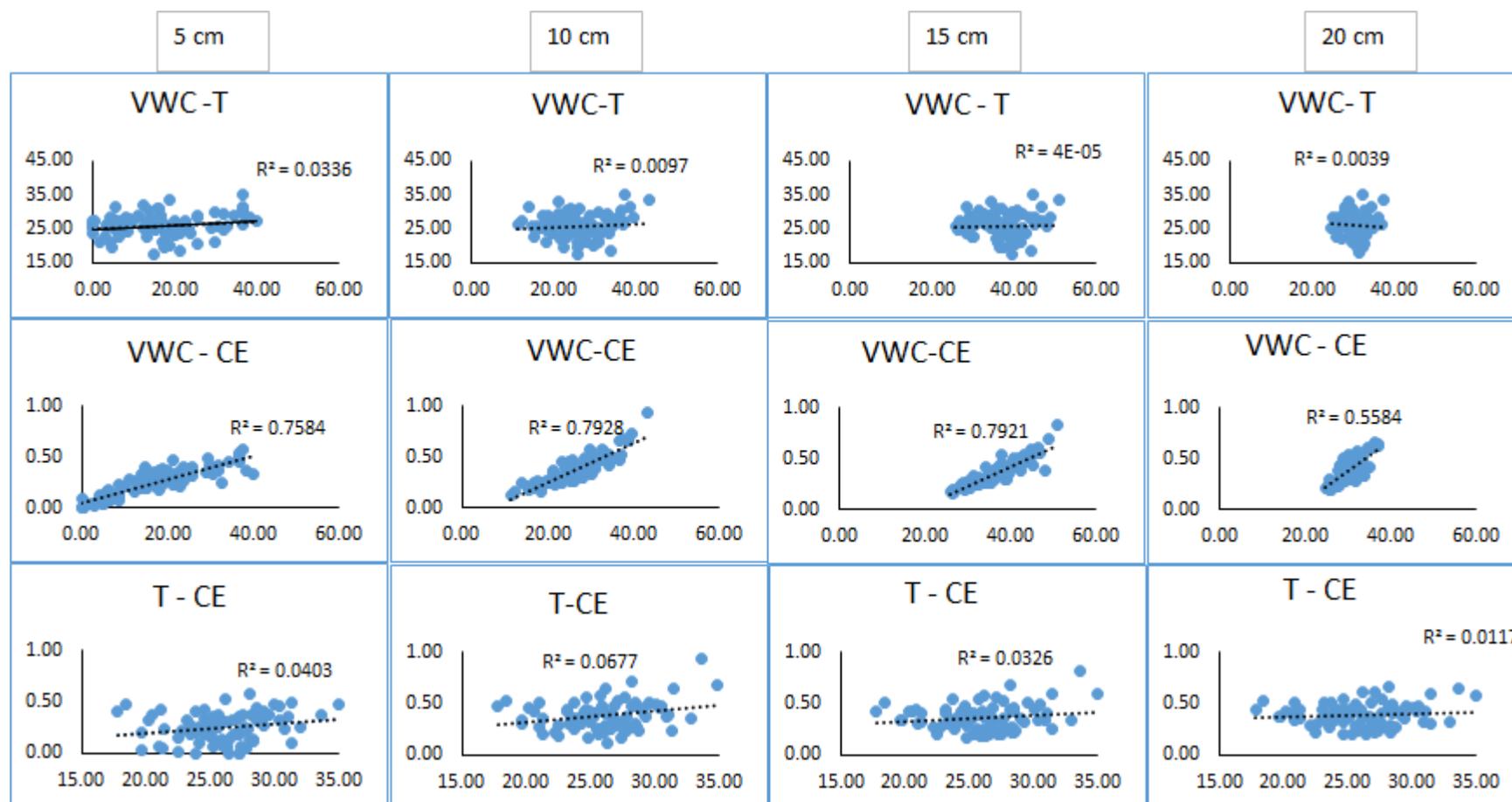
La corrélation entre VWC et CE dans le système d'irrigation localisée de surface indique une forte corrélation linéaire ( $R > 0,7$ ) au cours des 15 premiers centimètres du sol en profondeur. Mais à 20 cm, il n'y a pas de corrélation car  $R < 0,5$ . Au sein du système d'irrigation localisé souterrain, le même comportement est observé les 15 premiers centimètres du sol mais à 20 cm de profondeur, une faible corrélation est observée ( $R \geq 0,5$ ). La forte corrélation observée les 15 premiers centimètres de profondeur traduit l'impact de l'humidité du sol sur la conductivité électrique du sol. Montrant de ce fait que dans le système d'irrigation localisé souterrain, il y'a une bonne relation apparente entre VWC et CE que dans le système d'irrigation localisé de surface.

Entre T et CE, il n'y a pas de corrélation linéaire à différentes profondeurs dans les deux systèmes d'irrigation localisé. Signifiant qu'il n'y a pas de relation apparente entre les deux variables CE et T dans les deux systèmes d'irrigation.

a)



b)



**Figure 75.** Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P1.

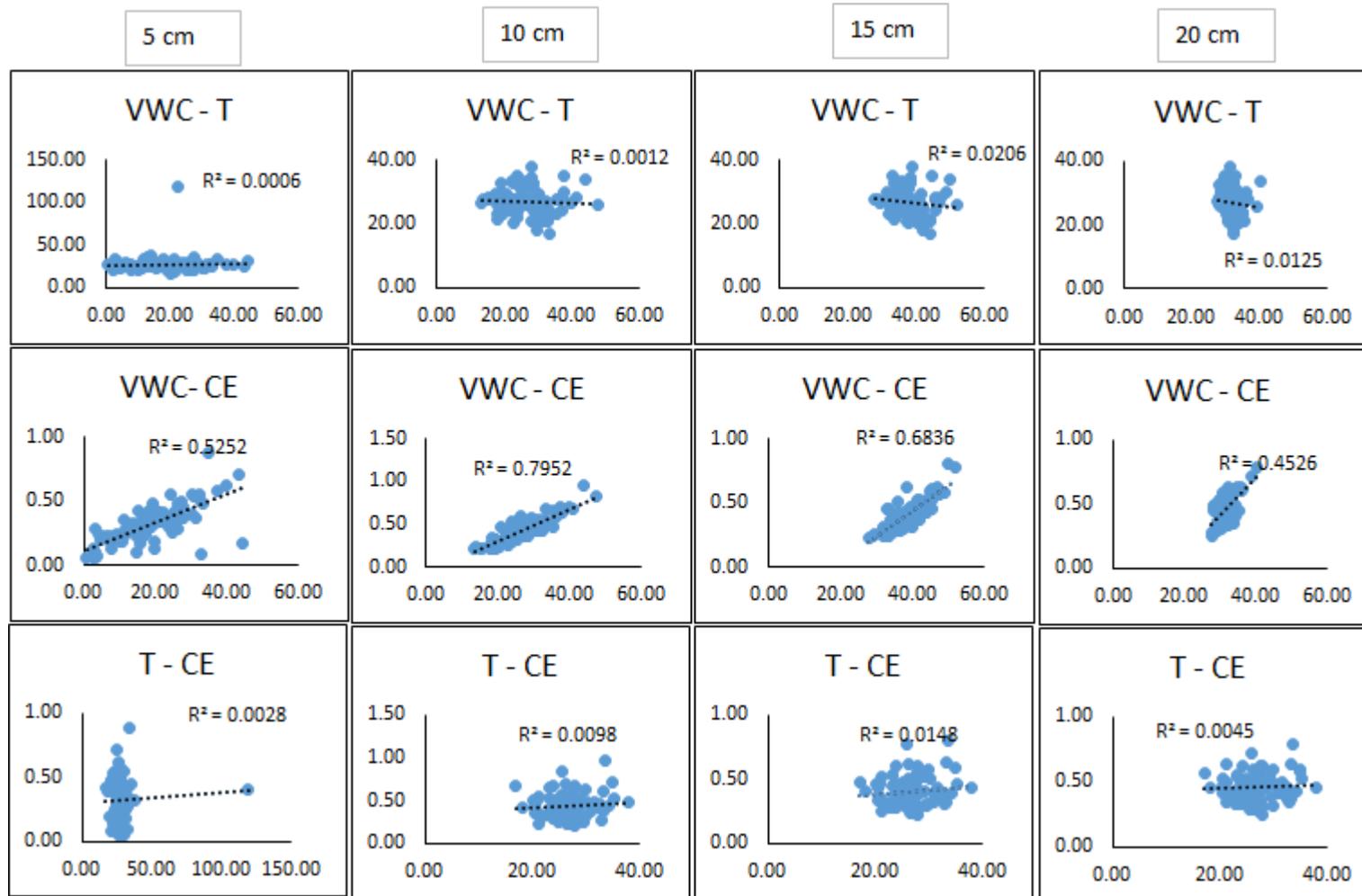
## 2 Paillis BRF (P3)

L'observation de la figure 76 montre à différentes profondeurs qu'il y'a pas de corrélation linéaire entre VWC et T dans différentes profondeurs. Aussi bien dans le système d'irrigation localisé de surface que souterrain car  $R < 0,5$ . Signifiant de ce fait qu'il n'existe pas de liaison entre ses deux paramètres sous ses deux systèmes d'irrigation. L'explication plausible est la présence du paillage, l'effet d'irrigation et la composition du sol.

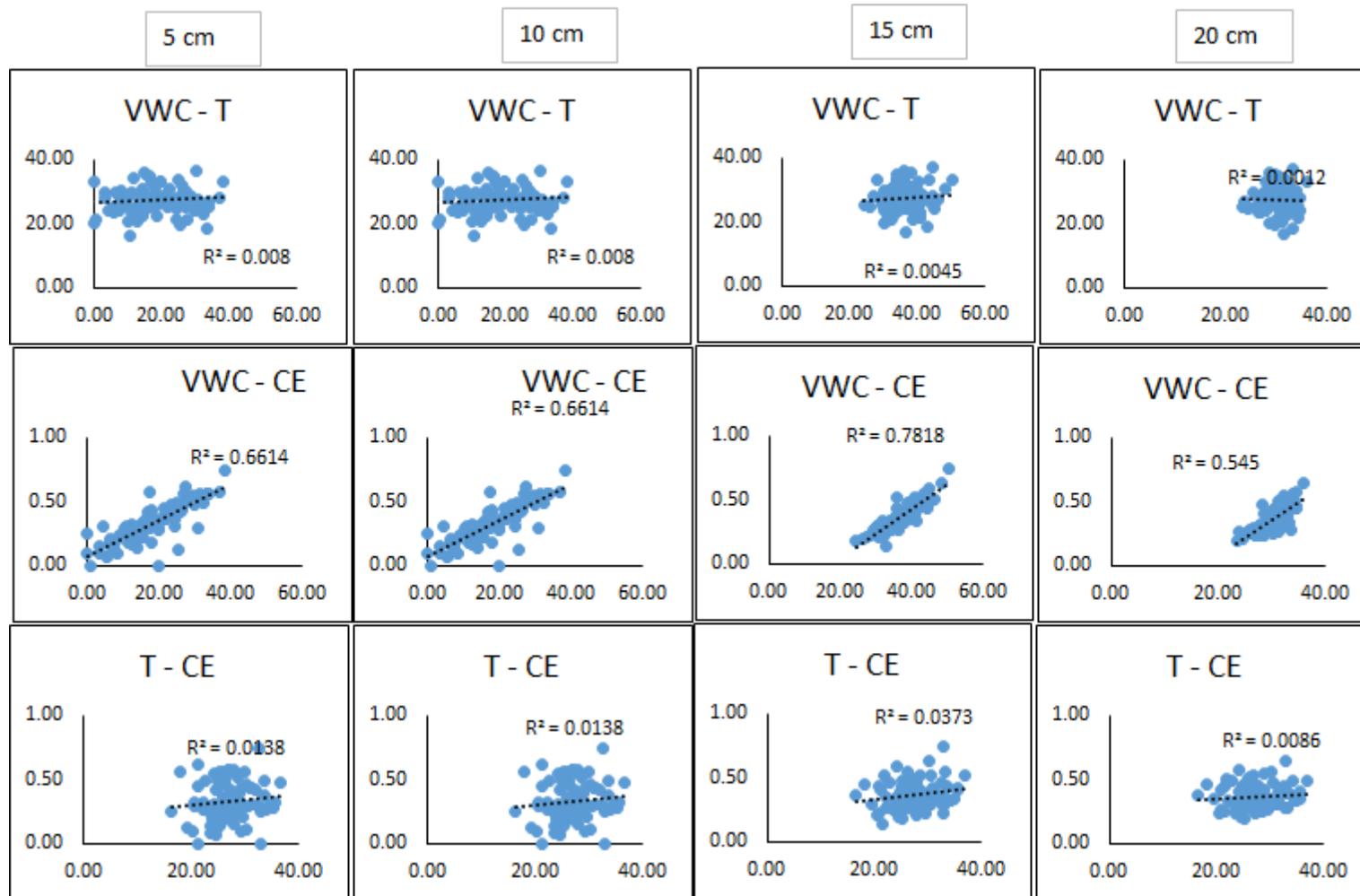
La corrélation entre VWC et CE dans le système d'irrigation localisée de surface indique une forte corrélation linéaire ( $R > 0,7$ ) au cours des 15 premiers centimètres du sol en profondeur. Mais à 20 cm, la corrélation est faible car  $R < 0,5$ . Au sein du système d'irrigation localisé souterrain, une bonne à très bonne corrélation est observée à toutes les profondeurs car  $0,5 < R < 0,8$ . La forte corrélation observée traduit l'impact de l'humidité du sol sur la conductivité électrique du sol. Montrant de ce fait que dans les deux (02) systèmes d'irrigation localisé, il y'a une bonne relation apparente entre VWC et CE.

Entre T et CE, il n'y a pas de corrélation linéaire à différentes profondeurs dans les deux systèmes d'irrigation localisé. Signifiant qu'il n'y a pas de relation apparente entre les deux variables CE et T dans les deux systèmes d'irrigation.

a)



b)



**Figure 76.** Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P3

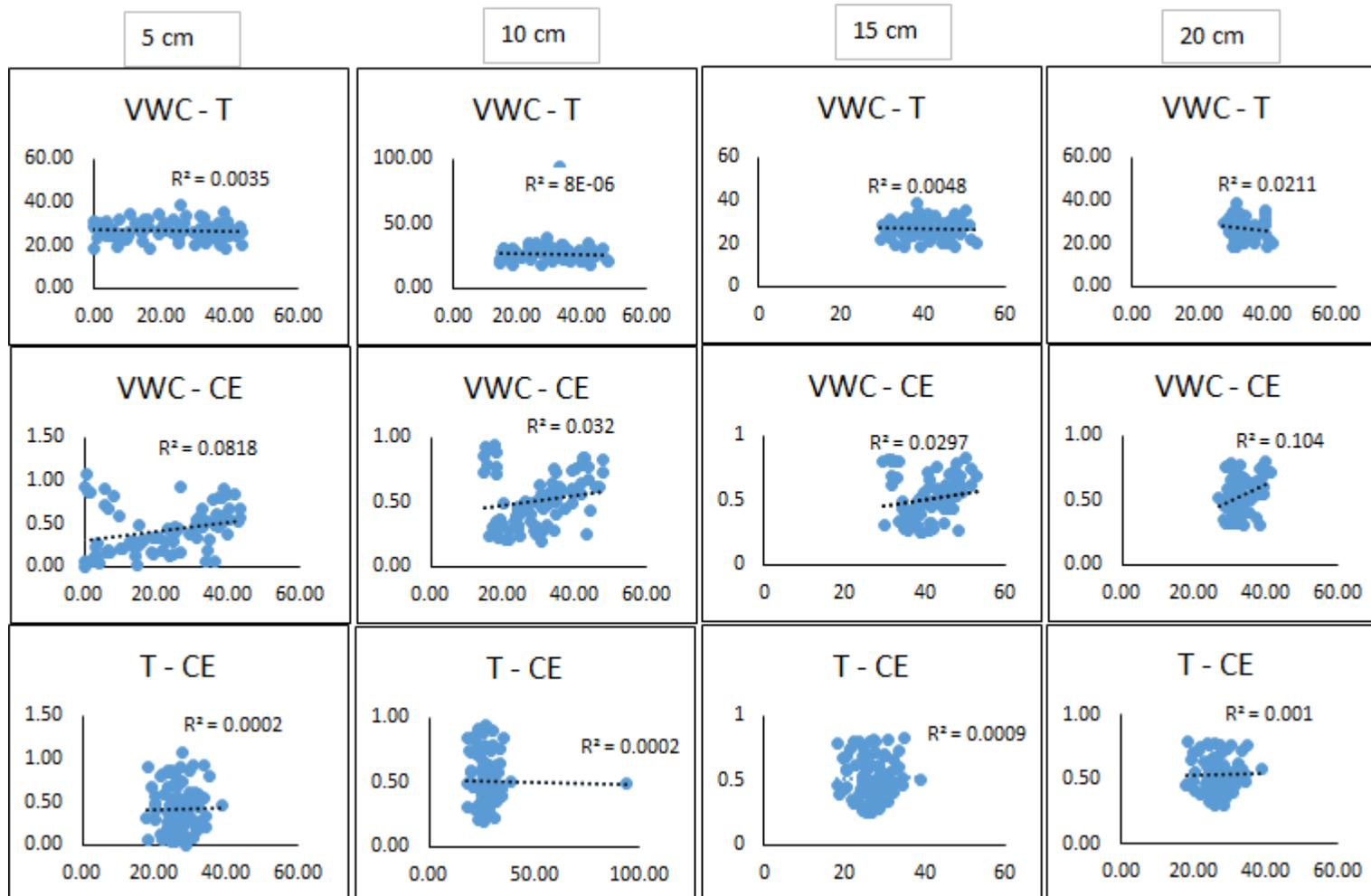
### 3 Témoin (P2)

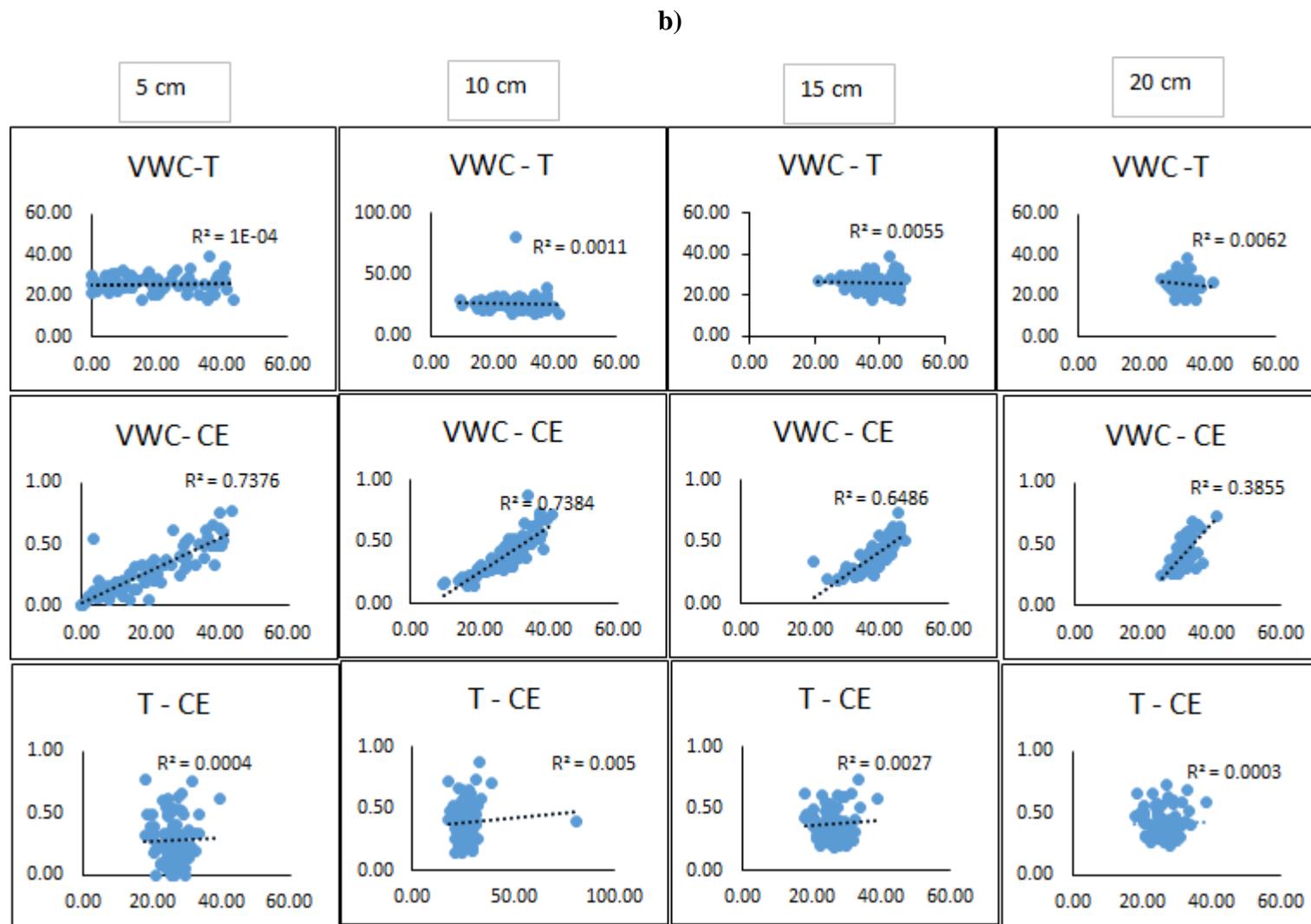
L'observation de la figure 77 montre à différentes profondeurs qu'il y'a pas de corrélation linéaire entre VWC et T dans différentes profondeurs. Aussi bien dans le système d'irrigation localisé de surface que souterrain car  $R < 0,5$ . Signifiant de ce fait qu'il n'existe pas de liaison entre ses deux paramètres sous ses deux systèmes d'irrigation. L'explication plausible est la présence du paillage, l'effet d'irrigation et la composition du sol.

La corrélation entre VWC et CE dans le système d'irrigation localisé de surface, montre qu'il n'y a pas de corrélation car  $R < 0,5$ . Par contre, dans le système d'irrigation localisée souterrain une forte corrélation linéaire est observée ( $R > 0,7$ ) au cours des 15 premiers centimètres du sol en profondeur. Mais à 20 cm, il n'y a pas de corrélation car  $R < 0,5$ . La forte corrélation observée les 15 premiers centimètres de profondeur traduit l'impact de l'humidité du sol sur la conductivité électrique du sol. Montrant de ce fait que dans le système d'irrigation localisé souterrain, il y'a une bonne relation apparente entre VWC et CE que dans le système d'irrigation localisé de surface.

Entre T et CE, il n'y a pas de corrélation linéaire à différentes profondeurs dans les deux systèmes d'irrigation localisé. Signifiant qu'il n'y a pas de relation apparente entre les deux variables CE et T dans les deux systèmes d'irrigation.

a)





**Figure 77.** Comparaison de la corrélation entre l'humidité du sol, la température et la conductivité sous irrigation goutte à goutte a) en surface, b) en subsurface pendant la période de croissance des tomates à des profondeurs de 5, 10, 15 et 20 cm sous le traitement P2

## V.5 Caractérisation de l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture

### V.5.1 Evaluation de l'ETR durant les phases de développement de la plante

L'observation de la figure 78 au stade de croissance, montre un comportement presque pareil dans les deux systèmes d'irrigation pour différentes parcelles. Cependant vers la fin du cycle on constate une légère différence de comportement. Par ailleurs, l'ETR est plus élevée dans les parcelles paillées (P1 et P3) et moindre dans celles non paillées (P2) suivant les deux systèmes d'irrigation.

Au stade de floraison, la visualisation de la figure 78 identifie dans les deux systèmes d'irrigation, un comportement légèrement différent au cours de la période au sein de P3. La comparaison de l'ETR dans les deux systèmes d'irrigation montre que les parcelles sous DIG ont des valeurs moindres que sous DIS avec P3 étant celle où l'on enregistre le plus bas taux aussi bien en surface qu'en souterrain. C'est dire que le système d'irrigation ainsi que le paillage influencent sur l'ETR.

La figure 77 au stade de fructification, mentionne dans l'ensemble un comportement différent au début et à la fin du cycle. Au niveau du DIS, l'ETR est constante dans les deux parcelles P2 et P3 et supérieure à P1. Quant au DIG, l'ETR est plus élevée dans les parcelles paillées. Montrant dans l'ensemble un ETR plus élevée au sein de DIG que de DIS.

L'appréciation de la figure 78 à la maturation et récolte des plantes, montre un comportement similaire dans les deux systèmes d'irrigation pour différentes parcelles. Ainsi l'ETR est constante dans toutes les parcelles.

Au vu des résultats obtenus dans chaque cycle, on remarque :

- l'ETR est plus élevée dans les parcelles paillées durant les phases 1 et 3 que dans celles témoins ;
- le système d'irrigation goutte à goutte est celui au sein duquel les différents parcelles (paillées et témoin) ont enregistrées de valeurs élevées d'ETR ; par contre à la phase 2, elles ont plutôt enregistrées de faibles valeurs d'ETR ;
- une constance de l'ETR dans les différentes parcelles dans les deux systèmes d'irrigation à la phase 4.

L'élévation de l'ETR dans les parcelles paillées plutôt que dans celles nues au cycle 1 et 3 peut s'expliquer par le paillage. En effet il peut réduire l'évaporation directe de l'eau du sol en limitant l'exposition du sol à l'air et au soleil, mais cela peut également entraîner une

augmentation de l'humidité relative près de la surface du sol, ce qui peut favoriser une transpiration plus importante des plantes.

Le type de système d'irrigation également influence l'ETR dans l'étude. Marqué soit par son élévation (cycle 1 et 3) ou encore par son abaissement (cycle2). Ce qui peut s'expliquer notamment par l'évaporation de surface et la transpiration des plantes, l'effet de la profondeur d'irrigation dans le sol, la distribution plus efficace de l'eau, la réponse des plantes et les conditions microclimatiques favorables.

La constance de l'ETR observée à la phase de maturation +récolte témoigne tout simplement de l'arrêt de travail du système racinaire de la plante car ayant atteint la fin de son cycle de vie.

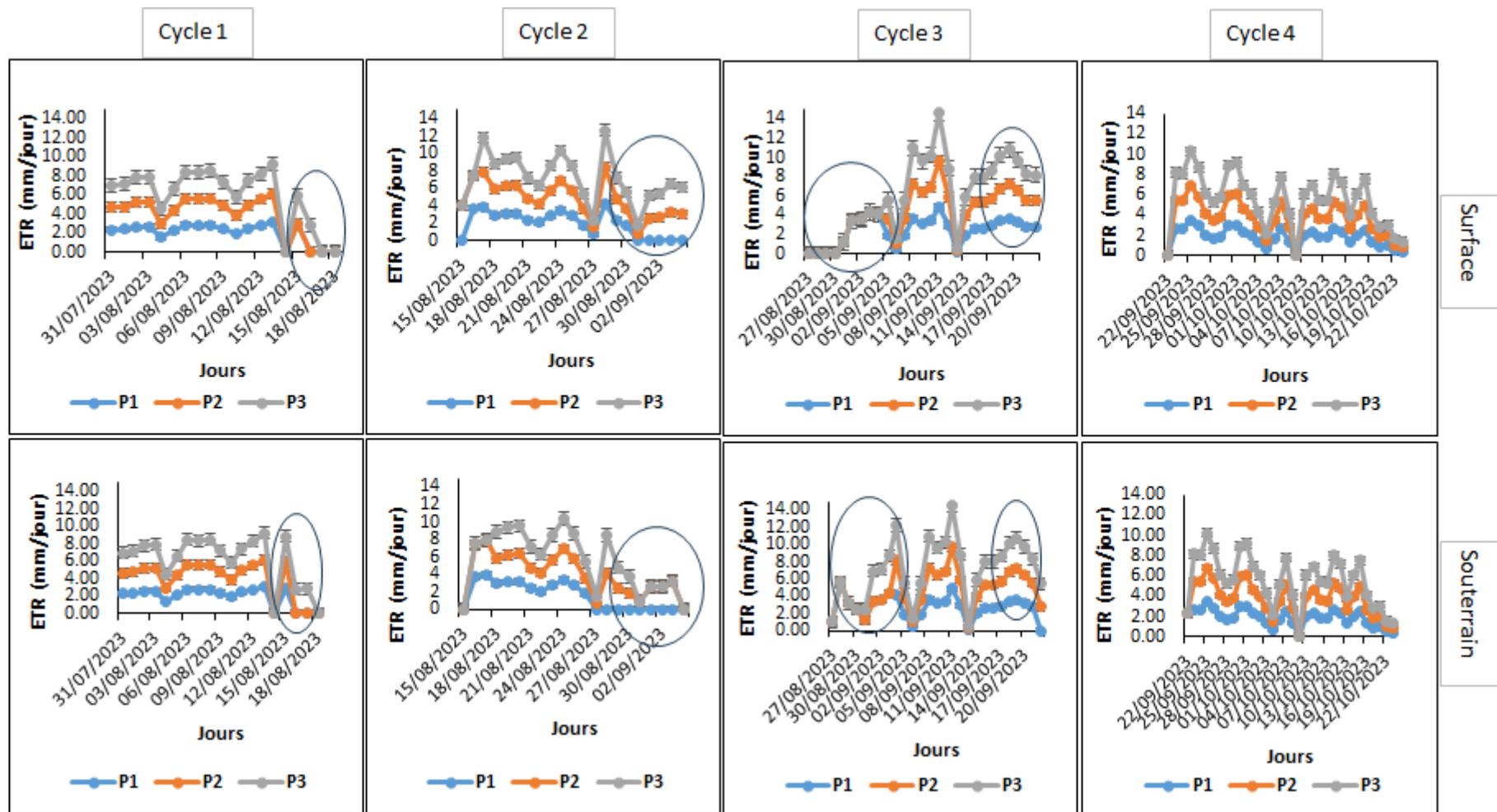
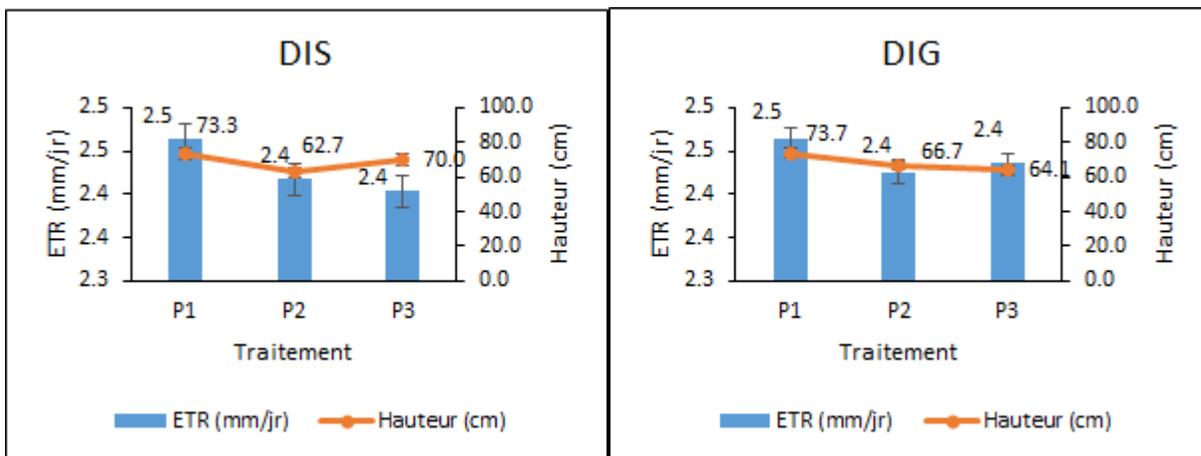


Figure 78. Evaluation de l'évapotranspiration (ETR) dans différentes parcelles

### V.5.2 Relation entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et la hauteur des plantes dans différentes parcelles

La visualisation de la figure 79, montre que P1 est la parcelle paillée ou l'ETR est plus élevée, dont les plantes ont la plus grande taille. Ce phénomène s'observe aussi bien en système d'irrigation goutte à goutte de surface que souterrain. La remarque mentionne que le système d'irrigation n'a aucune influence sur la relation de ses paramètres. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que dans la parcelle paillée, une plus grande proportion de l'eau est utilisée par les plantes pour la transpiration plutôt que pour l'évaporation directe du sol. Aussi, le paillis aide à maintenir une humidité plus constante dans le sol en réduisant l'exposition directe du sol au soleil et au vent. Permettant aux plantes de P1 d'avoir un accès plus constant à l'eau, ce qui peut favoriser une évapotranspiration plus élevée et une importante croissance de la plante par la même occasion car réduisant le stress hydrique et par conséquent une croissance optimale. Au niveau de DIG, en comparant les valeurs de P2 et P3, le constat traduit que P2 et P3 ont les mêmes valeurs d'ETR, par contre pas la même taille. En plus c'est la parcelle témoin qui a la plus grande taille. Ce phénomène peut être dû au développement des systèmes racinaires plus profonds et plus étendus des plantes pour rechercher l'eau, ce qui favoriserait une transpiration légèrement plus élevée ou égale malgré la taille apparente plus petite des plantes.



**Figure 79.** Relation entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et la taille des plantes dans différents traitements (paillis et témoins)

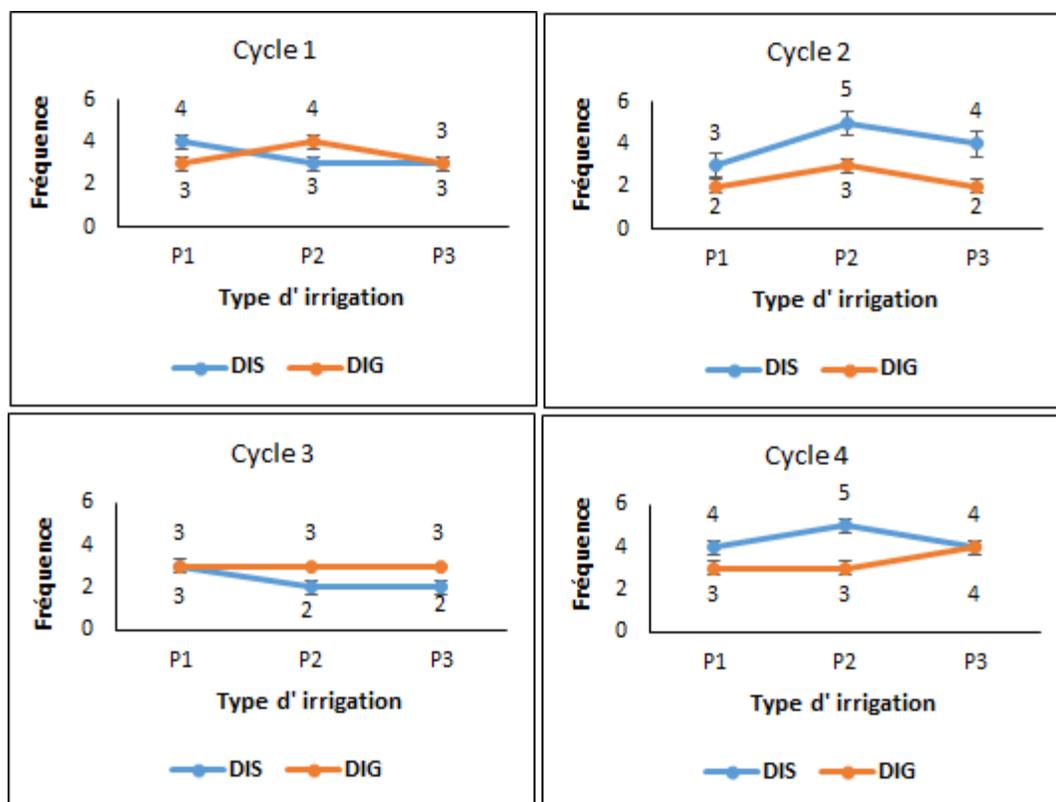
## V.6 Paramètres d'irrigation

### V.6.1 Fréquence d'irrigation

L'observation de la figure 80 permet d'identifier la parcelle P5 comme étant celle qui a été la moins irriguée en surface (13 tours d'irrigation), dont le stade 3 est celui qui a reçu le moins d'eau ; P1 comme celle la moins irriguée en souterrain (11 tours d'irrigation) dont le stade 2 est celui qui a reçu moins d'eau. La comparaison des deux systèmes d'irrigation localisée montre que la parcelle P1 est celle qui a été la moins irriguée pendant toutes les phases de développement de la plante. Aussi, toutes les parcelles (paillées et témoin) du système d'irrigation localisé souterrain ont été moins irrigués que celles de surface.

En définitif, le système d'irrigation goutte à goutte souterrain est celui qui a donné de meilleurs résultats en terme du nombre de tours d'eau dans toutes les parcelles. Aussi l'application du paillis mélange et le témoin semble plus efficace sous système d'irrigation localisé souterrain. Ce qui est plutôt le contraire avec le paillis BRF qui lui semble plutôt efficace sous système d'irrigation localisé de surface.

Le fait que le nombre de tours irrigué soit moindre au niveau des paillis qu'au niveau du témoin permet de dire que les paillis utilisés permettent de diminuer la fréquence d'irrigation. Ce résultat rejoint les conclusions des recherches effectuées par certains scientifiques (Chalker-Scott 2007; Ahmad et al. 2020; Iqbal et al. 2020). Ces derniers soulignent le fait que l'application du paillage peut réduire de façon significative la fréquence d'irrigation et peuvent même aller jusqu'à supprimer le besoin d'irrigation. Le choix des paillis étant déterminant en ce sens que certains en réduisons plus que d'autres comme nous l'avons par exemple observé avec les paillis utilisés dans l'étude. Aussi il faut noter que le choix du système d'irrigation à également un rôle important dans l'économie de l'eau. C'est d'ailleurs ce que confirme (Yang et al. 2023). De façon pratique, nous l'avons observé dans l'étude avec le nombre de cycles réduit d'irrigation dans les différentes parcelles sous-système d'irrigation localisé souterrain. Cependant au sein des différentes phases de développement, on n'observe pas un grand impact du type de système d'irrigation. Si oui, légère entre les parcelles paillées et celles non paillées pendant la phase de maturation et de floraison sous système d'irrigation localisé de surface.

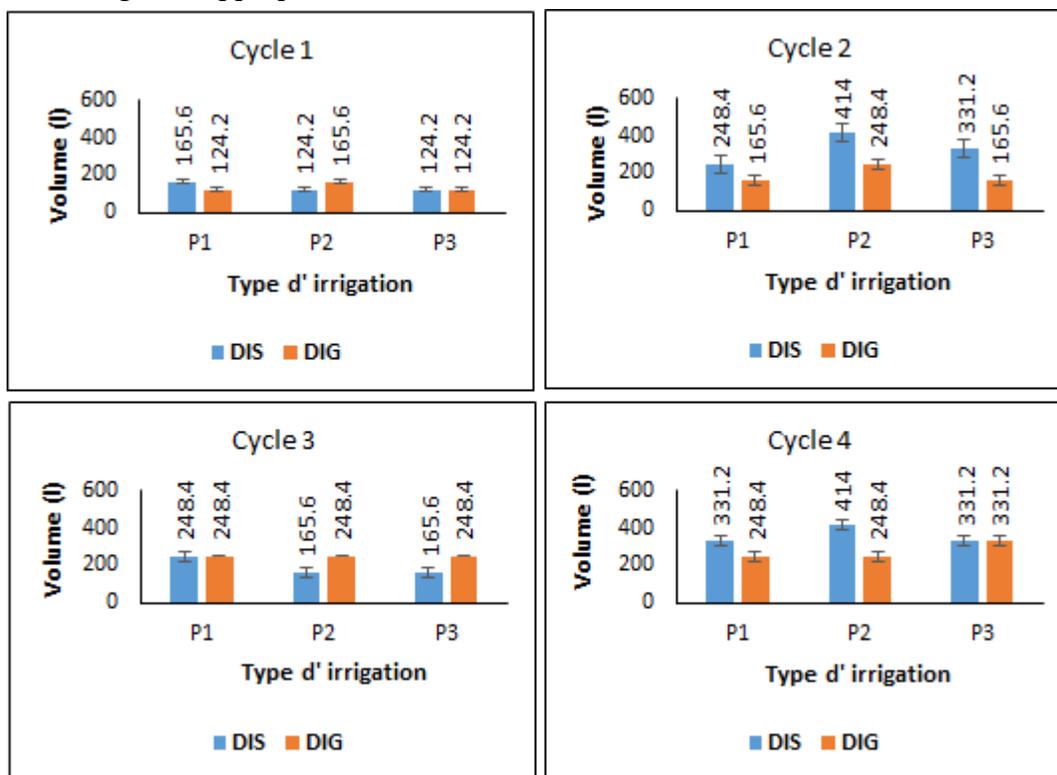


**Figure 80.** Fréquence d’irrigation de différents traitements en fonction de chaque phase de développement de la culture et du système d’irrigation appliqué.

### V.6.2 Volume total d’irrigation

La figure 81 présente les volumes durant les différentes phases de développement de la plante dans les différentes parcelles pour des systèmes d’irrigation aussi bien de surface que souterraine. La comparaison de ses volumes a permis d’identifier P1 comme étant la parcelle qui a enregistré au total un volume d’eau plus bas (786,6 l) en souterrain dont la première phase est celle qui a reçu le moins d’eau (124,2 l) ; P2 comme celle ayant reçu au total le plus d’eau lors de la campagne (1117,8 l) en surface dont les phases de floraison et de maturation + récolte ont enregistrées le plus grand taux (414 l). De manière générale, les parcelles paillées ont reçu moins d’eau que celles non paillées. Particulièrement celles irriguées avec le système goutte à goutte souterrain. D’après les chercheurs (Fernandez-Galvez & Simmonds 2006; Yang et al. 2023), le système d’irrigation goutte à goutte en général et souterrain en particulier à cette habilité de diminuer le volume d’eau. Certains auteurs (Simsek et al. 2017; Telkar et al. 2017; Stelli et al. 2018; Sharma et al. 2023) ont montré que le paillage peut également réduire l’utilisation de l’eau

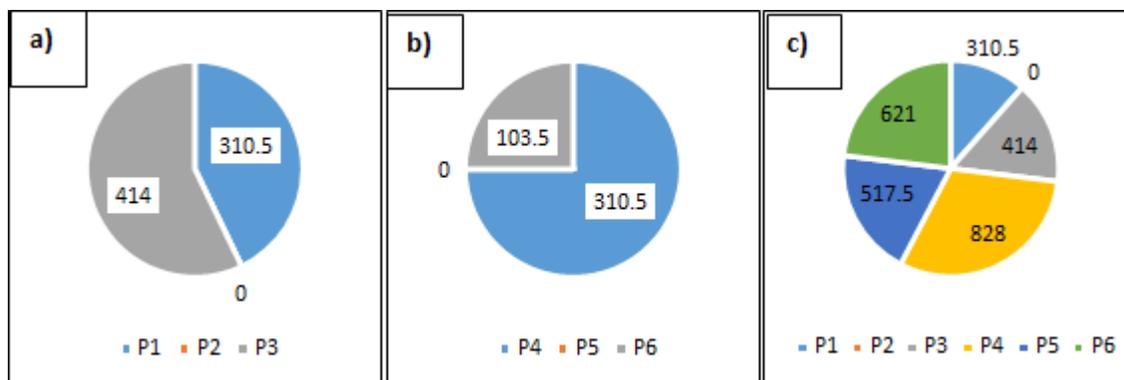
en irrigation. Ces propos rejoignent le résultat obtenu dans l'étude. Ainsi contrairement à (Admasu & Tamiru 2019), les résultats obtenus montrent bien une interaction entre le paillage et le système d'irrigation appliqué.



**Figure 81.** Volume total d'irrigation obtenue dans les différentes parcelles à chaque phase de développement de la plante

### V.6.3 Economie d'eau dans différentes parcelles suivant différents traitements

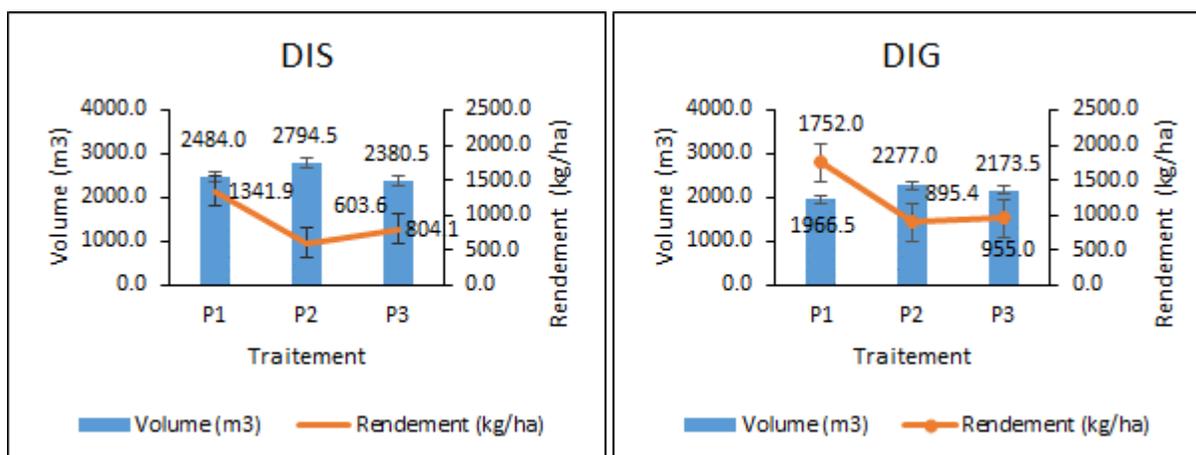
La figure 82 permet d'avoir un réel aperçu du gain en économie d'eau dans chaque parcelle à l'échelle de l'hectare. Que ce soit dans les systèmes d'irrigation de surface ou souterrain (par rapport aux témoins) et par rapport au témoin du système d'irrigation de surface uniquement. Ainsi P3 permet une économie d'eau de 414 m<sup>3</sup> (14,8 %) sous système d'irrigation localisée de surface contre P4 (310,5 m<sup>3</sup> soit 11,1 %) sous-système d'irrigation localisé souterrain. Par ailleurs, par rapport au témoin uniquement sous système d'irrigation goutte à goutte de surface, P4 permet une économie d'eau de pratiquement 828 m<sup>3</sup> (29,6 %) et P6 de 621 m<sup>3</sup> (22,2 %). C'est dire que le type de paillis ainsi que le type de système d'irrigation peut influencer positivement sur l'économie de l'eau irriguée. Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus par les auteurs (Fernandez-Galvez & Simmonds 2006; Yang et al. 2023).



**Figure 82.** Aperçu du gain en économie d'eau des paillis par rapport : *a)* au témoin de surface, *b)* témoin souterrain et *c)* uniquement du témoin de surface de tous paillis confondus

#### V.6.4 Relation entre les volumes d'eau et rendement dans différentes parcelles

L'observation de la figure 83 traduit un même comportement aussi bien sous système d'irrigation localisé de surface que souterrain. P1 est la parcelle ayant reçu moins d'eau mais qui a le rendement le plus élevé. Aussi bien en surface qu'en profondeur. Contrairement à P2 qui a reçu plus d'eau avec un rendement faible. Il peut s'expliquer par la conservation de l'eau, la réduction de la concurrence des mauvaises herbes, l'amélioration de l'absorption de l'eau et la réduction du stress hydrique au sein des parcelles paillées en générales et de P1 en particulier. En revanche, à P2 où une grande quantité d'eau est appliquée, une partie de cette eau peut être perdue par évaporation, ruissellement ou infiltration profonde sans bénéficier directement aux plantes cultivées. Entraînant un gaspillage d'eau et un faible rendement malgré la grande quantité d'eau appliquée. Couplé à la compétition des mauvaises herbes.



**Figure 83.** Relation entre le volume et le rendement obtenus dans différents traitements (paillis et témoins)

## V.7 Evaluation des indicateurs de performance de l'eau utilisée

### V.7.1 Application efficace d'irrigation (ea)

L'observation de la figure 84 montre au sein du système d'irrigation goutte à goutte :

- de surface, une application efficace d'irrigation (ea) supérieure dans la parcelle P2 (97,1%) et légèrement inférieure dans les parcelles paillées P1 (96,9%) et P3 (96,7%) avec  $P1 > P3$ ;
- souterrain, le même phénomène ci-dessus est observé. Le classement étant P2 (96,7%)  $>$  P3 (96,4%)  $>$  P1 (96,1%).

Ces résultats montrent une meilleure répartition de l'eau de l'irrigation dans toutes les parcelles avec un accent plus prononcé au sein des parcelles témoins. Ce constat peut s'expliquer par la présence du paillage. En effet, selon plusieurs auteurs (Stelli et al. 2018; Du et al. 2022), le paillage agit comme une barrière qui limite l'évaporation de l'eau du sol et réduit le ruissèlement. Ce qui par ailleurs peut entraîner une répartition moins uniforme de l'eau car le paillis peut créer des canaux où l'eau a tendance à s'écouler plutôt que de se répartir de manière homogène dans le sol. Aussi, la texture du sol ainsi que sa capacité à retenir l'eau sont quelques facteurs qui ont peut-être joué en la faveur des parcelles non paillées. En effet, ces facteurs aident l'eau à mieux s'infiltrer dans le sol, favorisant une meilleure répartition. La comparaison des deux systèmes d'irrigation identifie le système d'irrigation goutte à goutte de surface avec la parcelle P4 comme étant celui qui a une meilleure répartition de l'eau. Ainsi les résultats de notre étude sont le contraire de ceux obtenus par certains scientifiques (Reddy et al. 2013; Gouda et al. 2023). En effet, ces derniers ont plutôt obtenu des valeurs plus élevées sur parcelles paillées que non paillées. Pour ce qui est spécialement de (Gouda et al. 2023), ils ont obtenu des valeurs d'ea allant de 91,37 à 94,13 %. Aux vues de ses valeurs, nous pouvons dire que nous avons obtenu de meilleurs résultats sur l'application efficace de l'irrigation (ea) que ces derniers

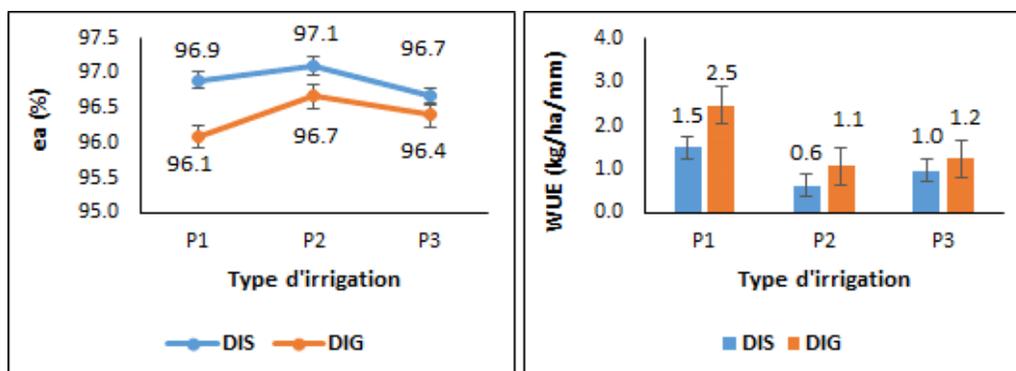
### V.7.2 Utilisation efficace de l'eau (WUE)

. La visualisation de la figure 84 au niveau de l'irrigation localisée de surface, montre que WUE est supérieure à la parcelle P1 (1,5 kg/ha/mm) et inférieure à la parcelle P2 (0,6 kg/ha/mm). C'est dire que l'utilisation efficace de l'eau (WUE) est supérieure dans les parcelles paillées et moindre dans celle non paillée car  $P3 > P5 > P4$ . La même observation est faite sous système d'irrigation souterrain avec WUE supérieure dans la parcelle P1 (2,5 kg/ha/mm) et inférieure dans la parcelle P2 (1,1 kg/ha/mm). La comparaison des deux systèmes identifie P1 comme étant la parcelle paillée ayant une haute WUE (2,5 kg/ha/mm). Le résultat de P1 signifie une utilisation plus efficace des ressources en eau au sein de cette parcelle que dans le reste. De même, le résultat de P2 traduit plutôt un gaspillage d'eau suite à une utilisation inefficace de l'eau par les plantes. Ce qui peut être dû à des pertes d'eau dues à l'évaporation ou au ruissèlement.

Dans l'ensemble, trois informations majeures ressortent :

- le système d'irrigation localisé souterrain montre de meilleurs résultats de WUE aussi bien dans les parcelles paillées que non paillée ;
- le paillage constitué de mélange donne de meilleurs résultats aussi bien en surface qu'en souterrain par rapport au paillage constitué de BRF ;
- Les parcelles paillées ont de meilleurs résultats de WUE que celles non paillées ;

Les résultats ci – dessus ont été approuvés par plusieurs scientifiques (Yaghi et al. 2013; Admasu & Tamiru 2019; Gouda et al. 2023; Yang et al. 2023). Ainsi, nous pensons comme les auteurs suscités, que le système d'irrigation localisé sous paillage est une option économique viable qui peut être recommandé parmi les agriculteurs en climat aride ou semi-aride.



**Figure 84.** Paramètres d'efficacité de l'eau dans différentes parcelles

## V.6 Conclusion

L'optimisation de l'efficacité de l'irrigation dans la culture de la tomate relève que le paillis mélange combiné avec le système d'irrigation localisée souterrain (15 cm de profondeur) entraîne une augmentation significative de rendement allant de 603,6 kg/ha (dans les parcelles non paillée) à 1752 kg/ha (dans les parcelles paillées) de la tomate tout en régulant l'humidité, la température et la conductivité du sol. Aussi ils ont démontré une utilisation efficace de l'eau d'irrigation (WUE) sous parcelles paillées (2,5 kg/ha/mm) que nu (0,6 kg/ha/mm). Permettant une économie de l'eau irriguée de 29,6 %. Cependant, on observe une légère diminution de l'efficacité de l'eau (ea) avec le mélange (96,1 %) et le BRF (96,4 %), contrairement au témoin où elle reste élevée (97,1 %).

## **CHAPITRES VI : ETUDE COMPARATIVE DES SYSTEMES D'IRRIGATION DANS L'OPTIMISATION DE LA CROISSANCE DES ORANGERS**

Cette partie a pour objectif d'optimiser la croissance des orangers tout en économisant une bonne partie de la dose d'irrigation. Ceci à partir de l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'irrigation les plus efficaces (goutte à goutte en surface et souterrain) en Algérie en général, et dans la plaine de la Mitidja en particulier, dans l'amélioration de la disponibilité en eau. Tout en tenant compte des conditions climatiques dans lesquelles les arbres ont évolué.

### **VI.1 Conditions météorologiques durant les périodes de campagne**

Les différents paramètres de température de l'air (T), d'humidité relative (Hrel), de vitesse du vent moyen (W1), de radiations solaires (W1) et de précipitations ont été enregistrées quotidiennement de façon automatique toutes les dix (10) min ; via la station météorologique installée en champ, au cours des périodes de campagnes 2022 et 2023. Ces différents paramètres sont exprimés respectivement en degré Celsius (°C), pourcentage (%), kilomètres par jour (km/h), watt par mètre carré (w/m<sup>2</sup>) et en millimètres (mm).

#### **VI.1.1 Analyse de différents paramètres climatiques au cours de la première période de campagne (2022)**

La figure 85 illustre les différents graphes des paramètres suscités, obtenus à la première campagne de terrain, au cours de Juillet – Novembre 2022. L'observation générale de ses paramètres permet d'apercevoir de faibles précipitations à partir de la fin du mois de Septembre. Le maximum enregistré étant de 37.40 mm (30/09/2022). Du début à la fin de la saison, les températures ont tendance à être plus élevées de Juillet – mi-Septembre et moindre de fin Septembre jusqu'en Novembre. Le maximum (44.01°C) étant enregistré autour du 14 Août et le minimum (9.27°C), le dernier jour de la saison (21/11/2022).

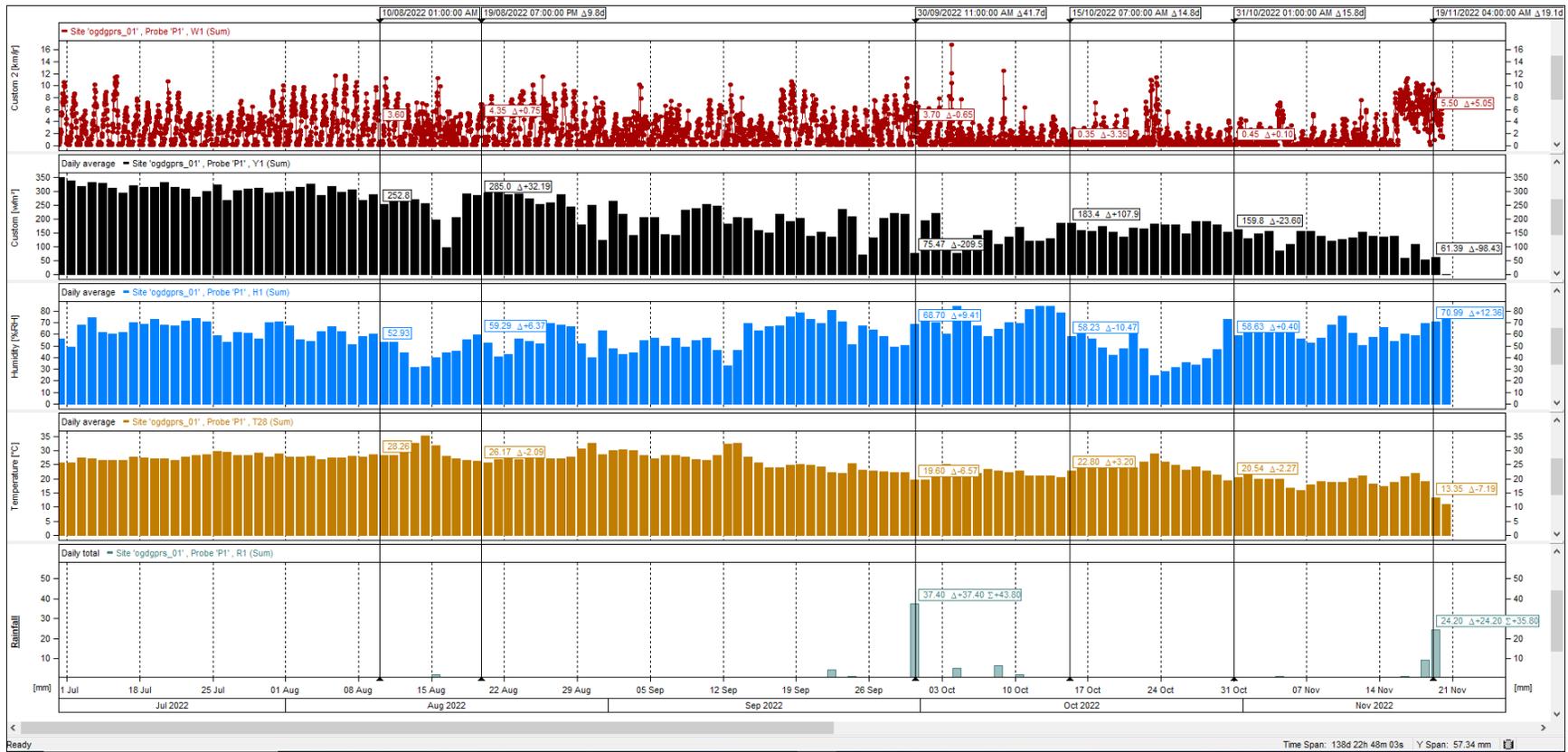
Variante le long de la période, l'humidité relative enregistrée traduit un comportement opposé à celui de la température du 10/08/2022 – 19/08/2022 et du 15/10/2022 – 31/10/2022. Le

maximum (94.81%) est relevé entre le 10 et le 15 Octobre tandis que le minimum (16.17%) est plutôt identifié le 23/10/2022.

Le rayonnement solaire (Y1) quant 'à lui est plus intense au cours des deux (02) premiers mois de la saison (Juillet et Août). Toutefois, à partir de fin Septembre, il s'affaiblit au fil des jours. Le maximum (1103 w/m<sup>2</sup>) est relevé le premier jour de la campagne (11/07/2022) et le minimum (0w/m<sup>2</sup>) à l'avant dernier jour de la saison (20/11/2022).

La vitesse du vent observée tout le long de la saison est plus rapide du début de la campagne (11/07/2022) jusqu'au début du mois d'Octobre ; couronné par un pic maximum (16.70 km/h) relevé le 04/10/2022. A la suite de cela, une régression en moyenne de la vitesse du vent est plutôt observée jusqu'à la fin de la campagne.

La comparaison de tous ses paramètres de manière simultanée montre précisément entre 10/08/2022 – 19/08/2022 (9 jours environs) une température de l'air qui augmente avec la vitesse du vent, pendant que l'humidité relative et le rayonnement solaire diminuent ; avec un pic très bas suite à de légères précipitations. Ce phénomène s'observe également du 30/09/2022 - 15/10/2022 ; aussi du 31/10/2022 - 19/11/2022. Un point essentiel à souligner est le fait que le 30/09/2022, lorsque les précipitations sont aux maximums, la température diminue légèrement avec W1 ; pendant que Hrel augmente et Y1 diminue considérablement. Ainsi, on peut dire que l'augmentation des Pi a eu un grand impact sur Y1. C'est d'ailleurs le même constat observé le 19/11/2022.



**Figure 85.** Variations hebdomadaires des différents paramètres climatiques durant la période expérimentale 2022

### **VI.1.2 Analyse de différents paramètres météorologiques au cours de la deuxième période de campagne (2023)**

La figure 86 illustre les différents paramètres météorologiques obtenus durant la deuxième campagne de terrain, de Juillet – Novembre 2023.

Les précipitations enregistrées tout le long de la saison sont extrêmement faibles, voire inexistantes. L'observation de son graphe identifie le 02/11/2023 un pic maximum (5.20 mm) et le 13/09/2023 le pic minimum (0 mm).

Le maximum de température a été relevé au tout début de la campagne, plus précisément le deuxième et troisième jour ; atteignant 47.32°C. Par contre, le minimum (11.15 °C) a été relevé plutôt vers la fin de la campagne ; à savoir le dernier jour (15/11/2023).

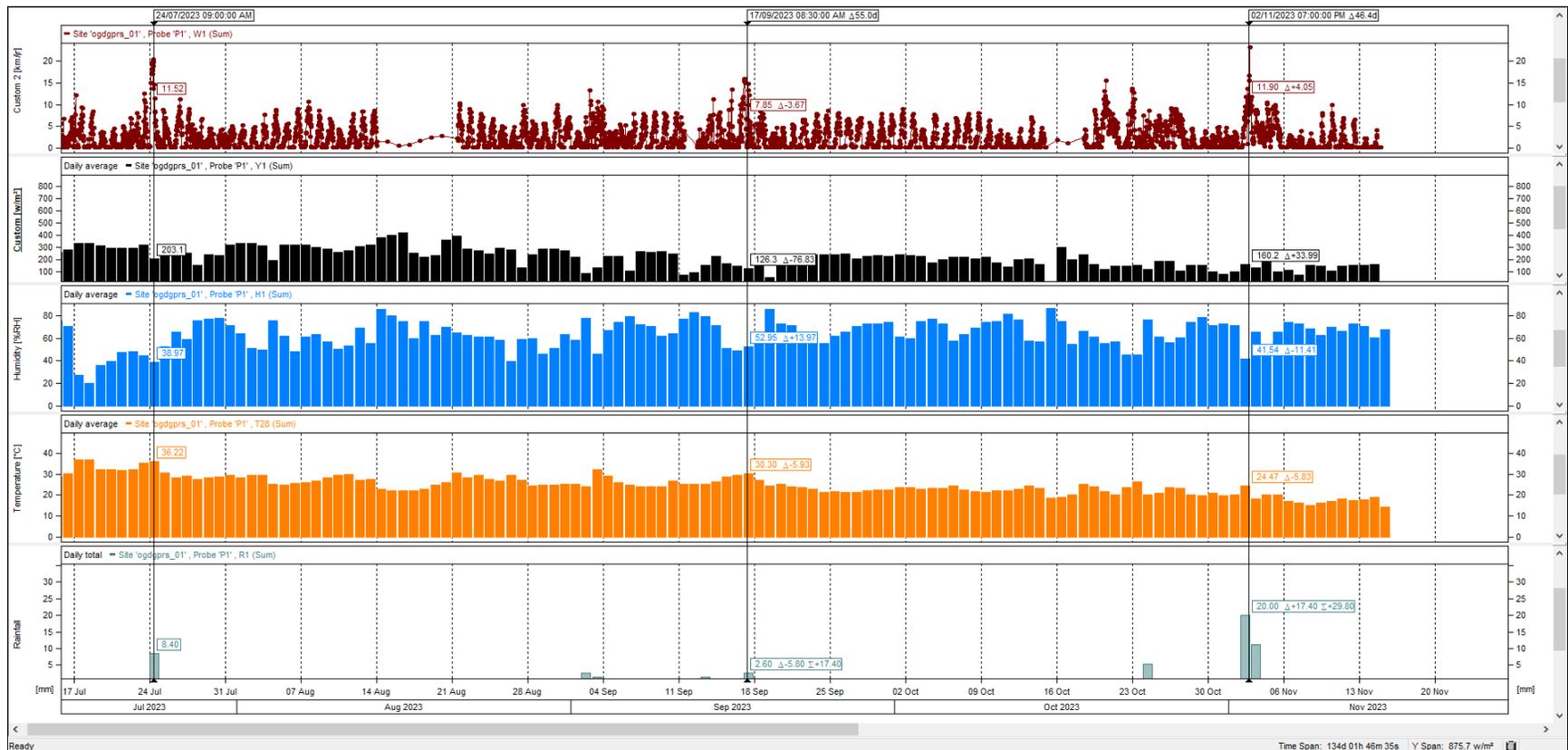
L'humidité relative enregistrée tout le long de la période a tendance à croître au fil des jours. Cependant au tout début de la campagne (deuxième et troisième jour), les valeurs les plus faibles ont été relevées. Le maximum enregistré durant la période est de 95.83 % et le minimum est de 9.87 %.

Le rayonnement solaire (Y1) enregistré tout le long de la période est plus intense au cours des deux (02) premiers mois. Passé ses deux mois, il a plutôt tendance à diminuer au fil des jours. Le maximum enregistré est de 1190 w/m<sup>2</sup> et le minimum est de 0 w/m<sup>2</sup>.

La vitesse du vent (W1) est beaucoup plus importante au début (juillet) et fin (Novembre) de la saison. Notons que le maximum de vitesse (23 km/h) est enregistré le 02/11/2023 et le minimum (0 km/h), est plutôt relevé le dernier jour de la saison (15/11/2023).

La comparaison simultanée de ses cinq (05) paramètres climatiques montre en plus des quelques précipitations présentes, des remarques particulièrement aux dates :

- 24/07/2023, W1 augmente avec T quand Hrel et Y1 décroissent ;
- 17/09/2023, T croît légèrement avec Hrel et W1, quand Y1 par contre décroît ;
- 02/11/2023, lorsque W1, Y1 et T croissent, Hrel décroît



**Figure 86.** Variations hebdomadaires des différents paramètres climatiques durant la période expérimentale 2023

### **VI.1.3 Comparaison des paramètres météorologiques sur deux ans**

Le tableau 16 présente une brève analyse descriptive des données obtenues par mois en moyenne et totalité (uniquement pour les précipitations) dans chaque paramètre pendant les deux campagnes. L'analyse comparative sur deux ans de ses paramètres permet de constater qu'il y'a eu plus de précipitations en 2022 qu'en 2023 ; dont le maximum relevé s'est effectué au mois de Septembre 2022 et le minimum au mois d'Août 2023. La température en moyenne est plus élevée en 2023 qu'en 2022 ; avec pour maximum relevé en Juillet 2023 et le minimum en Novembre 2023. L'humidité relative en moyenne est plus importante en 2023 qu'en 2022 ; le maximum relevé s'est effectué en Septembre 2023 et le minimum en Août 2022. Le rayonnement solaire en moyenne est plus intense en 2023 qu'en 2022 ; dont le maximum est enregistré en Juillet 2022 et le minimum en Novembre 2022. La vitesse du vent en moyenne est identique sur les deux années ; dont le maximum est relevé en Août 2022 et le minimum en Octobre 2022.

**Tableau 16.** Statistique descriptive des données climatiques obtenues pour les mois de juillet à novembre sur deux années

Date	Pi (mm)		T (°C)		Hrel (%)		Ra (w/m <sup>2</sup> )		Vvent (km/h)	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
Juillet	0.00	8.40	27.67	31.63	64.59	53.61	314.11	272.60	2.44	2.12
Août	2.00	0.20	28.33	27.28	53.21	57.78	262.44	282.87	2.61	2.03
Septembre	43.80	9.80	25.94	24.98	58.57	67.08	185.50	196.47	2.07	2.04
Octobre	14.00	6.20	23.07	22.47	58.93	65.58	154.73	171.23	0.93	1.91
Novembre	36.40	31.40	18.91	18.40	62.95	65.35	120.21	133.42	2.03	1.94
<b>Total</b>	<b>96.20</b>	<b>56.00</b>								
<b>Min</b>	<b>0.00</b>	<b>0.20</b>	<b>18.91</b>	<b>18.40</b>	<b>53.21</b>	<b>53.61</b>	<b>120.21</b>	<b>133.42</b>	<b>0.93</b>	<b>1.91</b>
<b>Max</b>	<b>43.80</b>	<b>31.40</b>	<b>28.33</b>	<b>31.63</b>	<b>64.59</b>	<b>67.08</b>	<b>314.11</b>	<b>282.87</b>	<b>2.61</b>	<b>2.12</b>
<b>Moy</b>		<b>11.20</b>	<b>24.79</b>	<b>24.95</b>	<b>59.65</b>	<b>61.88</b>	<b>207.40</b>	<b>211.32</b>	<b>2.01</b>	<b>2.01</b>

**Note.** *Pi* = précipitations ; *T* = température de l'air ; *Hrel* = humidité relative ; *Ra* = rayonnement global ; *Vvent* = vitesse du vent

## **VI.2 Caractérisation de l'état du sol et de la plante**

### **VI.2.1 Evaluation de l'humidité du sol par mois sous chaque système d'irrigation**

Pour mieux observer le comportement de l'humidité dans le sol (SWC) ainsi que celui des racines à chaque apport d'eau (irrigation ou pluie), le long du profil de sol de 85 cm de profondeur, des illustrations suite aux sondes installées in – situ sous chaque système d'irrigation (S1, S2 et S3) ont été réalisées suivant chaque mois, de chaque campagne effectuée. Les mois pris en considération sont Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre. Rappelons que S1 a été installé sous un système d'irrigation goutte à goutte souterrain de 15 cm de profondeur, S2 sous celui de surface et S3 sous un système d'irrigation localisé à 30 cm de profondeur.

#### **1) Etude comparative de l'évolution de l'humidité du sol de S1 suivant chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023)**

- **Juillet**

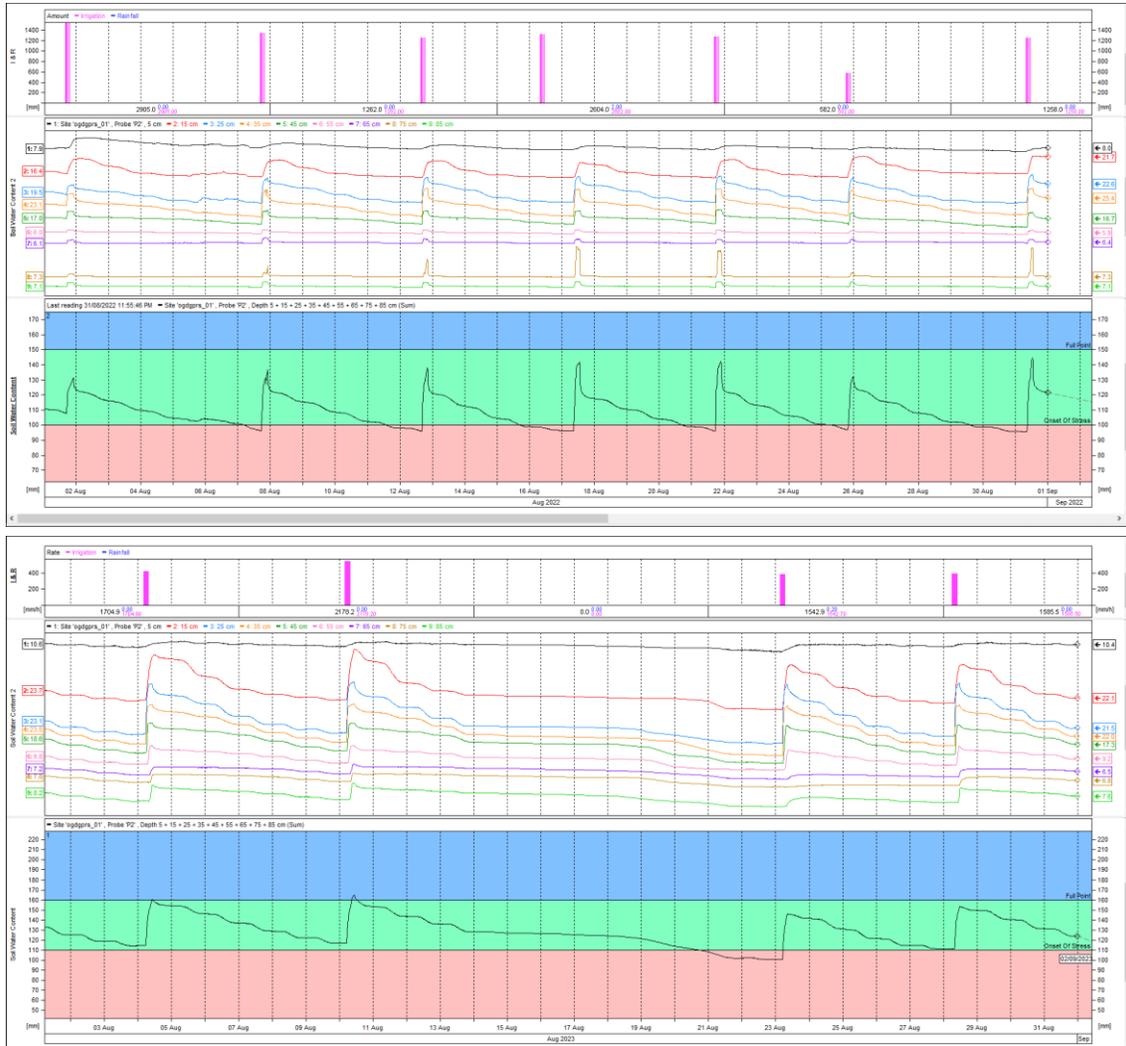
La comparaison sur deux ans de l'évolution de SWC suite aux apports d'irrigation (Fig.87), montre qu'en 2023, S1 a reçu peu d'eau qu'en 2022. SWC a mieux augmenté dans les différents horizons du sol en 2023 qu'en 2022 ; laissant transparaître de meilleures irrigations au cours de cette année. Ce constat peut se justifier par l'adaptation de la plante au fil des tours d'irrigation et des années. En effet, au tout début de la campagne, le système racinaire de la plante ne s'était pas encore mieux adapté au système d'irrigation car l'arbre était plus jeune. De ce fait, les marches racinaires se limitaient en subsurface. Mais vers la fin de cette même campagne, elles sont allées plus en profondeur. Ce qui fait qu'en 2023, c'est devenu plus facile pour ces racines de s'épanouir dans le sol. La concentration racinaire s'étend de 15 à 35 cm (20 cm) de profondeur en 2022 contre 15 à 85 cm (70 cm) de profondeur en 2023. Justifiant ainsi l'amélioration au fil des ans des marches racinaires de la plante.



**Figure 87.** Evolution de l’humidité dans le sol suite aux apports d’eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Août**

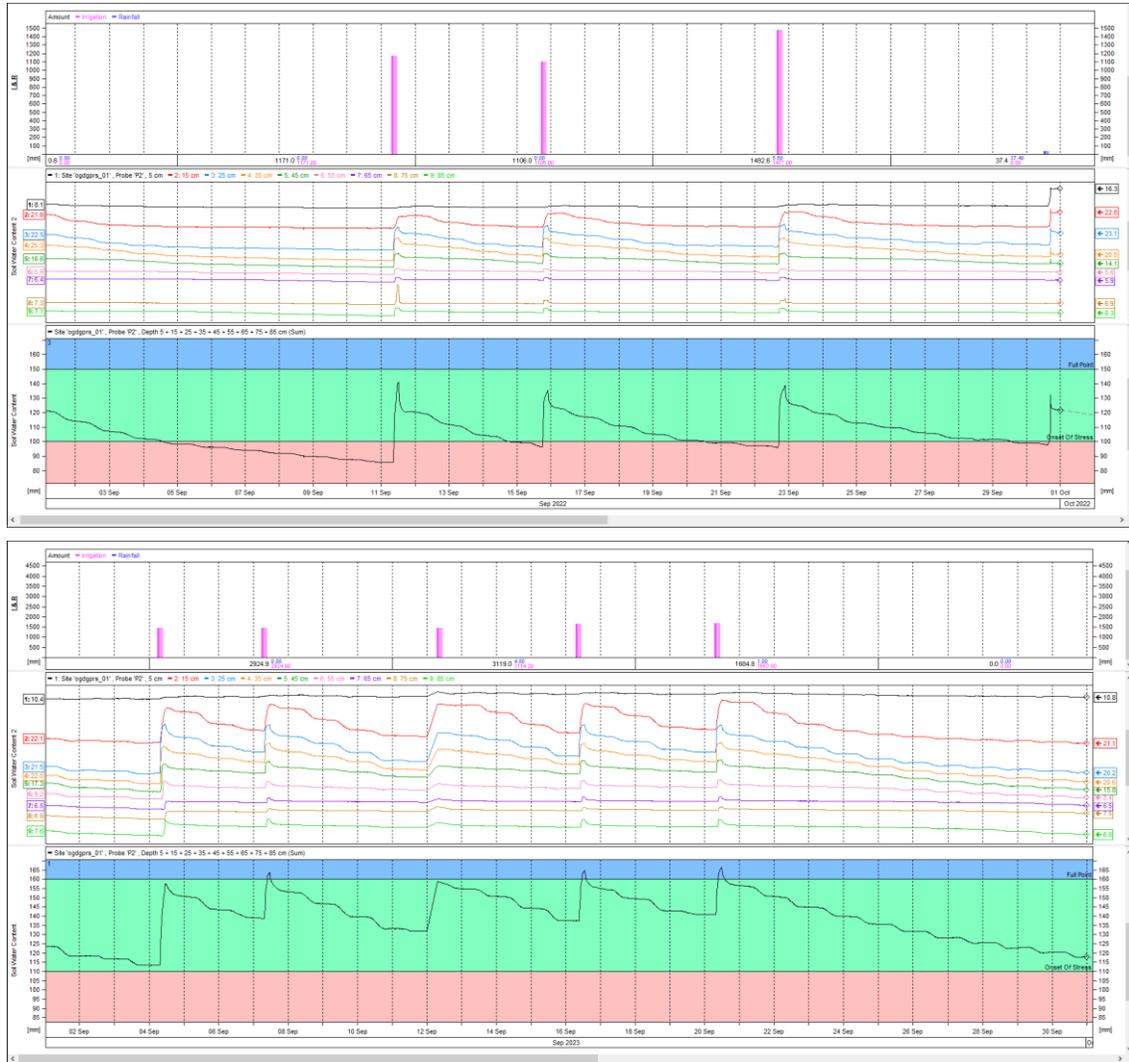
L’observation de l’illustration sur deux (02) ans (Fig.88) montre que la durée de tour d’irrigation en 2023 est plus grande (13 jours) qu’en 2022 (6 jours). L’SWC augmente mieux en 2023 dans les différents horizons de sol suite aux apports d’eau qu’en 2022. Les fréquences de précipitations et d’irrigation relevées sont plus importantes en 2022 (6) qu’en 2023 (4). Pour ce qui est de la concentration racinaire de la plante, elle va de 15 à 55 cm (40 cm de profondeur) en 2022 contre 15 à 85 cm (70 cm de profondeur) en 2023.



**Figure 88.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'août, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Septembre**

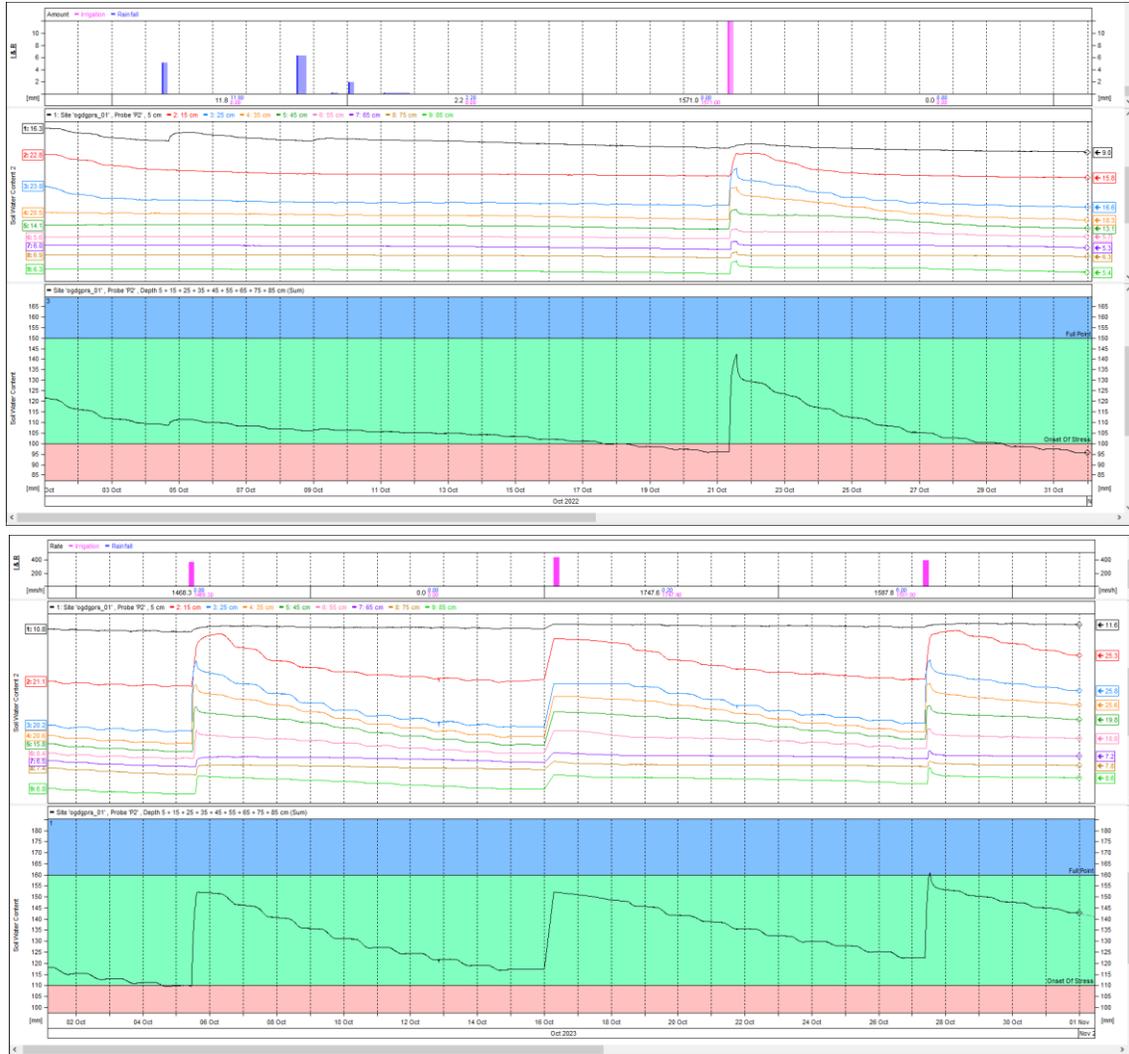
Sur deux ans, la figure 89 identifie une fréquence d'irrigation plus importante en 2023 (5) qu'en 2022 (3). La durée d'irrigation entre deux tours étant plus longue en 2022 (7 jours) qu'en 2023 (5 jours). Que ce soit en 2022 comme en 2023, les horizons allant de 15 à 55 cm de profondeur ont reçu une meilleure augmentation de SWC que dans les horizons plus profonds. Par contre à 5 cm de profondeur, il y a eu absence de marches racinaires. Ainsi la concentration racinaire sur les deux ans est comprise entre 15 et 55 cm de profondeur, soit 40 cm au total.



**Figure 89.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Septembre, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Octobre**

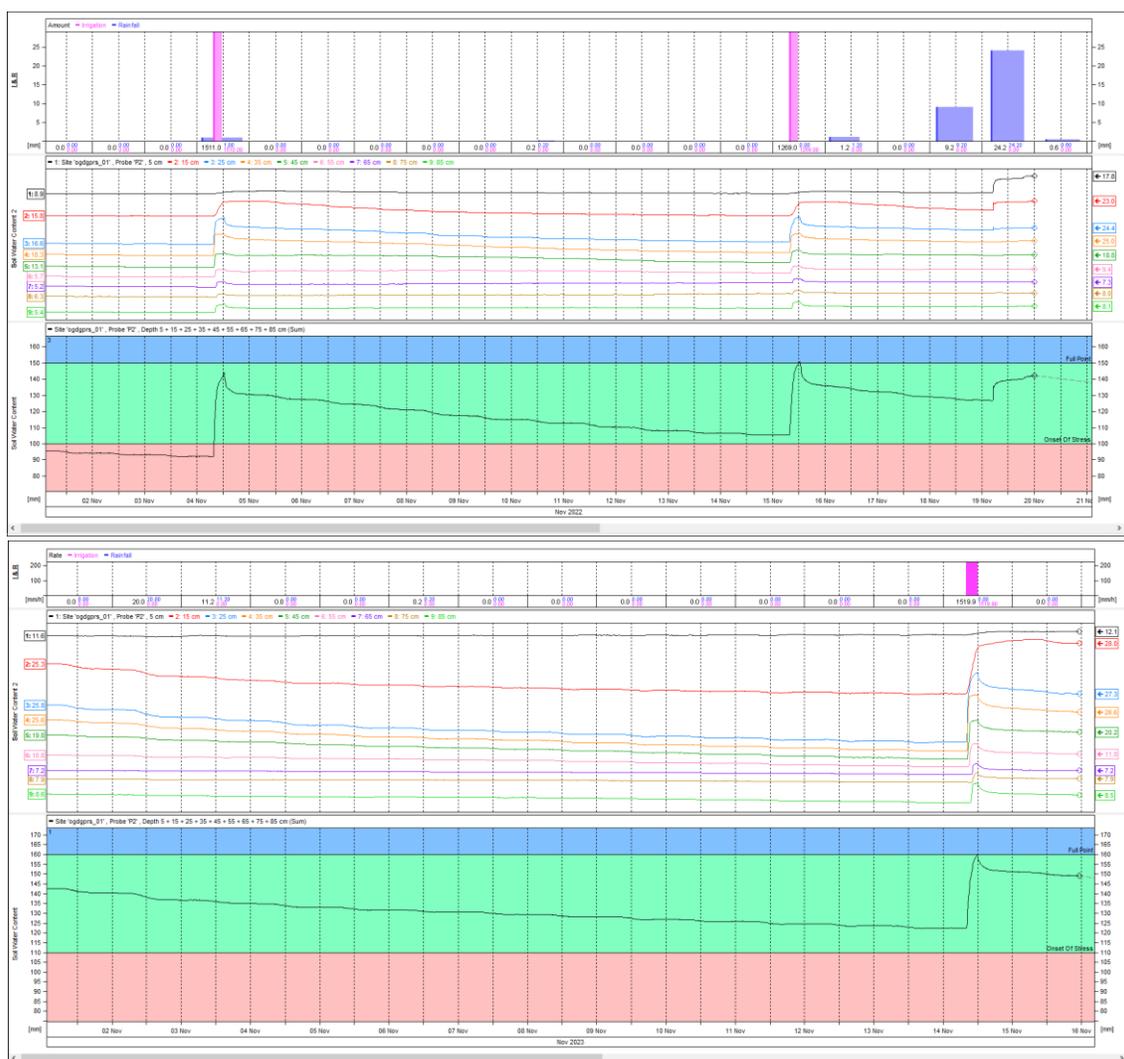
La comparaison sur deux ans (Fig.90) montre que la fréquence d'irrigation a été plus élevée en 2023 (3) qu'en 2022 (1). L'évolution de SWC dans chaque capteur, a permis d'identifier la profondeur de la zone racinaire de 15 à 85 cm, soit environ 70 cm de profondeur aussi bien en 2022 qu'en 2023.



**Figure 90.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'octobre, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Novembre**

Sur deux (02) années de campagne (Fig.91), le nombre de tours d'eau a été plus important en 2022 (6) qu'en 2023 (1). Quant à la concentration racinaire, elle a été beaucoup plus présente de 15 à 55 cm de profondeur qu'entre 65 et 85 cm de profondeur. 5 cm étant l'horizon qui a brillé par l'absence de marches racinaires au cours des différents tours d'eau. Par contre lors des tours de précipitations, le comportement inverse a été observé dans tous les horizons. Ainsi la zone racinaire se situe globalement entre 15 et 85 cm de profondeur, soit 70 cm de profondeur exacte sur deux ans.



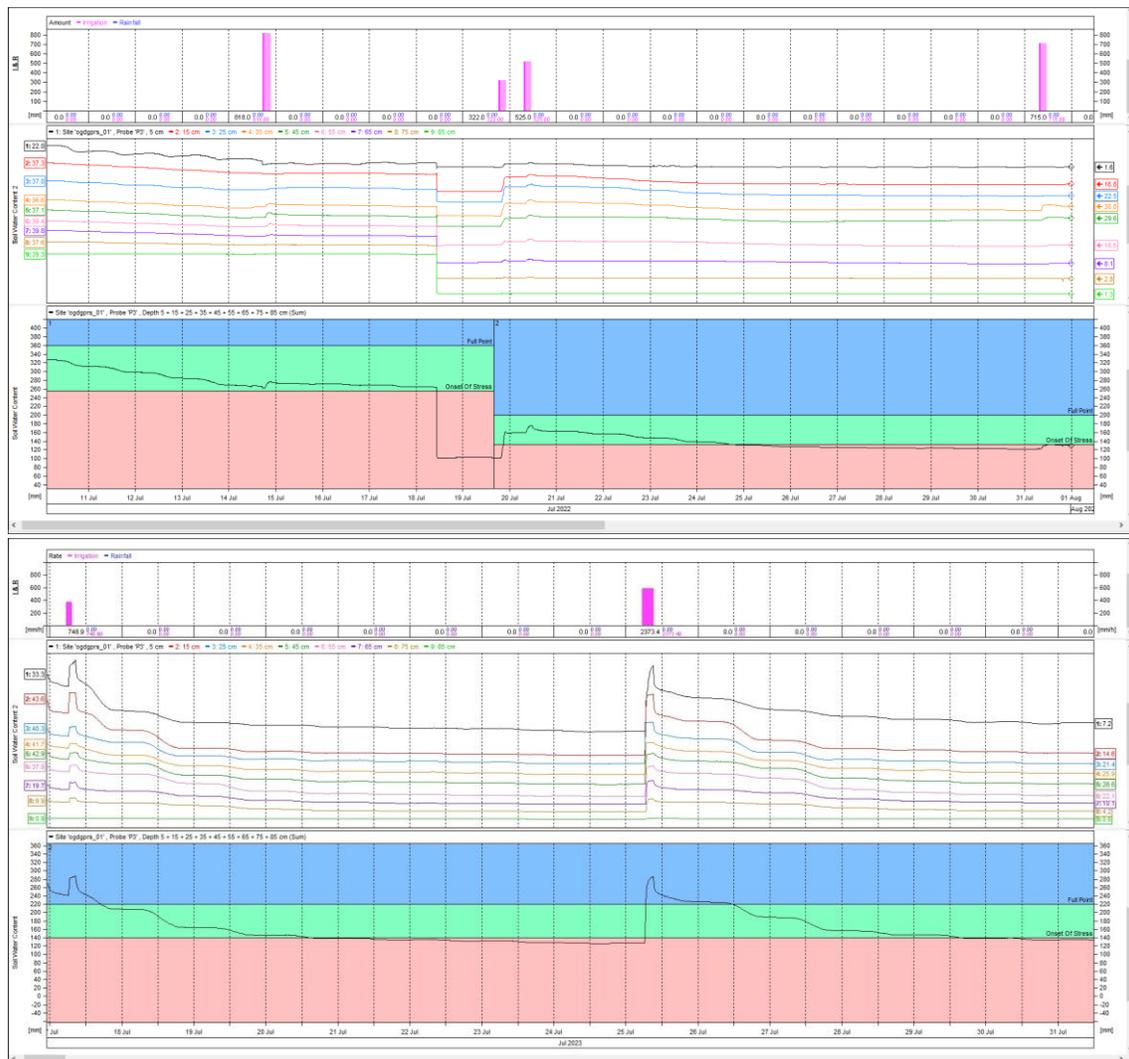
**Figure 91.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Novembre, dans la sonde 1 sur deux ans

## 2 Etude comparative de l'évolution de l'humidité du sol dans S2 de chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023) d'irrigation

- **Juillet**

La comparaison sur deux (02) ans des tours d'eau apportés (Fig.92) montre qu'aussi bien en 2023 qu'en 2022, les apports (irrigations et précipitations) n'ont pas vraiment permis une bonne augmentation de SWC dans tous les horizons. Aussi les fréquences d'irrigation ont été deux fois plus importantes en 2022 (4) qu'en 2023 (2). Ainsi la concentration racinaire

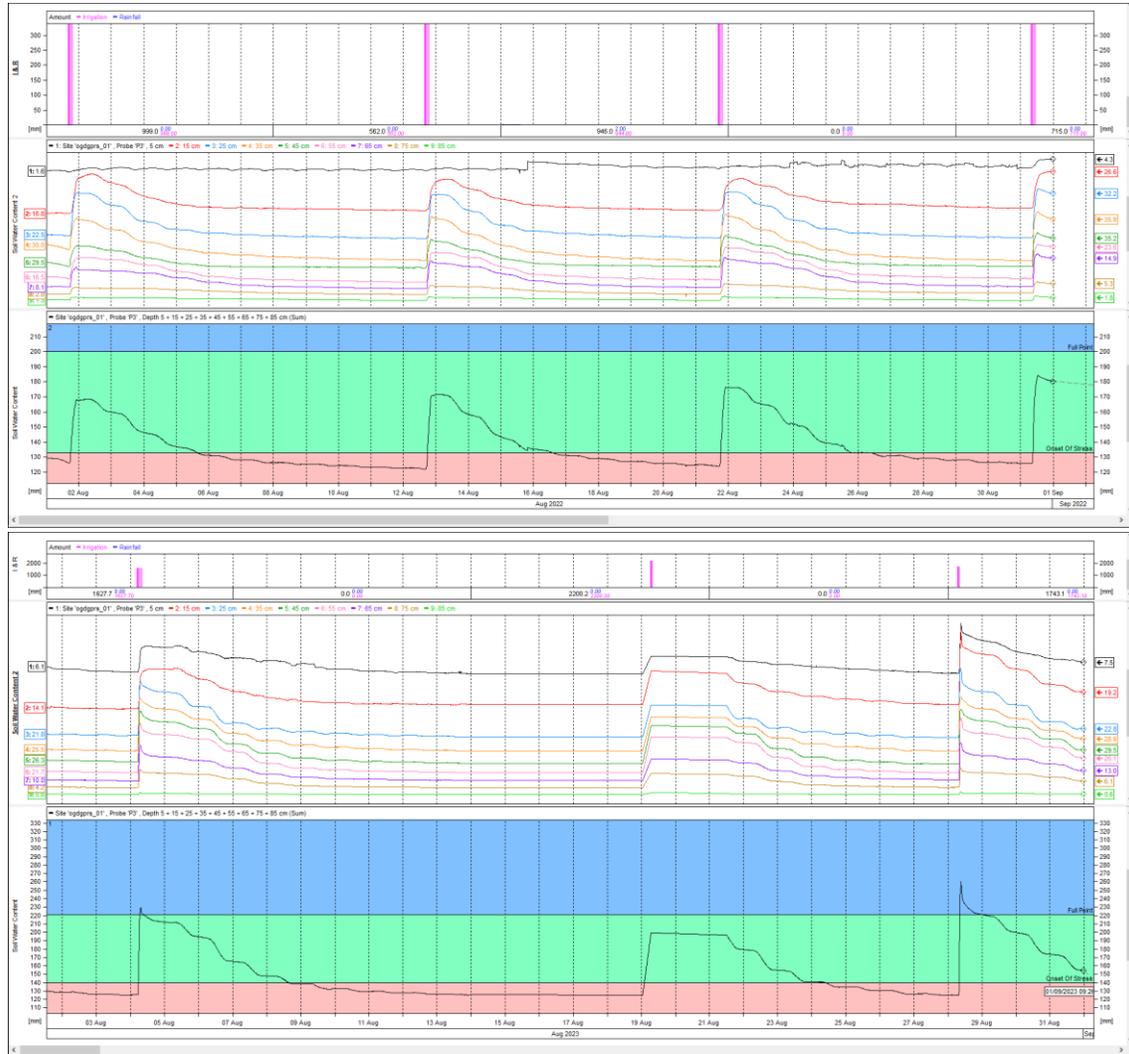
s'étend sur 30 cm de profondeur ( $H_{15} - H_{45}$ ) en 2022 contre 70 cm de profondeur ( $H_5 - H_{75}$ ) en 2023.



**Figure 92.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Août**

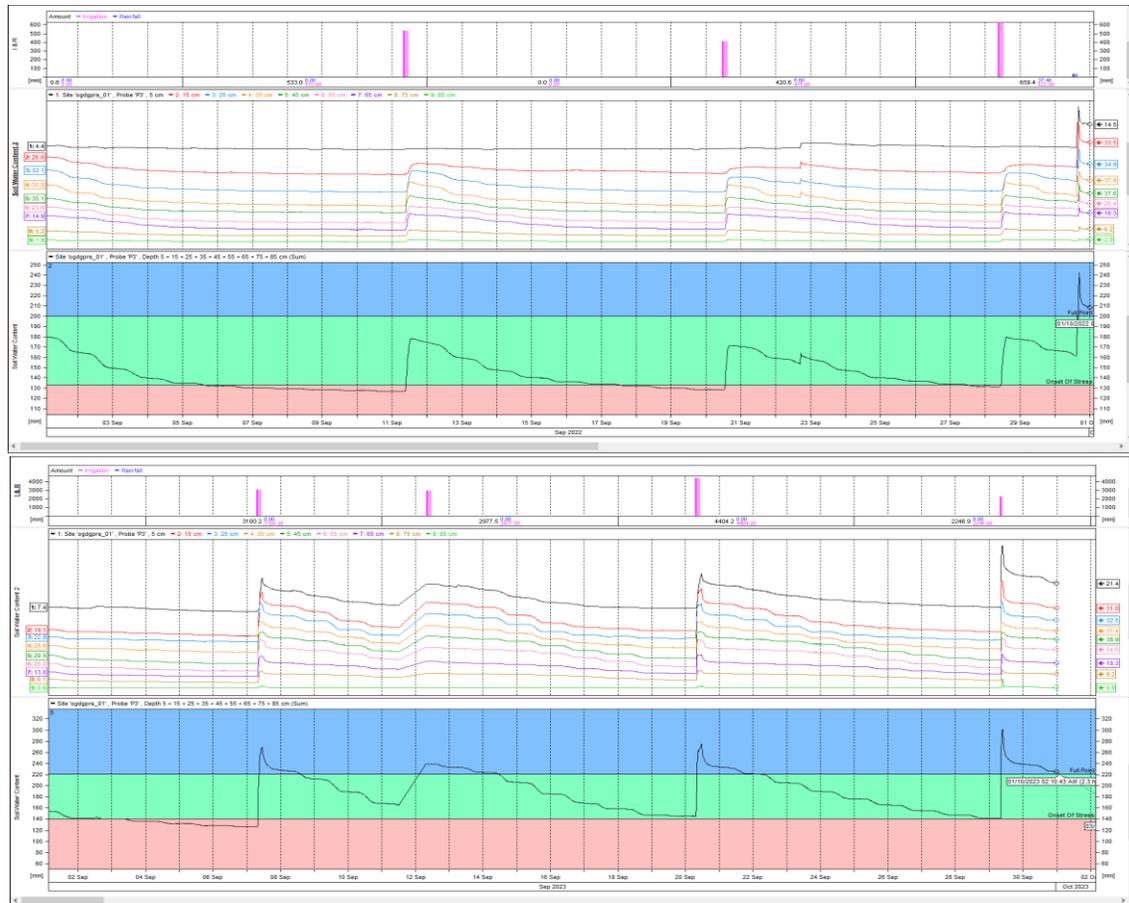
L'illustration sur deux ans (Fig.93), montre que la fréquence d'irrigation est plus considérable en 2022 (4) qu'en 2023 (3) et la durée maximale entre deux tours est de 10 jours en 2022 pendant qu'en 2023, elle est de 16 jours. La concentration racinaire s'étend sur 70 cm aussi bien en 2022 ( $H_{15} - H_{85}$ ) qu'en 2023 ( $H_5 - H_{75}$ ).



**Figure 93.** Evolution de l’humidité dans le sol suite aux apports d’eau pendant le mois d’Août, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Septembre**

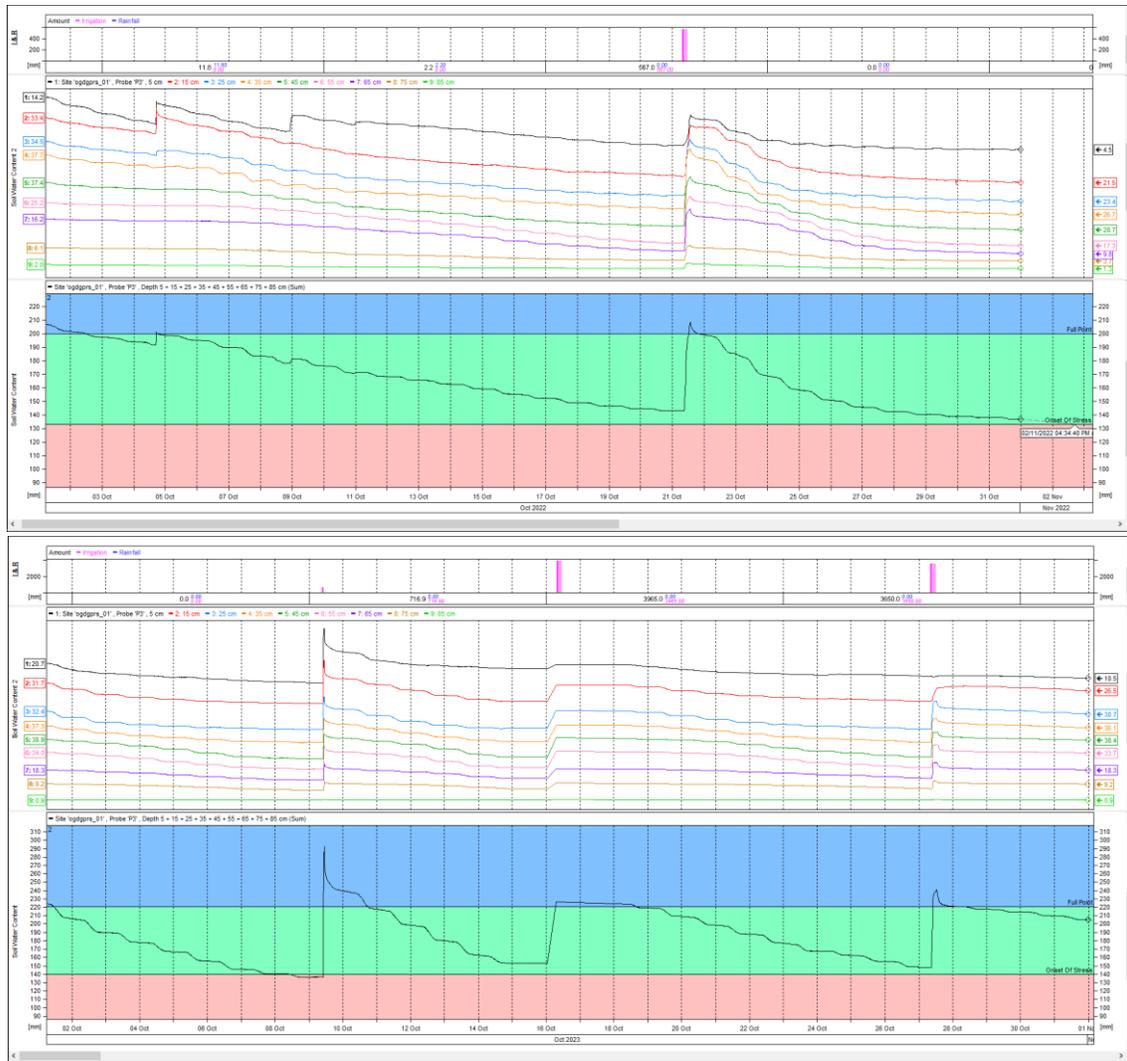
La comparaison sur deux (02) ans (Fig.94) montre que la fréquence d’irrigation est de 3 en 2022 contre 4 en 2023. La durée maximale entre deux (02) tours d’irrigation est légèrement plus élevée en 2023 (10 jours) qu’en 2022 (9 jours). La concentration racinaire quant ’à elle s’étend sur 60 cm de profondeur ( $H_{15} - H_{75}$ ) en 2022 contre 70 cm de profondeur en 2023 ( $H_5 - H_{75}$ ).



**Figure 94.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Septembre dans la sonde 2 sur deux ans

- **Octobre**

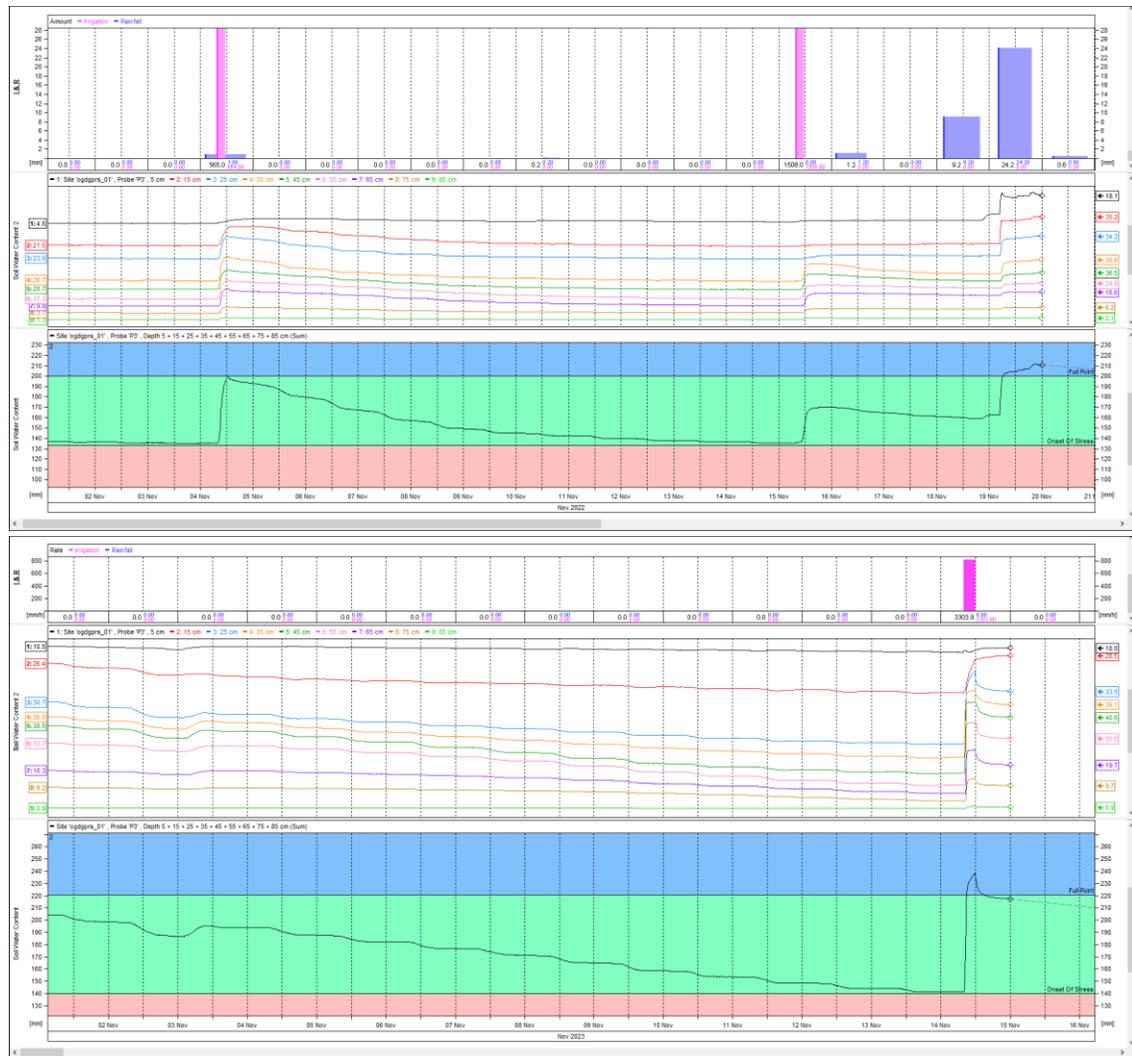
La comparaison sur deux ans (Fig.95) note une élévation du nombre de tours d'irrigation plus important en 2023 (3) qu'en 2022 (2) ; avec des précipitations qui sont plutôt présentes en 2022 et absentes en 2023. La durée maximale étant de 7 jours entre deux tours d'irrigation en 2023. La concentration racinaire s'étend sur 80 cm de profondeur ( $H_5 - H_{85}$ ) en 2022 contre 70 cm de profondeur maximale ( $H_5 - H_{75}$ ) en 2023.



**Figure 95.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'octobre, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Novembre**

La comparaison sur deux (02) ans (Fig.96) montre qu'en 2023, la fréquence d'irrigation a été moindre (1) qu'en 2022 (2). Les précipitations ont été quant à elles présentes en 2022 et absentes en 2023. La zone racinaire varie entre 80 et 50 cm de profondeur ( $H_5 - H_{85}$  ;  $H_{35} - H_{85}$ ) en 2022 contre 60 cm de profondeur ( $H_{15} - H_{75}$ ) en 2023.

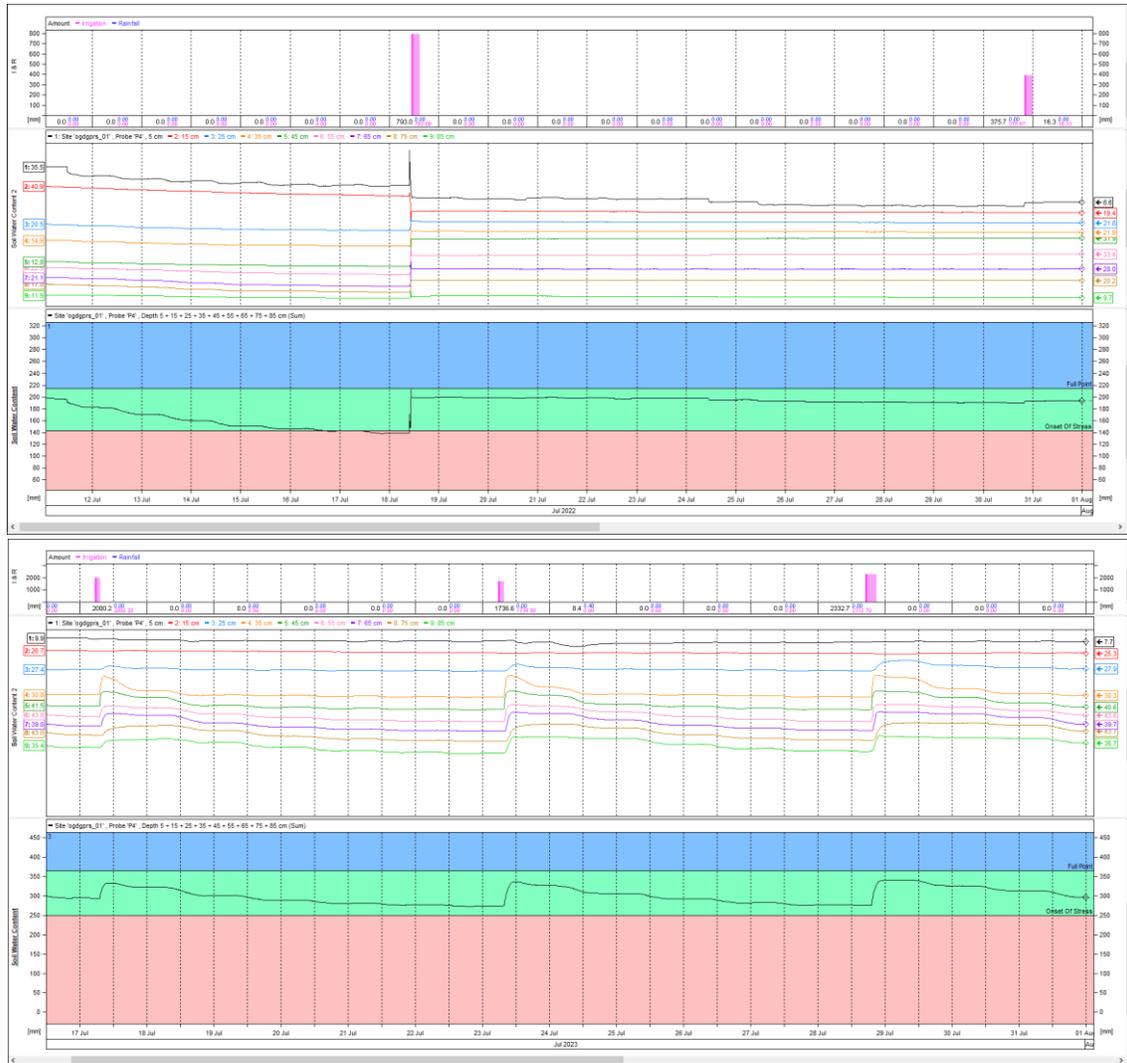


**Figure 96.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois de Novembre, dans la sonde 2 sur deux ans

### 3) Etude comparative de l'évolution de l'humidité du sol dans S3 suivant chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023)

- **Juillet**

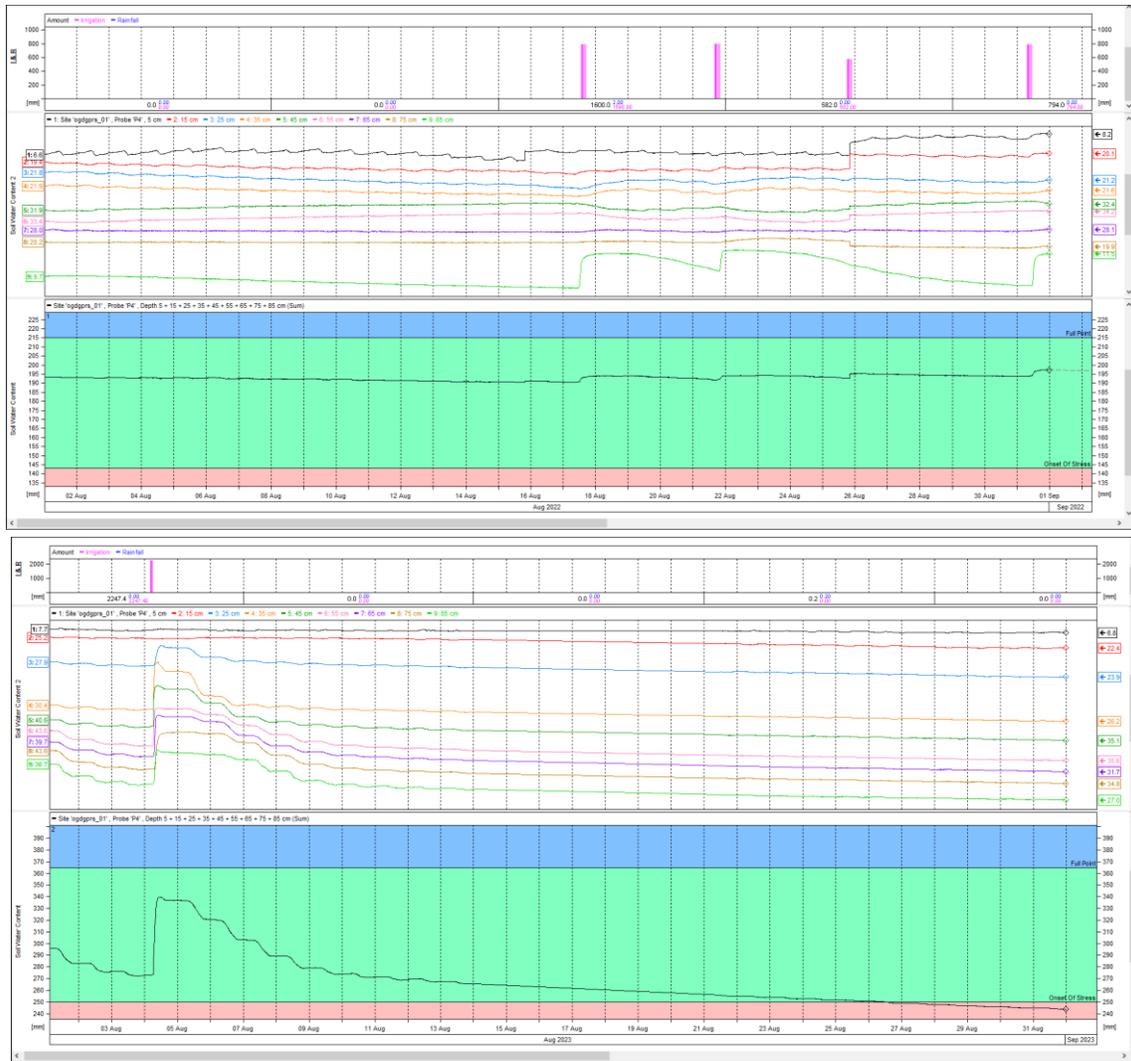
L'examen sur deux ans (Fig .97) montre que la durée d'irrigation maximale est beaucoup plus grande en 2022 (12 jours) qu'en 2023 (5 jours). Par contre, les fréquences d'irrigation sont légèrement élevées en 2023 (3) qu'en 2022 (2). SWC a mieux augmenté en 2023 qu'en 2022. La concentration racinaire varie de 5 à 80 cm de profondeur en 2022 ( $H_5$ ,  $H_5 - H_{85}$ ) contre 60 cm en 2023 ( $H_{25} - H_{85}$ ).



**Figure 97.** Evolution de l’humidité dans le sol suite aux apports d’eau pendant le mois de Juillet, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Août**

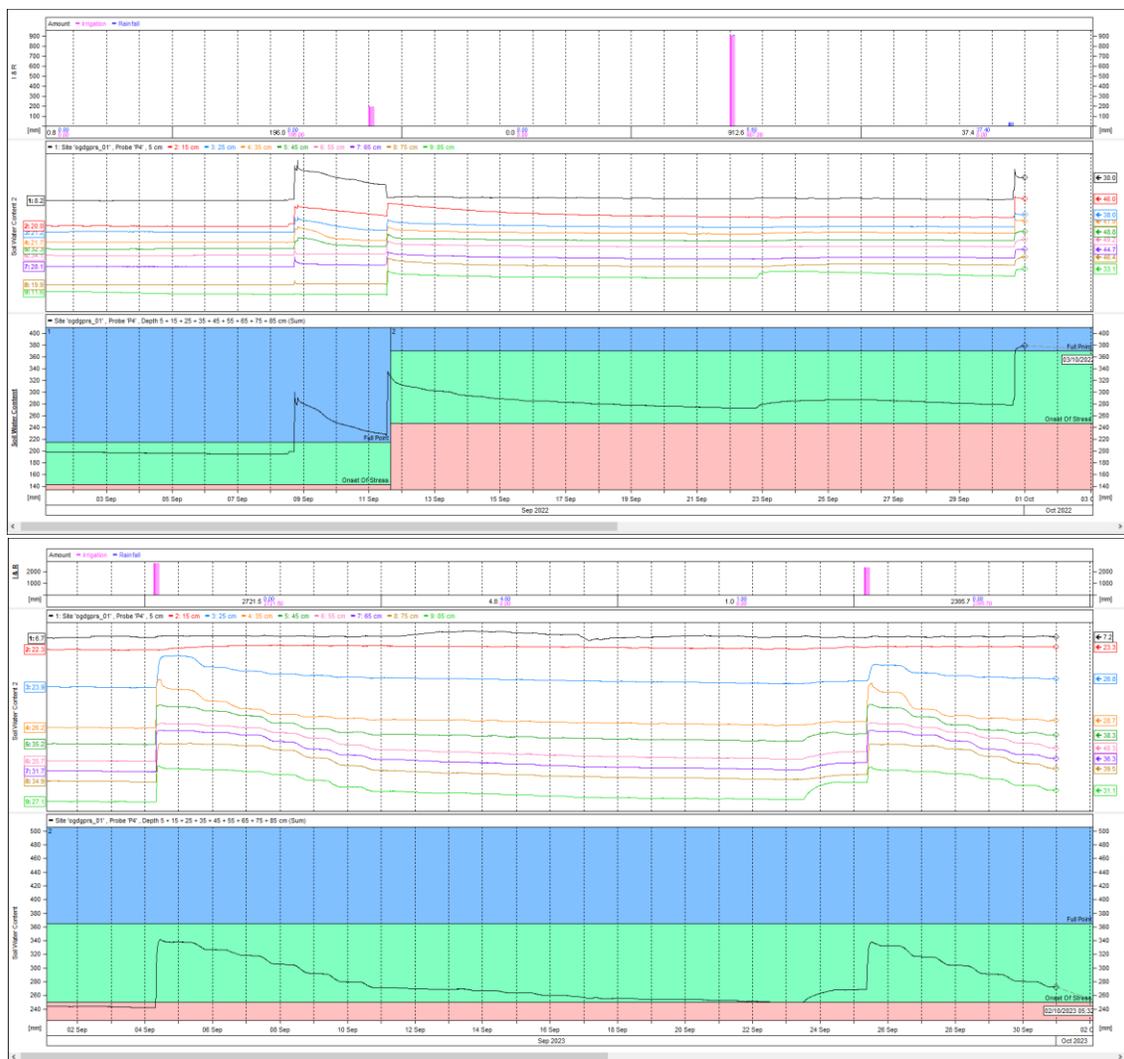
Le bilan sur deux ans (Fig.98) montre que l’apport d’eau effectué en 2023 a été mieux apprécié par la plante qu’en 2022. Avec une concentration racinaire s’étendant sur 60 cm de profondeur (H<sub>25</sub> – H<sub>85</sub>).



**Figure 98.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'août, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Septembre**

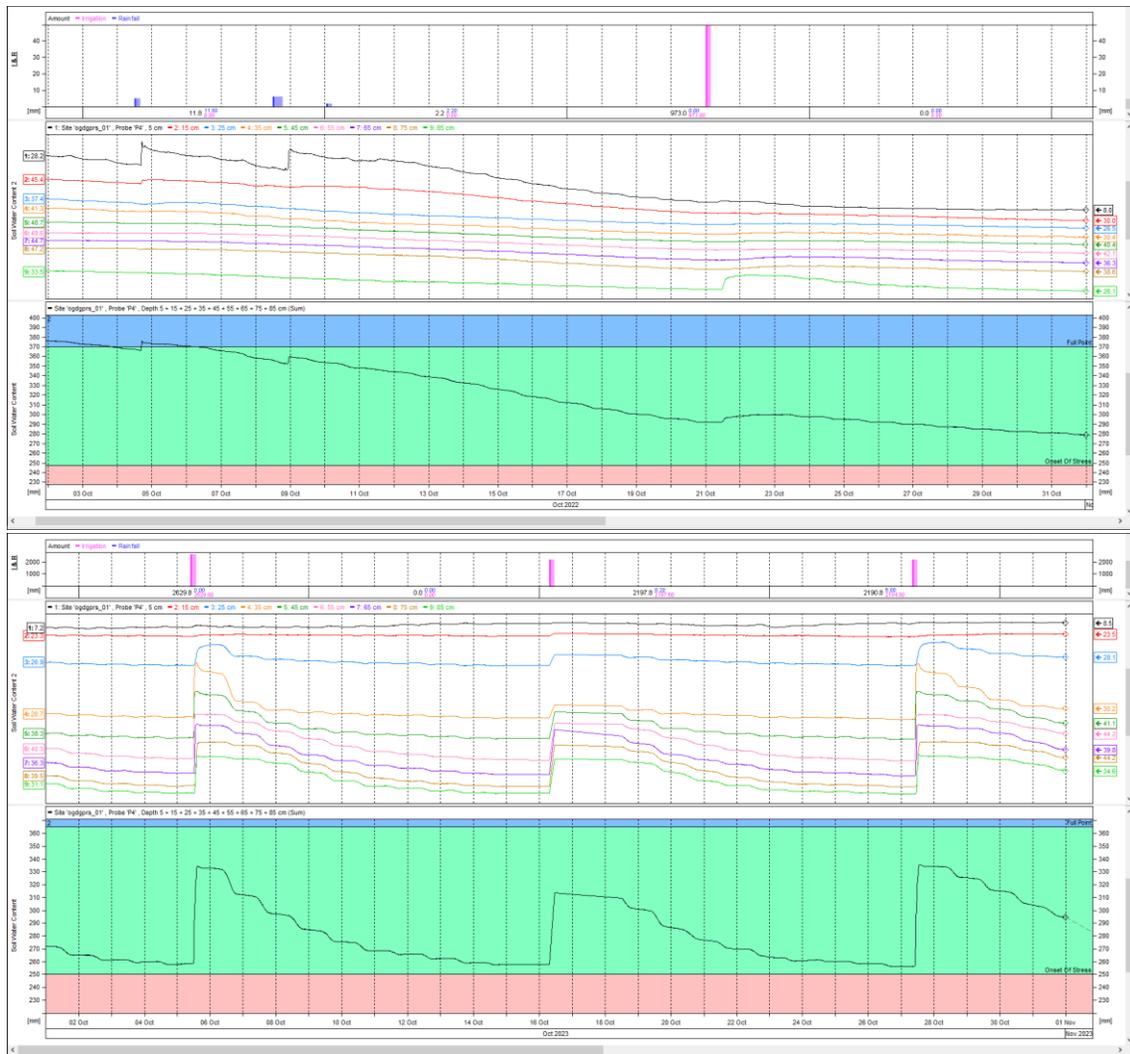
Le parallèle sur deux (02) ans (Fig.99) permet de s'apercevoir que les tours d'eau (irrigation et quelques gouttes de pluie) apportés en 2023 ont beaucoup plus été mieux appréciés par la plante que ceux de 2022. La durée maximale de jours entre deux irrigations est pareille aussi bien en 2022 qu'en 2023 (21 jours). La zone racinaire s'étend sur 70 cm de profondeur (H<sub>15</sub> – H<sub>85</sub>) en 2022 contre 50 cm de profondeur en 2023 (H<sub>35</sub> – H<sub>85</sub>).



**Figure 99.** Evolution de l’humidité dans le sol suite aux apports d’eau pendant le mois de Septembre, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Octobre**

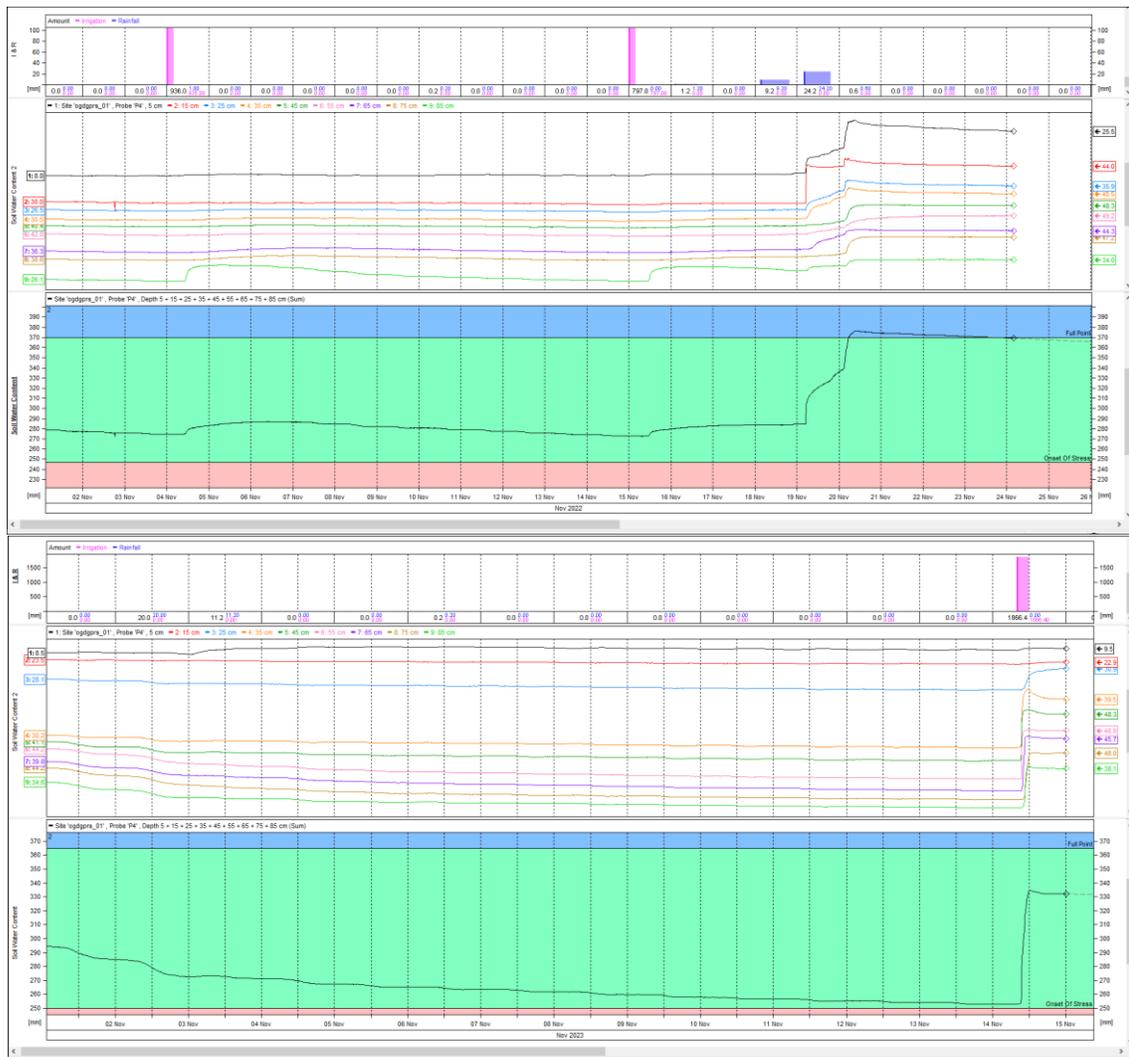
La confrontation des données sur deux ans (Fig.100) souligne plus de bonnes réponses d’infiltration de SWC marqué par son augmentation dans presque tous les horizons en 2023 qu’en 2022. La zone racinaire s’étend en moyenne sur 10 cm de profondeur en 2022 contre 50 cm de profondeur en 2023.



**Figure 100.** Evolution de l'humidité dans le sol suite aux apports d'eau pendant le mois d'Octobre, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Novembre**

La revue sur deux (02) ans (Fig. 101) aperçoit les précipitations aussi bien en 2022 qu'en 2023 ; ayant principalement impactés l'horizon H<sub>5</sub>. Le tour d'irrigation de 2023 a été bien apprécié par presque tous les horizons que ceux de 2022. La concentration racinaire s'étend sur 80 cm de profondeur en 2022 contre 60 cm de profondeur en 2023.



**Figure 101.** Evolution de l’humidité dans le sol suite aux apports d’eau pendant le mois de Novembre dans la sonde 3 sur deux ans

En définitif, à la suite de l’évaluation de SWC par mois dans chaque sonde sur deux ans, plusieurs résultats ont été obtenus.

- **Sonde 1**

La zone racinaire de la plante varie de 20 à 70 cm de profondeur en 2022 ; contre 40 à 70 cm de profondeur en 2023. Avec des fréquences d’irrigation dans l’ensemble plus importantes en 2022 qu’en 2023. L’augmentation de SWC se fait plus ressentir en 2023 qu’en 2022. La durée maximale entre deux tours d’irrigation sur deux ans varie de 7 à 13 jours.

- **Sonde 2**

La zone racinaire de la plante varie de 30 à 80 cm de profondeur en 2022 contre 60 à 70 cm de profondeur en 2023. Les fréquences d'irrigation sont plus importantes en 2022 qu'en 2023. L'augmentation de SWC est mieux perçue en 2023 qu'en 2022. La durée maximale entre deux tours d'irrigation varie de 7 à 16 jours sur deux ans.

- **Sonde 3**

La zone racinaire de la plante varie de 5 à 80 cm de profondeur en 2022 ; contre 50 à 60 cm de profondeur en 2023. Avec des fréquences d'irrigation dans l'ensemble plus importantes en 2023 qu'en 2022. L'augmentation de SWC est plus appréciée en 2023 qu'en 2022. La durée maximale entre deux tours d'irrigation sur deux ans varie de 11 à 21 jours.

Yang et al., 2023 souligne que l'irrigation goutte à goutte peut réguler l'eau en impactant le développement des racines dans la zone racinaire. Les résultats de simulation de la teneur en eau dans le sol réalisés par Bourziza et al., 2017 ont démontré que le goutte à goutte souterrain permet une répartition de l'eau plus verticalement qu'horizontalement. Ce même auteur en 2014, a expliquer que les racines se développent plus en profondeur que latéralement. Ces résultats obtenus par les chercheurs ci – dessus viennent en appui à ceux obtenus dans la zone. Justifiant ainsi la profondeur d'enracinement plus importante dans le sol pour S1 et S3 contrairement à S2.

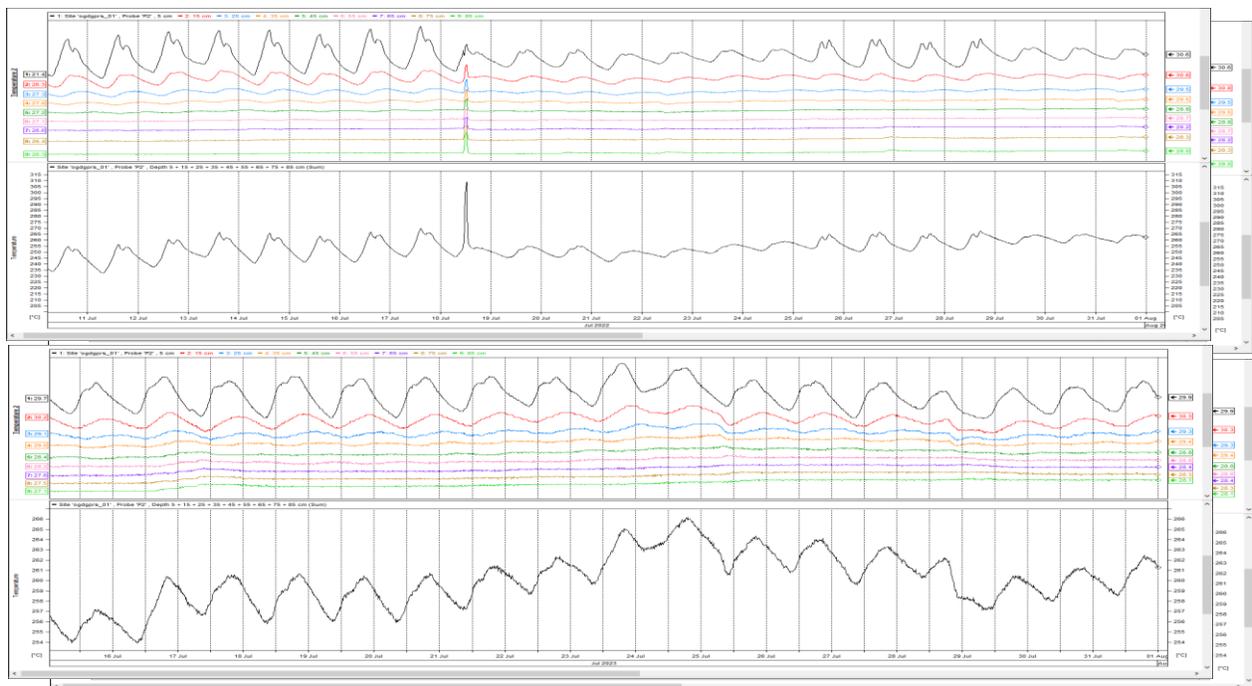
### **VI.2.2 Evaluation de la température dans le sol par mois**

Pour mieux observer le comportement de la température dans le sol (T) le long du profil de sol de 85 cm de profondeur, des illustrations (cumul et capteur par capteur) par sonde installée en champ (S1, S2 et S3) ont été réalisées suivant chaque mois de chaque campagne effectuée. Les mois pris en considération sont Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre. Rappelons que S1 a été installé dans un système d'irrigation goutte à goutte souterrain de 15 cm de profondeur, S2 dans celui de surface et S3 dans un système d'irrigation localisé à 30 cm de profondeur.

# 1) Etude comparative de l'évolution de la température dans le sol (cumul et capteur par capteur) au niveau de S1 à chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023)

## • Juillet

En 2022 (Fig.102), du 11 – 19 juillet plus précisément, une élévation de la température dans le sol est observée, dont le pic maximum se situe entre 18 et 19 Juillet. Sur tout le mois, H<sub>5</sub> est l'horizon qui enregistre le plus de température dans le sol. Toutefois, dans les quatre (04) premiers horizons, l'observation de la température est plus importante que dans le reste des horizons. Ainsi plus on va en profondeur, plus la température diminue, voire se stabilise dans le sol. Le cumul de température montre une augmentation au début, suivie d'une légère diminution, puis d'une augmentation progressive jusqu'à la fin du mois. En 2023 (Fig.102), la température dans le sol est plus élevée dans les quatre (04) premiers horizons en général et dans l'horizon H<sub>5</sub> en particulier. Par contre dans le reste des horizons, elle diminue, et se stabilise en profondeur. Autour du 23 -28 Juillet, les fluctuations vont être plus importantes, mais passé cette date, elle va chuter avant de reprendre progressivement à augmenter comme en 2022.



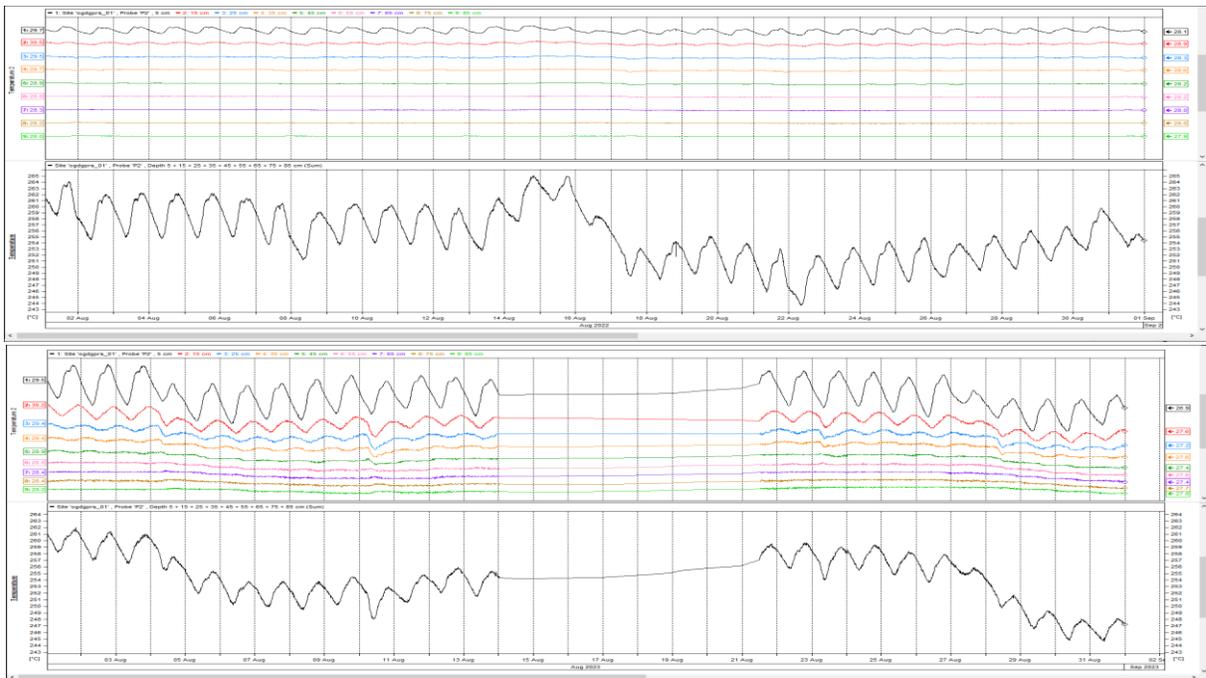
**Figure 102.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Août**

En 2022 (Fig.103), des fluctuations de température sont plus présentes dans les deux (02) premiers horizons (H<sub>5</sub> et H<sub>15</sub>) et de moins en moins dans les horizons profonds (H<sub>25</sub> -H<sub>85</sub>). Le cumul de température sur un profil de 85 cm de sol, montre que la température est plus élevée pendant les seize (16) premiers jours ; avec un pic maximum enregistré le 16/08/2022. Par la suite, elle s'abaisse progressivement jusqu'au 22/08/2022 avant d'augmenter sensiblement jusqu'au 31/08/2022.

En 2023 (Fig.103), les fluctuations importantes s'observent dans les quatre (04) premiers horizons du sol comme en 2022. Toutefois dans les horizons plus profonds, elles ont tendance à être moins importantes. Le cumul présente des fluctuations de température élevées au début du mois qui par la suite, vont s'abaisser jusqu'au 11/08/2022 ; avant d'augmenter au fur et à mesure jusqu'au 27/08/2023. A la fin du mois, ses fluctuations vont plutôt diminuer.

Sur deux (02) ans, le comportement observé du cumul de température dans le sol en 2022 s'oppose à celui de 2023 vers la fin du mois car au début il est presque similaire. Il faut dire qu'en 2023, les températures ont été beaucoup plus importantes qu'en 2022. Au point d'atteindre l'horizon H<sub>35</sub> ; avec H<sub>5</sub> étant celui qui a reçu les plus fortes fluctuations.



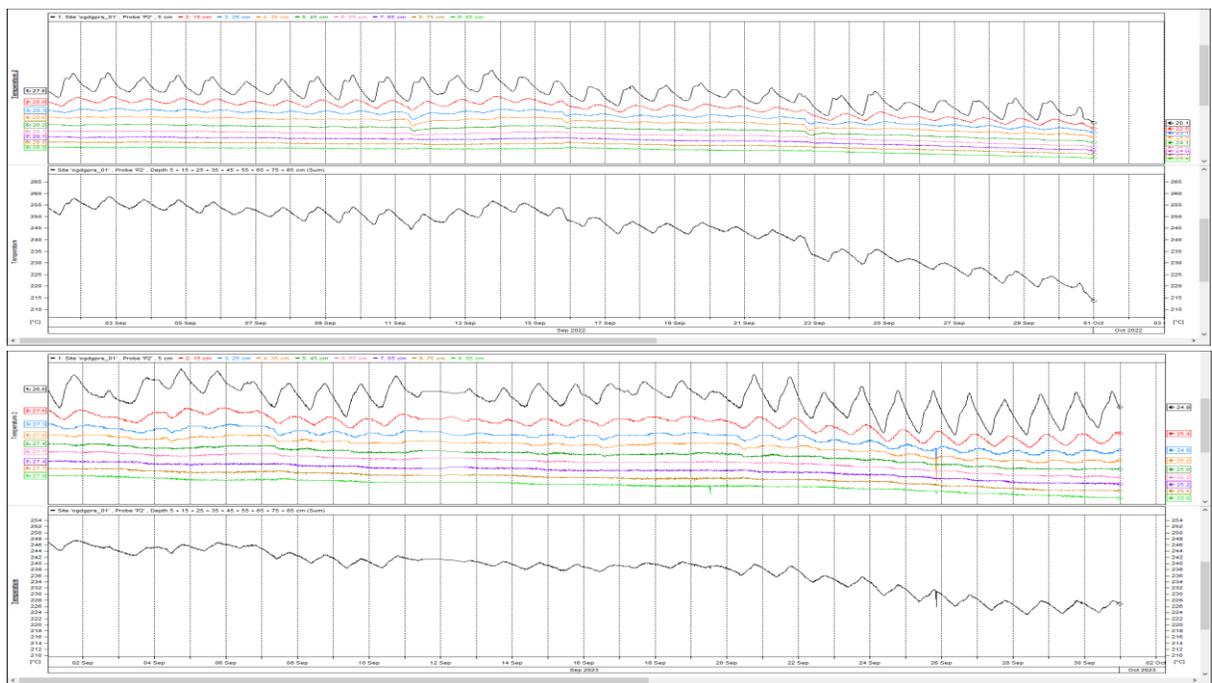
**Figure 103.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d'Août, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Septembre**

En 2022 (Fig.104), les températures dans le sol fluctuent énormément dans les 35 premiers centimètres du sol ; avec l’horizon H5 étant celui ou les plus grandes fluctuations sont relevées au cours du mois. Cependant dans le reste des horizons, principalement du 11- 12 Septembre, le 16/09/2022 et 23/09/2022, des diminutions soudaines de températures s’observent. En général, malgré les fortes températures enregistrées du 12 – 16 septembre 2022, la tendance au fil des jours est plutôt décroissante.

En 2023 (Fig.104), tout comme l’année précédente, les 35 premiers centimètres constituent les horizons qui ont enregistré d’importante fluctuations de températures dans le sol ; dont l’horizon H5 constitue celui qui a reçu les plus fortes fluctuations. Mais dans les horizons plus profonds (H45 – H85), la température a tendance à diminuer, puis se stabiliser. Le cumul de température au cours du mois traduit clairement cette diminution.

La comparaison sur deux (02) ans de la température traduit clairement un même comportement décroissant au cours du mois. Par ailleurs H5 est l’horizon ou les fluctuations de ce paramètre sont plus importantes dans le sol (surtout en 2023), contrairement au reste des horizons du sol.



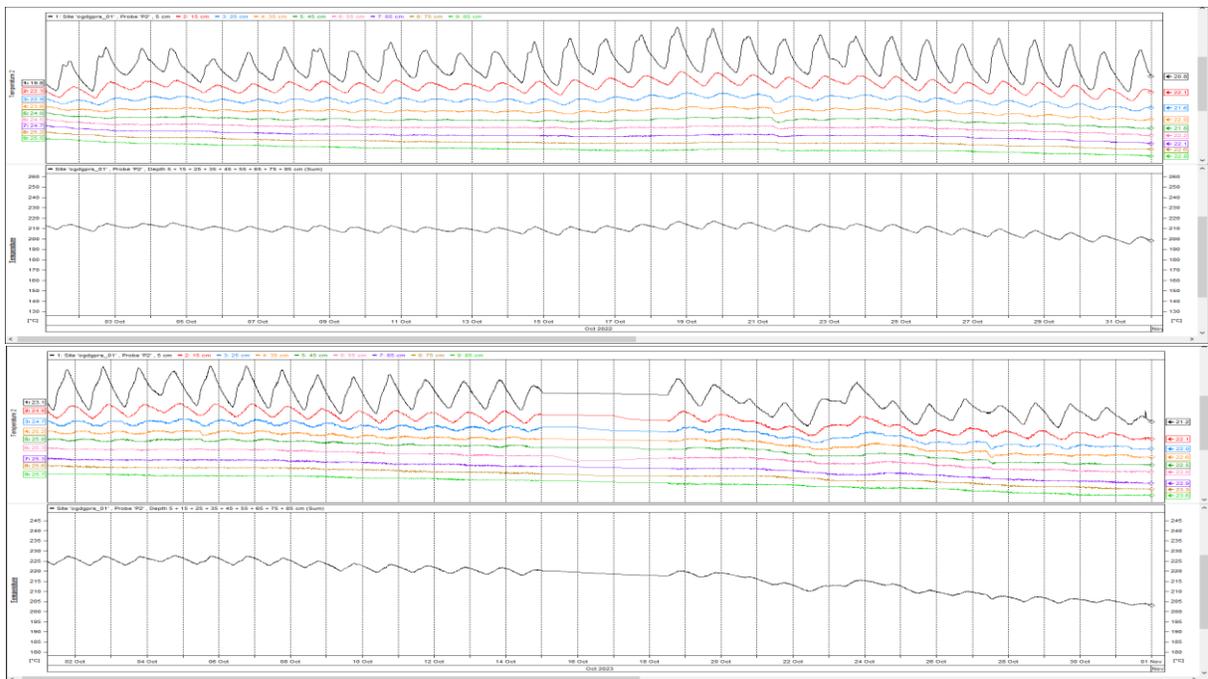
**Figure 104.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Octobre**

A la première année 2022 (Fig.105), les températures fluctuent énormément dans les trois premiers horizons (H<sub>5</sub>, H<sub>15</sub>, H<sub>25</sub>, H<sub>35</sub>) du sol en général et à H<sub>5</sub> en particulier. L'observation du cumul montre que durant le mois, les températures ont tendance à se stabiliser.

A la deuxième année 2023 (Fig.105), le même comportement de la température relevé en 2022 s'observe dans les différents horizons. Cependant au niveau du cumul, une légère différence se remarque. En effet, vers la fin du mois, la température dans le sol a tendance à plutôt diminuer.

Sur deux (02) ans, il faut noter que les variations de températures dans le sol ont été plus importantes en 2023 qu'en 2022. Aussi ce sont les mêmes horizons (les 35 premiers centimètres) du sol qui ont reçu plus de fluctuations que les autres.

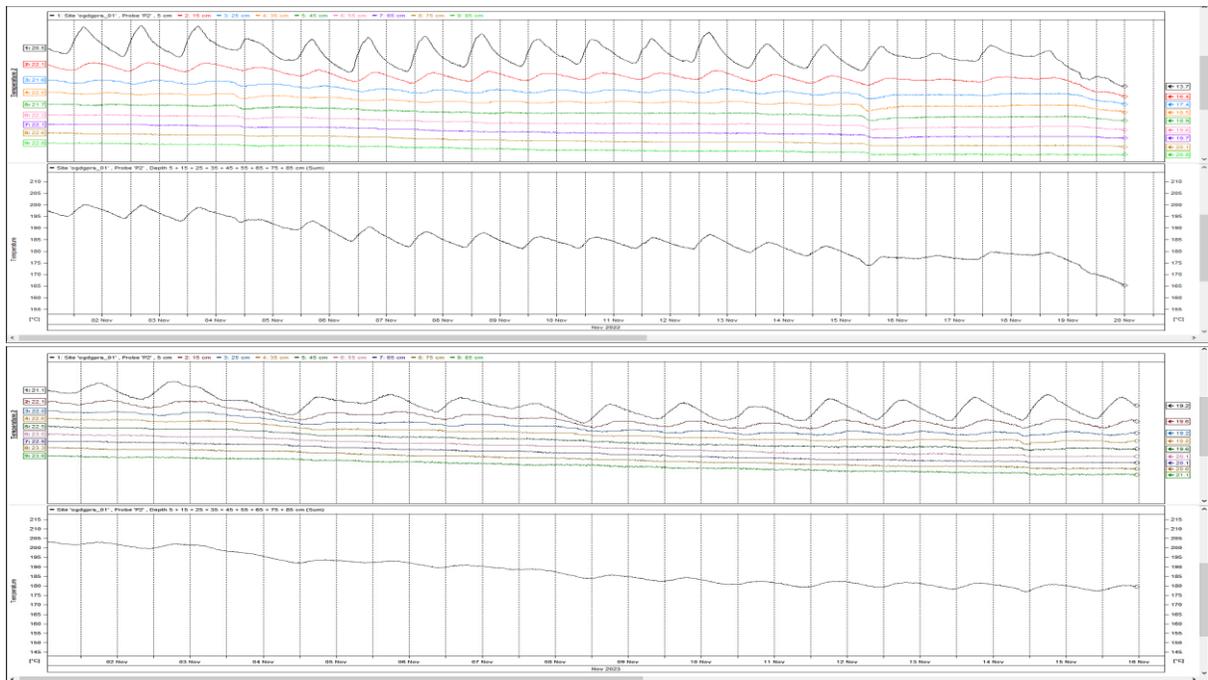


**Figure 105.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d'Octobre, dans la sonde 1 sur deux ans

- **Novembre**

En 2022 (Fig.106), les vingt - cinq (25) premiers centimètres du sol sont largement impactés par la température dans le sol. Par la suite, elle est beaucoup plus stable en profondeur. Le cumul montre une tendance décroissante au fil des jours. En 2023 (Fig.106), le même

comportement est observé ; avec une accentuation à partir du 08/11/2023. Sur deux ans, la tendance de la température dans le sol est décroissante tout le long du mois.



**Figure 106.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 1 sur deux ans

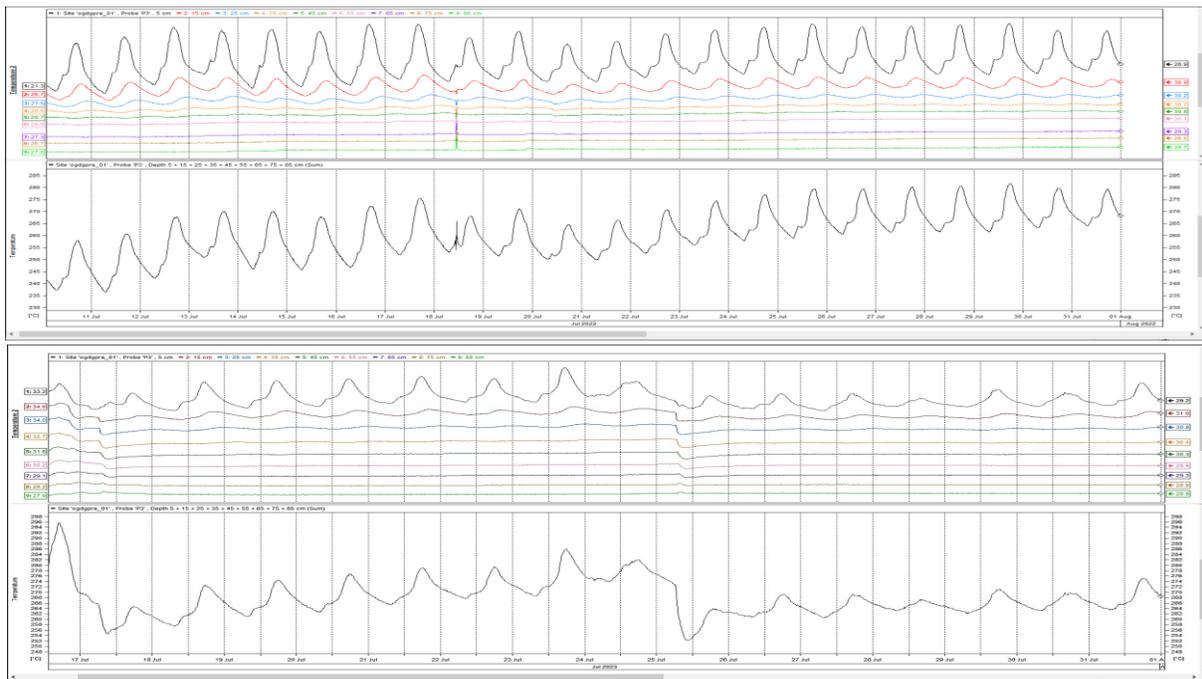
**2) Etude comparative de l'évolution de la température dans le sol (cumul et capteur par capteur) au niveau de la sonde 2 (S2) à chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023)**

- **Juillet**

A l'année 2022 (Fig.107), l'observation des fluctuations de températures dans chaque horizon, identifie H<sub>5</sub> comme étant celui dont la température est la plus élevée, parmi les horizons H<sub>5</sub>, H<sub>15</sub>, H<sub>25</sub> et H<sub>35</sub> ou les variations sont énormes comparés au reste des horizons du sol. Aussi l'illustration montre que plus on va en profondeur, plus la température dans le sol diminue ; au point de se stabiliser. Le cumul présente clairement des variations progressives de températures dans le sol au fil des jours. En 2023 (Fig.107), le même phénomène s'observe au sein de chaque horizon ; sauf que les fluctuations sont beaucoup plus importantes dans les trois (03) premières couches du sol. Dans le cadre du cumul, après le pic maximum observé au début du mois, une

chute de la température va s'en suivre du 17/07/2023 au 18/07/2023. Mais passé cette date, une élévation progressive de la température s'observe jusqu'au 25/07/2023. Après cette dernière date, la deuxième chute de la température s'observe du 25/07/2023 – 26/07/2023 jusqu'à atteindre le pic minimum du mois. Par la suite, une autre remontée s'observe de nouveau jusqu'à la fin du mois.

Sur deux (02) ans, le constat fait état de la croissance progressive de la température dans le sol tout le long du mois de 2022 ; contrairement à 2023 ou les fluctuations certes croissent aussi, mais de temps à autres diminuent brusquement avant de continuer à s'élever. Au niveau des différentes profondeurs, le comportement de la température est dans l'ensemble le même dans les deux années. Cependant la différence se situe juste au niveau du nombre de couches fortement impacté par la température d'une année à une autre.

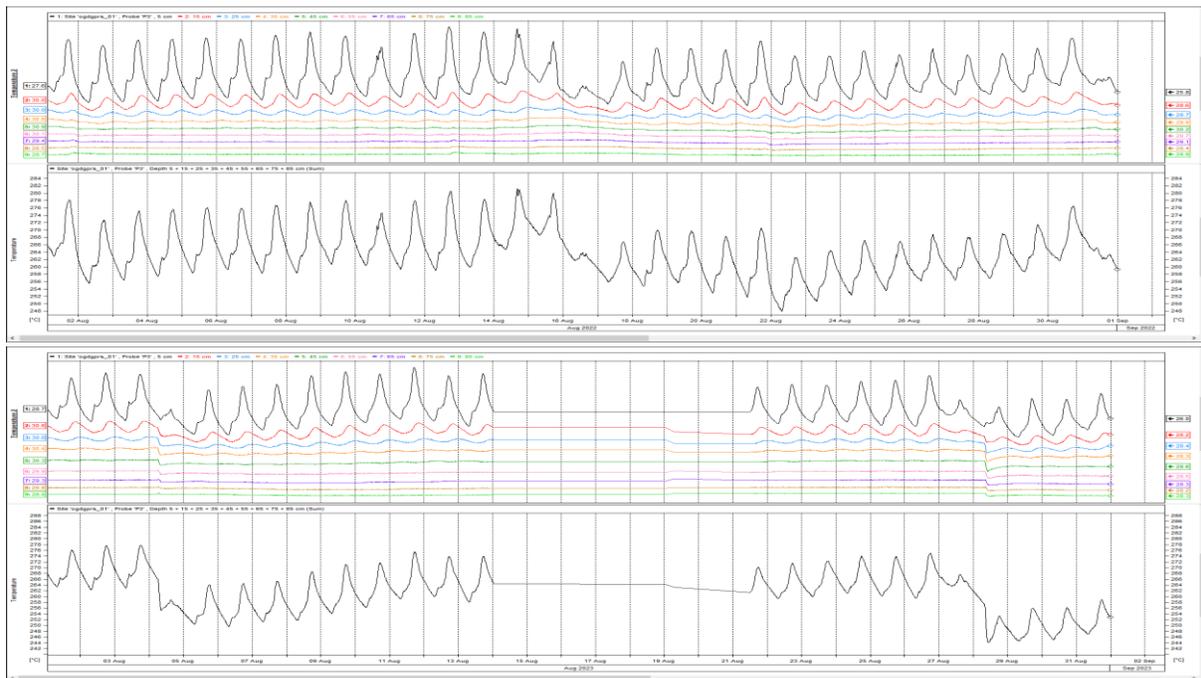


**Figure 107.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Août**

En 2022 (Fig.108), l'observation de la température dans le sol capteur par capteur, traduit le fort impact de ce paramètre dans les 35 premiers centimètres de profondeur du sol ; dont le maximum est relevé dans l'horizon H<sub>5</sub>. Dans les horizons plus profonds, c'est plutôt une

stabilisation de ce paramètre qui s’observe. Durant les quinze premiers jours du mois, l’observation du cumul de température dans le sol traduit des variations plus importantes que dans le reste de jours. En 2023 (Fig.108), le même comportement de température illustré en 2022 s’observe capteur par capteur. Mais au niveau du cumul, la tendance est différente. Au début du mois, les fluctuations les plus importantes sont observées du 1 – 4 Août 2023. Puis une diminution de la température dans le sol suivit d’une stabilité s’observe jusqu’au 28/08/2023 ou une autre chute libre est observée. Entraînant une diminution par escalier de température dans le sol. Sur deux (02) ans, la tendance des variations de température est identique capteur par capteur ; mais différent au niveau du cumul. H<sub>5</sub> est l’horizon du sol ou le maximum de température dans le sol s’observe.

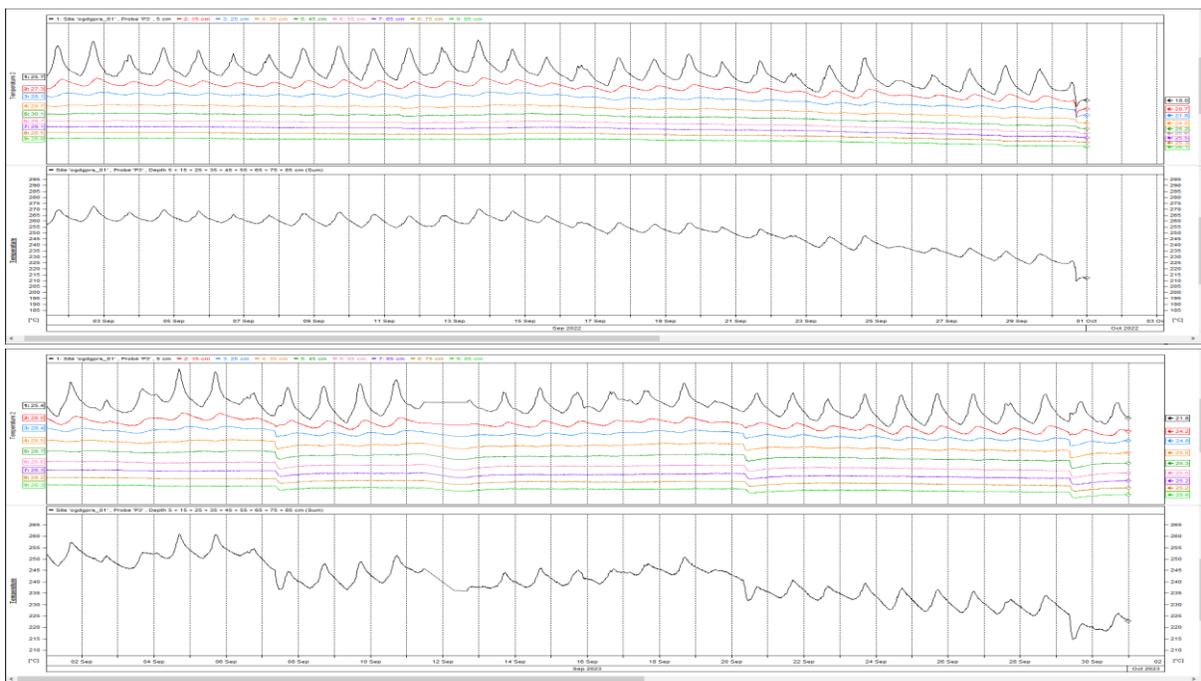


**Figure 108.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Août, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Septembre**

A l’année 2022 (Fig.109), les vingt – cinq premiers centimètres de profondeur constituent les horizons ou les variations de la température sont élevées ; particulièrement au sein de H<sub>5</sub>. Mais dans les horizons plus profonds, des stabilisations de cette température s’opèrent. Le cumul

permet d'apercevoir une tendance décroissante de température dans le sol au fil des jours. En 2023 (Fig.109), presque le même comportement est observé capteur par capteur ; mais aussi au sein du cumul. Cependant il faut noter au niveau des illustrations capteur par capteur, une chute de température dans chaque horizon du sol à partir de 25 cm de profondeur aux dates suivantes : 7/09/2023, 21/09/2023, 29/09/2023. La diminution au niveau du cumul se fait par escalier. Sur deux ans, H<sub>5</sub> est considéré comme étant l'horizon du sol où les fluctuations de températures ont été plus intenses.

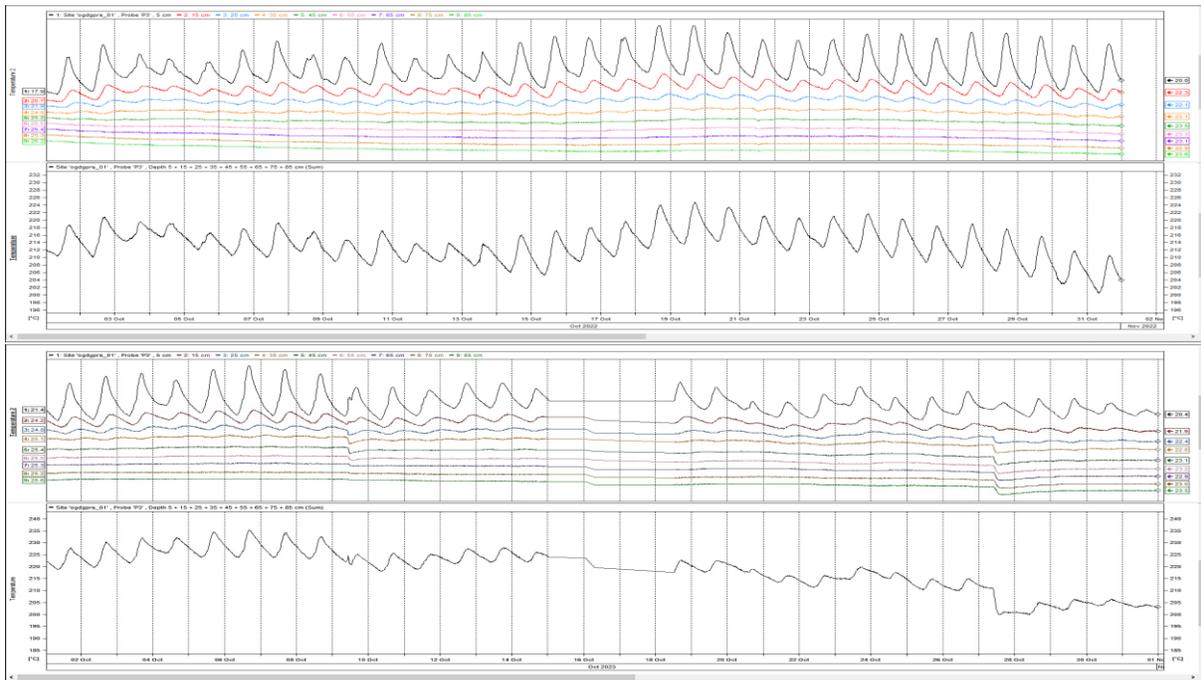


**Figure 109.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Octobre**

Au cours de l'année 2022 (Fig.110), les trente-cinq premiers centimètres constituent les horizons où de fortes températures sont relevées avec des fluctuations beaucoup plus prononcées à H<sub>5</sub>. Dans le reste des horizons, une diminution suivit d'une stabilité s'observe. Le cumul présente des fluctuations de température beaucoup plus stables les quatorze premiers jours du mois. Mais à partir du 15/10/2022, elles augmentent légèrement, avant de diminuer à partir du 23/10/2022 jusqu'à la fin du mois. Par contre à l'année 2023 (Fig.110), l'allure de la courbe du

cumul est plutôt décroissante. Tout comme en 2022, ce sont les horizons H<sub>5</sub>, H<sub>15</sub>, H<sub>25</sub>, H<sub>35</sub> qui reçoivent plus de température que le reste des horizons du sol.



**Figure 110.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d'Octobre, dans la sonde 2 sur deux ans

- **Novembre**

Que ce soit en 2022 comme en 2023 (Fig.111), l'allure de fluctuations de températures dans le sol est la même, aussi bien capteur par capteur que cumul. En effet, des fluctuations élevées dans les vingt – cinq premiers centimètres sont observés ; suivit d'une diminution puis stabilisation dans les horizons plus profonds. Traduisant de ce fait la tendance de la température à diminuer et se stabiliser au fur et à mesure qu'on va en profondeur. Aussi le cumul montre un comportement décroissant au fil des jours. Néanmoins vers la fin de 2023, entre le 14 et 15 Novembre, une chute brève de la température à partir de l'horizon H<sub>25</sub> jusqu'à l'horizon H<sub>85</sub> est observée.

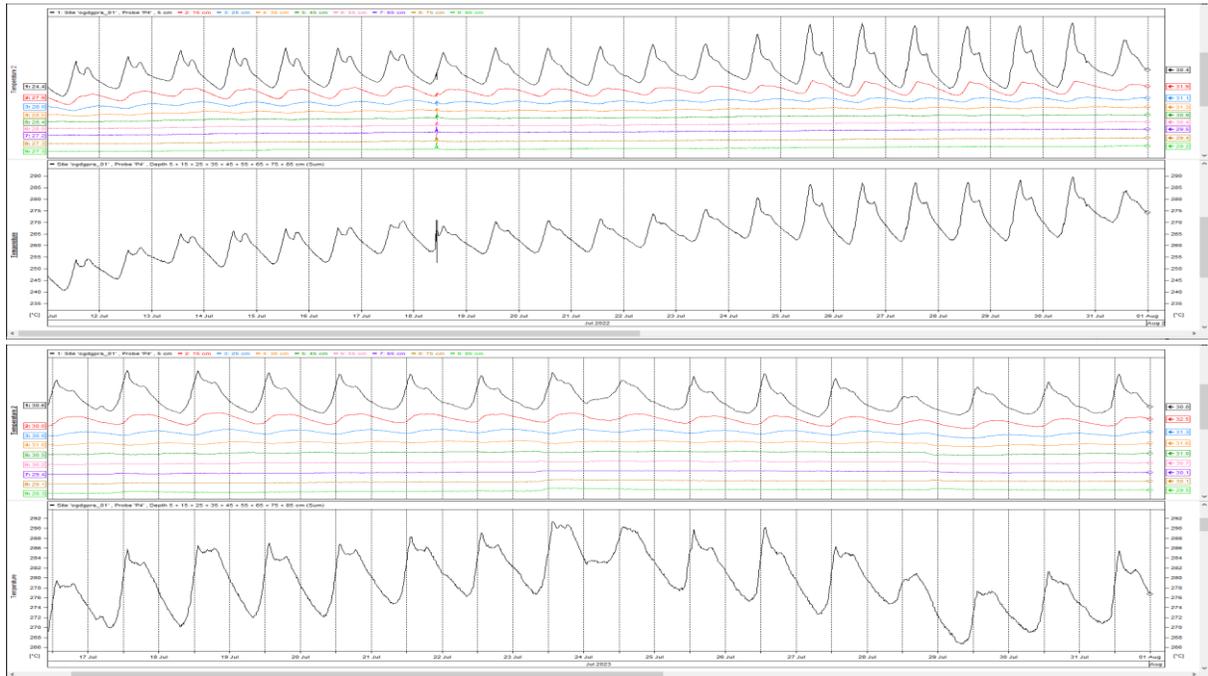


**Figure 111.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 2 sur deux ans

### 3) Etude comparative de l'évolution de la température dans le sol (cumul et capteur par capteur) au niveau de S3 à chaque mois pendant les deux (02) campagnes (2022 et 2023)

- **Juillet**

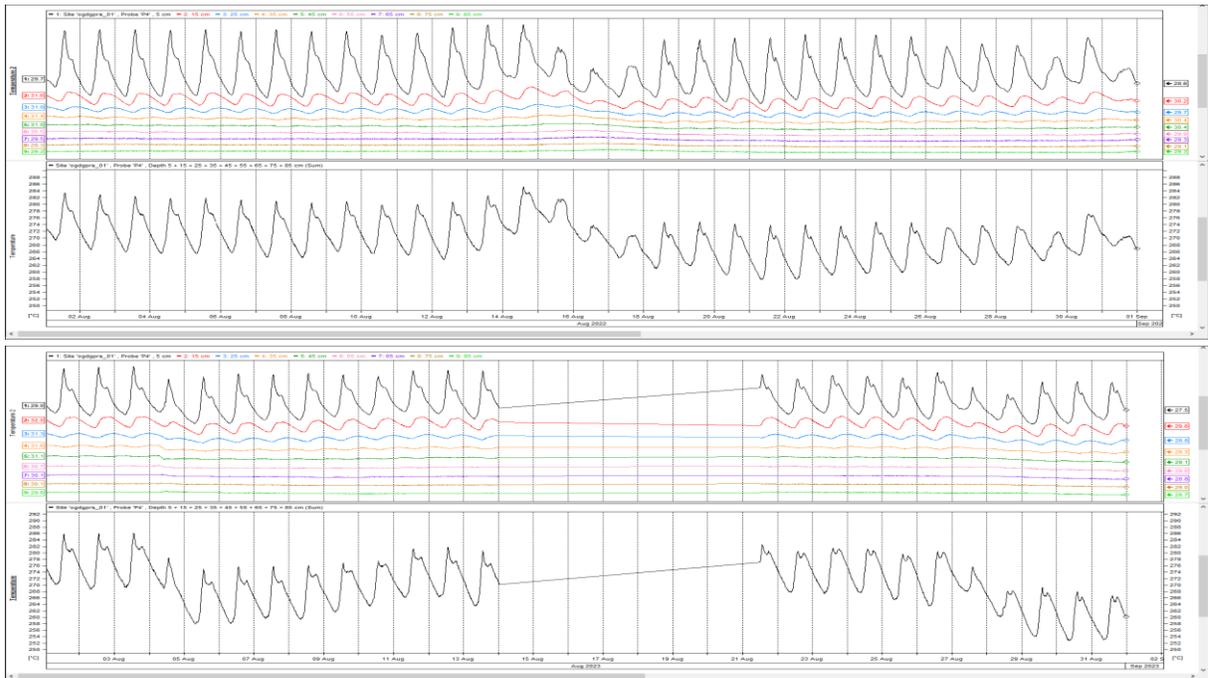
En 2022 comme en 2023 (Fig.112), la température fluctue énormément dans les trente – cinq premiers centimètres du sol ; avec H<sub>5</sub> étant l'horizon où le maximum de fluctuations a été relevé. L'observation générale de la courbe cumul sur deux années, montre une tendance croissante au fil des jours jusqu'au 25 juillet ou la tendance de la température est opposée. En effet à partir de cette date jusqu'à la fin du mois, pendant que la température continue de croître en 2022, elle décroît par contre à partir de cette même date en 2023 jusqu'à la fin du mois. Aussi, par rapport à 2022, les températures dans le sol ont été plus importantes en 2023.



**Figure 112.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Juillet, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Août**

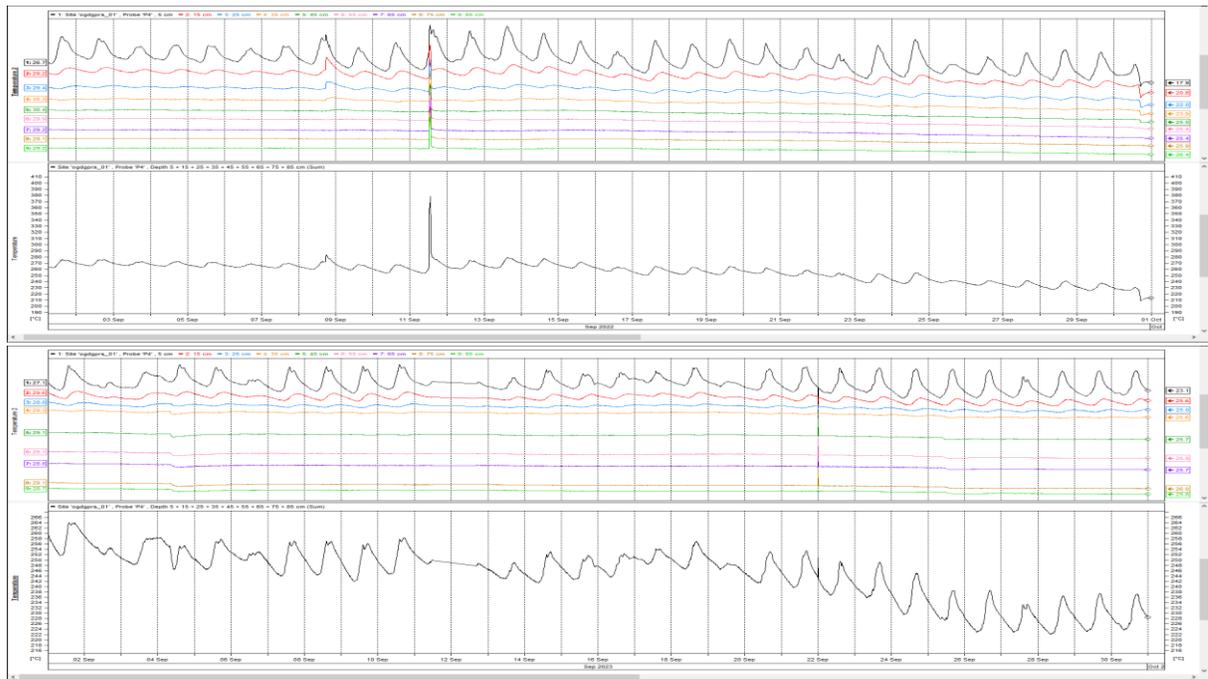
Aussi bien en 2022 qu'en 2023 (Fig.113), la température fluctue principalement dans les horizons allant de H<sub>5</sub>- H<sub>35</sub> ; avec H<sub>5</sub> étant celui où le maximum de fluctuations est relevé. L'observation du cumul de 2022 montre des fluctuations de températures beaucoup plus importantes dans les quinze premiers jours du mois ; et beaucoup moins dans le reste du mois. Par contre en 2023, ses fluctuations sont plus importantes dans les trois (03) premiers jours. Ensuite, elles vont légèrement chuter avant de croître jusqu'au 27/08/2023 ou elles vont chuter à nouveau et se stabiliser ; jusqu'à la fin du mois.



**Figure 113.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Août, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Septembre**

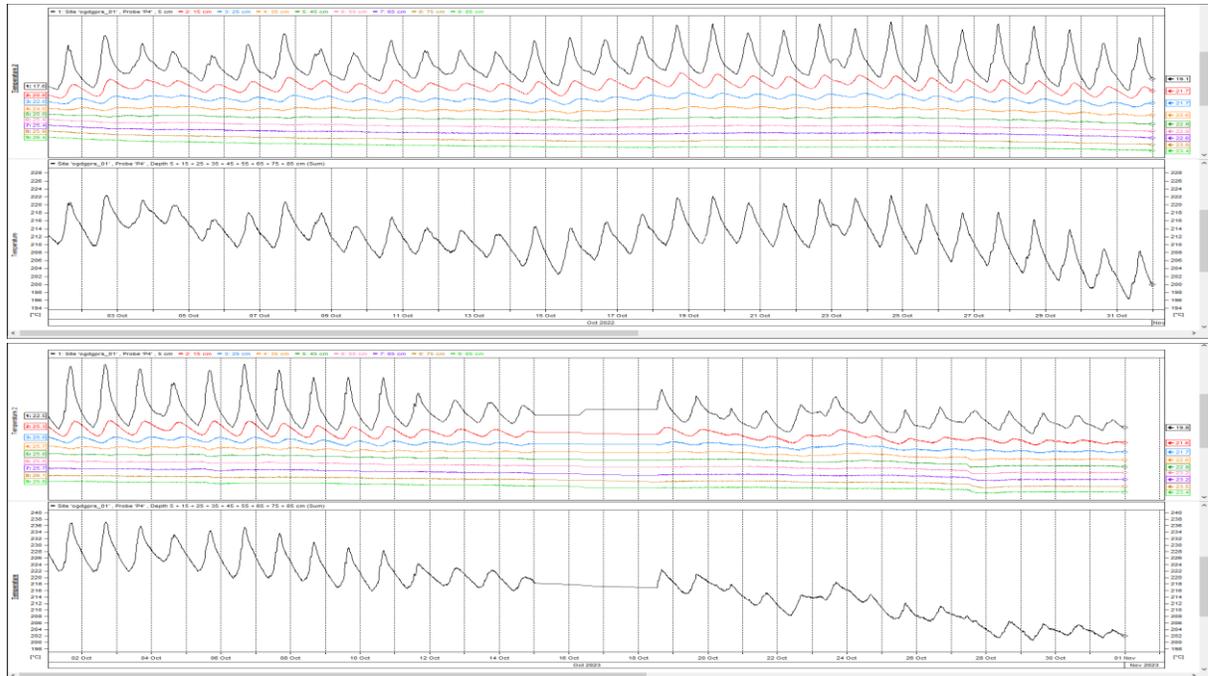
De 2022 à 2023 (Fig.114), les fluctuations sont importantes dans les trente – cinq premiers centimètres de profondeur du sol. Mais par la suite, elles diminuent et sont plus stables au fur et à mesure qu’on va en profondeur. Cependant en 2022, un comportement s’observe entre le 11/09/2022 et le 13/09/2022 dans l’illustration capteur par capteur. Il s’agit d’une élévation brève de la température dans le sol. Cependant en dehors de cette exception aussi visible dans l’illustration cumul, la tendance de la température dans le sol est beaucoup plus décroissante. Ces observations sont les mêmes opérées en 2023 à l’exception du comportement identifier précédemment.



**Figure 114.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Septembre, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Octobre**

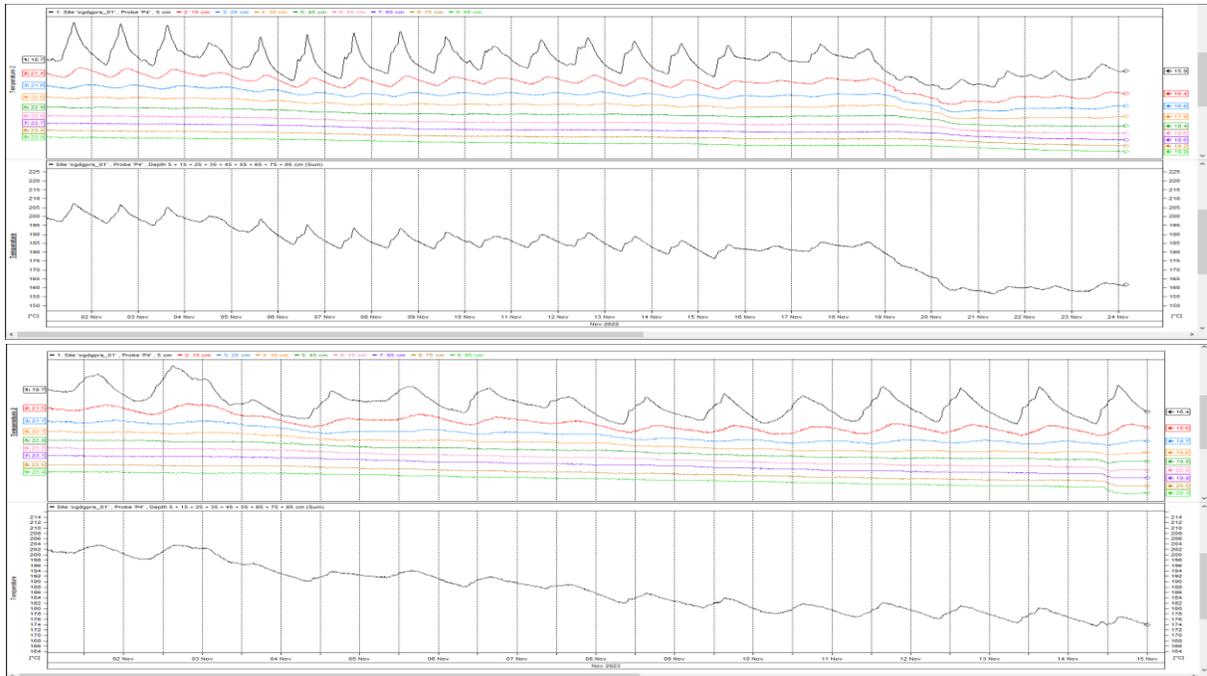
La comparaison des deux années (Fig.115), montre que les variations de températures dans le sol sont plus visibles dans les trente – cinq premiers centimètres de profondeur. L’illustration cumul de ce paramètre montre qu’en 2022, la température dans le sol diminue dans les quinze premiers jours, avant de croître à nouveau jusqu’au 25/10/2022 et diminuer par la suite. Cependant en 2023, elle décroît progressivement tout le long du mois.



**Figure 115.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois d’Octobre, dans la sonde 3 sur deux ans

- **Novembre**

Fluctuant de part et d’autre d’année en année (2022 - 2023), la température dans le sol (Fig.116) a tendance à décroître au fil des jours ; aussi bien en 2022 qu’en 2023. Entraînant un comportement presque pareil sur deux ans. Mais avec des températures un peu plus élevées en 2023 qu’en 2022. L’allure de fluctuations de températures dans le sol capteur par capteur est la même. En effet, des fluctuations élevées dans les vingt – cinq premiers centimètres sont observés ; suivit d’une diminution puis stabilisation dans les horizons plus profonds



**Figure 116.** Evolution de la température dans le sol pendant le mois de Novembre, dans la sonde 3 sur deux ans

En définitif, l'évaluation de la température dans le sol par mois a permis de ressortir plusieurs résultats dans chaque sonde.

- **Sonde 1**

L'observation de fluctuations de température dans le sol pendant deux ans dans chaque mois, montre qu'elles sont plus élevées dans les quatre premiers horizons du sol ( $H_5 - H_{35}$ ), avec en tête  $H_5$ . Cependant Novembre et Août font exception à la règle en terme du nombre d'horizon impactés (2 horizons du sol en 2022 pour Août et 2023 pour Novembre ; 3 horizons du sol en 2022 pour Novembre). Par ailleurs, plus on va en profondeur, plus la température dans le sol diminue.

- **Sonde 2**

En général, T fluctue plus dans les horizons  $H_5 - H_{35}$  sur deux ans ; avec  $H_5$  étant en tête de liste. Néanmoins, deux mois font exceptions à la règle en terme du nombre de couches impactés par T. Il s'agit de Septembre avec plutôt cinq couches ( $H_5 - H_{45}$ ) et Novembre avec trois

couches (H<sub>5</sub> – H<sub>25</sub>). Comme précédemment, T diminue dans le sol au fur et à mesure que la profondeur augmente.

- **Sonde 3**

Sur deux ans, H<sub>5</sub> – H<sub>35</sub> représentent les horizons fortement impactés par la température ; avec H<sub>5</sub> en tête. En effet au cinquième mois (Novembre), c'est plutôt les couches de 5 à 25 cm de profondeur, qui sont les plus impactées. T diminue dans le sol au fur et à mesure que la profondeur augmente.

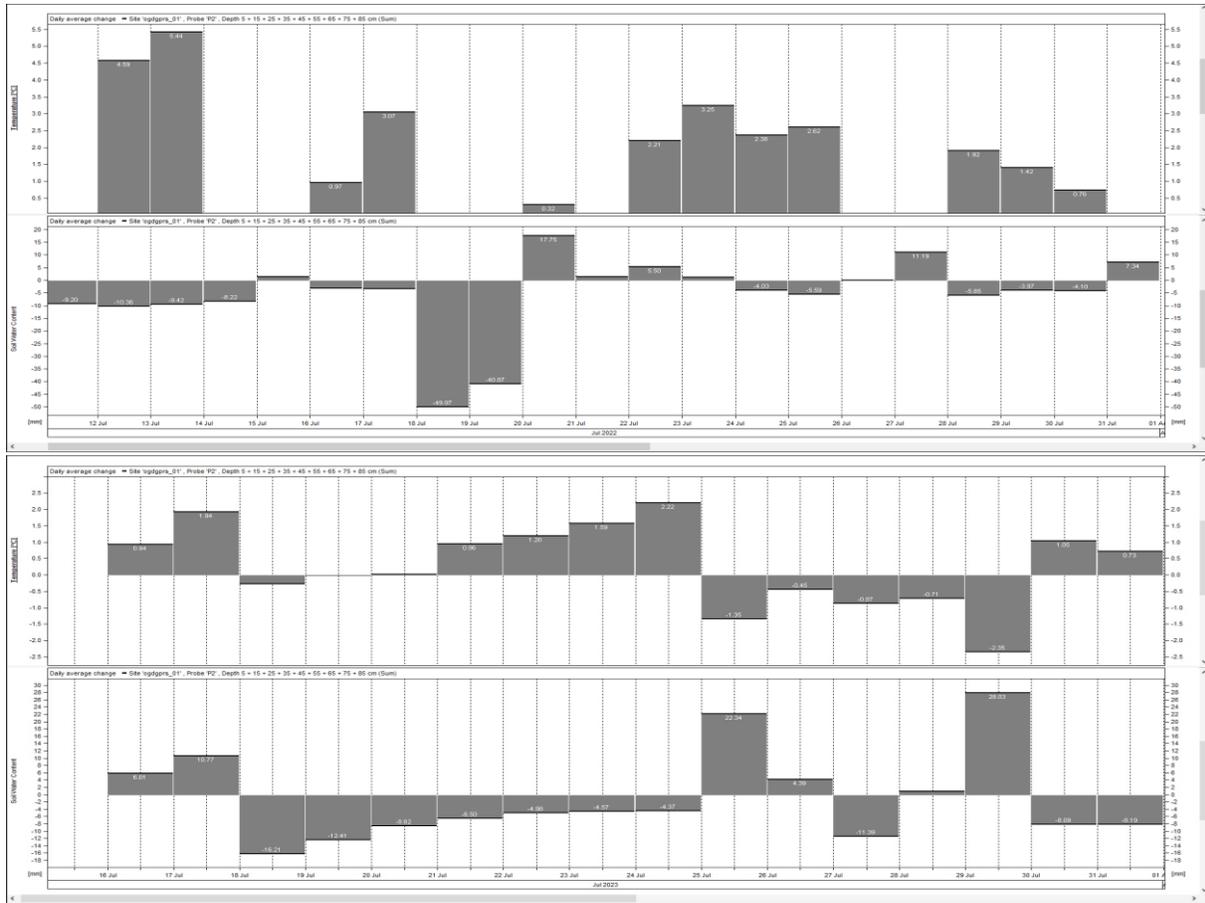
### **VI.2.3 Analyse journalière des totaux d'humidité et de température dans le sol**

Afin d'analyser les totaux journaliers d'humidité (SWC) et de température (T) dans le sol, le long d'un profil de 85 cm de profondeur, des illustrations par sonde installée en champ (S1, S2 et S3) ont été réalisées suivant chaque mois de chaque campagne effectuée. Notons que ces totaux sont aussi bien positifs (gain) que négatifs (pertes). Les mois pris en considération sont Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre. Rappelons que S1 a été installé dans un système d'irrigation goutte à goutte souterrain de 15 cm de profondeur, S2 dans celui de surface et S3 dans un système d'irrigation localisé à 30 cm de profondeur.

#### **1) Etude comparative des totaux journaliers d'humidité (SWC) et de température (T) du sol au niveau de S1 sur deux ans (2022 – 2023)**

- **Juillet**

Les illustrations de SWC et T en 2022 (Fig.117), présentent au cours du mois, la perte quotidienne de SWC allant de 3,97 à 49,97 mm par la plante, quand les fluctuations quotidiennes de T augmentent de 0,32 à 5,44 °C. Tout comme quand T est de 0 °C, SWC augmente de 0 à 17,75 mm par jour au total. En 2023 (Fig.117), la plante perd quotidiennement entre 4,37 et 16,21 mm d'eau quand T augmente de 0 à 2,22 °C par jour au total. Tout comme lorsque les fluctuations de T baissent de 0 à 2,35 °C par jour, la plante reçoit des apports d'eau journalier augmentant SWC de 0,5 mm à 28,03 mm sur un profil de 85 cm de profondeur.



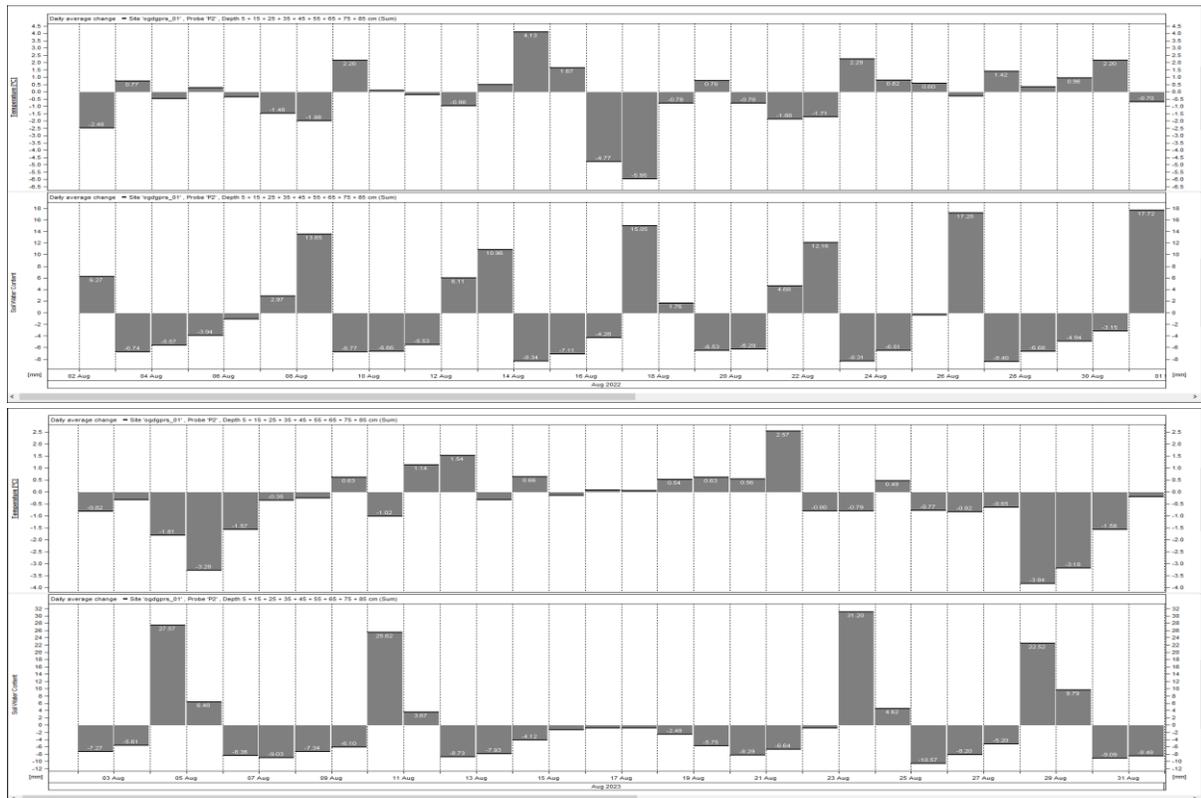
**Figure 117.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 1 pendant deux saisons

- **Août**

En 2022 (Fig.118), suite à l’illustration des graphes de T et SWC, des fluctuations de T par jour, allant jusqu’à 4,13°C au maximum (14 – 15 Août 2022) sont observés. Entraînant au sein de la plante, une perte au même moment de 8,34 mm d’eau. Notons aussi du 17 – 18 Août 2022, pendant qu’une baisse journalière de 5,95°C de T s’observe, la plante reçoit au même instant un apport d’eau journalier de 15,05 mm d’eau. Le maximum journalier étant de 17,72 mm de SWC. Par ailleurs tout le long du mois, la plante perd quotidiennement 2 à 8,34 mm d’eau, quand les fluctuations quotidiennes de T augmentent de 0,5 à 4,13 °C. Tout comme quand T baisse de 0,70 à 5,95 °C, SWC augmente de 1,76 à 17,72 mm par jour au total.

En 2023 (Fig.118), la plante perd quotidiennement entre 2,48 et 10,57 mm d’eau quand T augmente d’environ 0,49 à 2,57 °C par jour au total. Tout comme lorsque les fluctuations

baissent de 0,35 à 3,84 °C par jour, la plante reçoit des apports d'eau journalier variant de 3,67 mm à 31,20 mm sur un profil de 85 cm de profondeur.

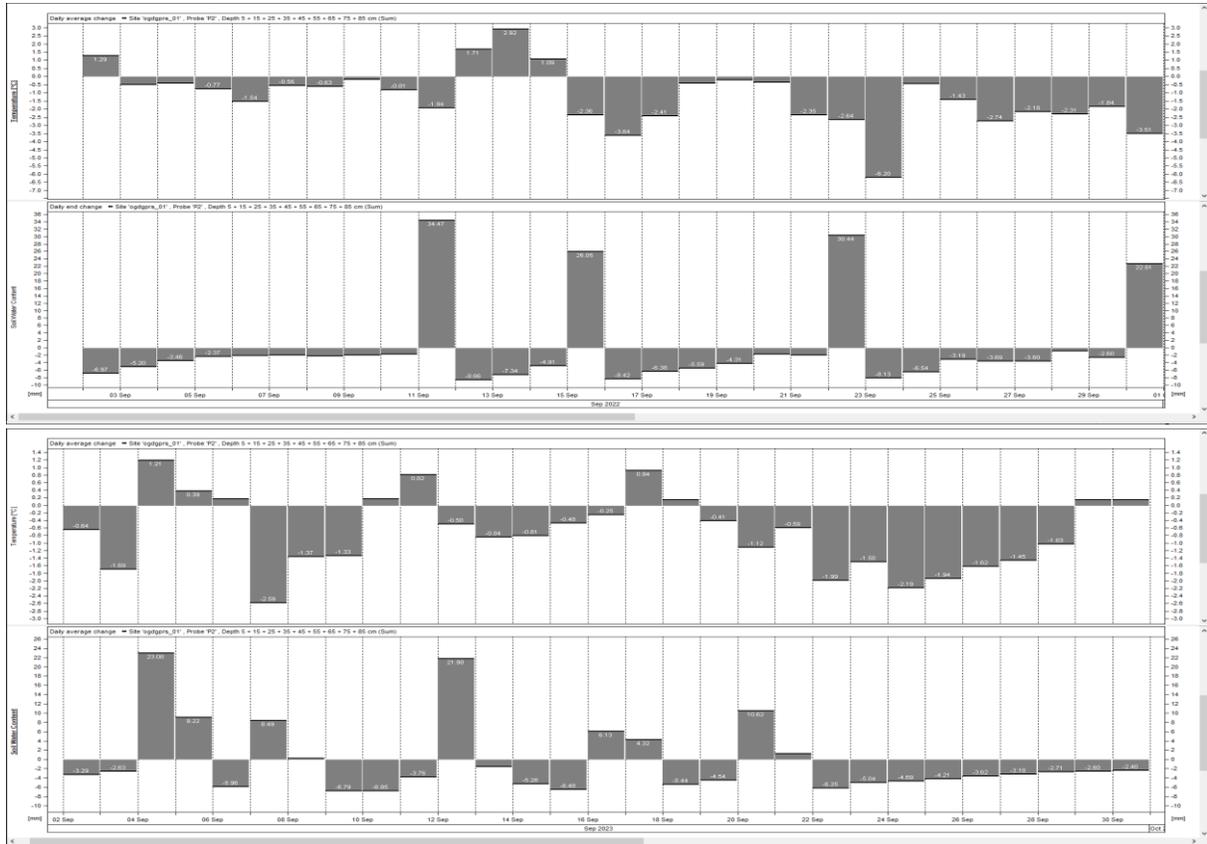


**Figure 118.** Totaux journaliers d'humidité et température dans le sol enregistré au mois d'Août, dans la sonde 1 pendant deux saisons

- **Septembre**

Les totaux de SWC et T pendant deux ans ont été enregistrés quotidiennement durant chaque saison. A la première année 2022 (Fig.119), leurs observations traduisent une perte journalière par la plante de SWC allant de 2,37 à 8,66 mm d'eau ; suite à un gain de T variant de 1,09 à 2,92 °C par jour. De même lorsque T baisse d'environ 0,56 à 6,20°C, SWC augmente de 22,81 à 34,47 mm d'eau par jour au sein de la plante suite à des apports d'eau.

A la deuxième année 2023 (Fig.119), lorsque la plante perd entre 2,40 et 6,85 mm par jour de SWC, les fluctuations de T augmentent de 0,2 à 1,21 °C par jour. De la même manière que quand T diminue par jour de 0,25 à 2,59 °C, SWC augmente par jour de 0,1 à 23,08 mm au sein de la plante par des apports en eau.

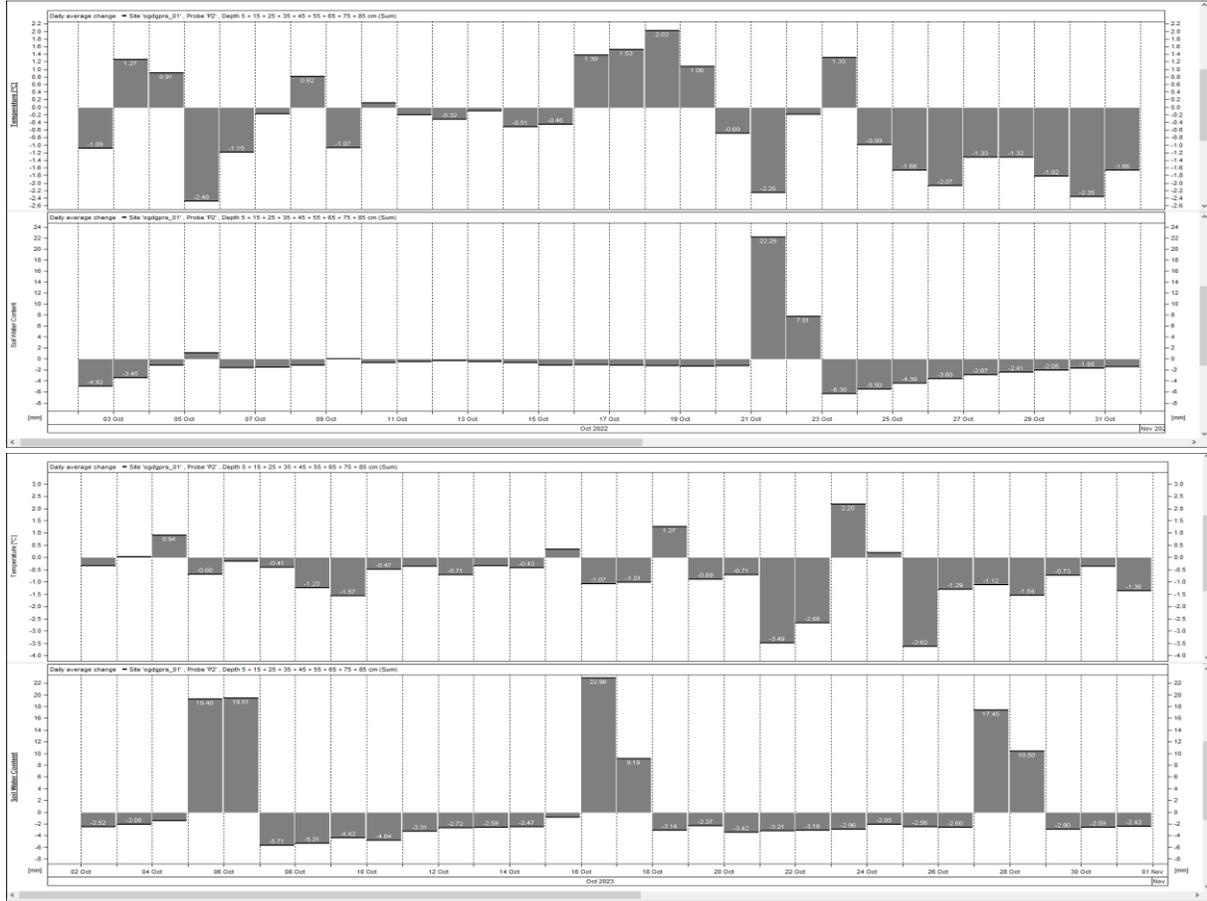


**Figure 119.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 1 pendant deux saisons

- **Octobre**

Durant l’année 2022 (Fig.120), la plante perd quotidiennement 0 à 6,30 mm d’eau, quand les fluctuations quotidiennes de T augmentent de 0,2 à 2,03 °C. Tout comme quand T baisse de 0,32 à 2,48 °C, SWC augmente de 0 à 22,29 mm par jour au total.

En 2023 (Fig.120), la plante perd quotidiennement entre 2 à 5,71 mm d’eau quand T augmente de 0 à 2,20 °C par jour au total. Tout comme lorsque les fluctuations baissent de 0 à 3,62 °C par jour, la plante reçoit des apports d’eau journalier variant entre 9,19 mm à 22,96 mm sur un profil de 85 cm de profondeur.

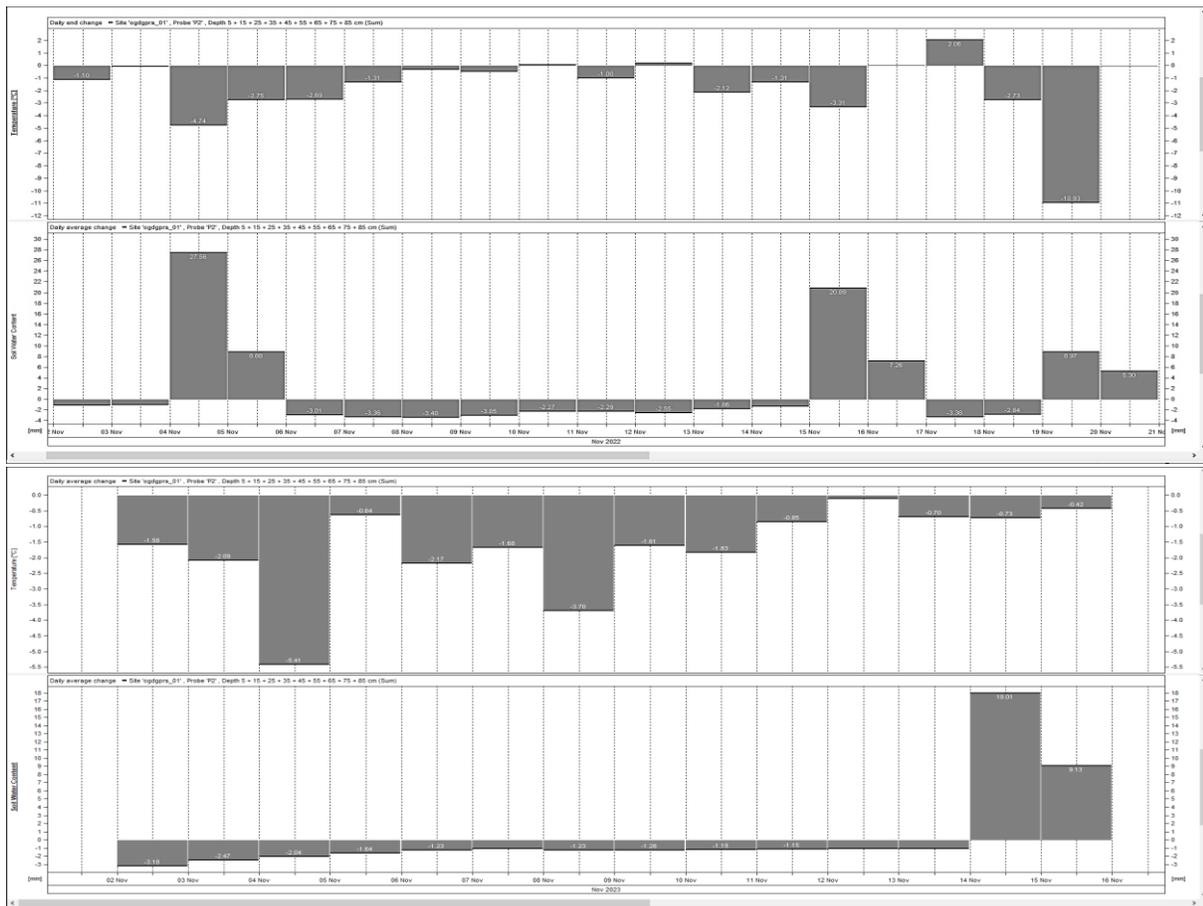


**Figure 120.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Octobre, dans la sonde 1 pendant deux saisons

- **Novembre**

Les illustrations de différents totaux journalier de T et SWC (Fig.121) montrent qu’en 2022, la plante perd environ 1,86 à 3,40 mm d’eau, quand T fluctue de 0 à 2,06 °C. Tout comme quand T diminue de 0,1 à 10,93 °C, SWC augmente de 5,30 à 27,56 mm par jour au total.

A l’année 2023 (Fig.121), quand la plante perd entre 1,15 et 3,18 mm d’eau par jour, T ne croît du tout pas car il est de 0°C par jour au total. Tout comme lorsque T baisse de 0,42 à 5,41 °C par jour, la plante reçoit des apports d’eau journalier variant entre 9,13 mm à 18,01 mm sur un profil de 85 cm de profondeur.



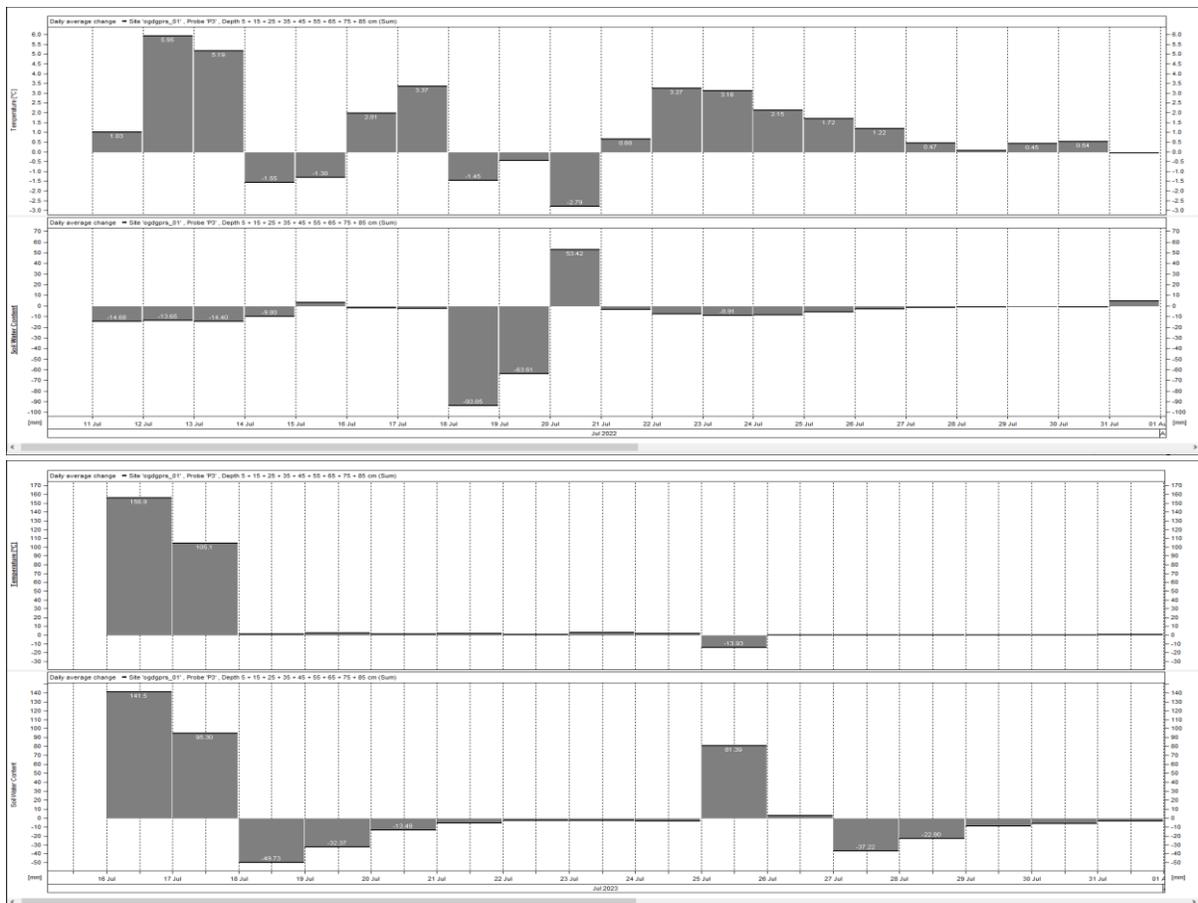
**Figure 121.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 1 pendant deux saisons

**2) Etude comparative des totaux journaliers d’humidité (SWC) et de température (T) du sol au niveau de S2 sur deux ans (2022 – 2023)**

**• Juillet**

A la première année 2022 (Fig.122), l’observation générale des graphiques traduit une perte journalière par la plante de SWC allant de 0 à 93,85 mm d’eau ; suite à un gain de T variant entre 0,1 à 5,95°C par jour. De même lorsque T baisse de 0 à 2,79°C, SWC augmente de 0 à 53,42 mm d’eau par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.122), lorsque la plante perd entre 0,1 et 49,73 mm par jour de SWC, les fluctuations de T augmentent de 0 à 156,9 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0 à 13,93 °C, SWC augmente par jour de 0 à 141,5 mm au sein de la plante.

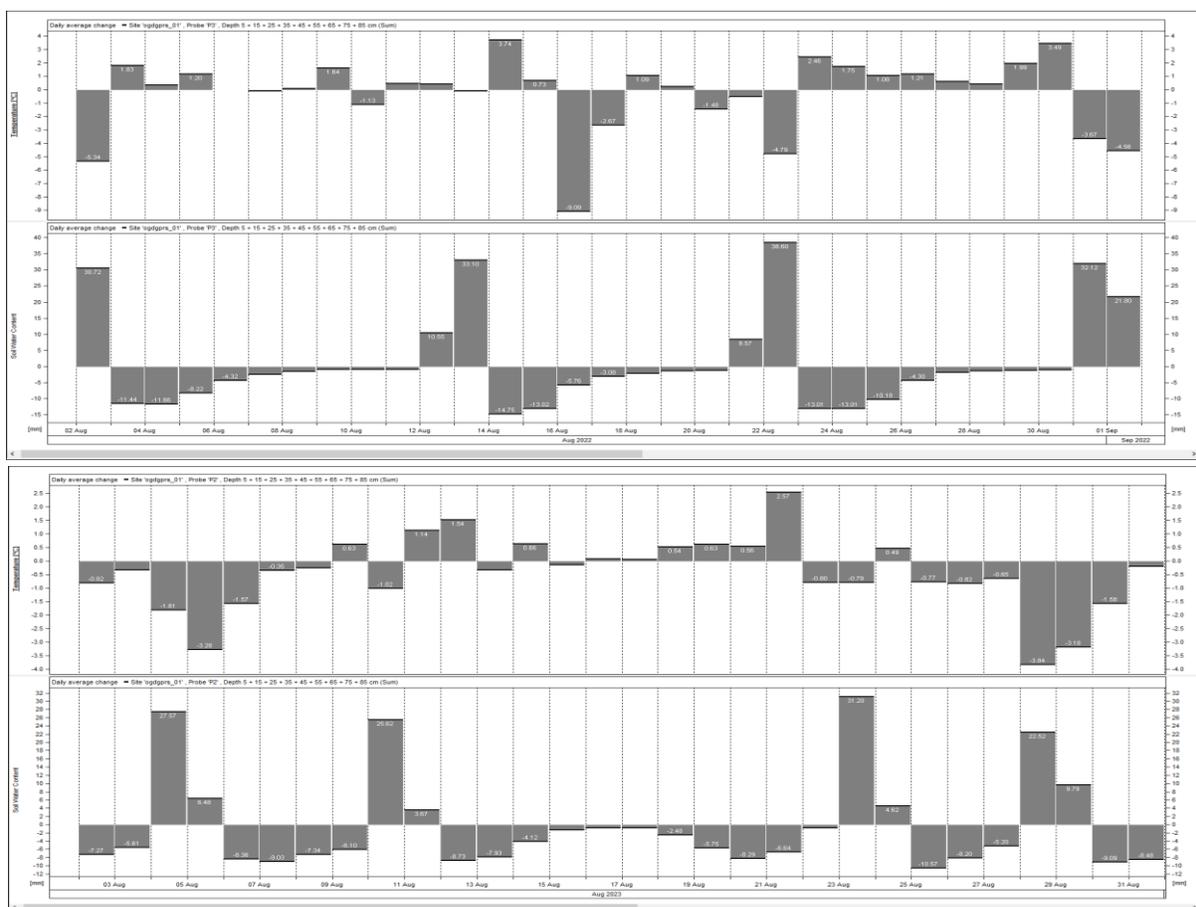


**Figure 122.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 2 pendant deux saisons

- **Août**

En 2022 (Fig.123), les différentes illustrations traduisent une perte journalière par la plante de SWC variant de 0,2 à 14,75 mm d’eau ; suite à un gain de T de 0 à 3,74°C par jour. De même lorsque T baisse de 0 à 9,09°C, SWC augmente de 0 à 38,60 mm d’eau par jour au sein de la plante.

En 2023 (Fig.123), quand la plante perd entre 0,1 et 10,57 mm par jour de SWC, T fluctue de 0,1 à 2,57 °C par jour. Tout comme quand T baisse par jour de 0,2 à 3,84 °C, SWC augmente par jour de 3,67 à 31,20 mm au sein de la plante.

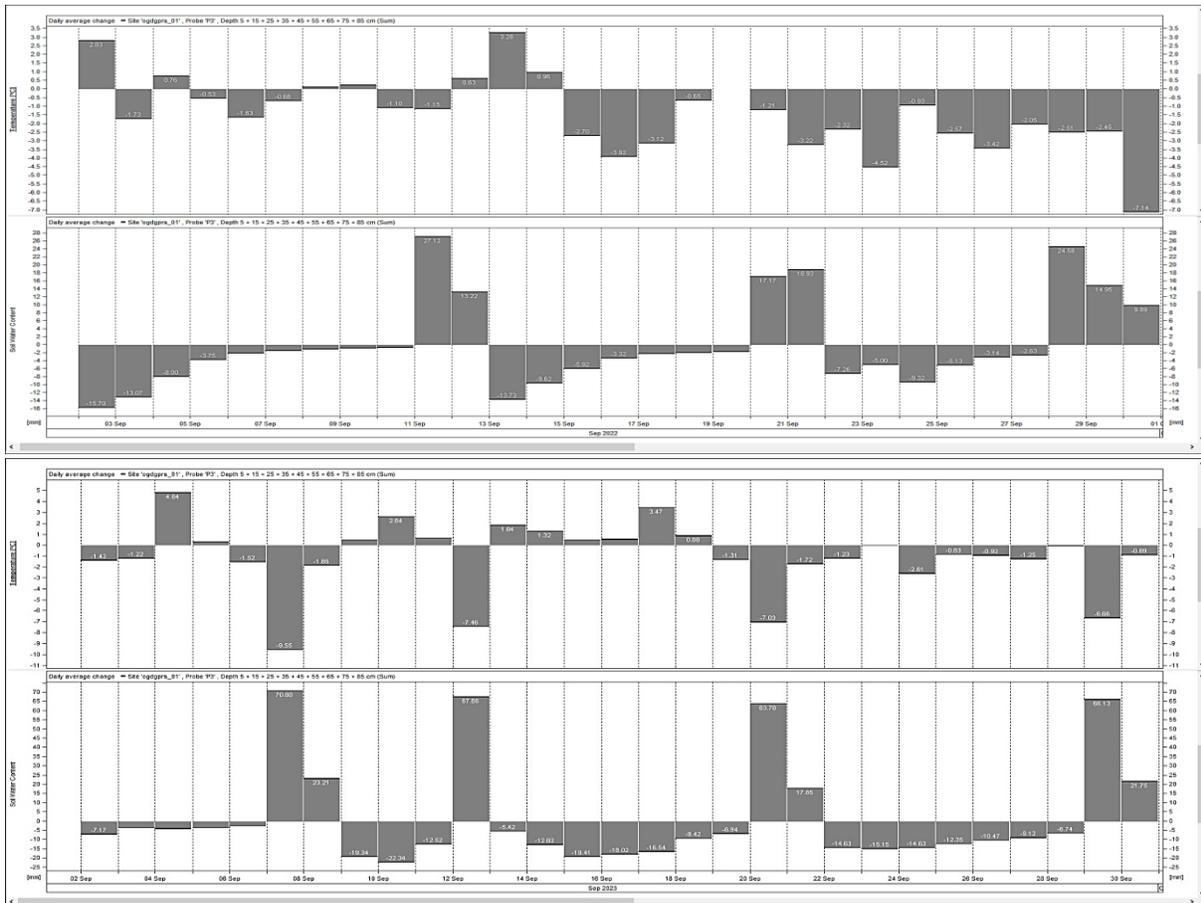


**Figure 123.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Août, dans la sonde 2 pendant deux saisons

- **Septembre**

A la première année 2022 (Fig.124), l’observation générale des graphiques présente une perte journalière par la plante de SWC allant de 2 à 15,70 mm, suite à un gain de T variant entre 0 et 3,28°C par jour. De même lorsque T baisse de 0 à 7,14°C, SWC augmente de 0 à 27,12 mm d’eau par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.124), lorsque la plante perd 5,42 à 22,34 mm par jour de SWC, T augmente de 0,33 à 4,84 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0 à 9,55°C, SWC croît par jour de 17,85 à 70,80 mm au sein de la plante avec l’apport d’eau.

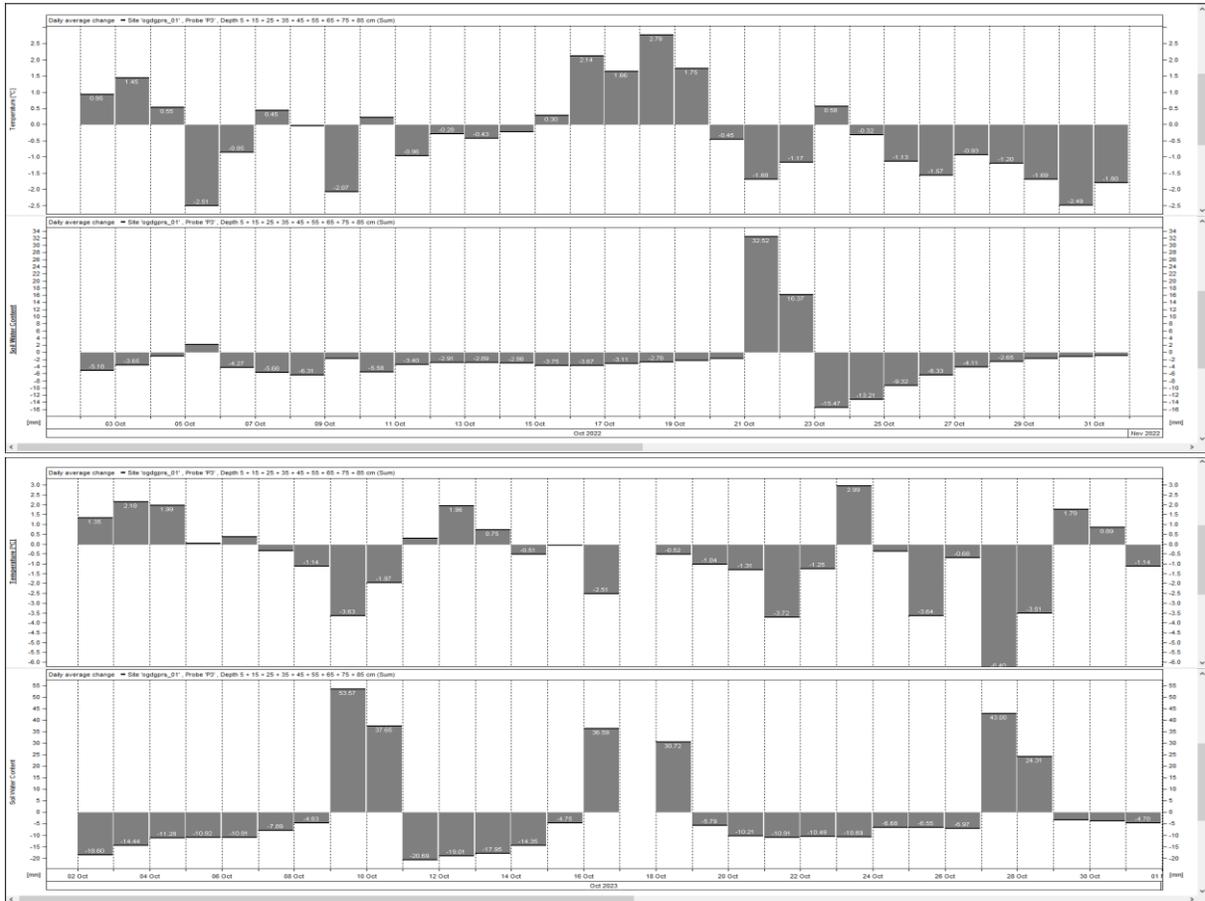


**Figure 124.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 2 pendant deux saisons

- **Octobre**

A l’année 2022 (Fig.125), les différentes illustrations traduisent une perte journalière par la plante de SWC variant de 2,65 à 15,47 mm d’eau ; suite à un gain de T allant de 0 à 2,78°C par jour. Tout comme lorsque T baisse de 0,28 à 2,51°C, SWC augmente de 2 à 32,52 mm d’eau par jour au sein de la plante.

En 2023 (Fig.125), quand la plante perd entre 4,70 et 20,69 mm par jour de SWC, T fluctue de 0,1 à 2,99 °C par jour. De la même façon, quand T baisse par jour de 0 à 6,40 °C, SWC augmente par jour de 24,31 à 53,57 mm au sein de la plante.

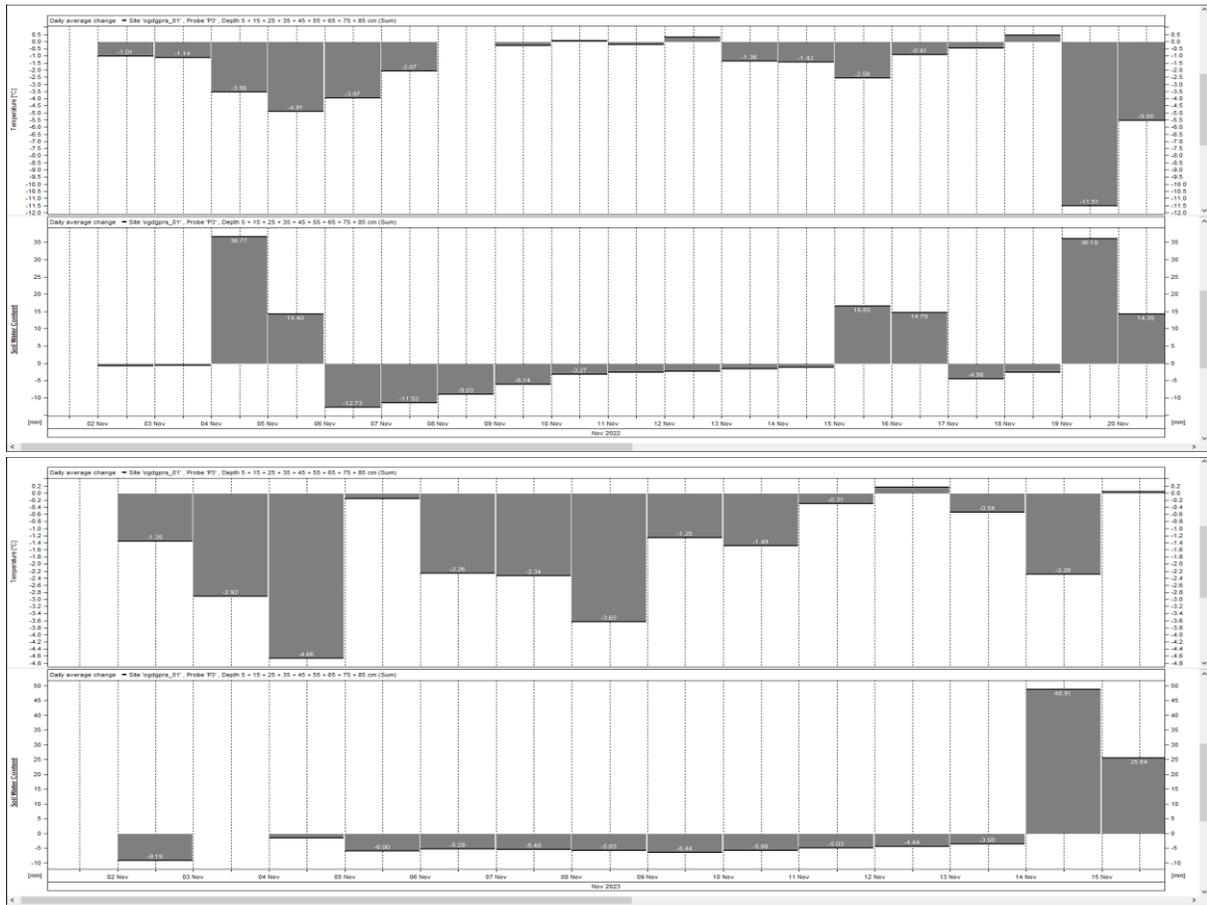


**Figure 125.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Octobre, dans la sonde 2 pendant deux saisons

- **Novembre**

A la première année 2022 (Fig.126), une perte journalière par la plante de SWC allant de 0 à 12,73 mm d’eau est observée ; suite à un gain de T variant de 0 à 0,5°C par jour. De même lorsqu’il y a diminution de T variant de 1,01 à 11,51°C, SWC augmente suite à des apports d’eau de 0 à 36,77 mm par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.126), lorsque la plante perd 3,58 à 9,19 mm par jour de SWC, T croît de 0 à 0,2 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0,31 à 4,66°C, SWC croît par jour de 25,64 à 48,91 mm au sein de la plante avec apport d’eau.



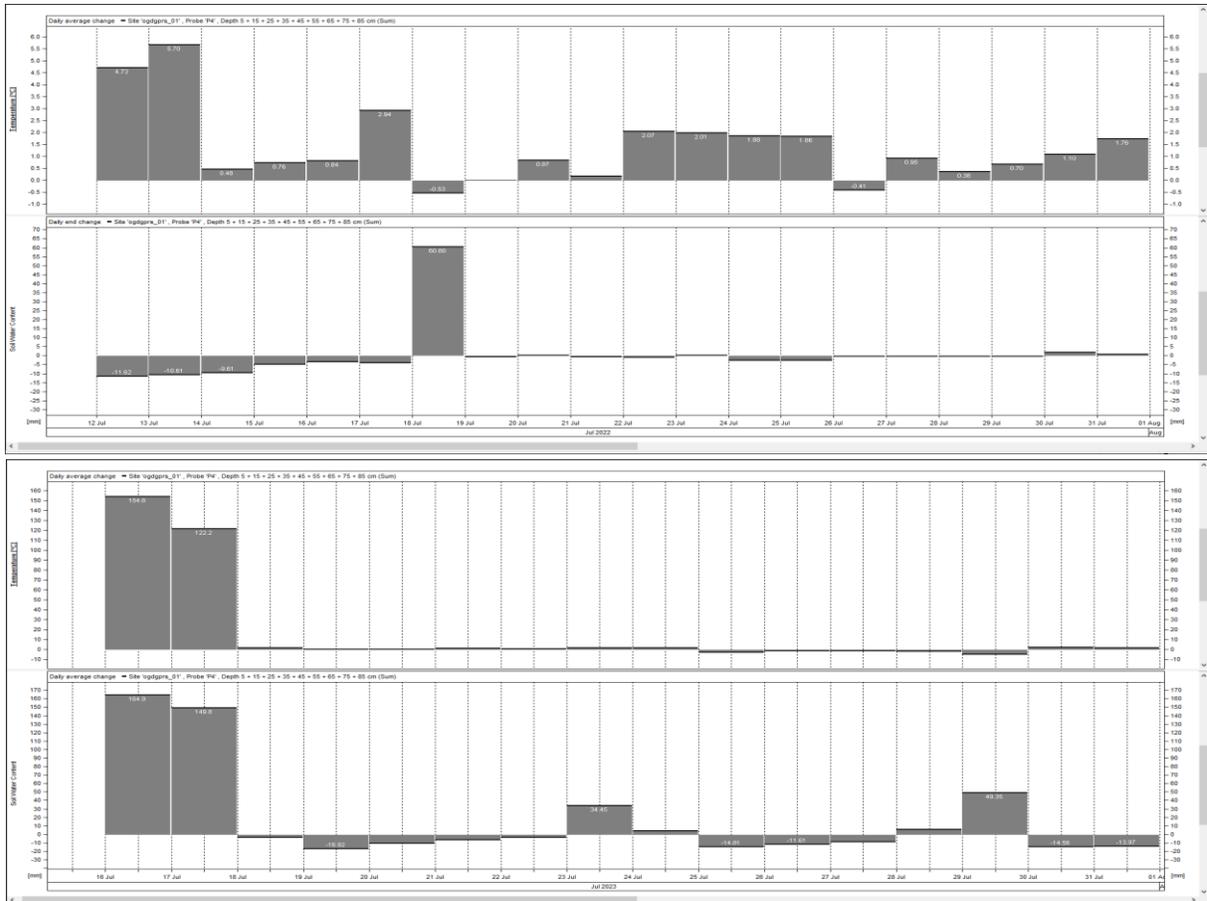
**Figure 126.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 2 pendant deux saisons

### 3) Etude comparative des totaux journaliers d’humidité (SWC) et de température (T) du sol au niveau de la sonde 3 (S3) sur deux ans (2022 – 2023)

- **Juillet**

A la première année 2022 (Fig.127), l’observation générale des graphiques présente une perte journalière par la plante de SWC allant de 0 à 11,62 mm d’eau ; suite à un gain de T allant de 0 à 5,70°C par jour. De même lorsque T baisse de 0 à 0,53°C, SWC augmente de 0 à 60,80 mm d’eau par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.127), quand la plante perd 0,1 à 16,92 mm par jour de SWC, T augmente de 0 à 154,8 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0 à 0,5 °C, SWC croît par jour de 0,5 à 164,9 mm au sein de la plante grâce à l’apport d’eau.

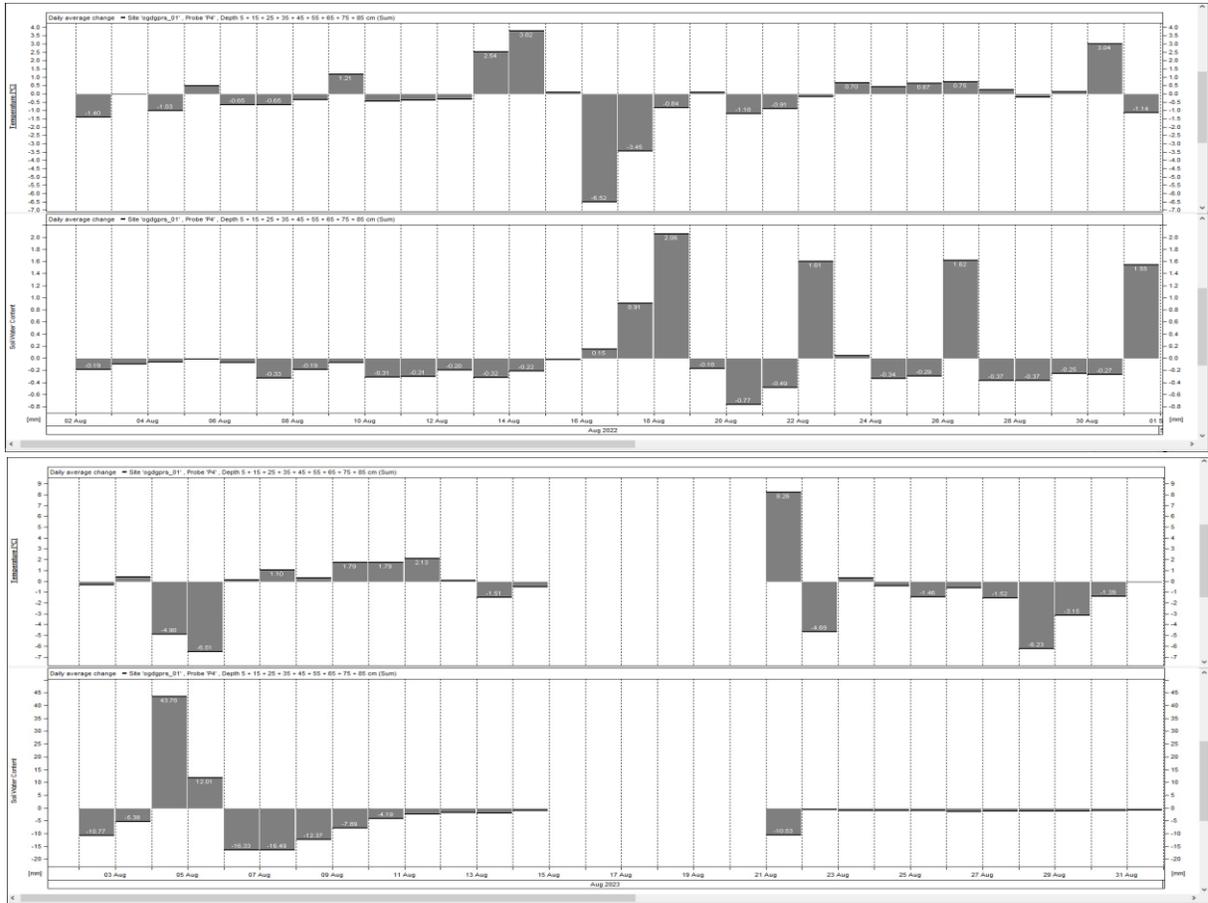


**Figure 127.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Juillet, dans la sonde 3 pendant deux saisons

- **Août**

A la première année 2022 (Fig.128), l’observation des graphes identifie une perte journalière par la plante de SWC allant de 0 à 0,77 mm d’eau ; suite à un gain de T variant entre 0 à 3,82°C par jour. De même lorsque T baisse de 0 à 6,52°C, SWC augmente de 0 à 2,06 mm d’eau par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.128), lorsque la plante perd 0 à 16,49 mm par jour de SWC, T augmente de 0 à 8,26 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0 à 6,51°C, SWC croît par jour de 0 à 43,78 mm au sein de la plante avec l’apport d’eau.

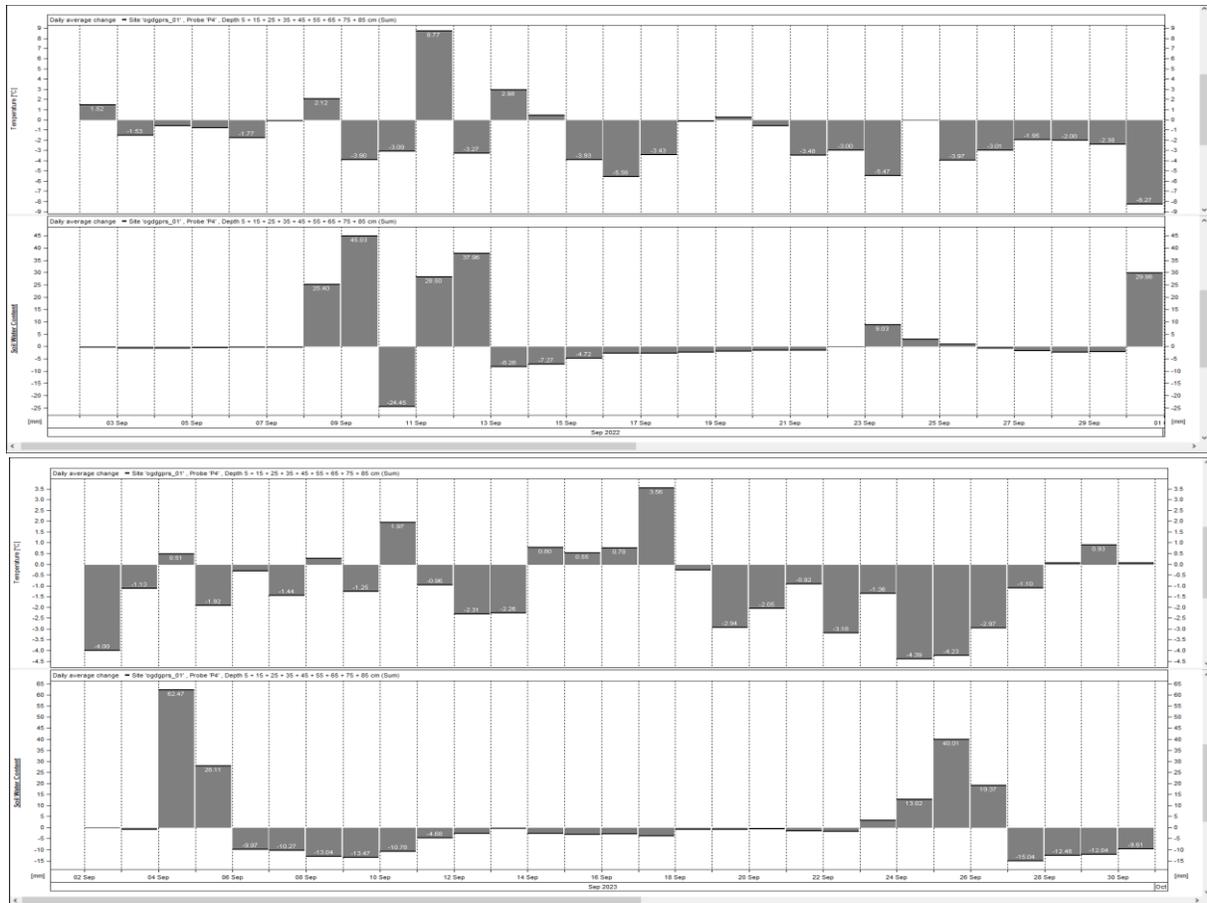


**Figure 128.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Août, dans la sonde 3 pendant deux saisons

- **Septembre**

En 2022 (Fig.129), les différentes illustrations traduisent une perte journalière par la plante de SWC variant de 0 à 24,45 mm d’eau ; suite à un gain de T de 0 à 8,77°C par jour. Tout comme lorsque T baisse de 0 à 8,27°C, SWC augmente de 0 à 45,03 mm d’eau par jour au sein de la plante.

En 2023 (Fig.129), quand la plante perd entre 0 et 15,04 mm par jour de SWC, T fluctue de 0 à 3,56 °C par jour. De la même façon, quand T baisse par jour de 0,96 à 4,39 °C, SWC augmente par jour de 0 à 62,47 mm au sein de la plante.

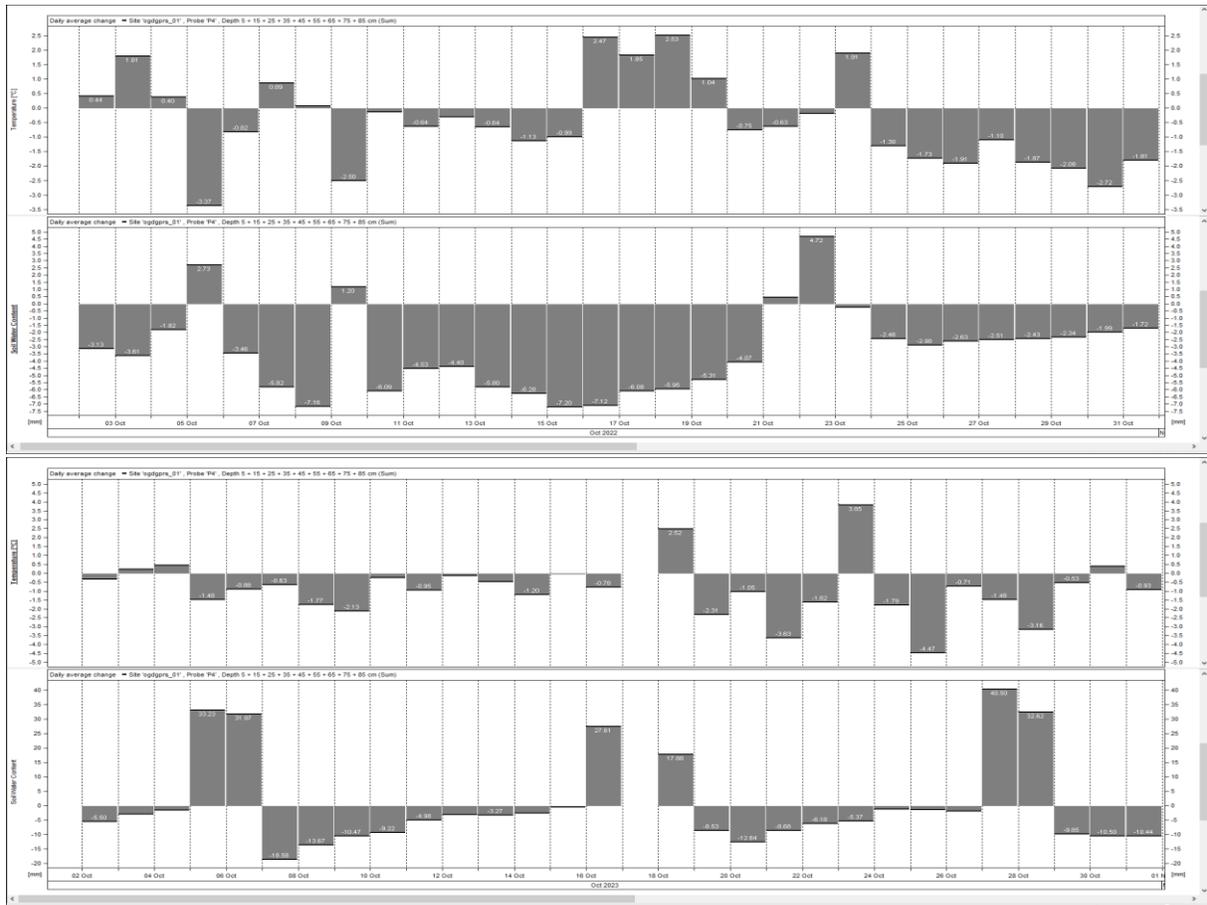


**Figure 129.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Septembre, dans la sonde 3 pendant deux saisons

- **Octobre**

En 2022 (Fig.130), les illustrations traduisent une perte journalière par la plante de SWC variant de 0,5 à 7,20 mm d’eau ; suite à un gain de T de 0,2 à 2,53°C par jour. Tout comme lorsque T baisse de 0,63 à 3,37°C, SWC augmente de 1 à 4,72 mm d’eau par jour au sein de la plante.

En 2023 (Fig.130), quand la plante perd entre 0 et 18,58 mm par jour de SWC, T fluctue de 0 à 3,85 °C par jour. De la même manière, quand T baisse par jour de 0 à 4,47 °C, SWC augmente par jour de 0 à 40,50 mm au sein de la plante.

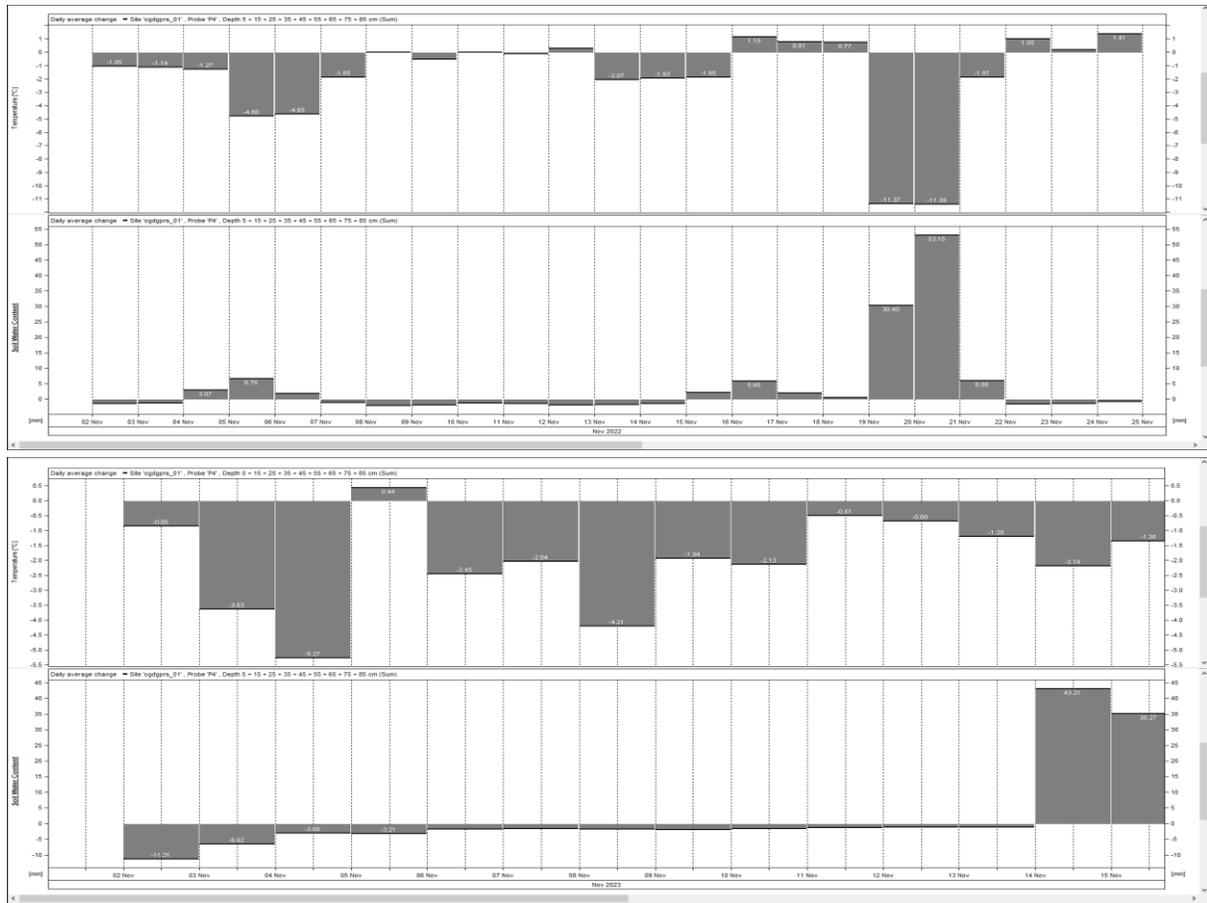


**Figure 130.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois d’Octobre, dans la sonde 3 pendant deux saisons

- **Novembre**

A la première année 2022 (Fig.131), une perte journalière par la plante de SWC allant de 0 à 0,5 mm d’eau est observée ; suite à un gain de T variant de 0 à 1,41°C par jour. De même lorsqu’il y a diminution de T variant de 1,05 à 11,39°C, SWC augmente suite à des apports d’eau de 0 à 53,15 mm par jour au sein de la plante.

A la deuxième année 2023 (Fig.131), lorsque la plante perd 2 à 11,31 mm par jour de SWC, T croît de 0 à 0,44 °C par jour. Tout comme quand T diminue par jour de 0,55 à 5,27°C, SWC croît avec apport d’eau de 35,27 à 43,21 mm au sein de la plante.



**Figure 131.** Totaux journaliers d’humidité et température dans le sol enregistré au mois de Novembre, dans la sonde 3 pendant deux saisons

Après analyse de différents totaux de SWC et T, plusieurs résultats ont été relevés dont la synthèse par sonde.

- **Sonde 1**

Durant la saison, la plante perd en moyenne par jour, 0 à 8.34 mm d’eau quand T augmente de 0 à 5.44°C en 2022. Tout comme, lorsque T baisse de 0 à 10.93 °C, SWC augmente de 0 à 22.29 mm. En 2023, quand T augmente de 0 à 2.57 °C, SWC diminue de 1.15 à 16.21 mm. Aussi, quand T diminue de 0 à 5.41 °C, SWC augmente de 0.1 à 31.20 mm.

- **Sonde 2**

Au cours de la saison, la plante perd en moyenne par jour, 0 à 93.85 mm d’eau quand T augmente de 0 à 5.95°C en 2022. Tout comme, lorsque T diminue de 0 à 11.51 °C, SWC

augmente de 0 à 53.42 mm par jour. En 2023, quand T augmente de 0 à 156.9 °C, SWC diminue de 0.1 à 49.73 mm. Aussi, quand T diminue de 0 à 13.93 °C, SWC augmente de 0 à 141.5 mm.

- **Sonde 3**

En 2022, quand T diminue de 0 à 11.39°C, SWC augmente de 0 à 60.80 mm. Tout comme, lorsque SWC baisse de 0 à 24.45 mm, T augmente de 0 à 8.77°C. En 2023, quand T diminue de 0 à 6.51 °C, SWC augmente de 0 à 164.9 mm. Aussi, quand T augmente de 0 à 154.8 °C, SWC diminue de 0 à 18.58 mm.

#### **VI.2.4 Evaluation de l'humidité du sol de toute la saison**

Pour mieux évaluer le comportement de l'humidité dans le sol (SWC), le long du profil de sol de 85 cm de profondeur, des illustrations par sonde installée en champ (S1, S2 et S3) ont été réalisées dans chaque campagne effectuée. Rappelons que S1 a été installé dans un système d'irrigation goutte à goutte souterrain de 15 cm de profondeur, S2 dans celui de surface et S3 dans un système d'irrigation localisé à 30 cm de profondeur.

##### **1) Etude comparative de l'évolution de l'humidité du sol dans la sonde 1 (S1) pendant deux (02) campagnes (2022 et 2023)**

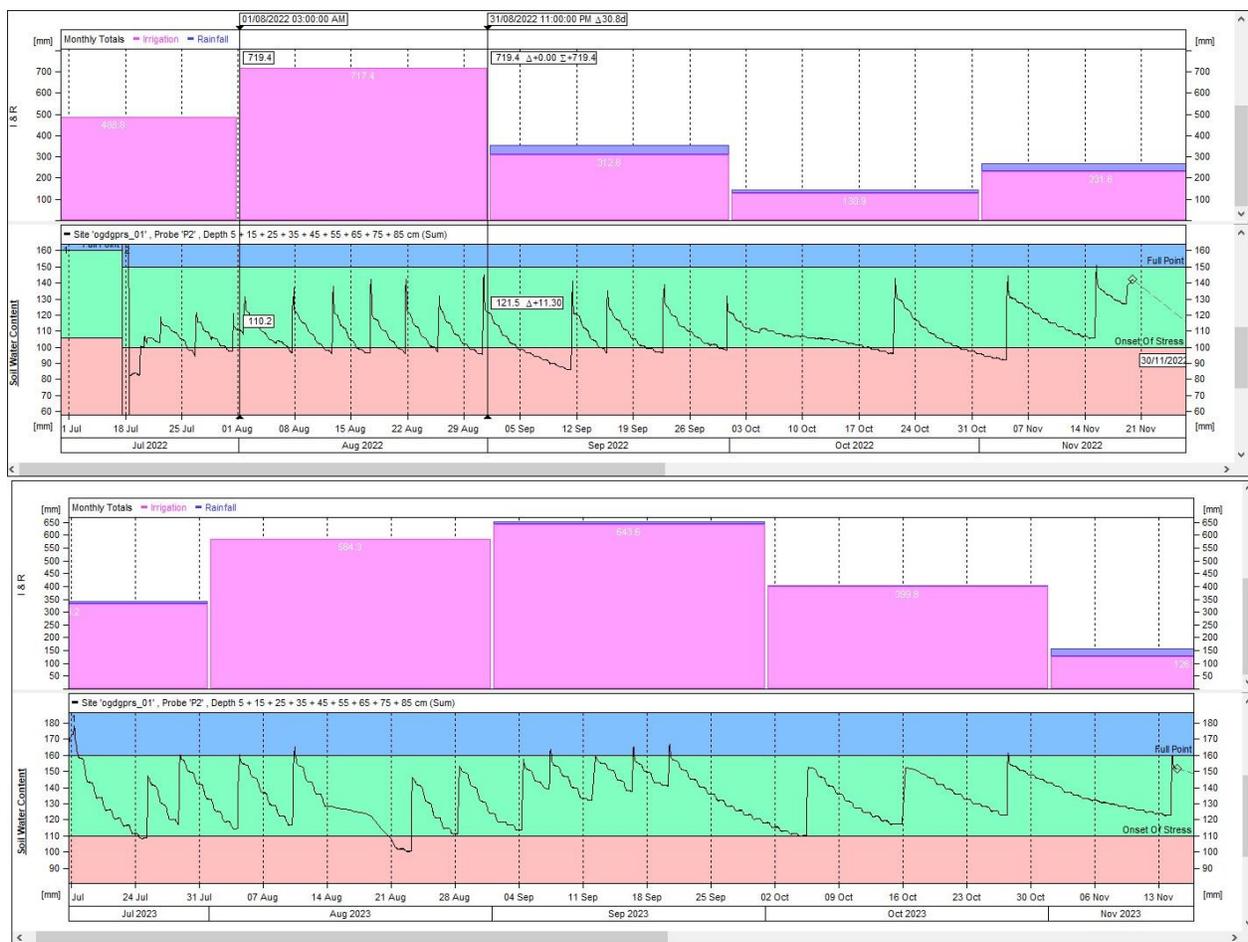
Durant pratiquement deux (02) ans (Fig.132), la sonde 1 a été irriguée dix – neuf (19) fois en 2022 contre seize (16) fois en 2023. Le mois d'Août est celui qui a reçu le plus de volume d'eau en 2022 (717,4 mm) ; contrairement en 2023 ou c'est plutôt le mois de Septembre qui a reçu le plus de volume d'eau (643,6 mm). Tout comme Octobre est le mois qui a reçu moins d'eau (130,9 mm) en 2022 contrairement en 2023 ou c'est plutôt Novembre qui en a reçu le moins (126,7 mm).

Au cours de ses années, deux (02) seuils ont été enregistrés en 2022 contre un seul en 2023. En effet, le premier seuil en 2022 a pour capacité au champ (CC) 160 mm, pour bas de la réserve facilement utile ( $B_{RFU}$ ) 106 mm dont la réserve facilement utile (RFU) est de 54 mm. Le second seuil de 2022 a plutôt pour seuils : CC = 150 mm,  $B_{RFU}$  = 100 mm avec RFU = 50 mm. Par contre en 2023, le seuil identifié a pour CC = 160 mm,  $B_{RFU}$  = 110 mm avec RFU = 50 mm.

Ainsi sur deux (02) ans, la RFU est la même. La comparaison du total d'apport d'eau montre qu'en 2022, le volume total est de 1881,5 mm contrairement en 2023 ou il est plutôt de 2087,6 mm. De ces valeurs, le constat montre qu'en 2023, la plante a beaucoup plus consommée

d'eau qu'en 2022. Par contre, la fréquence d'irrigation a été grande en 2022 qu'en 2023. La moyenne total d'apport d'eau sur deux ans a été de 1984,5 mm.

En 2022, la durée moyenne de tours d'irrigation tout le long de la saison est de 7 jours dont le maximum est de 29 jours (enregistré au mois de Septembre), et le minimum est de 1 jour (enregistré au mois de Juillet). Par contre, cette durée est en moyenne de 8 jours en 2023 ; avec pour maximum 18 jours (mois d'Octobre) et pour minimum 3 jours (enregistré aux mois de Juillet et septembre). De ces résultats, on peut dire que le nombre de jours maximal diffère sur deux (02) ans mais aussi du mois enregistré.



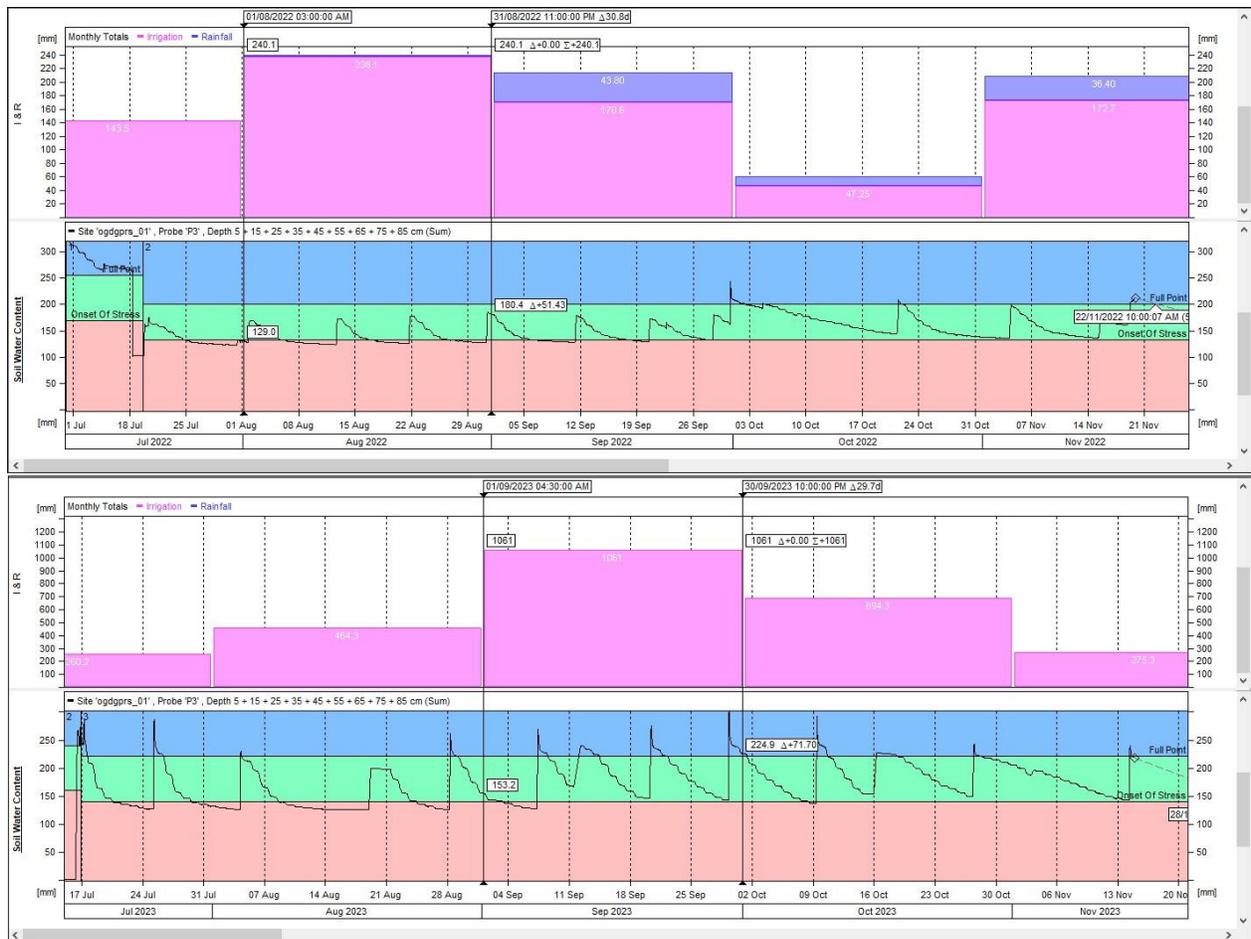
**Figure 132.** Comparaison de l'humidité du sol le long d'un profil de 85cm de profondeur de la sonde 1 suite aux apports d'eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023)

## **2) Etude comparative de l'évolution de l'humidité du sol dans la sonde 2 (S2) pendant deux (02) campagnes (2022 et 2023)**

Au cours de cinq mois (Juillet – Novembre), la sonde 2 (Fig.133) a été irriguée pendant deux (02) ans. De l'observation de ses graphes, il ressort que la fréquence d'irrigation a été de 14 fois en 2022 contre 13 fois en 2023. Le mois d'Août (238,1 mm) est celui qui a relevé le plus d'eau en 2022 ; contrairement en 2023 ou c'est plutôt Septembre (1061 mm). Quant 'aux mois ayant reçu le moins d'eau durant les saisons, 2022 retient Octobre (47,3 mm) et 2023 retient plutôt Juillet (260,2 mm). Au cours des deux (02) ans, deux (02) seuils ont été identifiés aussi bien en 2022 qu'en 2023. En 2022, il s'agit de  $CC = 255$  mm,  $B_{RFU} = 170$  mm avec  $RFU = 85$  mm pour le premier seuil ;  $CC = 200$  mm,  $B_{RFU} = 133$  mm avec  $RFU = 67$  mm pour le deuxième seuil. Par contre en 2023, on a plutôt pour premier seuil  $CC = 240$  mm,  $B_{RFU} = 160$  mm avec  $RFU = 80$  mm ; pour second seuil  $CC = 221$  mm,  $B_{RFU} = 140$  mm avec  $RFU = 81$  mm. De ces valeurs, le constat mentionne que la zone confortable (zone verte) pour la plante diffère légèrement sur deux ans, car étant un peu plus grande en 2023 qu'en 2022.

La durée moyenne de tours d'irrigation tout le long de la saison est de 10 jours dont le maximum est de 23 jours (enregistré au mois de Septembre), le minimum est de 1 jour (enregistré au mois de Septembre en 2022 ; contre 18 jours (mois de Octobre) de maximum, 5 jours (mois de Juillet) de minimum avec pour moyenne 10 jours en 2023. De ces résultats, on peut dire que le nombre de jours maximal diffère sur deux (02) ans mais aussi du mois enregistré.

La comparaison des totaux apportées d'eau sur toute la saison pendant deux (02) ans montre qu'en 2022, le volume total est de 772,2 mm contrairement en 2023 ou il est plutôt de 2755,1 mm. De ces valeurs, il est clair qu'en 2023, la plante a consommé beaucoup plus d'eau qu'en 2022. Ainsi sur deux ans, la somme d'apport d'eau en moyenne a été de 1763,6 mm



**Figure 133.** Comparaison de l’humidité du sol le long d’un profil de 85cm de profondeur de la sonde 2 suite aux apports d’eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023)

### 3) Etude comparative de l’évolution de l’humidité du sol dans la sonde 3 (S3) pendant deux (02) campagnes (2022 et 2023)

L’analyse des graphes de la sonde 3 sur deux (02) ans (Fig.134), montre que la fréquence d’irrigation est de 10 tours aussi bien en 2022 qu’en 2023. Août représente le mois ayant enregistré le plus d’eau (215,7 mm) en 2022. Par contre en 2023, c’est plutôt Octobre qui a enregistré la plus haute valeur (584,3 mm). En revanche, Octobre est le mois qui a relevé le moins d’eau (77,92 mm) en 2022 contrairement en 2023 ou c’est plutôt Novembre qui en a reçu le moins (155,5 mm).

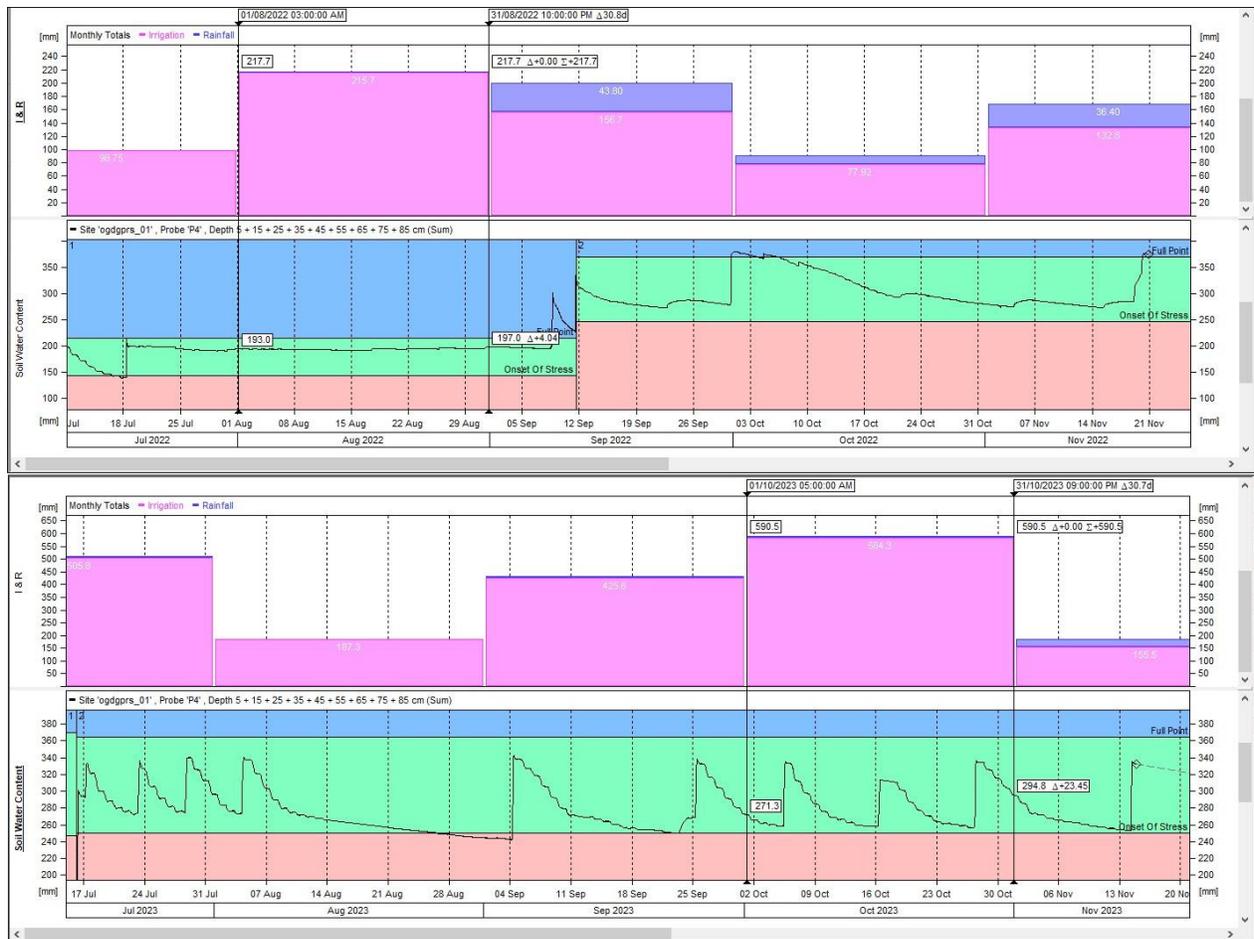
Au cours des deux (02) ans, deux (02) seuils ont été identifiés en 2022 contre un (01) en 2023. En 2022, il s’agit de  $CC = 215$  mm,  $B_{RFU} = 143$  mm avec  $RFU = 72$  mm pour le premier

seuil ; CC = 370 mm,  $B_{RFU} = 247$  mm avec RFU = 123 mm pour le deuxième seuil. Par contre en 2023, le seuil identifié a pour CC = 365 mm,  $B_{RFU} = 250$  mm avec RFU = 115 mm. De ces valeurs, le constat mentionne que la zone confortable (zone verte) pour la plante diffère sur deux ans.

La durée moyenne de tours d'irrigation tout le long de la saison est de 14 jours dont le maximum est de 29 jours (enregistré au mois de Septembre), le minimum est de 5 jours (enregistré au mois d'Août) en 2022 ; contre 31 jours (mois de Août – début Septembre) de maximum, 5 jours (mois de Juillet) de minimum, avec pour moyenne 13 jours en 2023. De ces résultats, on peut dire que le nombre de jours maximal diffère sur deux (02) ans mais aussi du mois enregistré. De ce fait, une grande rétention d'eau dans le sol s'est observée aussi bien en 2023 qu'en 2022.

Durant toute la saison, le volume d'eau total enregistré est de 681,87 mm en 2022 contre 1858,5 mm en 2023. Suivant ces valeurs, un fort taux de consommation d'eau a été plus enregistré en 2023 qu'en 2022. Ainsi sur deux (02) ans, la moyenne totale du volume d'eau apportée à la plante durant toute la saison est de 1270,2 mm d'eau.

Lorsqu'on compare toutes les moyennes de volumes d'eau apportés à la plante des trois sondes, S3 est celle qui a la moins consommé d'eau ; suivit de S2 puis de S1. Cependant la différence de pratiquement 1109,4 mm entre S1 et S2 en 2022 peut s'expliquer par le léger dysfonctionnement observé au niveau de S2 et S3 et aussi suite aux rendements et conditions climatiques.



**Figure 134.** Comparaison de l’humidité du sol le long d’un profil de 85cm de profondeur de la sonde 3 suite aux apports d’eau par mois pendant deux campagnes (2022, 2023)

En résumé, la comparaison de différentes sondes sur deux ans, montre que la fréquence d’irrigation est plus élevée à S1 et moindre à S3. En 2022, Août représente le mois le plus irrigué dans les trois sondes. Tandis qu’en 2023, c’est plutôt Septembre (S1, S2) et Octobre (S3). Le mois le moins irrigué en 2022 dans les trois sondes est Octobre ; contre Novembre (S1, S3) et Juillet (S2) en 2023. La durée moyenne entre deux tours d’irrigation sur deux ans est comprise entre 7 et 8 jours pour S1, 10 jours pour S2 et entre 13 et 14 jours pour S3. Quant à la durée maximale entre deux tours d’irrigation durant les mêmes années, elle varie de 18 à 29 jours pour S1, 18 à 23 jours pour S2 et de 29 à 31 jours pour S3. Par contre, la durée minimale entre ses mêmes tours varie de 1 à 3 jours pour S1 ; 1 à 5 jours pour S2 et 5 jours pour S3. Le nombre de seuils est le même dans toutes les sondes en 2022 ; à savoir de 2. Mais en 2023, il varie plutôt entre 1 et 2. De ce fait en 2022, RFU se situe entre 54 et 50 mm de profondeur pour S1 ; 85 et 67

mm de profondeur pour S2 ; 72 et 123 mm de profondeur pour S3. En même temps elle va être en 2023, de 50 mm pour S1, 115 mm pour S3 et entre 80 et 81 mm pour S2.

### **VI.3 Appréciation du taux de consommation quotidienne par la plante dans chaque sonde**

L'appréciation quotidienne de consommation de l'eau par la plante dans chaque sonde s'est opérée suite à des différents apports d'eau le long de la saison, sur cinq (05) mois, pendant deux (02) ans. Pour ce faire le calcul et mis sous forme de graphe de l'évapotranspiration potentiel (ET<sub>o</sub>) par le logiciel Irrimax s'est effectuée. Ce ET<sub>o</sub> a été comparé aux variations journalières du cumul de T et SWC sur un profil de 85 cm de profondeur suite à des apports d'eau.

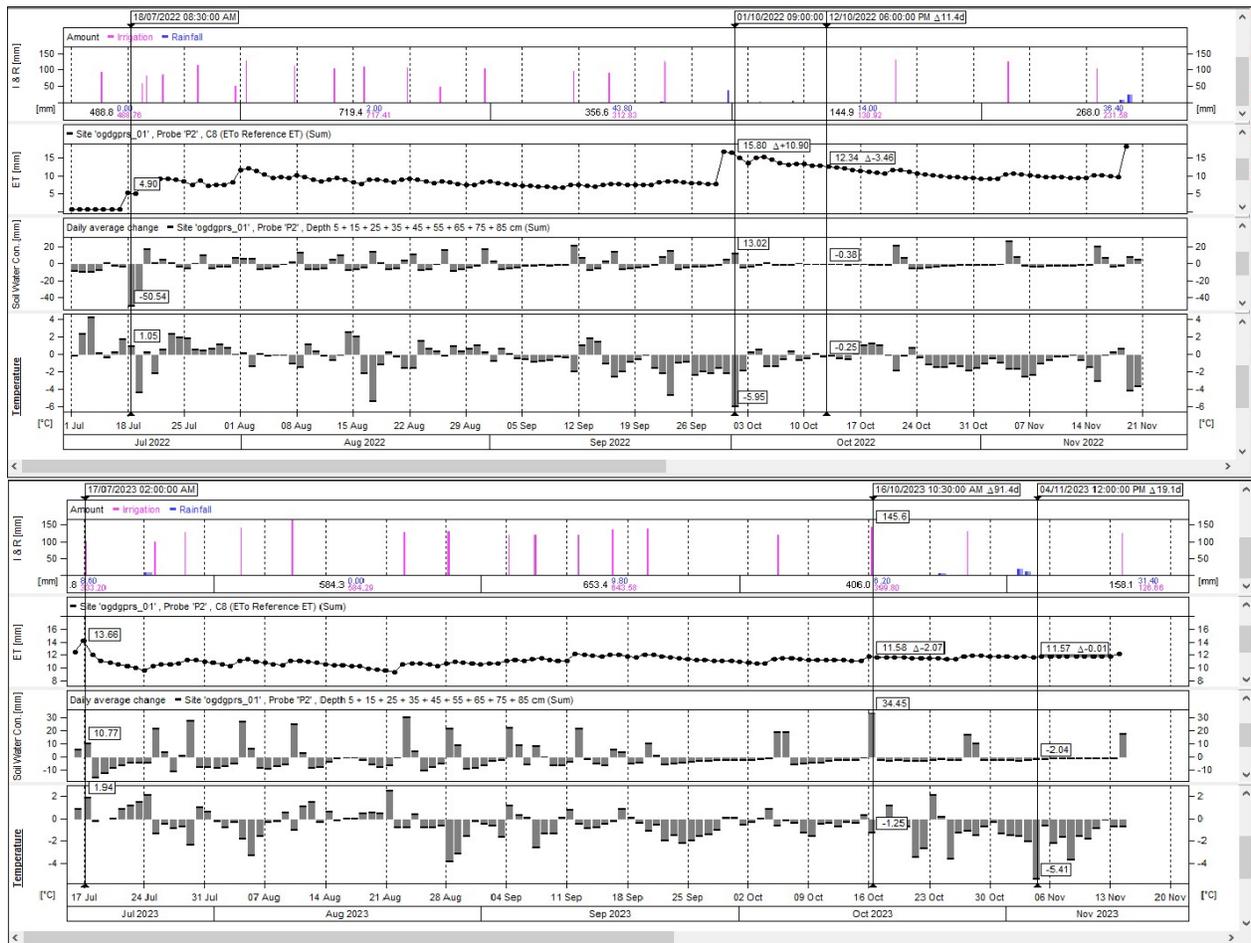
#### **VI.3.1 Etude relationnelle des paramètres SWC, T, ET<sub>o</sub> et apports d'eau au sein de la sonde 1 (S1)**

Durant toute la saison de la première année 2022 (Fig.135), l'illustration de différents graphes établit qu'au cours des différents apports d'eau (irrigation et précipitation), les taux de SWC augmentent automatiquement ; pendant que ceux de T diminuent considérablement. ET<sub>o</sub> quant à lui varie très peu. Tout comme lorsqu'il n'y a pas d'apport d'eau, les taux de SWC sont trop faibles pendant ceux de T sont élevés. Au tout début de la saison l'observation rapprochée du 11/07/2022 – 17/07/2022, montre qu'après apport d'irrigation, ET<sub>o</sub> très bas avec SWC, quand T a un taux trop élevé. Par contre, le 18/07/2022 ou il n'y a pas d'apport d'eau, ET<sub>o</sub> croît avec légèrement T ; pendant que SWC diminue énormément dans le sol comparé au reste de la saison. Le 01/10/2022, suite à l'apport par les précipitations, ET<sub>o</sub> se stabilise après augmentation ; pendant que les taux de SWC croissent légèrement et ceux de T baissent considérablement par rapport au reste de la saison. Le 08/10/2022, quand il y'a quelques gouttes de précipitations qui tombent, ET<sub>o</sub> a tendance à diminuer avec T et SWC.

A la deuxième année 2023 (Fig.135), quand il y'a apport d'eau (irrigation ou précipitations), les taux de SWC augmentent énormément pendant ceux de T diminuent considérablement. ET<sub>o</sub> quant à lui varie très peu tout le long de la saison. Cependant au tout début de la campagne une remarque est faite : ET<sub>o</sub> croît quand il y a irrigation, au même moment que SWC et T. Tout comme, le 16/10/2023, lors de l'apport d'eau (irrigation et précipitations), SWC augmente considérablement quand ET<sub>o</sub> croît légèrement, pendant que T diminue. Le

04/11/2023 après apport de précipitations, ETo est stable quand SWC diminue d'environ 2 mm et T de plus de 5°C.

Ainsi quand il y'a apport de précipitations ou d'irrigation, ou même des deux, ETo est pour la plupart stable ou sinon croît légèrement. T diminue considérablement pendant que SWC augmente.



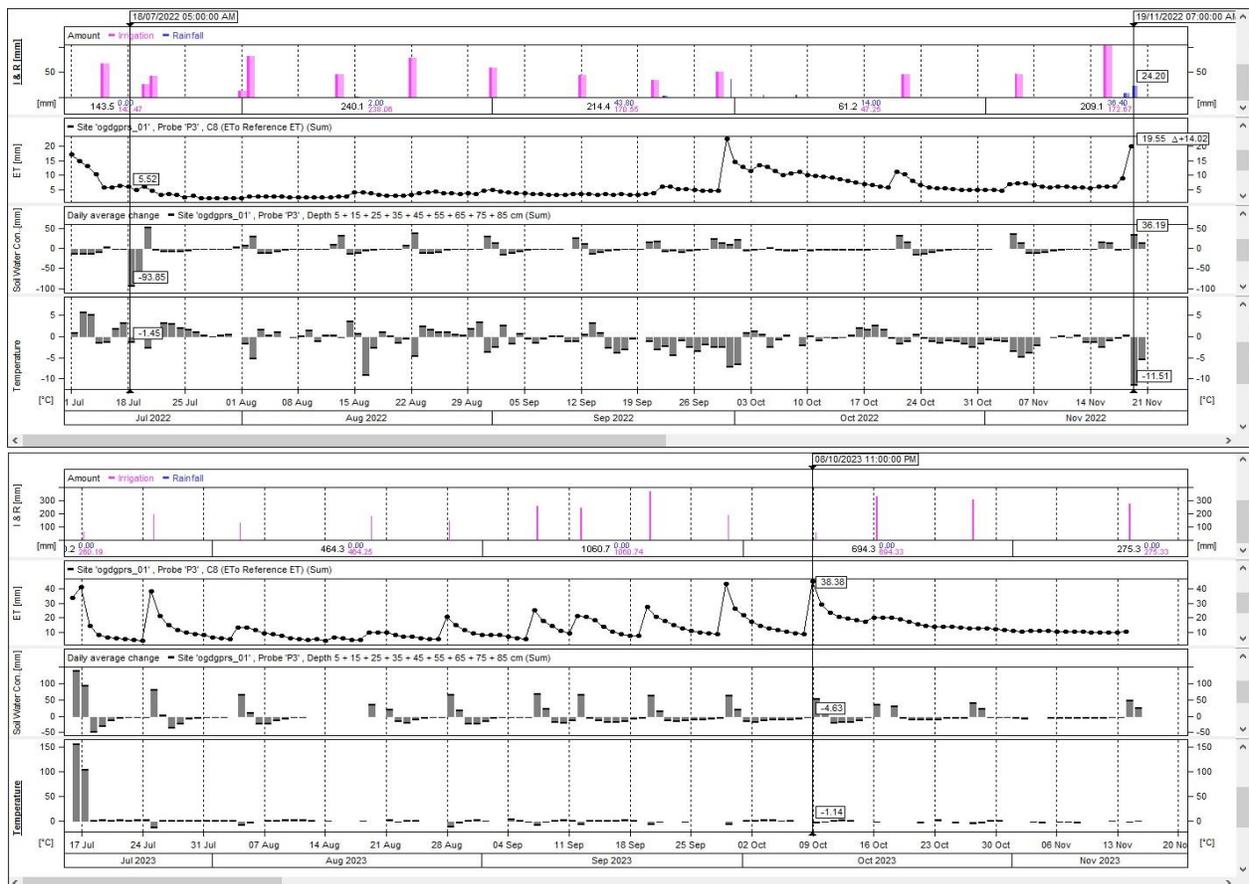
**Figure 135.** Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ETo) et apports d'eau au sein de la sonde 1 (S1) pendant deux ans

### VI.3.2 Etude relationnelle des paramètres SWC, T, ETo et irrigation (IR) au sein de la sonde 2 (S2)

Les différents graphes établis en 2022 (Fig. 136) concernant les paramètres suscités montre que durant toute la saison, ETo et T baissent suite à un apport d'eau ; permettant à la plante de consommer moins d'eau. Par contre lorsque ETo augmente au moment où il n'y a pas d'apport d'eau, la plante utilise plus d'eau ; surtout quand T augmente également. En 2023, ETo

fluctue énormément qu'en 2022 tout le long de la saison. Cependant, malgré ces fortes élévations, la plante consomme moins d'eau suite aux apports simultanés d'irrigation et de pluie. Le constat mentionne le fait que ces apports influent beaucoup sur l'état de la température dans le sol. En effet, à chaque apport, T diminue ou se stabilise, entraînant un meilleur épanouissement des racines de la plante dans le sol, donc évite à la plante de stresser. Ce constat s'observe d'ailleurs tout le reste de la saison après le 20/07/2023. Par ailleurs au tout début (17/07/2023-20/07/2023) de la saison, malgré l'apport d'eau, ETo croît avec T considérablement, quand SWC croît aussi pour un début avant de décroître par la suite. Pouvant entraîner un stress de la plante le temps qu'il ait un nouvel apport.

Sur deux ans, le comportement de chacun de ses paramètres sus - cités est différent ; mais la relation existante entre ses derniers est pareille



**Figure 136.** Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ETo) et apports d'eau au sein de la sonde 2 (S2) pendant deux ans

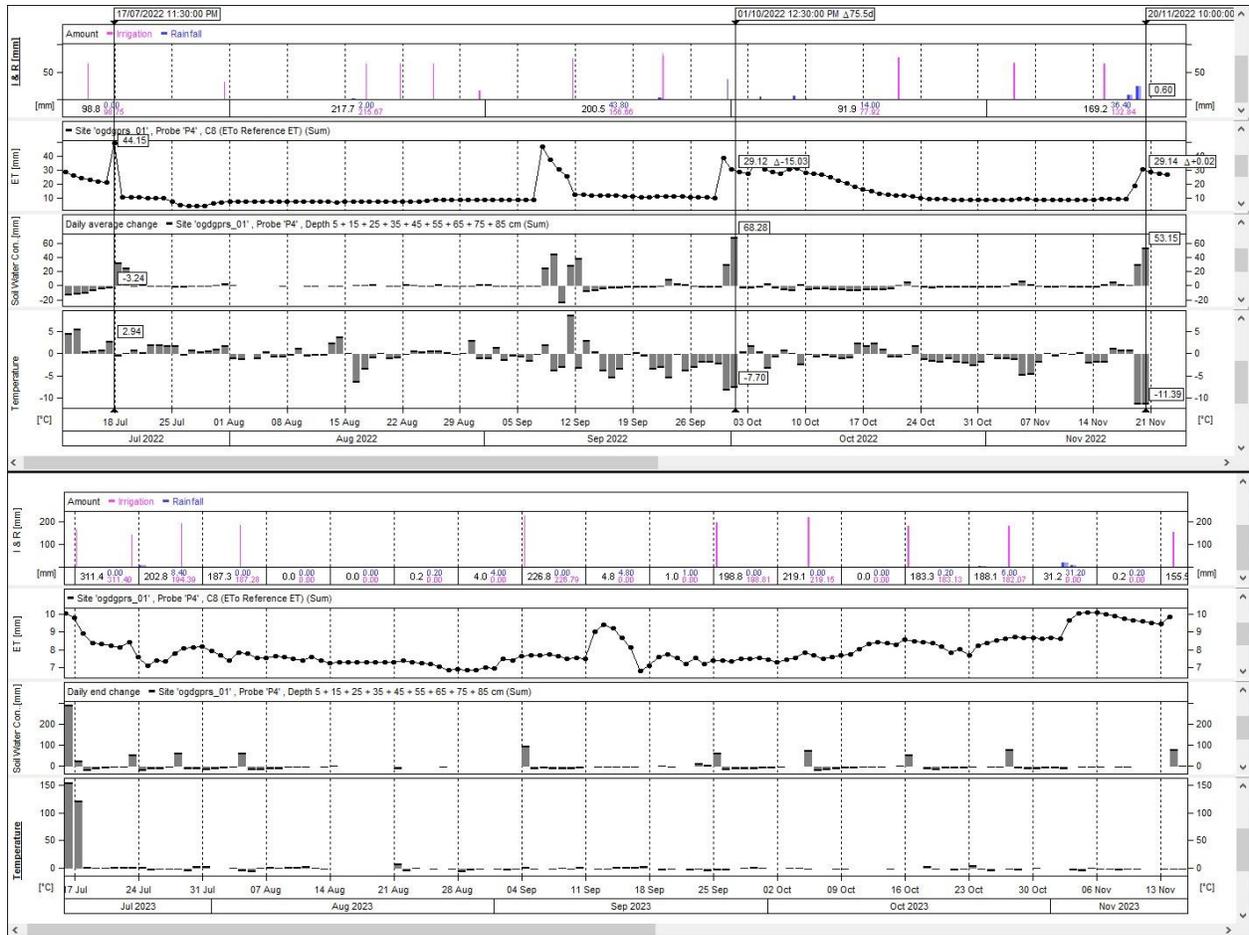
### **VI.3.3 Etude relationnelle des paramètres SWC, T, ETo et irrigation (IR) au sein de la sonde 3 (S3)**

Les différentes illustrations établies (Fig.137) présentent des allures presque différentes par année de chaque paramètre. En 2022, au tout début (11/07/2022 – 17/07/2022), suite à un apport d'eau, quand ET baisse, avec SWC, T augmente. Au 17/07/2022, sans apports d'eau, ET est élevée avec T et SWC. De manière générale, quand il y a apport d'eau (irrigation ou précipitation), ET diminue avec T, pendant que SWC croît, et vis -versa. Ce qui par la suite crée soit un épanouissement de la plante ou bien un stress du fait d'énormes pertes ou gain en eau.

Au début de la saison en 2023 (principalement dans les deux premiers jours) (Fig.138), après apport d'eau, T et SWC augmentent quand ET diminue. Au cours du reste de la saison (à partir du 24/07/2023 – 15/11/2023), l'apport en eau de façon simultanée quand ET est élevée, entraîne une augmentation de SWC considérable et une T faible, ou stable ; évitant à la plante de stresser. De ce fait, quand ET est élevée et qu'il y a apport d'eau, la plante a tendance à s'épanouir merveilleusement bien car T diminue dans le sol, parfois de manière considérable. Par contre sans apport d'eau et avec ET et T élevé, le stress de la plante s'observe à la place.

Sur deux ans, la tendance observée de chaque paramètre est presque différente, mais la relation existante entre ses derniers est presque pareille. ET surtout varie plus en 2023 qu'en 2022.

En résumé l'étude relationnelle entre SWC, ETo, T, IR et Pi est presque pareille dans les trois systèmes d'irrigation. Il s'agit entre autres du fait que quand il y'a apport de précipitations ou d'irrigation, ou même des deux, ETo est pour la plupart stable ou sinon croît légèrement. T diminue considérablement pendant que SWC augmente. Ce résultat relevé cadre avec celui obtenu par (Marks et al. 2015).



**Figure 137.** Comparaison de l'humidité du sol (SWC), température du sol (T), évapotranspiration potentielle (ETo) et apports d'eau au sein de la sonde 3 (S3) pendant deux ans

## VI.4 Caractérisation de l'évapotranspiration réelle dans le sol

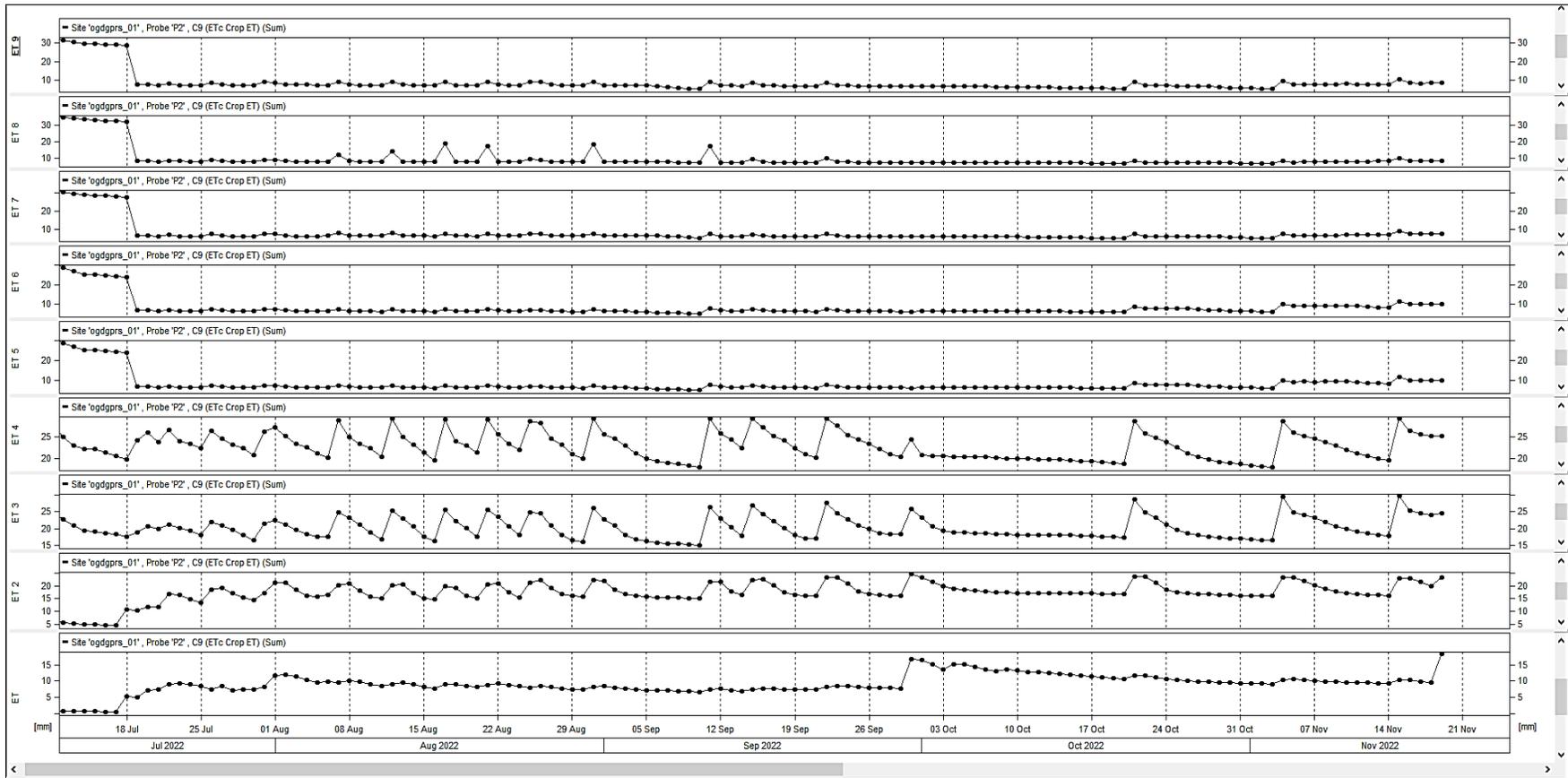
### VI.4.1 Caractérisation de l'évapotranspiration réelle de la culture (ETc) à différentes profondeurs dans le sol suivant chaque sonde

Pour caractériser l'ETc à différentes profondeurs dans chaque sonde, des graphes ont été réalisés dans Irrimax capteur par capteur sur un profil au total de 85 cm de profondeur. Chaque capteur représentant bien évidemment chaque profondeur. Notons que ET, ET2, ET3, ET4, ET5, ET6, ET7, ET8, ET9 représentent respectivement l'évapotranspiration réelle de la culture obtenue à 5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm, 55cm, 65cm, 75cm et 85cm de profondeur du sol.

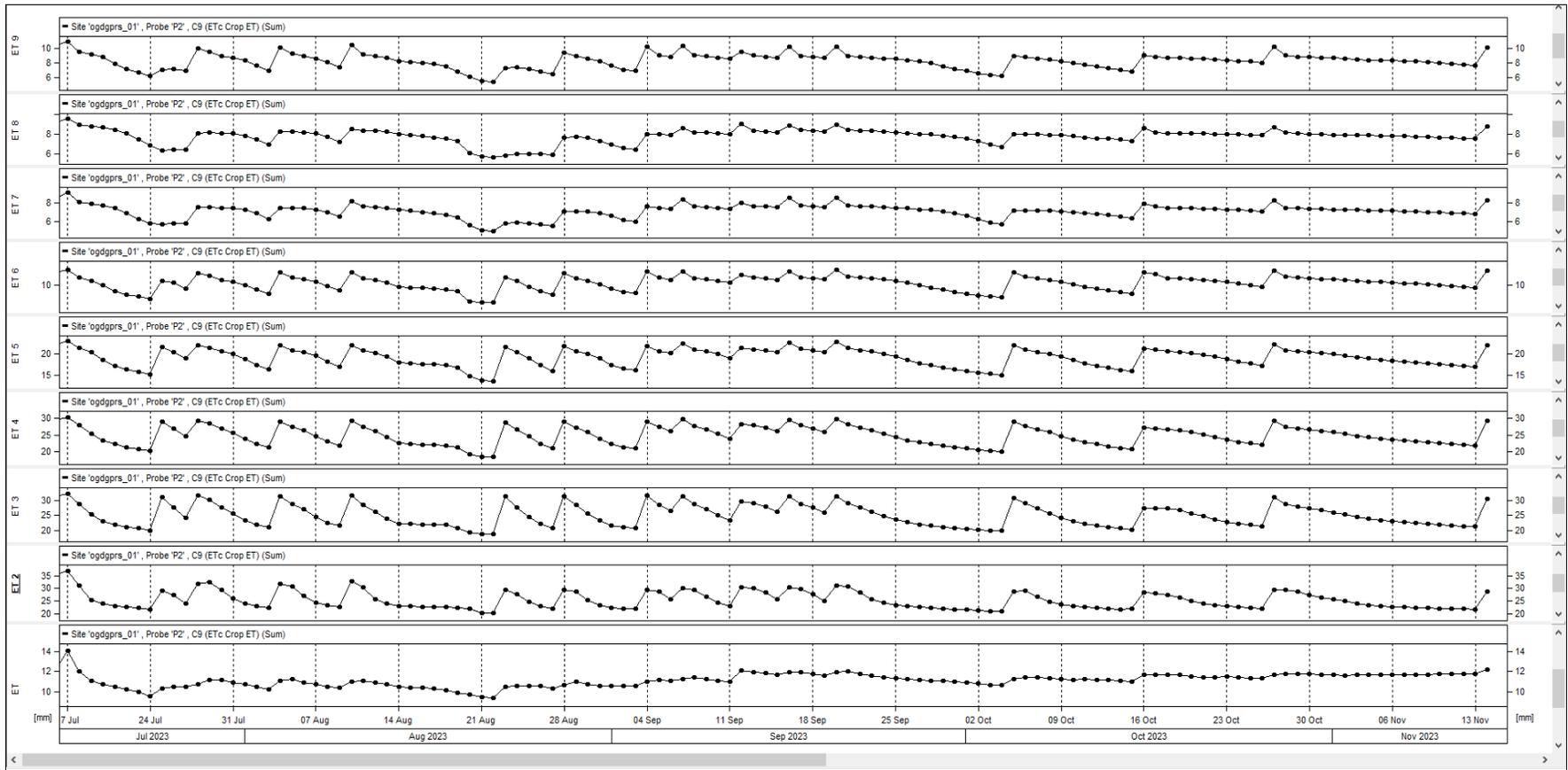
## **1 Sonde 1 (S1)**

L'observation graphique de S1 à la première année 2022 (Fig.138a), identifie un besoin important en eau de la plante en général dans les 4 premières profondeurs du sol (ET, ET2, ET3 et ET4) dont dans les trois derniers de ces quatre couches, le besoin en eau est plus important. Par contre dans le reste des couches (ET5, ET6, ET7, ET8 et ET9), le besoin en eau se fait plus ressenti la première semaine de la saison (11/07/2022 – 18/07/2022) car à la suite, il est en général plus constant. Toutefois, à l'avant dernière profondeur (ET8), entre le 8/08/2022 et le 19/09/2022, quelques pics élevés de besoins en eau de la plante sont identifiés. En 2023 (Fig.138b), les besoins en eau de la plante sont présents à toutes les profondeurs ; mais beaucoup moins en surface (ET) que dans le reste des couches. Tout comme ces besoins sont plus importants dans les trois premiers mois (Juillet, Août et Septembre) de la saison que dans les deux derniers mois (Octobre et Novembre).

a)



b)



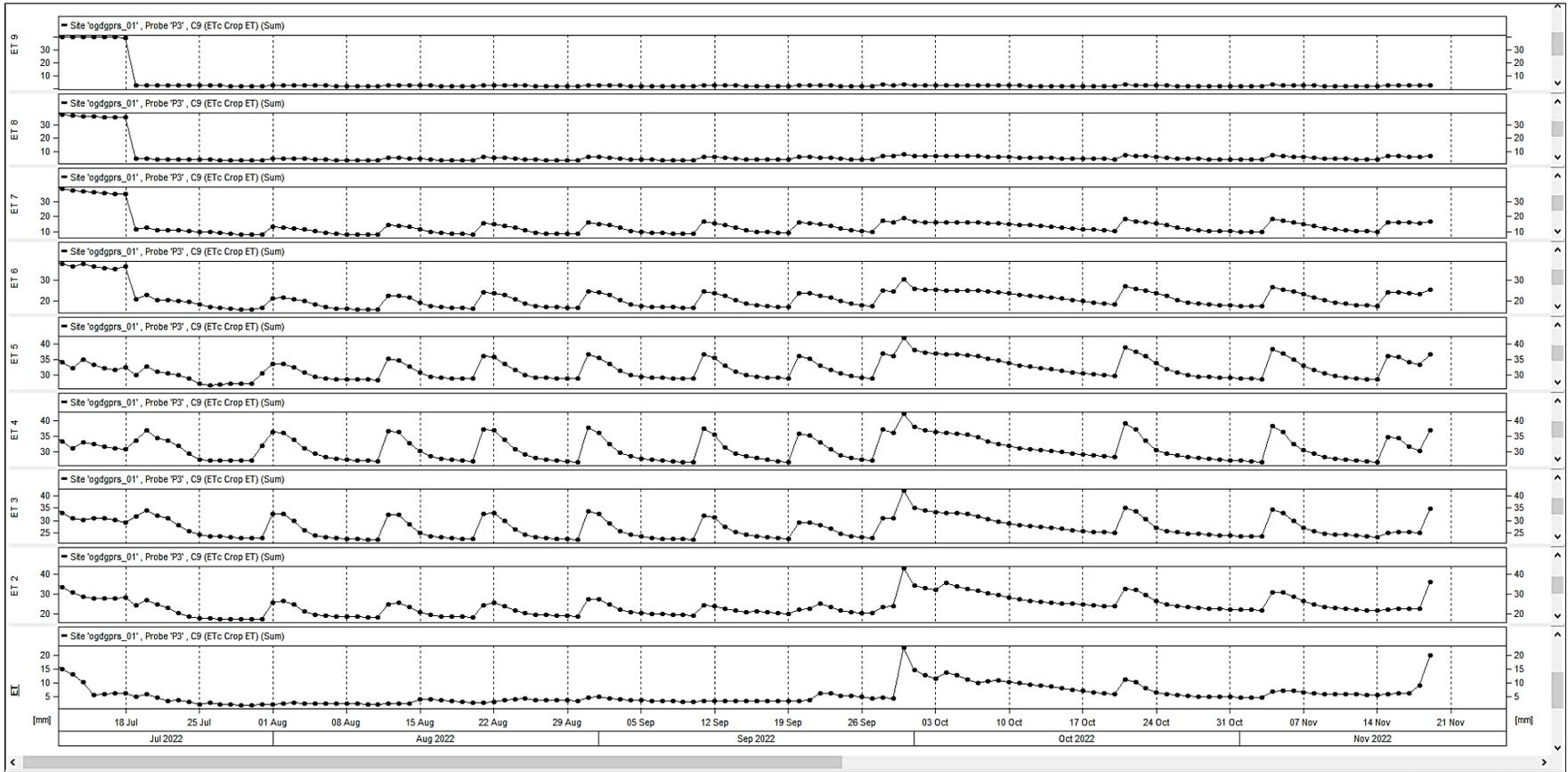
**Figure 138.** Evapotranspiration réelle de la culture (ETc) à chaque profondeur du sol au cours de la : a) première saison (2022) et b) deuxième saison (2023) dans la sonde 1

## 2) Sonde 2

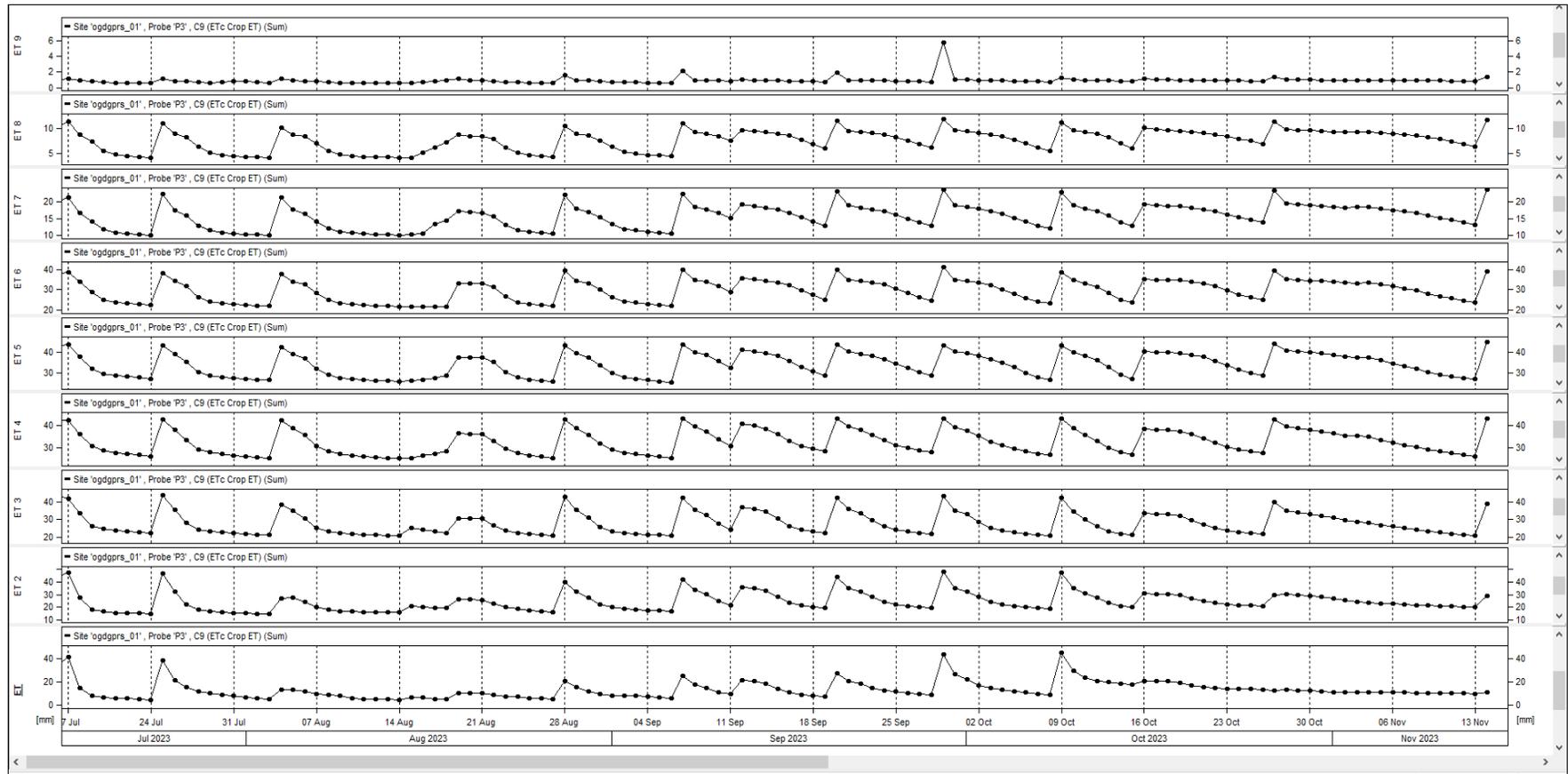
En 2022, les illustrations de différents graphes (Fig.139a) montrent que les besoins en eau de la plante sont présents dans les six premières profondeurs du sol (ET, ET2, ET3, ET4, ET5, ET6 et ET7). Notons que parmi ses derniers, ET est la couche où les besoins en eau de la plante sont moindres. L'observation sur toute la saison au sein des couches où la demande en eau est beaucoup plus importante, traduit une tendance presque pareille dans tous les mois. Toutefois, il faut noter que plus on va en profondeur, plus la demande en eau diminue. Aussi dans les deux derniers capteurs (ET8 et ET9), les besoins en eau sont plus importants à la première semaine de la campagne. Par la suite, ces besoins vont chuter avant de stabiliser tout le reste de la saison.

En 2023 (Fig.139b), les besoins en eau de la plante s'observent dans presque toutes les profondeurs ; excepté 85 cm où les besoins sont beaucoup moins présents. De même dans les horizons où les besoins en eau de la plante sont importants, 5 cm représente l'horizon où les besoins sont les moins intenses. L'observation de différents graphes sur toute la saison met en exergue de juillet jusqu'à mi -octobre, une forte demande en eau de la plante contrairement à la fin de la saison (fin octobre – mi-novembre).

a)



b)



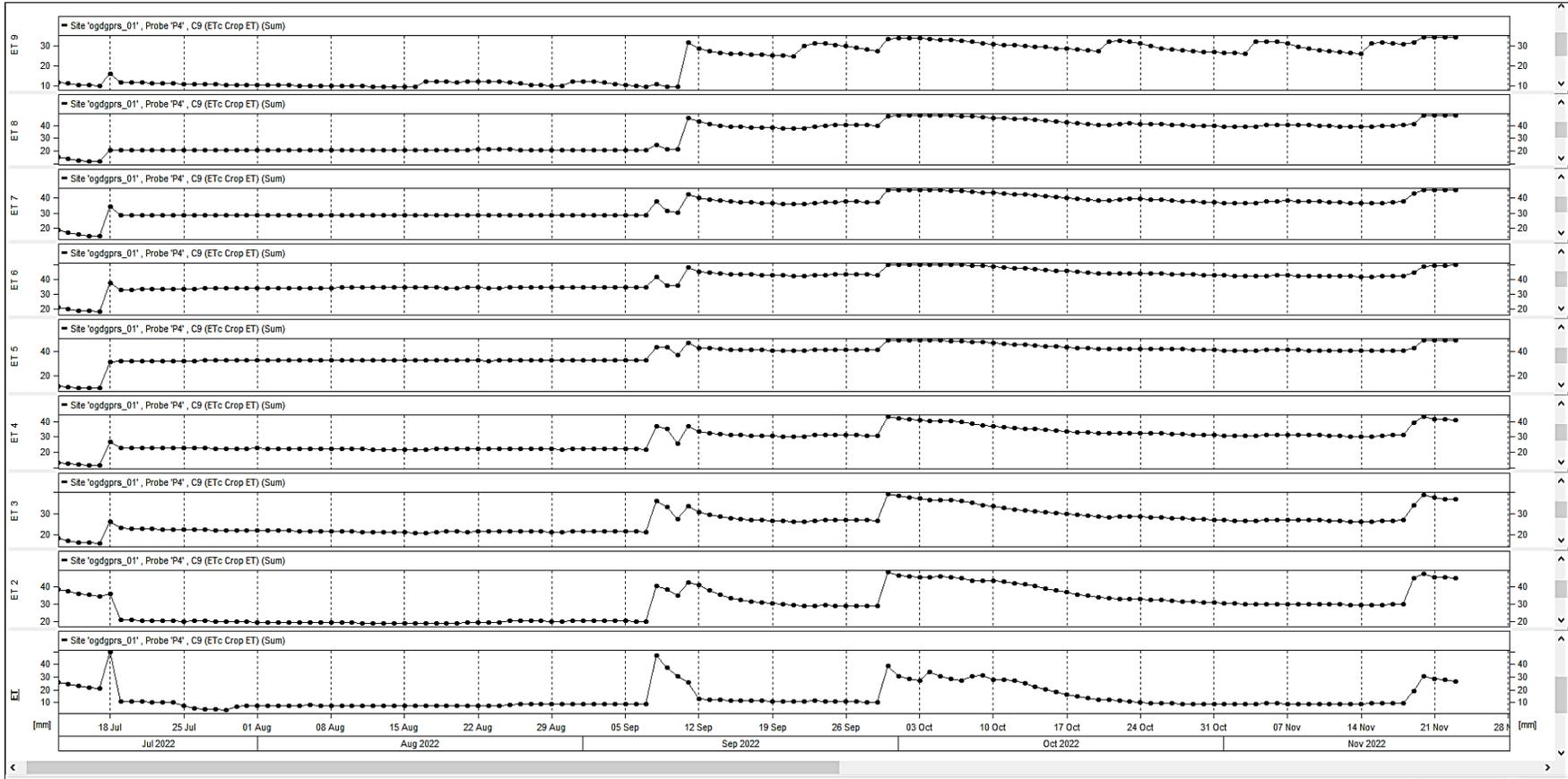
**Figure 139.** Evapotranspiration réelle de la culture (ETc) à chaque profondeur du sol au cours de la : a) première saison (2022) et b) deuxième saison (2023) dans la sonde 2

### 3) Sonde 3

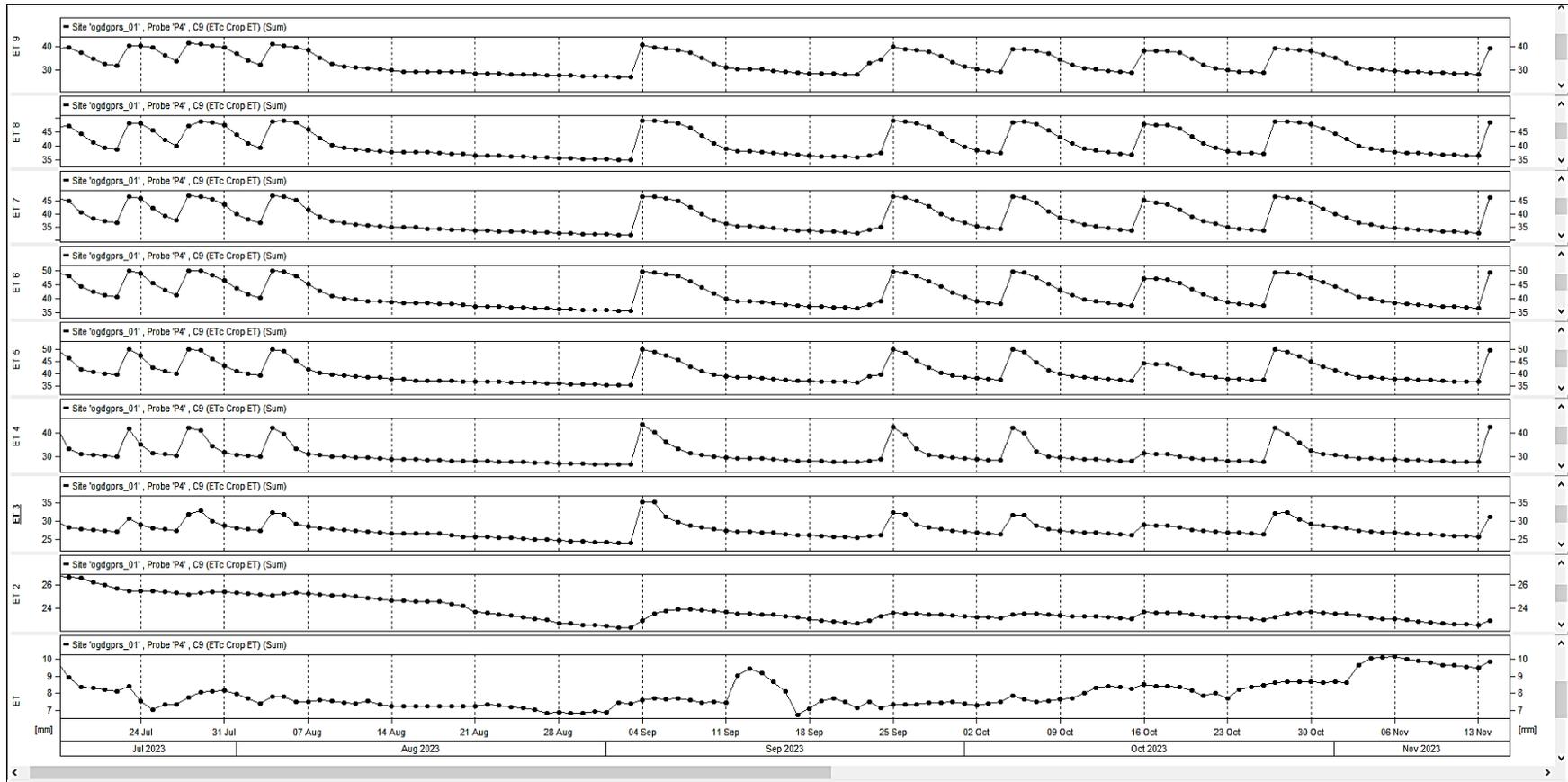
A la première année 2022 (Fig.140a), l'observation graphique montre que les besoins en eau augmentent dans toutes les profondeurs aux dates suivantes : 18/07/2022, 5/09/22 – 12/09/2022, 29/09/2022 – 03/10/2022, 14/11/2022 -21/11/2022. Cependant, en dehors de ses dates, ils varient très peu sur tout le long de la saison et dans le profil du sol.

A la deuxième année 2023 (Fig.140b), les besoins en eau se font plus ressentir à partir de ET3 jusqu'à ET9. Par contre dans les deux (02) premières profondeurs (ET et ET2), ses besoins varient très peu et ont tendance à se stabiliser. Tout le long de saison, on s'aperçoit que les besoins en eau de la culture sont plus importants dans les mois suivants : Juillet, mi – septembre jusqu'à fin octobre.

a)



b)



**Figure 140.** Evapotranspiration réelle de la culture (ETc) à chaque profondeur du sol au cours de la : *a*) première saison (2022) et *b*) deuxième saison (2023) dans la sonde 3

#### **VI.4.2 Comparaison de l'évapotranspiration réelle de la culture (ETc) obtenu dans toutes les sondes installées**

L'étude comparative de l'ETc obtenue dans toutes les sondes installées en champ s'est faite sur un profil pédologique de 85 cm de profondeur par mois, pendant deux (02) ans. Le tableau 17 présente une brève analyse descriptive obtenues au sein de chaque sonde par mois durant les deux saisons (2022 et 2023). L'analyse globale de ce tableau montre que les valeurs de ETc sont plus élevées en 2023 qu'en 2022. Cette augmentation est particulièrement notable au niveau des sondes S2 et S3.

La variabilité saisonnière affiche les mois de Juillet et Novembre comme ceux ayant obtenus les plus faibles valeurs d'ETc pour les deux années ; dont une baisse plus marquée en novembre 2023 par rapport à novembre 2022. De cette même variabilité, Août et Octobre sont identifiés comme les mois ayant les valeurs les plus élevées ; surtout en Octobre 2022 pour S3, atteignant un pic de 10017,29 mm. (Jamshidi et al. 2020) identifie suivant la recherche de deux ans menés sur les agrumes de Janvier à Juin, le total par mois de 1843.2 mm à 1874,6 mm. En comparant ses valeurs à celles obtenues, il est clair qu'elles sont inférieures. L'explication plausible à cela se justifie par le contexte de l'étude. En effet, le type d'agrumes, le stade phénologique de la plante ainsi et que les conditions climatiques sont les facteurs qui justifient cette énorme différence.

La comparaison des valeurs ETc au sein des sondes présente S3, comme la sonde ayant enregistré les valeurs les plus élevées, surtout en Août et Octobre. Elle montre une forte augmentation en 2023 par rapport à 2022, bien qu'Octobre 2023 soit légèrement inférieur à celui de 2022. S1 et S2 sont les sondes qui ont plutôt obtenues des augmentations modérées en 2023 ; sauf en juillet et novembre ou une diminution est observée.

Cette analyse met en évidence une augmentation globale de l'ETc en 2023 par rapport à 2022, avec des pics notables en été et début d'automne, et une variabilité importante entre les sondes, en particulier pour la sonde S3.

La diminution dans la sonde S1 de l'ETc aux mois de Juillet et Novembre, pourrait indiquer que l'irrigation à 15 cm de profondeur permet de mieux répondre aux besoins en eau des racines superficielles des orangers en début et en fin de saison. Les racines superficielles des orangers pouvant être bien desservies par cette profondeur d'irrigation, surtout durant les mois où les températures sont moins élevées. Quant à l'augmentation de l'ETc observée aux mois d'Août

et Octobre (mois les plus chauds), cette profondeur semble maintenir une humidité suffisante pour soutenir l'évapotranspiration des orangers, ce qui est crucial pour éviter le stress hydrique pendant la période de fructification

Les valeurs modérées et fluctuation saisonnière observées dans la sonde 2 (S2) traduit le fait que l'irrigation de surface montre une efficacité intermédiaire pour les orangers. En effet, les valeurs plus faibles de ETc enregistrées en juillet et en novembre 2023 suggèrent que l'évaporation de l'eau à la surface réduit l'efficacité de l'irrigation, surtout pendant les périodes de forte chaleur et de vent, qui sont fréquentes en été dans la plaine de Mitidja. La hausse des valeurs de ETc aux mois d'Août et Octobre pourrait être le résultat de l'évaporation accrue en surface, nécessitant plus d'eau pour maintenir les besoins des orangers, qui sont particulièrement sensibles au stress hydrique pendant la période de croissance des fruits.

Les valeurs élevées en été et début d'automne relevées au niveau de S3 montrent que l'irrigation goutte à goutte souterrain (30 cm de profondeur) semble être la plus efficace pour les orangers, surtout pendant la saison chaude. Les racines plus profondes des orangers peuvent accéder à cette eau, ce qui est crucial pendant les mois où la demande en eau est la plus élevée (août à octobre), période critique pour le développement des fruits. Le pic observé en octobre 2022 indique un besoin intense en eau pendant cette période, alors que la légère baisse en 2023 peut s'expliquer par la meilleure gestion de l'irrigation durant cette année.

**Tableau 17.** Evapotranspiration réelle de la culture (ETc) par mois, obtenue en millimètres (mm) dans chaque sonde (S1, S2, S3), sur un profil pédologique de 85 cm pendant 2 ans

MOIS	2022			2023		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Juillet	2831.75	4083.32	3953.00	2290.22	2878.78	4967.24
Août	3299.02	4482.28	6002.86	4117.28	4982.24	8398.89
Septembre	3020.06	4579.46	8275.18	4289.19	5753.26	8451.99
Octobre	3107.09	5282.56	10017.29	4212.26	6093.82	8943.42
Novembre	2128.75	3033.36	5495.60	1867.53	2517.43	3803.78
<b>Total</b>	<b>14386.67</b>	<b>21460.98</b>	<b>33743.93</b>	<b>16776.48</b>	<b>22225.53</b>	<b>34565.32</b>
<b>Min</b>	<b>2128.75</b>	<b>3033.36</b>	<b>3953.00</b>	<b>1867.53</b>	<b>2517.43</b>	<b>3803.78</b>
<b>Max</b>	<b>3299.02</b>	<b>5282.56</b>	<b>10017.29</b>	<b>4289.19</b>	<b>6093.82</b>	<b>8943.42</b>
<b>Moy</b>	<b>2877.33</b>	<b>4292.20</b>	<b>6748.79</b>	<b>3355.30</b>	<b>4445.11</b>	<b>6913.06</b>

## VI.5 Caractérisation du coefficient cultural (Kc) de la culture des orangers

### VI.5.1 Caractérisation du coefficient cultural (Kc) à différentes profondeurs dans le sol suivant chaque sonde

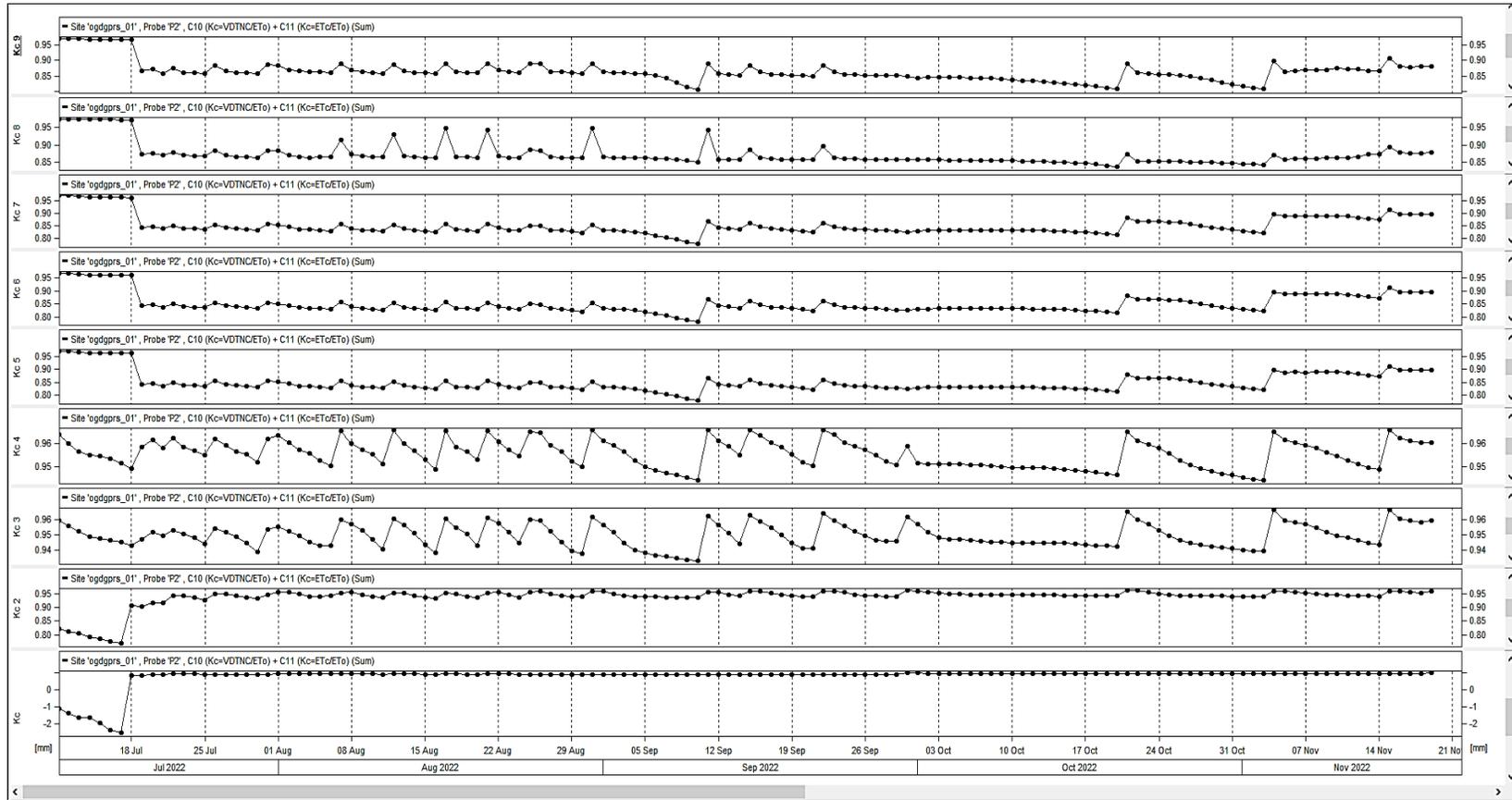
Pour caractériser le Kc à différentes profondeurs dans chaque sonde, des graphes ont été réalisés dans Irrimax capteur par capteur sur un profil au total de 85 cm de profondeur. Chaque capteur représentant bien évidemment chaque profondeur. Notons que Kc, Kc2, Kc3, Kc4, Kc5, Kc6, Kc7, Kc8, Kc9 représentent respectivement le coefficient cultural de la culture obtenue à 5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm, 55cm, 65cm, 75cm et 85cm de profondeur du sol.

#### 1) Sonde 1 (S1)

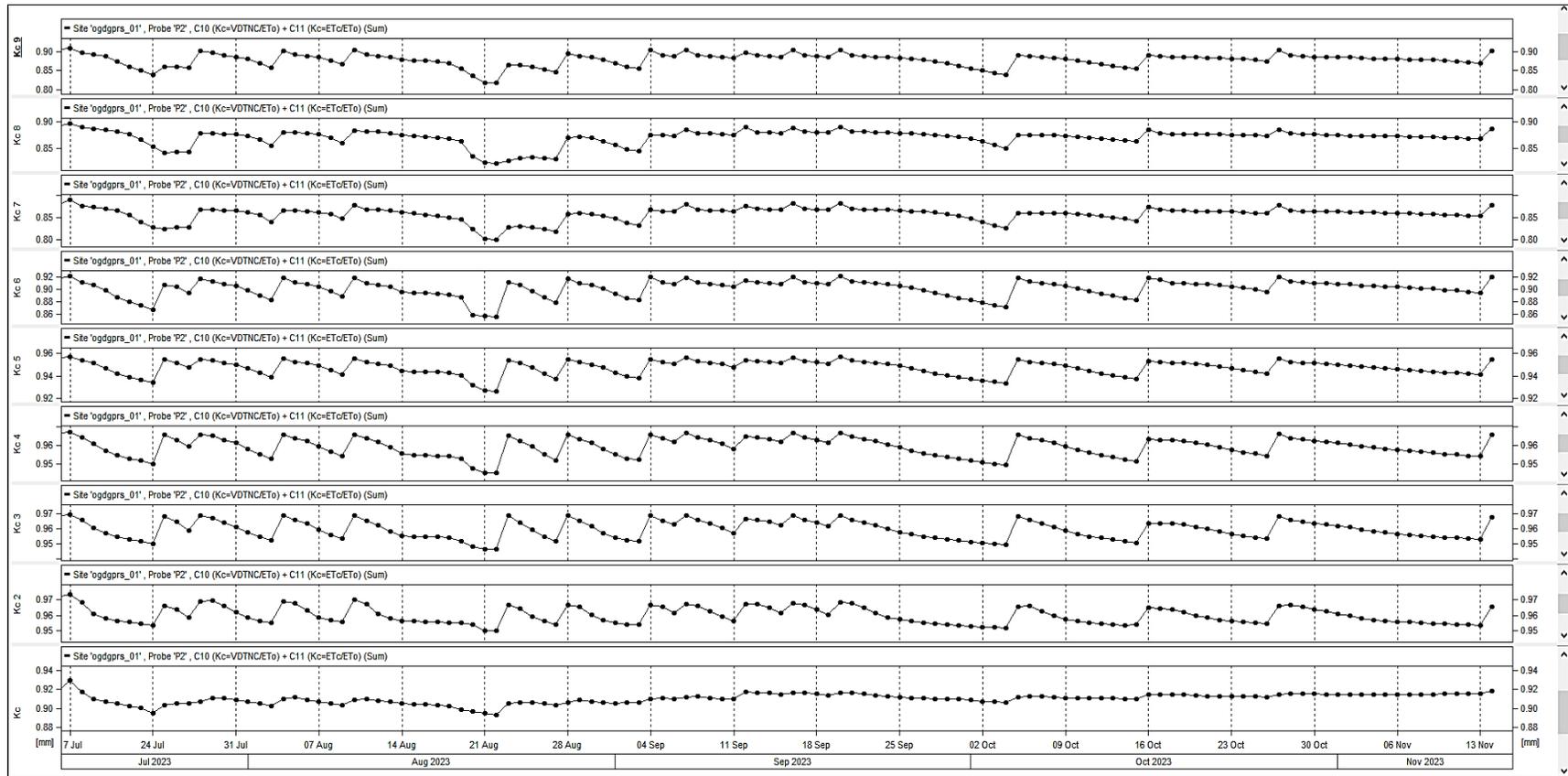
En 2022 (Fig.141a), l'analyse du graphe capteur par capteur, montre qu'en début de saison (11/07/2022-18/07/2022), Kc diminue de 5 à 35 cm de profondeur. Par contre au cours de ces mêmes dates, il se stabilise dans le reste des profondeurs. Du 18/07/2022 – 31/09/2022, il fluctue énormément à presque toutes les profondeurs (25 -85 cm). Dans les deux premiers horizons (5 et 15 cm), il est beaucoup plus stable. Par contre du 01/10/202 – 17/10/2022, il est

plutôt stable dans tous les horizons. Vers la fin de la saison (18/10/2022 – 21/11/2022), il s'élève et se stabilise dans presque tous les capteurs, en dehors de 5 cm où il continue d'être stable. En 2023 (Fig.141b), l'analyse du graphe montre une même tendance tout le long de la saison à partir de 15 cm de profondeur jusqu'à 85 cm de profondeur. Par contre au niveau de 5 cm de profondeur, le comportement est différent à partir du 24/07/2023.

a)



b)



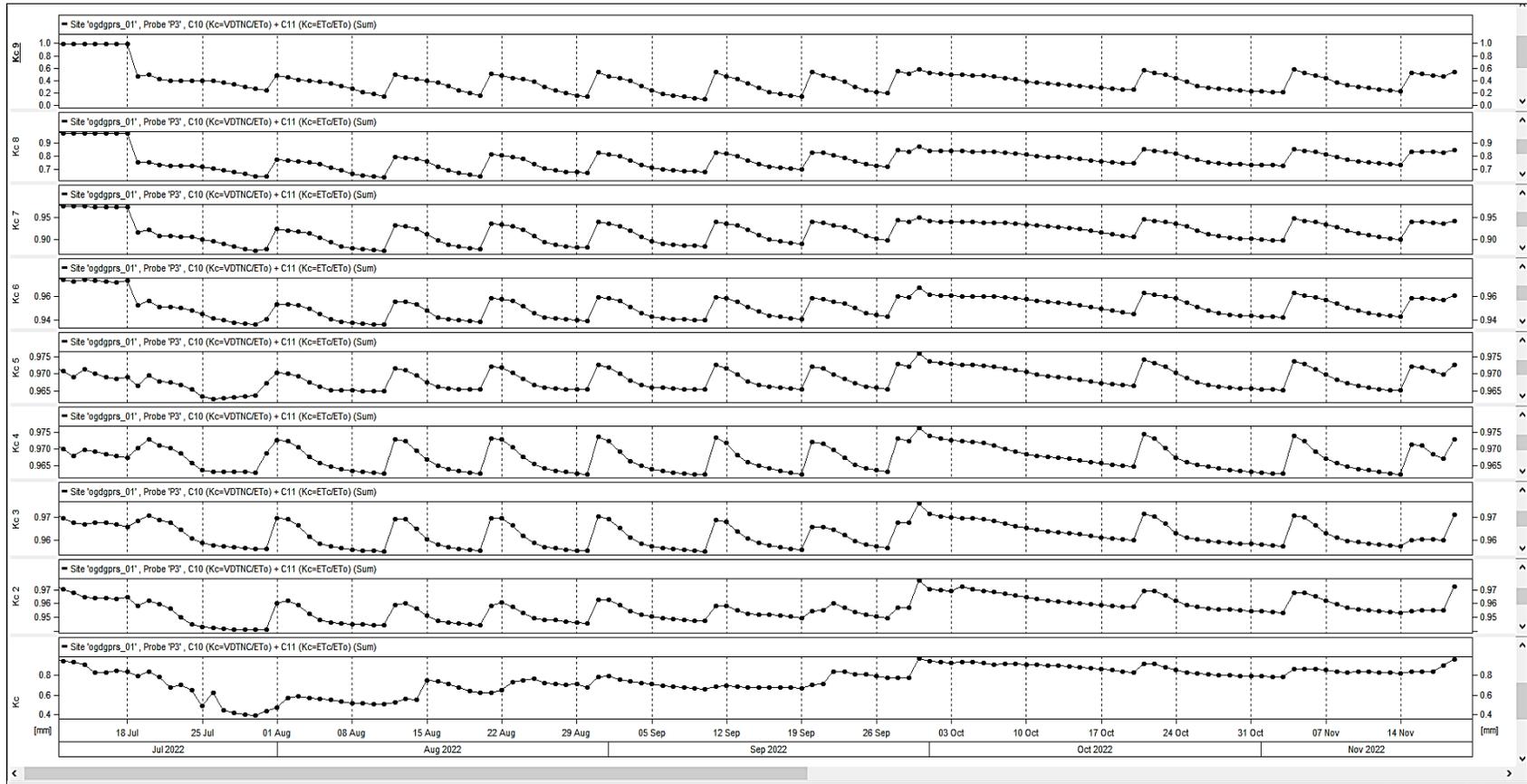
**Figure 141.** Coefficient cultural ( $K_c$ ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : *a*) première saison (2022) et *b*) deuxième saison (2023) de la sonde 1

## 2) Sonde 2

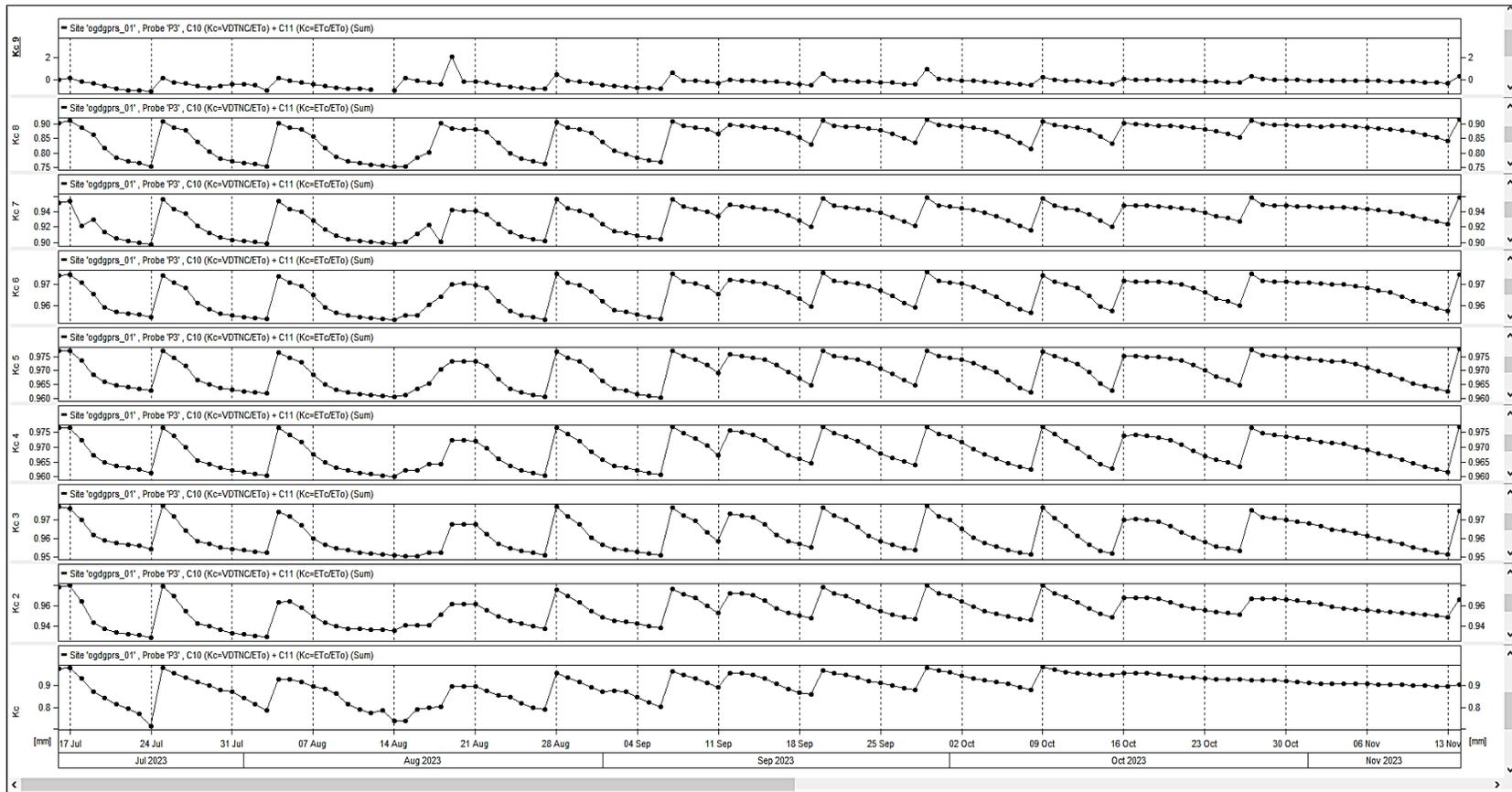
Les illustrations de l'évolution du Kc capteur par capteur réalisées (Fig.142a) présentent en 2022, des valeurs de Kc faibles (5 cm – 45 cm de profondeur) et stables (55 cm – 85 cm de profondeur) lors de la première semaine (11/07/2022 – 18/07/2022) de la saison. Par la suite, du 18/07/2022 – 28/09/2022, Kc fluctue énormément dans toutes les profondeurs. A partir du 03/10/2022 jusqu'à la fin de la saison, Kc a tendance à être beaucoup plus stable qu'élevé. Par ailleurs, il faut noter que pendant que la stabilité est beaucoup plus visible en surface, elle l'est de moins en moins en profondeur dans le sol.

L'observation générale en 2023 des courbes (Fig.142b) permet d'apercevoir une faible évolution de Kc à 85 cm tout le long de la saison ; contrairement dans le reste des horizons où le Kc varie énormément. De plus près, à la première semaine (17/07/2023 – 24/07/2023) de la campagne, une décroissance de Kc s'observe à toutes les profondeurs. Par la suite, elle fluctue énormément jusqu'au 30/10/2023 où il diminue à nouveau, voire se stabilise. Notons que Kc a commencé à se stabiliser à 5 cm de profondeur le 09/10/2023, bien avant de le faire dans le reste des profondeurs.

a)



b)



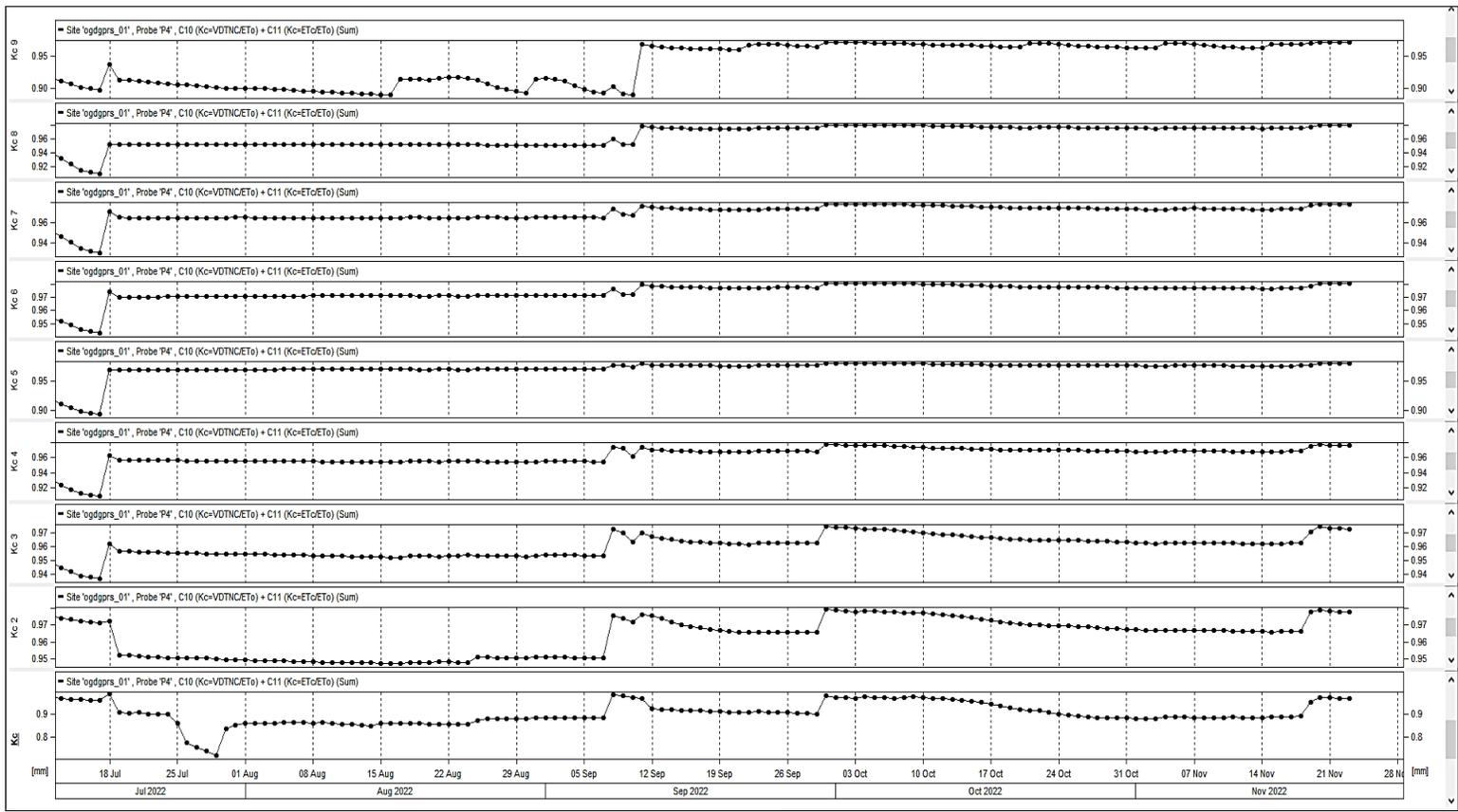
**Figure 142.** Coefficient cultural ( $K_c$ ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : *a*) première saison (2022) et *b*) deuxième saison (2023) dans la sonde 2

### 3) Sonde 3

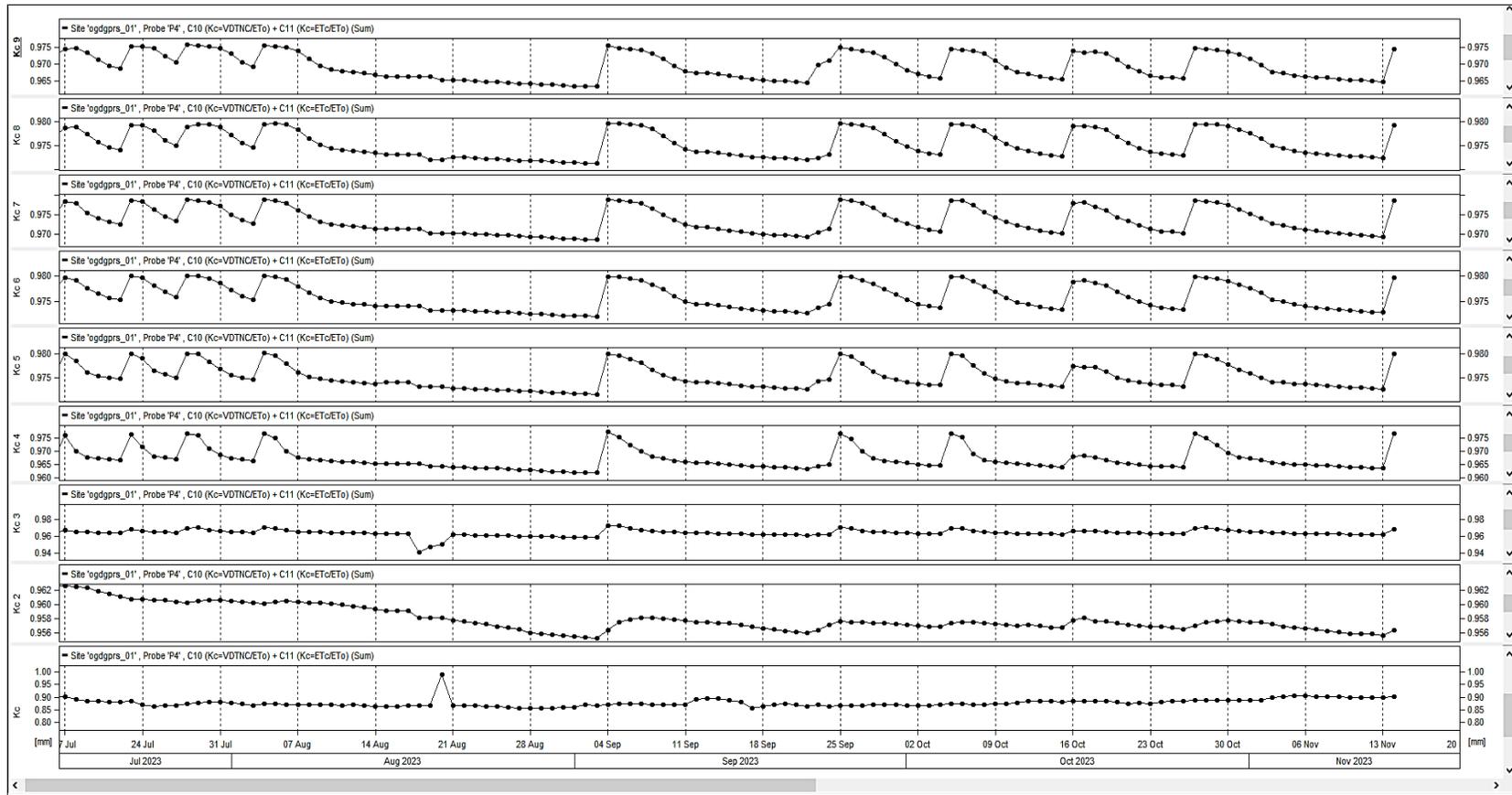
En 2022 (Fig.143a), l'analyse des graphes de Kc obtenus présente à la première semaine de la saison (11/07/2022 – 18/07/2022), une stabilisation de Kc dans les 15 premiers centimètres (15 cm) de profondeur du sol, avant de diminuer dans le reste des profondeurs au cours de la même semaine. Cependant le 18/07/2022, pendant que Kc va diminuer dans les 15 premiers cm, il va plutôt s'élever dans le reste des profondeurs. Du 19/07/2022 – 05/09/2022, une stabilité dans l'ensemble s'observe dans chaque profondeur. Seulement avec quelques différences au niveau de 5 cm ou il y'a une diminution observée du 25/07/2022 – 01/08/2022 ; aussi au niveau de 85 cm de profondeur ou il l'a tendance à s'élever entre le 15/08/2022 - 05/09/2022. Du 08/10/2022 – 10/08/2022, Kc fluctue légèrement avant par la suite de se stabiliser à nouveau dans l'ensemble jusqu'à la fin de la saison. Notons que cette stabilité s'observe mieux à partir de 45 cm jusqu'à 85 cm que dans les 35 premiers centimètres du sol.

En 2023 (Fig.143b), les graphes de Kc réalisés mettent en exergues une fluctuation de Kc à partir de 45 cm de profondeur de sol à contrario d'une stabilité dans les 35 premiers cm du sol à la première semaine du mois de la saison (17/07/2023 -24/07/2023). Du 14/08/2023 – 04/09/2023, C'est beaucoup plus une stabilité qui s'observe (35 cm -85 cm de profondeur) qu'une diminution de Kc (15 et 25 cm de profondeur). Seulement à 5 cm au cours de cette même date, une légère évolution de Kc s'observe. Dans le reste de la saison (à partir de 05/09/2023 jusqu'à la fin), des fluctuations de Kc se font plus ressentir à partir de 35 cm de profondeur ; car dans les trois premières profondeurs (5 cm, 15 cm et 25 cm), le Kc est beaucoup plus stable.

a)



b)



**Figure 143.** Coefficient cultural ( $K_c$ ) de la culture à chaque profondeur du sol au cours de la : *a*) première saison (2022) et *b*) deuxième saison (2023) dans la sonde 3

### **VI.5.2 Comparaison du coefficient cultural (Kc) de la culture obtenue dans toutes les sondes installées**

Le tableau 18 présente les coefficients culturaux (Kc) obtenus chaque mois pour les années 2022 et 2023, avec les sondes placées sous différents systèmes d'irrigation. Le coefficient cultural est un facteur qui permet d'ajuster les besoins en eau d'une culture spécifique en fonction de son stade de développement, des conditions climatiques, et du type de culture. L'analyse globale des données montre que les coefficients culturaux pour les différentes sondes sont relativement stables d'un mois à l'autre au cours des deux années. Reflétant une constance dans la réponse des orangers aux conditions d'irrigation et aux phases de leur cycle de développement. Le coefficient Kc de S1 montre une légère augmentation en 2023 par rapport à 2022, suggérant une amélioration de l'efficacité de l'irrigation souterraine à 15 cm de profondeur.

La comparaison des valeurs de Kc entre les sondes montre que dans S1, le Kc se situe entre 0,80 et 0,92 en 2022 et est légèrement plus élevé en 2023, variant de 0,91 à 0,92. Les coefficients Kc pour S2 sont légèrement inférieurs en 2023 par rapport à 2022, avec une baisse notable en juillet et août. Les coefficients Kc de S3 sont les plus élevés et les plus stables parmi les trois sondes, avec des valeurs comprises entre 0,94 et 0,97 pour les deux années.

L'étude menée par (Snyder & O'Connell 2007) sous climat aride sur les coefficients culturaux pour l'irrigation micro – aspersion, dans la culture des orangers Thomson à l'état mature a permis d'obtenir les valeurs de Kc par mois tout le long de l'année. Cependant, on s'est concentré sur celles obtenues du mois de Juillet à Novembre. Il s'agit respectivement de 0.96, 1.02, 1.02, 1.07 et 1.70. (Consoli & Papa 2013), spécifie que le maximum au mois de Novembre de Kc obtenu est de 0.95 sous climat Méditerranéen semi - aride. Ces valeurs sont certes légèrement différentes de celles obtenues dans la zone à partir de Août ; mais elles ne sont pas non plus trop éloignées. Par ailleurs, il faut remarquer que l'influence du type d'irrigation et le stade phénologique de la plante peuvent justifier cette différence observée. En effet, dans le cadre de mes travaux, mes arbres sont encore jeunes (moins de 6 ans d'âge) et les systèmes pris en compte sont le goutte à goutte de surface et souterrain.

**Tableau 18.** Coefficient cultural (Kc) de la culture des orangers par mois, obtenue en millimètres (mm) dans chaque sonde (S1, S2, S3), sur un profil pédologique de 85 cm pendant 2 ans

MOIS	2022			2023		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Juillet	0.80	0.87	0.94	0.92	0.77	0.96
Août	0.89	0.82	0.94	0.91	0.77	0.96
Septembre	0.88	0.83	0.96	0.92	0.80	0.96
Octobre	0.88	0.86	0.97	0.91	0.82	0.96
Novembre	0.90	0.86	0.96	0.92	0.81	0.96
<b>Min</b>	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	<b>0.94</b>	<b>0.91</b>	<b>0.77</b>	<b>0.96</b>
<b>Max</b>	<b>0.90</b>	<b>0.87</b>	<b>0.97</b>	<b>0.92</b>	<b>0.82</b>	<b>0.96</b>
<b>Moy</b>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	<b>0.95</b>	<b>0.92</b>	<b>0.79</b>	<b>0.96</b>

L'analyse des variations mensuelles de Kc permet de constater que les valeurs de Kc sont légèrement plus basses en été (Juillet et Août) pour S2 en 2023, ce qui pourrait refléter un stress hydrique dû à une évaporation plus importante en surface, affectant ainsi l'efficacité de l'irrigation. Par contre de Septembre à Novembre, les coefficients Kc restent élevés, particulièrement pour S3, suggérant que l'irrigation souterraine profonde continue de bien répondre aux besoins des orangers même en fin de saison, lorsque les conditions de croissance sont encore favorables.

L'augmentation légère du Kc en 2023 dans S1, indique une amélioration dans la gestion de l'irrigation, probablement en raison d'une meilleure adaptation de la profondeur d'irrigation aux besoins des racines superficielles des orangers. Par contre, la baisse des valeurs Kc en 2023 au sein de S2, surtout en été, suggère que l'irrigation de surface est moins efficace pour les orangers, possiblement en raison des pertes d'eau par évaporation, ce qui pourrait rendre l'irrigation moins efficace pendant les périodes de forte chaleur. Les valeurs élevées et stables de Kc observées dans S3, montrent que l'irrigation souterraine à cette profondeur est la plus adaptée pour les orangers, offrant une meilleure rétention d'eau et répondant aux besoins des racines plus profondes.

Finalement, les coefficients culturels montrent que l'irrigation doit être soigneusement gérée en fonction des saisons, avec une attention particulière à l'été où les besoins en eau sont plus élevés et les risques de stress hydrique sont plus importants, surtout avec une irrigation de

surface. Par ailleurs pour une meilleure optimisation, l'irrigation souterraine, surtout à 30 cm (S3), semble être la meilleure stratégie pour les orangers en termes de maintien de l'humidité du sol, minimisation des pertes d'eau, et optimisation de la productivité, en particulier dans les conditions climatiques de la plaine de Mitidja.

## **VI.6 Analyse des apports d'eau et rendement dans chaque système d'irrigation**

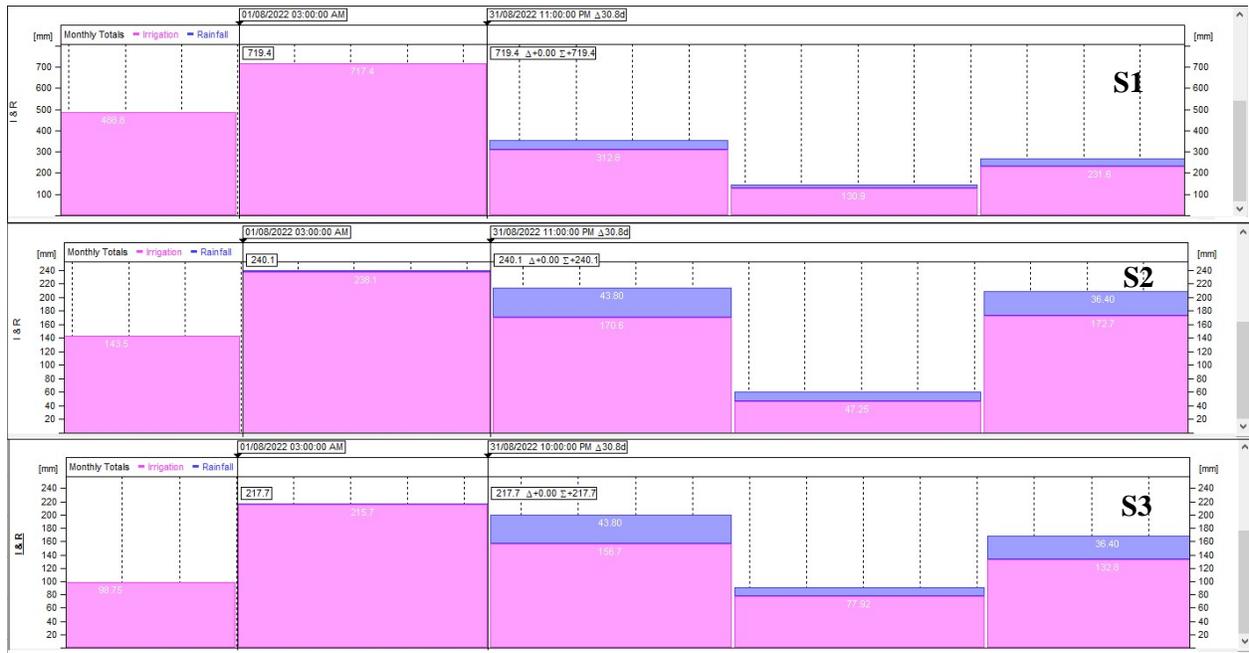
### **VI.6.1 Evaluation du volume d'irrigation de chaque système d'irrigation**

Afin d'évaluer les volumes d'eau apportés à chaque plante sous différents systèmes d'irrigation pendant deux ans, des graphes ont été illustrés. Ces derniers traduisent les totaux du volume obtenu par pendant cinq (05) mois (Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre) durant toutes les deux saisons (2022 et 2023). Rappelons que S1 représente le système d'irrigation goutte à goutte subsurface (15 cm) ; S2 celui de surface et S3, celui souterrain (30 cm de profondeur).

- **Année 2022**

L'analyse globale de la figure 144 montre que dans S1, les volumes d'irrigation varient de 130,9 mm (octobre) à 717,4 mm (août), avec une moyenne de 376,3 mm. Dans S2, les volumes d'irrigation varient de 47,3 mm (octobre) à 238,1 mm (août), avec une moyenne de 154,43 mm.. Au sein de S3, les volumes varient plutôt de 77,92 mm (octobre) à 215,7 mm (août), avec une moyenne de 136,4 mm

Globalement, 2022 montre une gestion de l'irrigation où les volumes les plus élevés sont appliqués en été (juillet et août) pour toutes les sondes, avec une réduction progressive à l'approche de l'automne. Le système d'irrigation de subsurface (S1) reçoit les volumes les plus élevés, probablement pour maximiser l'humidité dans la zone racinaire principale, tandis que les systèmes en surface et souterrain (S2 et S3) sont utilisés de manière plus modérée, peut-être pour répondre aux conditions spécifiques du sol et aux besoins des racines à différentes profondeurs.

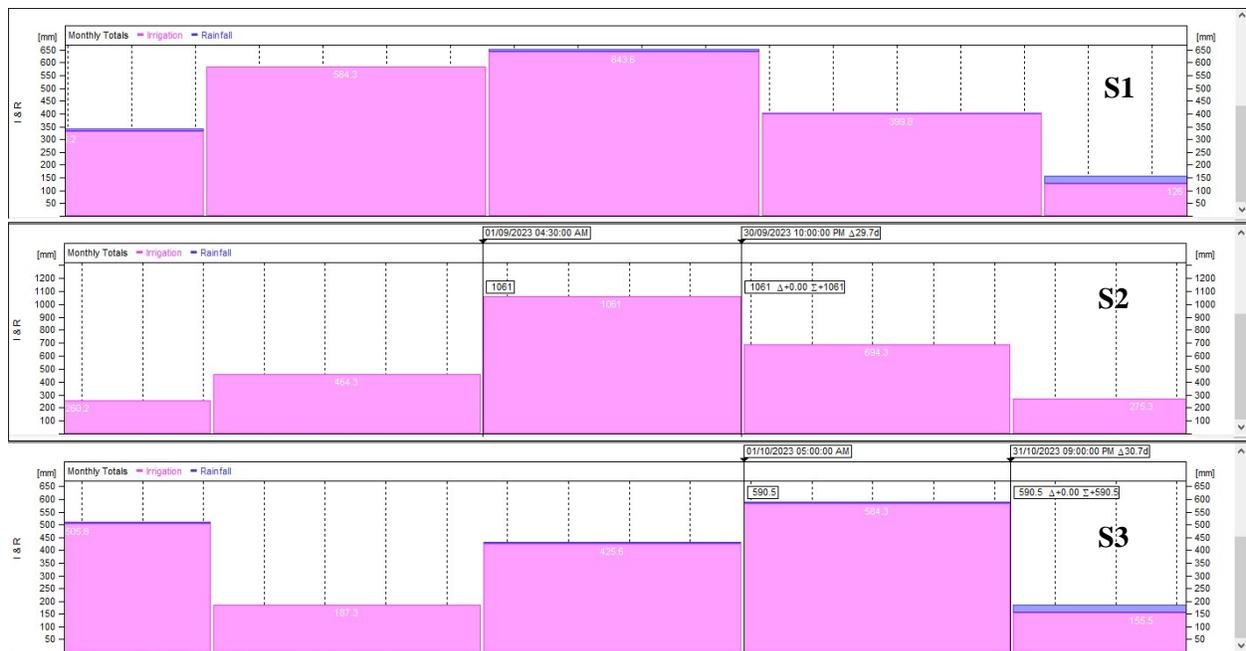


**Figure 144.** Totaux de volumes d'eau (mm) obtenus par mois dans chaque système d'irrigation installé durant la première campagne 2022

- **Année 2023**

L'examen de la figure 145 montre à S1, des volumes d'irrigation variant de 126,7 mm (novembre) à 643,6 mm (septembre), avec une moyenne de 417,5 mm. Les volumes sont relativement élevés tout au long de l'année, avec un pic en septembre. A S2, les volumes d'irrigation varient de 260,2 mm (juillet) à 1061 mm (septembre), avec une moyenne de 551,02 mm. Le système de surface reçoit une irrigation beaucoup plus intensive en 2023, avec un pic important en septembre. Au niveau de S3, les volumes varient de 155,5 mm (novembre) à 584,3 mm (octobre), avec une moyenne de 371,7 mm. Des pics majeurs s'observent en juillet et octobre,

Ainsi en 2023, l'irrigation a été nettement plus intensive, surtout pour S2 et S3. Le pic d'irrigation en septembre, notamment pour S2, reflète une réponse aux conditions climatiques particulières relevés pendant la saison. S1 continue de recevoir des volumes importants, mais la gestion semble plus équilibrée par rapport aux autres systèmes.

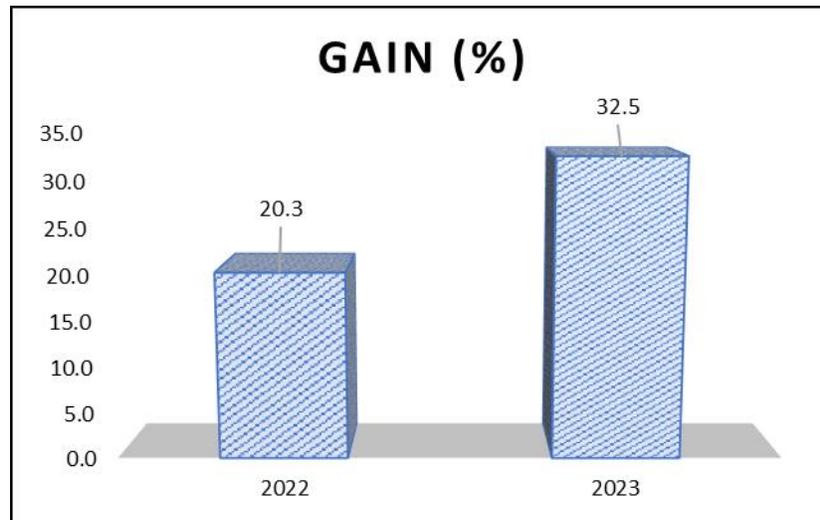


**Figure 145.** Totaux de volumes d'eau (mm) obtenus par mois dans chaque système d'irrigation installé durant la deuxième campagne 2023

En examinant les volumes d'irrigation appliqués aux orangers dans la plaine de Mitidja entre 2022 et 2023, on observe des ajustements notables en fonction des systèmes d'irrigation. S1, a montré une relative stabilité avec une légère augmentation de l'irrigation en 2023, notamment en septembre et octobre, probablement pour s'adapter aux besoins critiques de la culture en automne. S2, a vu une augmentation substantielle, surtout en septembre et octobre 2023, reflétant une stratégie visant à optimiser l'humidité dans la couche supérieure du sol, où l'évaporation peut être plus intense. En revanche, S3, a reçu des volumes irréguliers, avec une hausse notable en juillet et octobre 2023, ce qui pourrait indiquer une tentative d'assurer un apport en eau plus constant dans la zone racinaire profonde pendant les périodes critiques de stress hydrique.

La figure 146 illustre le gain en économie d'eau notable de S3 par rapport à S2 sur deux ans. L'analyse de graphe traduit une économie croissante allant de 20.3 à 32.5 % d'eau. C'est dire qu'au fil des ans, le système d'irrigation permet de plus en plus d'économiser de l'eau. Selon l'analyse globale effectuée par (Yang et al. 2023), sur l'irrigation goutte à goutte, il ressort que ce système permet d'économiser de l'eau en augmentant la croissance de la culture, l'efficacité d'utilisation de l'eau et du rendement. (Kourgialas et al. 2019) le rejoint en précisant que l'utilisation de l'eau peut être réduit jusqu'à 36 % pendant la période sèche avec ce système

comparé aux méthodes d'irrigation conventionnelles pour les agrumes. Ces résultats cadrent dans l'ensemble avec ceux obtenus dans la zone d'étude. Seulement en comparant les valeurs de pourcentages relevés, la valeur obtenue en 2023 se rapproche le plus de celle de Kourgialas et al., 2018 que celle de 2022.



**Figure 146.** Gain d'eau en pourcentage du système d'irrigation souterrain (30 cm de profondeur) par rapport à celui de surface sur 2 ans

### **VI.6.2 Relation existentielle entre les besoins et les apports d'eau dans chaque système d'irrigation pendant deux ans**

Le tableau 19 présente les résultats de l'évapotranspiration réelle de culture (ETc), du coefficient cultural (Kc) et des volumes d'irrigation obtenus par mois pour chaque système d'irrigation pendant deux campagnes (2022 et 2023).

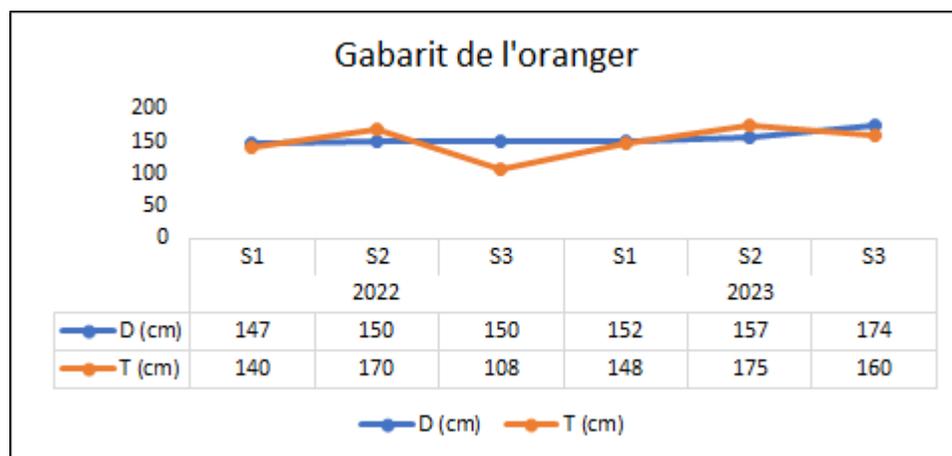
L'analyse du tableau 19 montre que l'irrigation est généralement ajustée pour répondre aux fluctuations du Kc et de l'ETc. Surtout pour les systèmes d'irrigation goutte à goutte souterrain (S1 et S3) qui montrent une bonne correspondance entre le Kc, ETc et les volumes d'eau apportés. Mettant en exergue une gestion efficace de l'irrigation qui réduit les pertes par évaporation et maximise l'usage de l'eau. Au niveau du goutte à goutte de surface (S2), bien que les volumes d'eau soient augmentés, ils semblent parfois excessifs, notamment en 2023, probablement pour compenser les pertes par évaporation. Ce qui pourrait être un signe d'inefficacité relative comparé à l'irrigation souterraine

**Tableau 19.** Analyse descriptive de l'évapotranspiration réelle de culture (ETc), du coefficient cultural (Kc) et des volumes d'irrigation obtenus par mois pour chaque système d'irrigation pendant deux campagnes (2022 2023).

MOIS	2022									2023								
	S1			S2			S3			S1			S2			S3		
	V	Kc	ETc	V	Kc	ETc	V	Kc	ETc	V	Kc	ETc	V	Kc	ETc	V	Kc	ETc
Juillet	488.8	0.80	2831.8	143.5	0.87	4083.3	98.8	0.94	3953.0	333.2	0.92	2290.2	260.2	0.77	2878.8	505.8	0.96	4967.2
Août	717.4	0.89	3299.0	238.1	0.82	4482.3	215.7	0.94	6002.9	584.3	0.91	4117.3	464.3	0.77	4982.2	187.3	0.96	8398.9
Septembre	312.8	0.88	3020.1	170.6	0.83	4579.5	156.7	0.96	8275.2	643.6	0.92	4289.2	1061.0	0.80	5753.3	425.6	0.96	8452.0
Octobre	130.9	0.88	3107.1	47.3	0.86	5282.6	77.9	0.97	10017.3	399.8	0.91	4212.3	694.3	0.82	6093.8	584.3	0.96	8943.4
Novembre	231.6	0.90	2128.8	172.7	0.86	3033.4	132.8	0.96	5495.6	126.6	0.92	1867.5	275.3	0.81	2517.4	155.5	0.96	3803.8
<b>Min</b>	<b>130.9</b>	<b>0.80</b>	<b>2128.8</b>	<b>47.3</b>	<b>0.82</b>	<b>3033.4</b>	<b>77.9</b>	<b>0.94</b>	<b>3953.0</b>	<b>126.6</b>	<b>0.91</b>	<b>1867.5</b>	<b>260.2</b>	<b>0.77</b>	<b>2517.4</b>	<b>155.5</b>	<b>0.96</b>	<b>3803.8</b>
<b>Max</b>	<b>717.4</b>	<b>0.90</b>	<b>3299.0</b>	<b>238.1</b>	<b>0.87</b>	<b>5282.6</b>	<b>215.7</b>	<b>0.97</b>	<b>10017.3</b>	<b>643.6</b>	<b>0.92</b>	<b>4289.2</b>	<b>1061.0</b>	<b>0.82</b>	<b>6093.8</b>	<b>584.3</b>	<b>0.96</b>	<b>8943.4</b>
<b>Moy</b>	<b>376.3</b>	<b>0.87</b>	<b>2877.3</b>	<b>154.4</b>	<b>0.85</b>	<b>4292.2</b>	<b>136.4</b>	<b>0.95</b>	<b>6748.8</b>	<b>417.5</b>	<b>0.92</b>	<b>3355.3</b>	<b>551.0</b>	<b>0.79</b>	<b>4445.1</b>	<b>371.7</b>	<b>0.96</b>	<b>6913.1</b>

### VI.6.3 Evolution du gabarit de l'arbre d'oranger

Afin d'apprécier le gabarit des arbres d'oranger du site expérimental, des orangers datant de moins de 6 ans ont été sélectionnés suivant chaque système d'irrigation sous lequel chaque sonde a été installée. Les mesures de la hauteur de l'arbre (T) ainsi que le diamètre de la couronne (D) encore dénommé envergure de la canopée ont été mesurés sur deux ans au tout début de la première campagne (2022) et la fin de la campagne (2023). L'objectif étant de visualiser la forme verticale et horizontale des orangers de la station sous différents systèmes d'irrigation. L'analyse comparative de ses paramètres sur deux années (Fig. 147) identifie S2 comme étant le système d'irrigation ayant permis une légère augmentation de la hauteur verticale sur la durée. Par contre S3 a plutôt permis une augmentation considérable sur la durée du diamètre de la couronne de l'arbre. Par ailleurs, S1, est celui qui sur la durée, maintien un certain équilibre des deux paramètres. Laissant transparaître l'impact du système d'irrigation sur la l'évolution végétative de l'arbre. C'est dire que le goutte à goutte souterrain (30 cm de profondeur) (S3) favorise une croissance horizontale plus étendue suite à l'approvisionnement principalement des racines profondes qui auront tendance à développer suivant cette direction pour l'approvisionnement en eau de la plante. Par contre le goutte à goutte de surface (S2) favorise plutôt une croissance verticale de l'arbre en approvisionnant essentiellement les racines de surface. Par ailleurs il faudrait aussi considérer les stratégies d'adaptation de l'arbre face aux conditions d'eau disponibles.

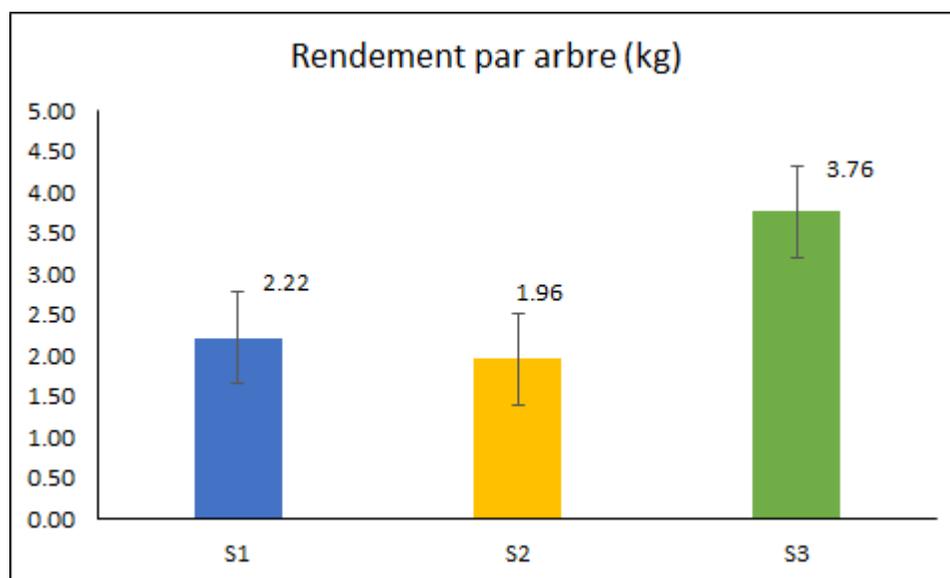


**Figure 147.** Evolution du gabarit de l'oranger sur deux ans dans chaque système d'irrigation (S1, S2, S3)

### VI.6.3 Rendement agricole obtenu par arbre d'oranger

La figure 148 présente le rendement agricole par arbre obtenu suite à l'usage de chaque système d'irrigation uniquement à la fin de la campagne 2023 car ayant eu quelques soucis expérimentaux à la première année. La lecture du graphe identifie S3 (système d'irrigation goutte à goutte souterrain de 30 cm de profondeur) comme étant celui qui a permis l'obtention d'un meilleur indice de rendement agricole ; Suivi de S1 et S2. Suite à la comparaison des systèmes, on constate de meilleurs résultats obtenus via les systèmes souterrains (S1 et S3) que de surface (S2).

Le rendement par arbre plus élevé sous la sonde S3 suggère que l'irrigation à 30 cm de profondeur offre des conditions plus favorables à la croissance des orangers, probablement en assurant une meilleure disponibilité en eau pour les racines. Les autres systèmes d'irrigation, à des méthodes différentes, semblent moins efficaces dans ce contexte. Les résultats obtenus sont presque pareils à ceux relevés par (Yang et al. 2023) qui soulignent que le goutte à goutte en général et souterrain en particulier améliore le rendement. Juste qu'il ne précise pas la profondeur idéale d'implantation du système goutte à goutte.



**Figure 148.** Indice de rendement agricole par arbre obtenu par rapport à la moyenne suite à l'usage de chaque système d'irrigation uniquement à la fin de la campagne 2023

## VI.7 Conclusion

La comparaison de différents systèmes sur deux ans montre que la fréquence d'irrigation est de 19 (S1) ; 14 (S2) et 10 (S3) en 2022 ; contre 16 (S1), 13 (S2) et 10 (S3) en 2023. En 2022, Août représente le mois le plus irrigué dans les trois sondes. Tandis qu'en 2023, c'est plutôt Septembre (S1, S2) et Octobre (S3). Le mois le moins irrigué en 2022 dans les trois sondes est Octobre ; contre Novembre (S1, S3) et Juillet (S2) en 2023.

La durée moyenne entre deux tours d'irrigation sur deux ans est comprise entre 7 et 8 jours pour S1, 10 jours pour S2 et entre 13 et 14 jours pour S3. Quant à la durée maximale entre deux tours d'irrigation durant les mêmes années, elle varie de 18 à 29 jours pour S1, 18 à 23 jours pour S2 et de 29 à 31 jours pour S3. Par contre, la durée minimale entre ses mêmes tours varie de 1 à 3 jours pour S1 ; 1 à 5 jours pour S2 et 5 jours pour S3.

Le nombre de seuils est le même dans toutes les sondes en 2022 ; à savoir 2. Mais en 2023, il varie plutôt entre 1 et 2. De ce fait, en 2022, RFU se situe entre 54 et 50 mm de profondeur pour S1 ; 85 et 67 mm de profondeur pour S2 ; 72 et 123 mm de profondeur pour S3. En même temps qu'elle va être en 2023, de 50 mm pour S1, 115 mm pour S3 et entre 80 et 81 mm pour S2.

Les mesures du volume d'eau total sont de 1881,5 mm (S1), 772,2 mm (S2) et 681,9 mm (S3) en 2022 ; tandis qu'elles sont plutôt de 2087,56 mm (S1), 2755,1 mm (S2) et 1858,5 mm (S3) en 2023. Entraînant une économie d'eau notable allant de 14 % (2022) à 32 % (2023) avec S3 par rapport à l'irrigation de surface (S2).

L'absence de marche de consommation est due principalement au drainage ou perte par percolation hors de la zone d'enracinement privilégié.

La concentration racinaire des orangers de la station varie entre 40 et 60 cm de profondeur. Les systèmes d'irrigation souterraine (S1 et S3) montrent une meilleure correspondance avec le Kc et l'ETc, suggérant une gestion plus efficace de l'eau, qui pourrait être particulièrement bénéfique pour maximiser la production des orangers dans la plaine de Mitidja

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette thèse de doctorat était d'étudier les systèmes d'irrigation présents au niveau de la parcelle expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique ; qui se retrouve dans la plaine de Mitidja, et offrir une meilleure gestion des ressources en eau en présentant de nouveaux outils d'optimisation de l'utilisation des ressources en eau tout en améliorant les rendements agricoles pour assurer la sécurité alimentaire de la population. A cet effet, plusieurs résultats ont été obtenus

Les études des sols montrent tout d'abord que le support sur lequel les tomates et les arbres d'oranger ont été plantés, objet de ce travail, possède majoritairement une matrice de limon. La densité apparente varie de 1,18 à 1,67 g/cm<sup>3</sup>, avec une moyenne de 1,38 g/cm<sup>3</sup> pour les tomates ; de 1,58 à 1,78 g/cm<sup>3</sup> dont la moyenne est de 1,66 g/cm<sup>3</sup> pour les orangers.

Avant le paillage, la matière organique varie de 1,14 à 1,23 % au sein du bloc A ; de 0,53 à 1,25 % au sein du bloc B. Quant au pH du sol, il varie de 7,05 à 7,2 pour le bloc A et de 6,02 à 7,16 pour le bloc B au niveau des tomates. Après le paillage, la matière organique est comprise entre 1,77 et 2,58 % pour le bloc A ; de 1,09 à 1,70 % pour le bloc B. En ce qui concerne le pH du sol, il est compris entre 6,66 et 7,26 pour le bloc A ; 6,2 et 7,06 pour le bloc B. Côté Orangers, le pH du sol varie plutôt 6,63 à 7,36 sur un profil d'un mètre de profondeur.

Le traitement des données d'infiltration obtenues in situ aussi bien dans les parcelles de tomates que celles des orangers montre globalement que les trois modèles sont applicables sur le terrain ; dont celui de Kostiakov modifié est le meilleur du point de vue applicabilité et vérification mathématique. En effet, ce modèle présente comme critères de performance en moyenne d'une part  $R^2 = 0,96$ ,  $RMSE = 1.30$ ,  $PBIAS = -10.49$  pour les tomates ; d'autre part :  $R^2 = 0,87$ ,  $RMSE = 1.60$ ,  $PBIAS = -0.15$  pour les orangers.

L'analyse de l'eau irriguée au sein des parcelles de tomates présente un pH de 7,30, une conductivité électrique de 699  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et une température de 19,42 °C. Côté orangers, l'analyse montre que le pH est de 7,09 ; la conductivité électrique est de 619  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et la température est de 19,48 °C. La qualité de l'eau est bonne pour l'irrigation.

L'étude de l'impact du paillage sur la température du sol met en exergue le rôle régulateur ou encore d'équilibre joué par les paillis. En effet, en 2022, la sciure permettait d'augmenter la température dans le sol ; par contre en 2023, le mélange permet plutôt de diminuer considérablement la température dans le sol. Notons qu'au sein de ce paramètre, l'écart de moyennes dans les parcelles paillées est de l'ordre de + 0.9°C (parcelle sciure) en 2022 contre - 1.3 °C (parcelle mélange) en 2023. Avec 10 cm et 20 cm étant respectivement les profondeurs ayant enregistré les valeurs de températures les plus élevées en 2022 et 2023.

Cette étude a également montré l'impact positif du paillis sur la stabilité de la salinité du sol ; mettant en exergue l'augmentation de la conductivité électrique en surface, suivie d'une diminution en profondeur. Par ailleurs, 10 cm est la profondeur qui a enregistré le plus fort taux de conductivité électrique en 2022 (0.44 mS/cm) et en 2023 (0.48 mS/cm). La parcelle mélange représente la parcelle ayant enregistré les plus faibles valeurs durant les deux (02) ans.

Pour ce qui est de l'impact du paillis sur l'humidité du sol, il montre qu'avec le temps, le paillage en général et la sciure en particulier permettent une meilleure rétention de l'humidité dans le sol de l'ordre de 2,5 % en 2022 contre 2,9 % en 2023 que le témoin. 15 cm étant la profondeur idéale de rétention sur deux ans suite au taux d'évaporation élevé en surface, le système racinaire de la plante et les remontées capillaires en profondeur. Il faut aussi noter l'impact positif du paillage sur la durée de chaque cycle de croissance de la plante ; identifiant de ce fait le cycle 3 comme étant celui qui a duré le plus sur deux ans dans chaque parcelle paillée.

L'établissement de corrélation entre les trois paramètres étudiés (humidité, température et conductivité du sol) identifie 10 cm et 15 cm sur deux ans comme étant celles où l'humidité du sol a beaucoup influencé la conductivité électrique du sol.

L'influence du paillage organique sur l'irrigation identifie sur deux ans, un nombre de tours d'irrigation plus faible dans les parcelles paillées que dans celle témoin. Mais aussi montre des parcelles paillées moins irriguées que celle témoin. La parcelle mélange étant celle la moins irriguée dont le nombre de tours est de 8. Par ailleurs, elle est celle qui a conservé plus d'eau dans le sol par rapport aux autres parcelles car en 2022, elle a mis au maximum 22 jours avant d'être à nouveau irriguée contre 21 jours en 2023. Tout comme, elle représente la parcelle qui a reçu le moins de volume d'eau sur deux ans (672 – 504 l). Permettant un énorme gain d'eau de l'ordre de 27,3 % (2022) à 50 % (2023) ; contrairement au reste de parcelles paillées.

La parcelle mélange est identifiée comme celle ayant obtenu le plus de fruits de tomate, avec un poids moyen maximal et un meilleur rendement par rapport aux autres parcelles. Pour ce qui est de l'évolution végétative, le paillage améliore son évolution à long terme qu'à court terme.

L'optimisation de l'efficacité de l'irrigation dans la culture de la tomate relève que le paillis mélange combiné avec le système d'irrigation localisée souterrain (15 cm de profondeur) entraîne une augmentation significative de rendement allant de 603,6 kg/ha (dans les parcelles non paillée) à 1752 kg/ha (dans les parcelles paillées) de la tomate tout en régulant l'humidité, la température et la conductivité du sol. Aussi ils ont démontré une utilisation efficace de l'eau d'irrigation (WUE) sous parcelles paillées (2,5 kg/ha/mm) que nu (0,6 kg/ha/mm). Permettant une économie de l'eau irriguée de 29,6 %. Cependant, on observe une légère diminution de l'efficacité de l'eau (ea) avec le mélange (96,1 %) et le BRF (96,4 %), contrairement au témoin où elle reste élevée (97,1 %).

La comparaison de différents systèmes sur deux ans au sein des orangers, montre que la fréquence d'irrigation est de 19 (S1) ; 14 (S2) et 10 (S3) en 2022 ; contre 16 (S1), 13 (S2) et 10 (S3) en 2023. En 2022, Août représente le mois le plus irrigué dans les trois sondes. Tandis qu'en 2023, c'est plutôt Septembre (S1, S2) et Octobre (S3). Le mois le moins irrigué en 2022 dans les trois sondes est Octobre ; contre Novembre (S1, S3) et Juillet (S2) en 2023.

La durée moyenne entre deux tours d'irrigation sur deux ans est comprise entre 7 et 8 jours pour S1, 10 jours pour S2 et entre 13 et 14 jours pour S3. Quant à la durée maximale entre deux tours d'irrigation durant les mêmes années, elle varie de 18 à 29 jours pour S1, 18 à 23 jours pour S2 et de 29 à 31 jours pour S3. Par contre, la durée minimale entre ses mêmes tours varie de 1 à 3 jours pour S1 ; 1 à 5 jours pour S2 et 5 jours pour S3.

Le nombre de seuils est le même dans toutes les sondes en 2022 ; à savoir de 2. Mais en 2023, il varie plutôt entre 1 et 2. De ce fait en 2022, RFU se situe entre 54 et 50 mm de profondeur pour S1 ; 85 et 67 mm de profondeur pour S2 ; 72 et 123 mm de profondeur pour S3. En même temps qu'elle va être en 2023, de 50 mm pour S1, 115 mm pour S3 et entre 80 et 81 mm pour S2.

Les mesures totales des volumes d'eau sont de 1881,5 mm (S1), 772,2 mm (S2) et 681,9 mm (S3) en 2022 ; tandis qu'elles sont plutôt de 2087,56 mm (S1), 2755,1 mm (S2) et 1858,5 mm (S3) en 2023. Entraînant une économie d'eau notable allant de 14 % (2022) à 32 % (2023) avec S3 par rapport à l'irrigation de surface (S2).

La concentration racinaire des orangers de la station varie entre 40 et 60 cm de profondeur. Les systèmes d'irrigation souterraine (S1 et S3) montrent une meilleure correspondance avec le  $K_c$  et l' $ET_c$ , suggérant une gestion plus efficace de l'eau, qui pourrait être particulièrement bénéfique pour maximiser la production des orangers dans la plaine de Mitidja.

Ces résultats peuvent faire l'objet d'une expérimentation et une utilisation à grande échelle pour une utilisation optimale des ressources en eau, ainsi qu'une augmentation des rendements. Ce qui conduira à réaliser les objectifs du développement durable (ODD) à l'horizon 2030 fixés par les Nations Unies. Ces derniers seront dans l'optique d'assurer la sécurité alimentaire du pays.

## **RECOMMANDATIONS**

Sur la base des résultats de l'étude de la tomate, nous recommandons aux agriculteurs de la plaine de la Mitidja d'adopter le paillis mélange associé au système d'irrigation localisé souterrain (de 15 cm de profondeur) pour cultiver efficacement la tomate. Tout simplement parce que c'est une option économique viable, simple à réaliser et efficace pouvant être utilisée par les agriculteurs en climat aride ou semi-aride.

Dans la culture des orangers de la plaine de Mitidja, nous recommandons l'adoption de l'irrigation souterraine, particulièrement à 30 cm de profondeur, combinée à l'intégration des technologies innovantes tels que Irrimax pour une meilleure optimisation du pilotage d'irrigation. Ceci afin de permettre une meilleure utilisation de l'eau, mais aussi améliorer la production agricole tout en minimisant les pertes d'eau.

De plus, nous encourageons la recherche continue sur de nouvelles pratiques et technologies d'agriculture de conservation et de précision adaptées à cette région, en mettant l'accent sur la durabilité environnementale et la rentabilité économique.

Il est également essentiel de sensibiliser et de former les agriculteurs aux avantages de l'agriculture de conservation et de précision ; aussi de faciliter l'accès aux ressources nécessaires, telles que les matériaux de paillage organiques et les équipements d'irrigation localisée.

Enfin, une collaboration étroite entre les chercheurs, les agriculteurs, les décideurs politiques et les acteurs des secteurs agricole et ressources en eau est cruciale pour promouvoir l'adoption généralisée de pratiques agricoles durables dans la plaine de la Mitidja.

## PERSPECTIVES

Comme travaux futurs, il serait intéressant de se pencher sur :

- La comparaison de l'efficacité du paillage organique sur différentes cultures autres (à l'instar des orangers par exemple) que les tomates pour déterminer les meilleures pratiques culturales pour chaque type de culture dans la région de la Mitidja ;
- L'optimisation de l'efficacité d'irrigation sous paillage à travers la conception des programmes d'irrigation, prenant en compte les effets du paillage sur la rétention et la consommation d'eau, pour maximiser l'efficacité de l'irrigation et minimiser les pertes ;
- La poursuite des recherches pour déterminer la profondeur d'irrigation souterraine la plus efficace pour les orangers ; aussi faire pareil pour les tomates sur toute la plaine de Mitidja ;
- L'intégration des technologies de télédétection et de modélisation à la question de recherche présente, dans l'optique de prédire les besoins en eau futurs, optimiser les stratégies d'irrigation et cartographier les variations spatiales de l'humidité du sol ; permettant aux agriculteurs d'adapter leurs pratiques agricoles ;
- L'optimisation de l'irrigation souterraine des orangers à partir du développement de modèles d'irrigation de précision intégrant les données climatiques locales, capacité de rétention d'eau et les besoins hydriques spécifiques des orangers pour ajuster automatiquement la fréquence et la quantité d'irrigation.
- La modélisation de l'impact des changements climatiques sur les besoins en irrigation à partir du développement des modèles qui prédisent comment les changements climatiques futurs pourraient affecter les besoins en irrigation des orangers dans la plaine de Mitidja ; aussi explorer les stratégies d'adaptation pour maintenir la productivité ;
- Les effets économiques et environnementaux de l'irrigation souterraine à travers d'une part, l'analyse de coûts – bénéfices de l'irrigation souterraine comparé par exemple aux systèmes d'irrigation traditionnels dans la culture des orangers ; mais aussi de l'évaluation et l'empreinte écologique de l'irrigation souterraine (consommation d'eau, d'énergie et de préservation des ressources naturelles) ;

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Abou Zakhem, B., Al Ain, F., & Hafez, R. (2019). Assessment of field water budget components for increasing water productivity under drip irrigation in arid and semi-arid areas, Syria. *Irrigation and Drainage*, 68(3), 452-463.
- Adams, J. E. (1966). Influence of mulches on runoff, erosion, and soil moisture depletion. *Soil Science Society of America Journal*, 30(1), 110-114.
- Admasu, R., & Tamiru, Z. (2019). Integrated Effect of Mulching and Furrow Methods on Tomato (*Lycopersium esculentum* L) Yield and Water Productivity at West Wellega, Ethiopia. *Natural Sciences Research*.
- Ahmad, S., Raza, M., Saleem, M., Iqbal, R., Zaheer, M., Haider, I., Aslam, M., Ali, M., & Khan, I. (2020). Significance of partial root zone drying and mulches for water saving and weed suppression in wheat. *Animal and Plant Sciences*, 30, 154-162.
- Akhtar, S., Wahid, A., Akram, M., & Rasul, E. (2001). Some growth, photosynthetic and anatomical attributes of sugarcane genotypes under NaCl salinity. *International Journal of Agriculture and Biology*, 3(4), 439-443.
- Al-agele, H. A. (2020). Irrigation Innovations to Increase Efficiency and Sustainability.
- Alsulaimani, F. (2017). *Testing and Evaluation of a Smart Irrigation System towards Smart landscaping in UAE* The British University in Dubai].
- Amichi, F., Bouarfa, S., Lejars, C., Kuper, M., Hartani, T., Daoudi, A., Amichi, H., & Belhamra, M. (2015). Greenhouses and men: farm holdings favouring territorial expansion and upward socio professional mobility on a Saharan pioneer front in Algeria.
- ANRH. (2012). « Note sur la piézométrie de la nappe de la Mitidja ». Rapport compagne
- ANRH. (2015). Bulletin des analyses physico-chimique des années (2011-2015) de la plaine de Mitidja.
- Aris, Y. (1994). *Études tectonique et microtectonique des séries jurassiques à plio-quaternaires du constantinois central (Algérie Nord-Orientale): caractérisation des différentes phases de déformation* Université Henri Poincaré-Nancy 1].
- Baslimane, A. (2012). *Recharge artificielle de la nappe (cas du bassin d'infiltration N 02 commune de Chebli*
- Batchelor, S., & Schnetzer, J. (2018). Compendium on climate-smart irrigation: concepts, evidence and options for a climate-smart approach to improving the performance of irrigated cropping system.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. .
- BEN HAMMADI, A., BOUROKBA, S., & BOUREGAA, S. (2023). *ETUDE COMPARATIVE DES VARIÉTÉS DE TOMATE EN ALGERIE MORPHOLOGIE, PRODUCTIVITE ET RÉSISTANCE AUX MALADIES* UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR].
- Besada, H., & Werner, K. (2015). An assessment of the effects of Africa's water crisis on food security and management. *International journal of water resources development*, 31(1), 120-133.
- BNEDER. (2015). Projet d'atteindre 2 millions d'hectares de terres irriguées en 2020. *Parution du BNEDER MAG N°- 1 Février 2015*.
- Bouaroudj, S., & Kadem, D.-E.-D. (2012). Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation.

- Boudjelel A. (2006). *Détermination des besoins en eau des cultures à l'aide de logiciel cropwat 4.3 dans la wilaya de Tipaza. Mémoire,*
- Bourziza, R., Hammani, A., Mailhol, J. C., Bouaziz, A., & Kuper, M. (2017). Modélisation de l'irrigation en goutte à goutte enterré du palmier dattier sous les conditions oasiennes. *Cahiers Agricultures*, 26(3), 35007.
- Boyer, L. (2021). *Revue de littérature systématique sur le potentiel d'utilisation des paillis organiques à améliorer la qualité des sols et de la durabilité des vergers de pommes québécois.*
- Cadavid, L., El-Sharkawy, M., Acosta, A., & Sánchez, T. (1998). Long-term effects of mulch, fertilization and tillage on cassava grown in sandy soils in northern Colombia. *Field Crops Research*, 57(1), 45-56.
- Camilli, A., Cugnasca, C. E., Saraiva, A. M., Hirakawa, A. R., & Corrêa, P. L. (2007). From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 58(1), 25-36.
- Canton, H. (2021). Food and agriculture organization of the United Nations—FAO. In *The Europa directory of international organizations 2021* (pp. 297-305). Routledge.
- Chabaca, M. (2004). L'irrigation gravitaire par micro-raie en Algérie. Propositions pour une amélioration de la pratique ou une modernisation de la technique. Quelles alternatives? Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée,
- Chabaca, M. (2008). Maîtrise des performances des systèmes d'irrigation à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle. Cas de quelques exploitations agricoles en Algérie dans la plaine de la Mitidja ouest tranche 1. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb,
- Chabaca, M. N. (2007). *Analyse des paramètres d'efficience de l'irrigation gravitaire traditionnelle en Algérie* INA].
- Chabour, N., Mebrouk, N., Hassani, I., Upton, K., Dochartaigh, B., & Howard, I. (2018). Africa Ground WaterAtlas: Hydrogeology of Algeria. *British Geological Survey: Nottingham, UK.*
- Chadou, O., Ahmim, A., (2019). *Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation dans la région d'El Oued. Mémoire de Master, Science de la nature et de la vie. 57p.*
- Chalker-Scott, L. (2007). Wood Chip Mulch: Landscape Boon or Bane? *Master Gardener.*
- Chandra, R., & Rustgi, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in polymer science*, 23(7), 1273-1335.
- Chenafi, A., Monney, P., Ceymann, M., Arrigoni, E., Boudoukha, A., & Carlen, C. (2013). Influence de l'irrigation déficitaire sur le rendement, la qualité de pommes 'Gala'et l'économie en eau. *Rev. Suisse vitic. arboric. Hortic*, 159, 92-101.
- Clint Richards, T. (2018). Japan's Agriculture Dilemma. *The Diplomat.* <https://thediplomat.com/2014/09/japans-agriculture-dilemma/>
- Coiffait, P.-E. (1992). *Un bassin post-nappes dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie nord-orientale)* Nancy 1].
- Consoli, S., & Papa, R. (2013). Corrected surface energy balance to measure and model the evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions. *Irrigation science*, 31, 1159-1171.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 11-43.

- Costa, M. M., Queiroz, D. M. d., Pinto, F. d. A. d. C., Reis, E. F. d., & Santos, N. T. (2014). Efeito do teor de água na relação entre a condutividade elétrica aparente e atributos do solo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 36, 395-401.
- da Silva, J. (2017). FAO-The future of food and agriculture: Trends and challenges. *Report of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Darouich, H. (2014). *Multicriteria Analysis for Irrigation Sustainable Development: Design and Selection of Irrigation Systems* Universidade de Lisboa (Portugal)].
- Dekhil, S. (1991). L'eau et le developpement de l'irrigation en algerie. *New Médit*, 1(2), 34-38.
- Denison, J. (2020). *Cadre de Développement de l'Irrigation et de Gestion de l'Eau Agricole en Afrique*.
- Dimane, F., Haboubi, K., Hanafi, I., & El Himri, A. (2016). Évaluation de l'efficacité de traitement des eaux usées par le lagunage naturel: Cas de la station d'épuration d'Imzouren-MAROC-[Assessment of the effectiveness of a wastewater and treatment by the natural lagoon: Case of the treatment plant of the city Imzouren-MAROC-]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17(2), 672-681.
- Djoudar - Hallal, D. (2003). *Vulnérabilité et protection des nappes aquifères en région côtière Alger*].
- Djoudar D. (2011). *Classification des bassins versants de la Mitidja Centre et Ouest (Algérie) selon la méthode développée par l'APRONA* Communication internationale, Alger.
- Doeffinger, T., Borgomeo, E., Young, W. J., Sadoff, C., & Hall, J. W. (2020). A diagnostic dashboard to evaluate country water security. *Water Policy*, 22(5), 825-849.
- Donagemma, G. K., Ruiz, H. A., Alvarez V, V. H., Ker, J. C., & Fontes, M. P. F. (2008). Solution equilibrium phosphorus in clay and silt fractions of oxisols after particle size analysis pre-treatments. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1785-1791.
- Du, C., Li, L., & Effah, Z. (2022). Effects of straw mulching and reduced tillage on crop production and environment: A review. *Water*, 14(16), 2471.
- Dukes, M. D., Shedd, M., & Cardenas-Lailhacar, B. (2009). Smart Irrigation Controllers: How Do Soil Moisture Sensor (SMS) Irrigation Controllers Work? AE437/AE437, rev. 3/2009. *EDIS*, 2009(2).
- Ecrément, Y. (1971). Étude agro-pédologique de la plaine de la Mitidja et carte 1/50 000. *Inst. Nat. Géogr.*
- Eissenstat, D. M., Neilsen, D., Neilsen, G. H., & Adams, T. S. (2018). Above-and Belowground Responses to Shifts in Soil Moisture in Bearing Apple Trees. *HortScience*, 53(10), 1500-1506.
- Elkassar, G. (2022). Precision Irrigation and Its Applicability under Egyptian Conditions: a review.
- Evans, R., Stevens, W., & Iversen, W. (2006). Development of site-specific irrigation research under linear move systems. Proc. 26th Annual Intl. Irrig. Technical Conf,
- Evet, S. R., Colaizzi, P. D., Lamm, F. R., O'Shaughnessy, S. A., Heeren, D. M., Trout, T. J., Kranz, W. L., & Lin, X. (2020). Past, present, and future of irrigation on the US Great Plains. *Transactions of the ASABE*, 63(3), 703-729.
- FAO. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome : FAO. *Irrigation and Drainage, Paper N° 56*, 300 p.
- FAO. (2006). *Food and Agriculture Organization of the United Nations* , "Guidelines for soil description", <http://www.fao.org>, Rome, Italy.

- FAO. (2008). Gestion des eaux en irrigation. Méthodes d'irrigation, . In *manuel de formation n°7. Rome*.
- Farid, H. U., Mahmood-Khan, Z., Ahmad, I., Shakoor, A., Anjum, M. N., Iqbal, M. M., Mubeen, M., & Asghar, M. (2019). Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 84-91.
- Fernandez-Galvez, J., & Simmonds, L. (2006). Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 83(3), 197-208.
- Furman, A., Warrick, A., Zerihun, D., & Sanchez, C. (2006). Modified Kostiakov infiltration function: Accounting for initial and boundary conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(6), 587-596.
- Gan, Y., Siddique, K. H., Turner, N. C., Li, X.-G., Niu, J.-Y., Yang, C., Liu, L., & Chai, Q. (2013). Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments. *Advances in agronomy*, 118, 429-476.
- Garcia-Sanchez, A.-J., Garcia-Sanchez, F., & Garcia-Haro, J. (2011). Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and electronics in agriculture*, 75(2), 288-303.
- Gebremeskel, G., Gebremicael, T., Hagos, H., Gebremedhin, T., & Kifle, M. (2018). Farmers' perception towards the challenges and determinant factors in the adoption of drip irrigation in the semi-arid areas of Tigray, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 4, 527-537.
- Gendron, L. (2017). Irrigation de précision: un choix économique?: analyse de la pertinence de gérer les irrigations à l'aide de tensiomètres dans la culture de la fraise au Québec et en Californie.
- Gouda, A., Nemichandrappa, M., Babu, M., Halidoddi, R., Reddy, M., & Ramesh, G. (2023). Influence of Different Irrigation Scenario's under Mulched and Non-mulched Condition on Soil Moisture, Yield and Wue of Ridge Gourd (*Luffa acutangula*, L.). *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 1385-1391.
- Haghiabi, A.-H., Abedi-Koupai, J., Heidarpour, M., & Mohammadzadeh-Habili, J. (2011). A new method for estimating the parameters of Kostiakov and modified Kostiakov infiltration equations. *World Applied Sciences Journal*, 15(1), 129-135.
- Halilat, M. (2004). Effect of potash and nitrogen fertilization on wheat under Saharan conditions. IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa. Rabat, Morocco,
- Haverkamp, R., Kutilek, M., Parlange, J.-Y., Rendon, L., & Krejca, M. (1988). INFILTRATION UNDER PONDED CONDITIONS: 2. INFILTRATION EQUATIONS TESTED FOR PARAMETER TIME-DEPENDENCE AND PREDICTIVE USE: 1. *Soil science*, 145(5), 317-329.
- Heitz, H., Basset-Mens, C., & Vannière, H. (2011). Analyse du cycle de vie. Les petits agrumes produits au Maroc et consommés en France.
- Hillel, D. (1994). *Rivers of Eden. The struggle for water and the quest for peace in the Middle East*.
- Hoffman, G. J. H., T.A.; Solomon, K.H. . (1990). Introduction. In Management of Farm Irrigation Systems. Eds.; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MI., 5 - 10.

- Imache, A., Dionnet, M., Bouarfa, S., Jamin, J.-Y., Hartani, T., Kuper, M., & Goulven, P. I. (2009). " Participatory scenariology": a social learning approach to conceive the future of Mitidja's irrigated agriculture.
- Imache, A., Kuper, M., Bouarfa, S., Hartani, T., & Dionnet, M. (2011). Les" marchés" de l'eau et de la terre dans la plaine de la Mitidja en Algérie: opportunités et fragilités.
- Imache, A., Le Goulven, P., Bouarfa, S., & Chabaca, M. (2007). Evolutions de la demande en eau agricole dans la plaine irriguée de la Mitidja, Algérie. Troisième atelier régional du projet Sirma,
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Valipour, M., Saleem, M. F., Zaheer, M. S., Ahmad, S., Toleikiene, M., Haider, I., Aslam, M. U., & Nazar, M. A. (2020). Potential agricultural and environmental benefits of mulches—a review. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 1-16.
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., Kamgar-Haghighi, A. A., Shahsavari, A. R., & Niyogi, D. (2020). Evapotranspiration, crop coefficients, and physiological responses of citrus trees in semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 227, 105838.
- Jia, B., & Fu, J. (2020). Critical nitrogen dilution curve of drip-irrigated maize at vegetative growth stage based on leaf area index. *Nongye Gongcheng Xuebao*, 36(6), 66-73.
- Kaboneka, S., Nsavyimana, G., Bizimana, S., & Bicereza, D. (2021). Cinétique de décomposition de la paille de blé dans un sol acide du Mugamba Sud (Burundi): effet du mode d'application. *Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles*, 30, 9-19.
- Kayum, M., Asaduzzaman, M., & Haque, M. (2008). Effects of indigenous mulches on growth and yield of tomato. *Agriculture and Rural Development*, 6 (1-2), 1-6.
- Kourgialas, N. N., Koubouris, G. C., & Dokou, Z. (2019). Optimal irrigation planning for addressing current or future water scarcity in Mediterranean tree crops. *Science of the Total Environment*, 654, 616-632.
- Külcü, R. (2023). The Significance of Al-Jazari's Four-Bucket Water Lifting Machine in the History of Engineering and Science. *International journal of multidisciplinary research and analysis*, 06(10 ), 4897-4902
- Kumar, S., & Dey, P. (2011). Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry. *Scientia Horticulturae*, 127(3), 318-324.
- Kumar, S. D., & Lal, B. R. (2012). Effect of mulching on crop production under rainfed condition: a review.
- Lamont, W. J. A. D. (2005). Index, Features Plastics : Modifying the Microclimate for the Production of Vegetable Crops. 15.
- Legba, E. C., Dossou, L., Honfoga, J., Odjo, S., & Ramasamy, S. (2024). Organic mulching.
- Li, X., Tian, D., Guo, K., Xu, B., & Zhao, S. (2016). Influence of mulch drip irrigation on wheat root distribution characteristics. *J. Drain. Irrig. Mach. Eng*, 34, 545-552.
- Liao, Y., Cao, H.-X., Liu, X., Li, H.-T., Hu, Q.-Y., & Xue, W.-K. (2021). By increasing infiltration and reducing evaporation, mulching can improve the soil water environment and apple yield of orchards in semiarid areas. *Agricultural Water Management*, 253, 106936.
- Liasu, M., & Achakzai, A. (2007). Influence of *Tithonia diversifolia* leaf mulch and fertilizer application on the growth and yield of potted tomato plants. *Agric. And Environ(Sci 2* (4)), 335-340.
- MADR. (2009). *Bilan du programme quinquennal du secteur agricole et rural 2005-2009*.

- MADR. (2011). *Le Renouveau Agricole en chiffres. Rapport d'étape. Contrats de performance 2009- 2010 et prévisions de clôture 2011*, Alger. .
- Marks, D., Dalton, M., & Buss, P. (2015). Real-time 2D visualization of soil fertilizer dynamics in potatoes using a multi-sensor capacitance probe array. V International Symposium on Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production 1192,
- Meddi, H., Meddi, M., & Assani, A. A. (2014). Study of drought in seven Algerian plains. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 339-359.
- Meddi, M., Boufekane, A., & Meddi, H. (2015). *Recharge artificielle de la nappe de la Mitidja*.
- Mehdi, N. (2017). *Etude de l'évolution de la qualité des eaux souterraines de la plaine de la Mitidja au cours de la période (2003/2006) et l'influence de la variabilité piézométrique*
- Merdaci, I. S. (2020). *La modélisation de la gestion d'irrigation dans la région de Biskra en utilisant le traitement des images satellitaires (la télédétection)* Université Mohamed Khider de Biskra].
- Messahel, M., Chabaca, M. N., Bahbouh, L. S., Benhafid, M. S., Mihoubi, M. K., Salhi, C., (2013). *Etude et Valorisation des Eaux Usées épurées en irrigation (cas des périmètres agricoles de la Mitidja)*. .
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyck, M., & Ghorbani Dashtaki, S. (2014). Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), 681-693.
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., & Singh, V. P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological processes*, 17(13), 2629-2652.
- Mkhabela, K., Dlamini, M., & Manyatsi, A. (2019). The effect of mulching on soil moisture retention and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Intl. J. Environ. Agr. Res*, 5(9), 59.
- Mokadem, T. (2016). *La cartographie des nitrates de la plaine de Mitidja*
- Montague, T., & Kjelgren, R. (2004). Energy balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species. *Scientia Horticulturae*, 100(1-4), 229-249.
- Morbidity, F., Barrera Jr, W., Zanin, G., Verdi, L., Camarotto, C., Ghinassi, G., Maucieri, C., Marta, A. D., & Borin, M. (2024). The state of the art on deficit irrigation in soybean. *Irrigation and Drainage*, 73(2), 757-769.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mutin, G. (1977). Développement et maîtrise de l'espace en Mitidja. *Géocarrefour*, 52(1), 5-34.
- Neuvy, G. (1991). *L'homme et l'eau dans le domaine tropical*. Masson.
- Nicolardot, B., Recous, S., & Mary, B. (2001). Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C: N ratio of the residues. *Plant and soil*, 228(1), 83-103.
- Niyazi, B., Masoud, M., Elfeki, A., Rajmohan, N., Alqarawy, A., & Rashed, M. (2022). A comparative analysis of infiltration models for groundwater recharge from ephemeral stream beds: A case study in Al Madinah Al Munawarah Province, Saudi Arabia. *Water*, 14(11), 1686.
- Oku, E., & Aiyelari, A. (2011). Predictability of Philip and Kostiakov infiltration models under inceptisols in the humid forest zone, Nigeria. *Agriculture and Natural Resources*, 45(4), 594-602.

- Pakdel, P., Tehranifar, A., Nemati, H., Lakzian, A., & Kharrazi, M. (2013). Effect of different mulching materials on soil properties under semi-arid conditions in northeastern Iran. *Wudpecker Journal of Agricultural Research*, 2(3), 80-85.
- Philip, J. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil science*, 83(5), 345-358.
- Rasmussen, K. (1999). Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*, 53(1), 3-14.
- Reddy, M., Ayyanagowdar, M., Nemichandrappa, M., Balakrishnan, P., Patil, M., Polisgowdar, B., & Satishkumar, U. (2013). Techno economic feasibility of drip irrigation for onion (*Allium cepa* L). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 25(4).
- Remini, B. (2019). La foggara et le Ghout (Algérie): quand le forage sonne le déclin. *Larhyss Journal*, 39, 275-297.
- RGA. ( 2003). *Rapport général sur les résultats définitifs du recensement général de l'agriculture*. .
- Rivière-Honegger, A., & Ruf, T. (2000). Approches sociales de l'irrigation et de la gestion collective de l'eau. Démarches et expériences en France et dans le monde. *Territoires en mutation (CNRS)*, 230.
- Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., & Friedman, S. P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose zone journal*, 2(4), 444-475.
- Sabri, A., Bouaziz, A., Hammani, A., Kuper, M., Douaik, A., & Badraoui, M. (2017). Effet de l'irrigation déficitaire contrôlée sur la croissance et le développement foliaire du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.).
- Sadek, I. I., Youssef, M. A., Solieman, N. Y., & Alyafei, M. A. M. (2019). Response of soil properties, growth, yield and fruit quality of cantaloupe plants (*Cucumis melo* L.) to organic mulch. *Merit Res. J. Agric. Sci. Soil Sci*, 7(9), 106-122.
- Safari, N., Kazemi, F., & Tehrani, A. (2021). Examining temperature and soil moisture contents of mulches in the urban landscaping of an arid region. *Desert*, 26 (2), 139-156. <https://doi.org/https://doi.org/10.22059/jdesert.2020.256170.1006639>
- Shaheb, M. R., Sarker, A., & Shearer, S. A. (2022). Precision agriculture for sustainable soil and crop management. In *Soil Science-Emerging Technologies, Global Perspectives and Applications*. IntechOpen.
- Sharma, S., Basnet, B., Bhattarai, K., Sedhai, A., & Khanal, K. (2023). The influence of different mulching materials on Tomato's vegetative, reproductive, and yield in Dhankuta, Nepal. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100463.
- Simsek, U., Erdel, E., & Barik, K. (2017). Effect of mulching on soil moisture and some soil characteristics. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(12), 7437-7443.
- Singer, C. K., & Martin, C. A. (2008). Effect of landscape mulches on desert landscape microclimates. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*, 34(4), 230-237.
- Skhiri, A. (2017). *Les bases de l'irrigation: Calcul des besoins en eau*. Éditions universitaires européennes.
- Smerdon, E., & Blair, A. (1988). Infiltration à partir des données avancées d'irrigation. II: Expérimental. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1), 18-30.
- Snyder, R., & O'Connell, N. (2007). Citrus crop coefficients determined using a surface renewal method. *J. Irrig. Drain. Eng*, 133(1), 43-52.
- Sojka, R. E., Bjerneberg, D. L., & Entry, J. (2002). Irrigation: An historical perspective. *Encyclopedia of soil science*, 1(1070), 745-749.

- Stagnari, F., Galièni, A., Speca, S., Cafiero, G., & Pisante, M. (2014). Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to conservation agriculture in Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 167, 51-63.
- Stelli, S., Hoy, L., Hendrick, R., & Taylor, M. (2018). Effects of different mulch types on soil moisture content in potted shrubs. *Water SA*, 44(3 July). <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i3.17>
- Tankeuoo, K. I., Meddi, M., & Ammari, A. (2022a, 17 – 18 Septembre). *Estimation des paramètres des modèles d'infiltration des sols dans la plaine de la Mitidja* Second International Conference on Geosciences & Environment, Mascara (Algérie).
- Tankeuoo, K. I., Meddi, M., & Ammari, A. (2022b, 05 - 06 Decembre ). *Étude comparative de l'évolution de l'humidité du sol entre deux paillis utilisés dans la culture de la tomate* The 1st International Conference on Sustainable Soil Management: A challenge for food security, CRSTRA, Biskra (Algérie).
- Tankeuoo, K. I., Meddi, M., & Ammari, A. (2023a, 7 - 9 Juin 2023). *Effet du paillis organique sur l'humidité du sol dans la culture de la tomate* 1st international hybrid water and environment symposium: sharing to preserve, Maghnia, Algérie.
- Tankeuoo, K. I., Meddi, M., & Ammari, A. (2023b). Influence of mulches on soil moisture and water infiltration in the tomato crop. *Acta agriculturae Slovenica*, 119(4), 1–16-11–16.
- Tarchag, C. (2020). Effet des doses d'irrigation sur la culture de tomate dans la région de Biskra.
- Telkar, S., Kant, K., Pratap, S., & Solanki, S. (2017). Effect of mulching on soil moisture conservation. *Biomolecule reports*, 9, 1-4.
- Thiébeau, P., & Bertrand, I. (2016). Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, 87, 17.
- Tswana, M., Olaniyi, J., & Atanda, T. (2017). Effects of Mulch Material and Mulching Rate on Fruit Yield and Nutritional Quality of Tomato Variety (*Lycopersicon lycopersicum* mill) in Ogbomoso and Mokwa, Nigeria. *Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciences*, 5(3). <https://doi.org/10.19080/ctbeb.2017.05.555662>
- Valé, M. (2007). Minéralisation de l'azote organique: effets de la température et de l'humidité du sol. *Perspectives agricoles*(331), 46-49.
- Van Nierop, E. T., & White, D. P. (1958). Evaluation of several organic mulching materials on a sandy loam forest nursery soil.
- Vand, A. S., Sihag, P., Singh, B., & Zand, M. (2018). Comparative evaluation of infiltration models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 4173-4184.
- Venot, J.-P., Bowers, S., Brockington, D., Komakech, H., Ryan, C. M., Veldwisch, G. J., & Woodhouse, P. (2021). Below the radar: Data, narratives and the politics of irrigation in Sub-Saharan Africa. *Water alternatives*, 14(2), 546-572.
- Wanniarachchi, D., Cheema, M., Thomas, R., & Galagedara, L. (2019). Effect of biochar on TDR-based volumetric soil moisture measurements in a loamy sand podzolic soil. *Soil Systems*, 3(3), 49.
- White, L. (1962). *Medieval technology and social change* (Vol. 163). Oxford University Press, USA.
- Wood, A. W. (1991). Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. *Soil and Tillage Research*, 20(1), 69-85.
- Yaghi, T., Arslan, A., & Naoum, F. (2013). Cucumber (*Cucumis sativus*, L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 128, 149-157.

- Yang, P., Wu, L., Cheng, M., Fan, J., Li, S., Wang, H., & Qian, L. (2023). Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. *Water*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/w15091733>
- Yuemei, H., Xiaoqin, Z., Jianguo, S., & Jina, N. (2008). Conduction between left superior pulmonary vein and left atria and atria fibrillation under cervical vagal trunk stimulation. *Colombia Médica*, 39(3), 227-234.
- Zegada-Lizarazu, W., & Berliner, P. (2011). The effects of the degree of soil cover with an impervious sheet on the establishment of tree seedlings in an arid environment. *New forests*, 42, 1-17.
- Zerouati, F. (2014). *Estimation de l'humidité du sol d'un périmètre irrigué à partir d'images satellitaires*
- Zolfaghari, A., Mirzaee, S., et Gorji, M. . (2012). Comparaison de différents modèles pour estimer l'infiltration cumulée. *Journal international des sciences du sol*, 7(3), 108. <https://doi.org/DOI : 10.3923/ijss. 2012.108.115>

