



1. Thème de l'essai

L'essai consiste à tester de nouveaux outils de pilotage de l'irrigation d'une part, et d'expérimenter avec ces outils des stratégies de culture des vergers fruitiers qui soient plus économes en eau d'autre part. Il s'agit d'améliorer nos stratégies de gestion de l'eau en arboriculture pour les rendre plus économes, en intégrant des outils innovants que sont les dendromètres de précision PepiPIAF, qui permettent de déterminer en temps réel l'état hydrique des arbres, pour piloter l'irrigation au plus près des besoins réels de la culture.

2. But de l'essai

L'objectif est d'intégrer les dendromètres Pepipiaf pour le pilotage de stratégies d'irrigation économes et/ou en conditions de restriction en verger de pêcher. Des objectifs de réduction d'apports d'eau sont fixés par rapport à une référence d'irrigation « normale ». Des outils de mesure de l'état hydrique du sol (tensiomètres) sont aussi intégrés comme outils complémentaires de pilotage de l'irrigation.

3. Matériel & Méthodes : modalités étudiées et plan de l'essai

Pour cette troisième année d'essai, les Pepipiaf sont restés installés sur le verger sur les arbres n° 12, 24 et 35 du rang 7, et sur les arbres 8, 16 et 31 du rang 8. L'essai comprend 2 modalités réparties sur ces 2 rangs 7 et 8 (cf plan de l'essai). Au début du système d'irrigation de chaque rang est installée une électrovanne volumétrique qui permet de connaître le volume exact d'eau qui passe à travers la vanne. Au milieu du système d'irrigation de chaque rang, soit après l'arbre 21 du rang, est installée une électrovanne. Ces électrovannes sont programmables et automatiques, permettant un pilotage différencié des 2 modalités et des relevés précis des volumes apportés sur les 2 modalités.

L'irrigation est un système de micro-jets pendulaires. 1 micro-jet est installé entre chaque arbre.

Règles de décision :

- La modalité située au nord de la parcelle d'essai est irriguée comme le reste du verger Pamela. Le pilotage se fait selon les relevés hebdomadaires des tensiomètres (déclenchement de l'irrigation à partir de 40 cb à 30 ou 50 cm approximativement, et volume établi théoriquement en fonction de l'ET, avec une programmation hebdomadaire, donc un ETP calculé en prévisionnel à la semaine)
- La modalité située au sud de la parcelle est irriguée en suivant les mêmes principes, mais des restrictions peuvent être mises en place en fonction des données issues des Pepipiaf selon les indicateurs d'amplitudes maximales de contraction et de croissance journalière.

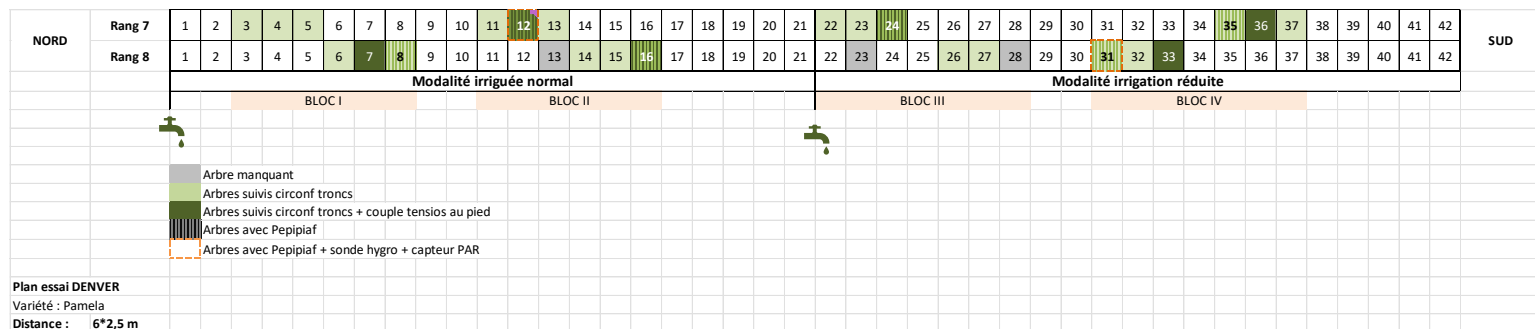


Figure 1 : plan de l'essai DENVER 2023, site SEFRA

4. Résultats

a. Bilan précipitations 2023

Après un hiver avec des précipitations moyennes, le printemps 2023 (mars-avril-mai) a été sec concernant les cumuls de précipitations. Globalement, les sols ont été peu rechargés après la sécheresse 2022, et les nappes phréatiques restent à des niveaux préoccupants en ce début 2023. L'été 2023 a été relativement pluvieux (au-dessus de la moyenne 1991-2020), avec plusieurs précipitations efficaces en juin et juillet, seul le mois d'août a connu un épisode de canicule associée à une sécheresse (figure 2).

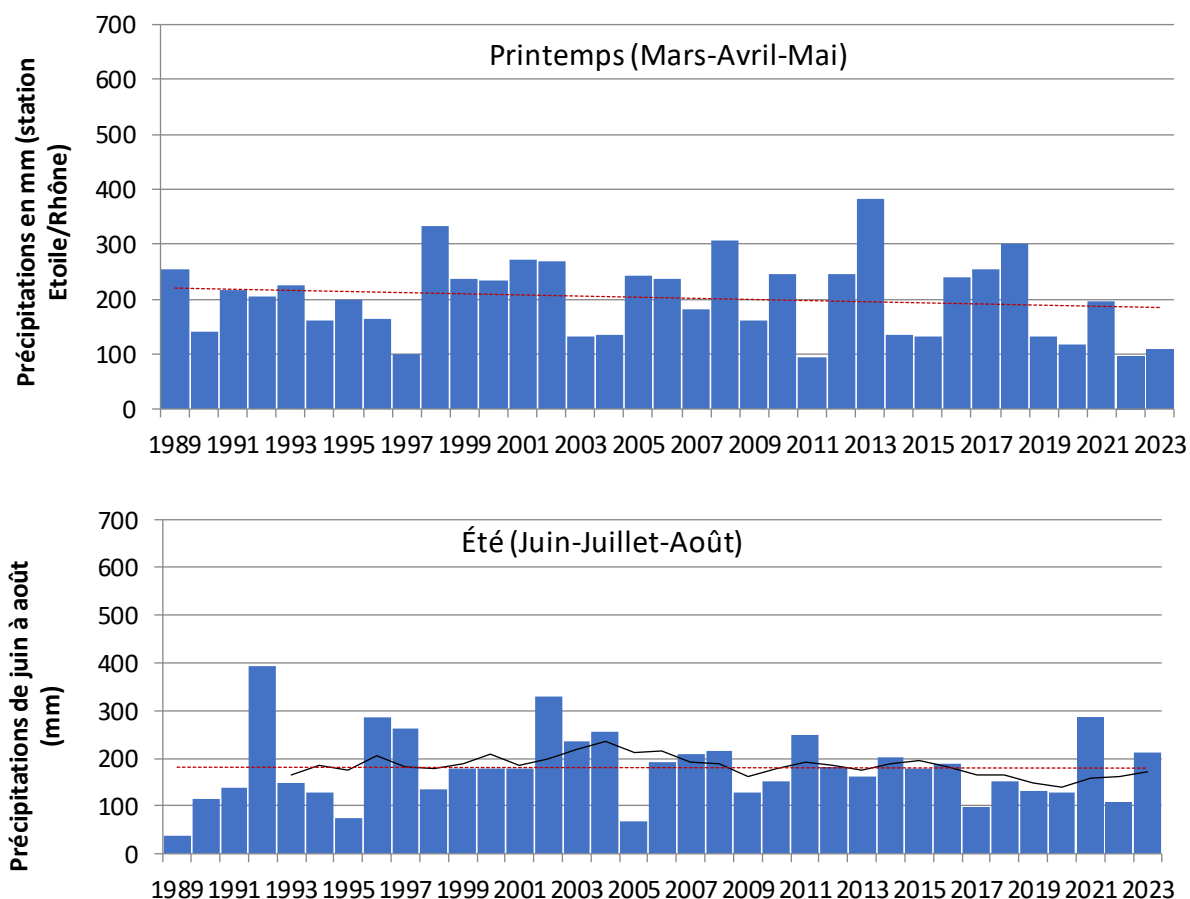


Figure 2 : bilan des précipitations saisonnières (printemps et été) pour 2022 sur le site d'Etoile-Sur-Rhône

a. Bilan Hydrique 2023

L'irrigation du verger a été déclenché au début du mois d'avril, et la dernière irrigation a été effectuée mi-octobre. Si le début de saison 2023 a été assez sec jusqu'au mois d'avril, des épisodes de précipitations significatives se sont produits en mai, juin et début juillet. 1 seule période de sécheresse est à noter au mois d'août associée à une canicule intense et durable. De nouveaux épisodes de précipitations importants ont eu lieu fin août, fin septembre et en octobre, une arrière saison surtout marquée par des épisodes de chaleur tardifs. Des apports d'eau d'irrigation ont été maintenus régulièrement tout au long de la saison, maintenant les tensiomètres à des valeurs inférieurs à 40 cb, témoins d'un confort hydrique global du verger jusqu'à début juillet. Ensuite, et malgré les irrigations répétées pendant ces périodes, les tensiomètres ont régulièrement décroché (figure 3), de mi-juillet jusqu'au mois d'août, signe d'une sécheresse intense dans le verger notamment mi-août et ce malgré les apports d'eau.

L'irrigation entre les 2 modalités d'essai n'a pas été différenciée sur toute la saison qui comprend la floraison, la nouaison, la croissance des fruits et la récolte, soit jusqu'à fin juin. Ensuite, compte tenu du confort hydrique global constaté à la fois sur les tensiomètres et sur les dendromètres, 8 coupures ont été réalisées dans la modalité en restriction jusqu'à mi-août et ce malgré le décrochage des tensiomètres à des valeurs supérieures à 100 cb.

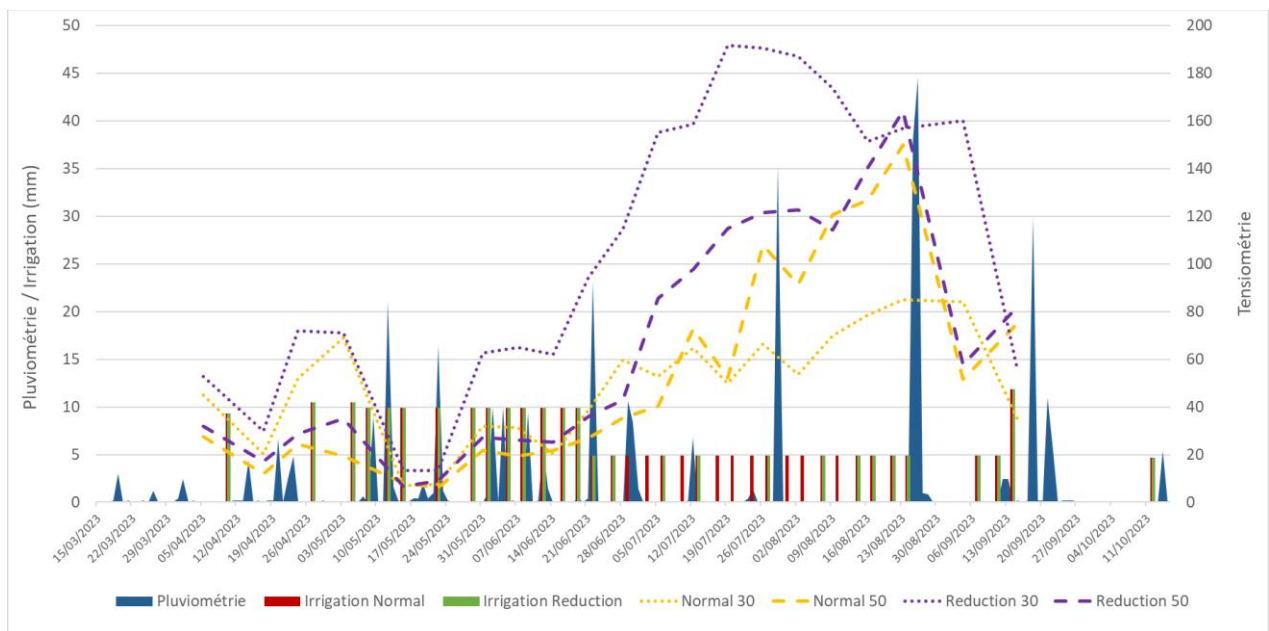


Figure 3 : bilan hydrique 2023, verger Pamela, site de la SEFRA

b. Bilan Irrigation 2023

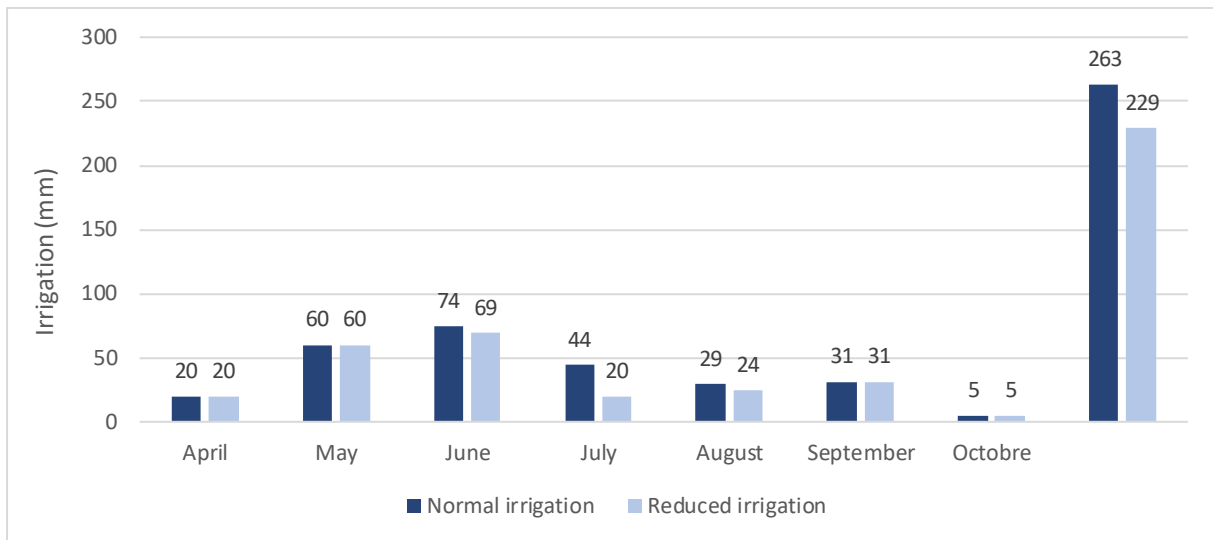


Figure 4 : apports d'irrigation 2023, parcelle d'essai, site de la SEFRA

Le total de l'irrigation sur la parcelle irriguée « normalement » s'élève à 263 mm d'apports (figure 4). La réduction du volume d'irrigation total en 2022 sur la modalité Irrigation réduite est de 15% par rapport à la modalité irriguée normalement (229 mm), du fait des restrictions effectuées de fin juin à mi-août.

Les niveaux d'irrigation sont un peu supérieurs à la moyenne annuelle du verger depuis sa plantation (figure 5), cela dit sur la modalité irriguée normalement, les niveaux d'irrigation restent assez raisonnés (263 mm = 2630 m³ d'eau apportée par ha, ce qui est une fourchette basse des pratiques d'irrigation sur pêcher en moyenne « à dire d'expert »).

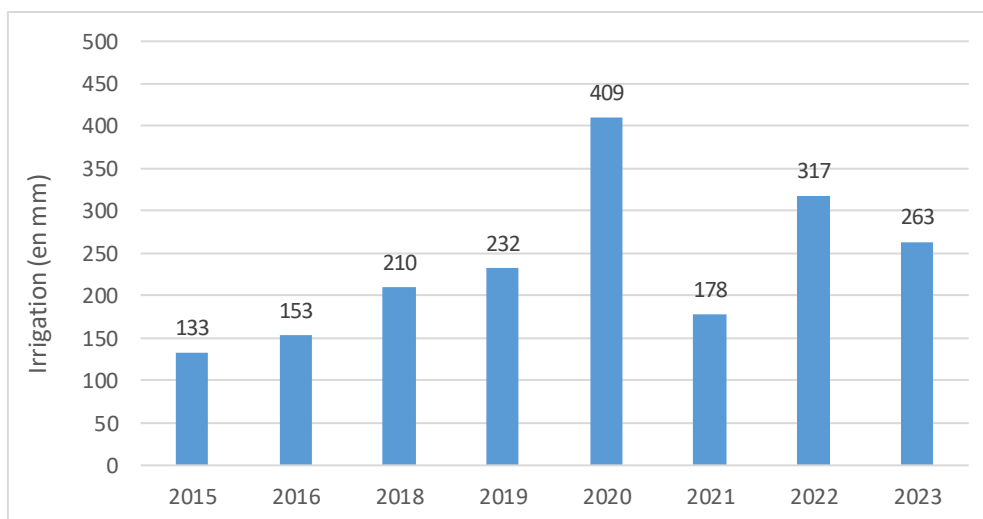


Figure 5 : total irrigation chaque année, verger Pamela, site de la SEFRA

c. Extraits des courbes issues des données Pepipiaf

Au sein d'une modalité, chaque dendromètre Pepipiaf a montré des courbes relativement similaires en termes de dynamique de croissance, avec des variations concernant l'intensité des amplitudes de contraction selon les branches sur lesquelles ils étaient positionnés (figure 6). Globalement, les courbes ont montré une bonne dynamique de croissance tout au long de la saison pour les 2

modalités, d'avril à septembre. La croissance journalière a été également un témoin important de ce stress hydrique.

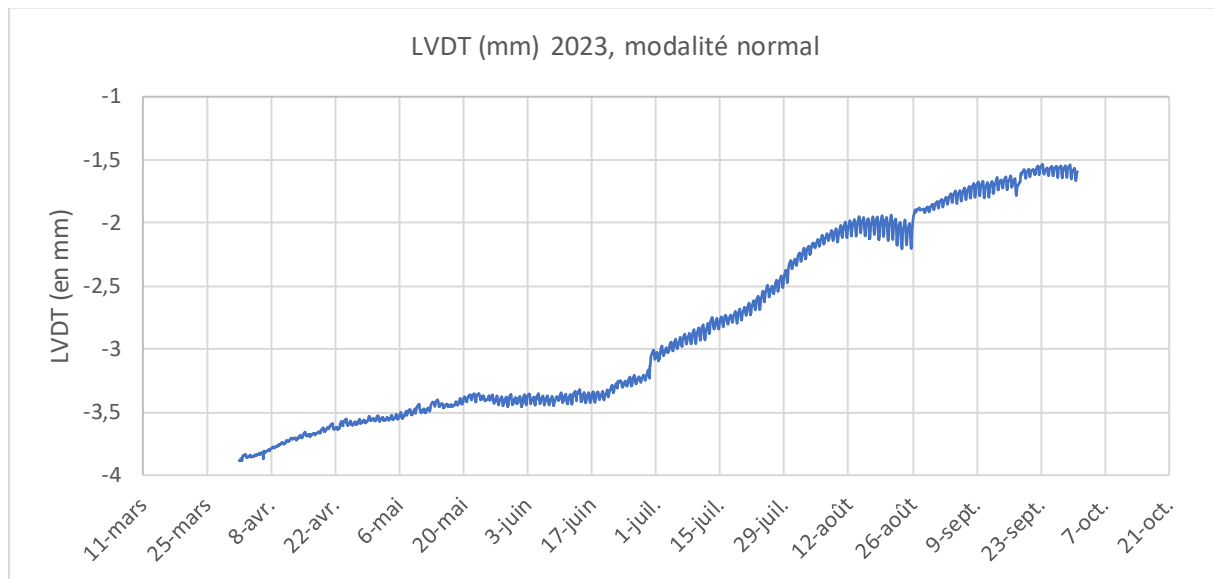


Figure 6 : données LVDT 2023 : On distingue une seule période de décroissance et de fortes amplitudes de contraction durant la saison, au mois d'août pendant la canicule.

d. Croissance journalière et amplitudes de contraction : des indicateurs clairs de stress hydrique tout au long de la saison

La croissance journalière (ou « Daily Evolution ») est mesurée par la différence entre la position maximum du capteur LVDT au jour J et la position maximum du capteur LVDT au jour J-1 (figure 7).

Tout au long de la saison, ces courbes représentant la croissance moyenne des arbres des 2 modalités ont des dynamiques sensiblement identiques, avec des croissances relativement continues. Seules 3 phases d'arrêt de croissance ont pu être relevées pour les 2 modalités qui correspondent à chaque fois à des périodes de plusieurs jours sans précipitations (début mai, mi-août et début octobre). Seule la phase d'arrêt de croissance en août semble être un stress hydrique important, avec une phase de décroissance bien caractérisée. A noter, dans ces phases de stress modérées ou fortes, la modalité restriction semble toujours être stressée de manière légèrement plus intense. Dans ces périodes, l'irrigation joue un rôle crucial pour limiter ce stress et limiter les arrêts de croissance. Comme vu en 2022, même si l'irrigation programmée est identique dans les 2 modalités, l'irrigation réelle apportée que l'on peut mesurer par les relevés des compteurs nous indique que la modalité restriction est en réalité plus faible que dans la modalité normale, dû fait d'une perte de pression dans les tuyaux. Les volumes sont alors réduits d'environ 5-10%. C'est ce delta qui semble expliquer cette plus forte intensité de stress hydrique des arbres de la modalité restriction dans ces phases de stress hydrique.

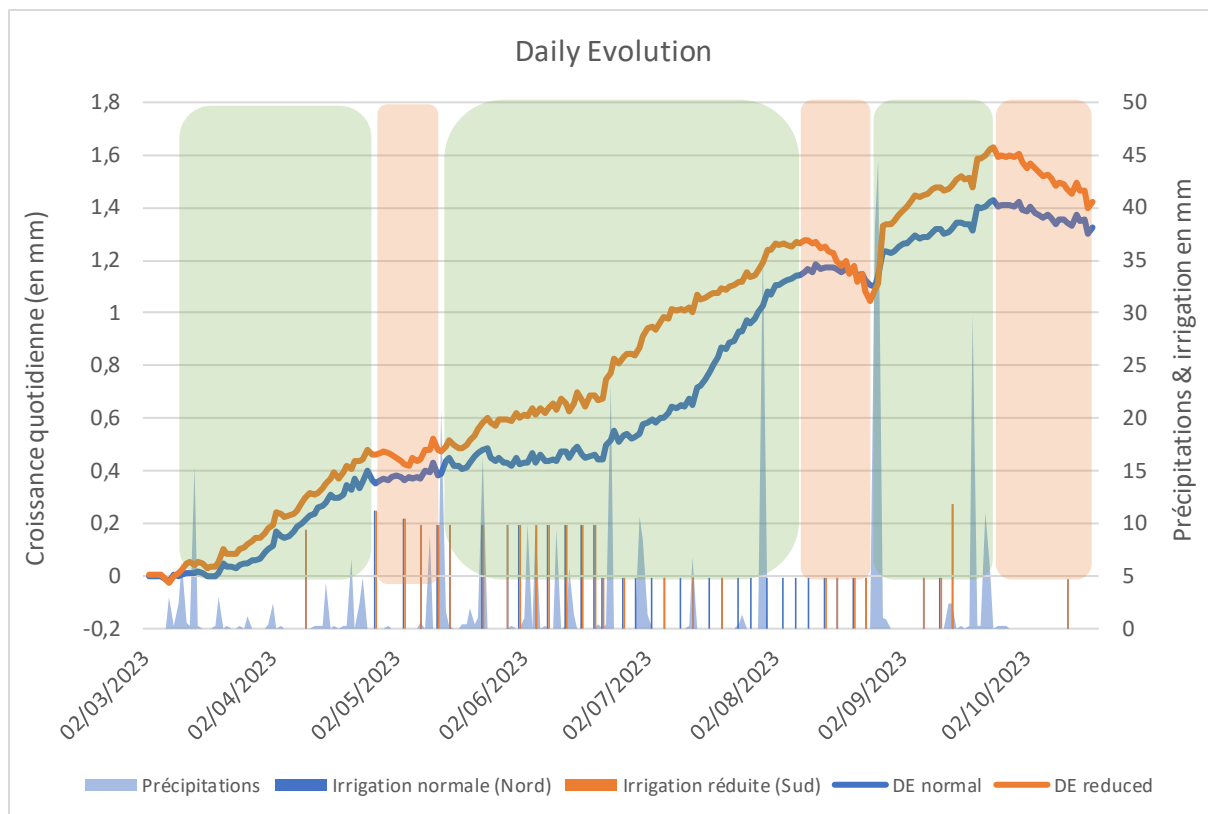


Figure 7 : croissance journalière moyenne par modalité (moyenne des 3 relevés par modalité)

L'amplitude maximale de contraction (figure 8) est calculée en prenant la différence entre le maximum et le minimum relevé par le capteur LVDT sur une même journée. Huguet et al. (1992) ont établi des seuils de MDS sur pêcher sur la base de charpentières d'environ 40 mm de diamètre : de 0 à 0,15mm, l'arbre est considéré « healthy » ; de 0,2 à 0,4mm l'arbre est considéré en stress. Ces références sont à prendre avec précaution, car n'ont pas été validées au-delà de leur expérience et restent contestées dans d'autres publications (Torrecillas et al., 2018). Ils sont ajoutés au graphique en couleur de fond à titre indicatif.

Les amplitudes de contraction sont relativement identiques entre les 2 modalités tout au long de la saison. Une seule période se distingue nettement durant laquelle une différence entre les 2 courbes est visible, elle correspond à la période de post-récolte de fin juin à mi-août dans laquelle des restrictions ont été mises en place dans la modalité restriction. Il apparaît ainsi que les amplitudes sont plus élevées dans la modalité restriction pendant cette période, témoin d'un stress hydrique plus intense induit par les restrictions. Ce stress hydrique a été maîtrisé et est resté modéré si on regarde la croissance continue des arbres pendant cette période (figure 7).

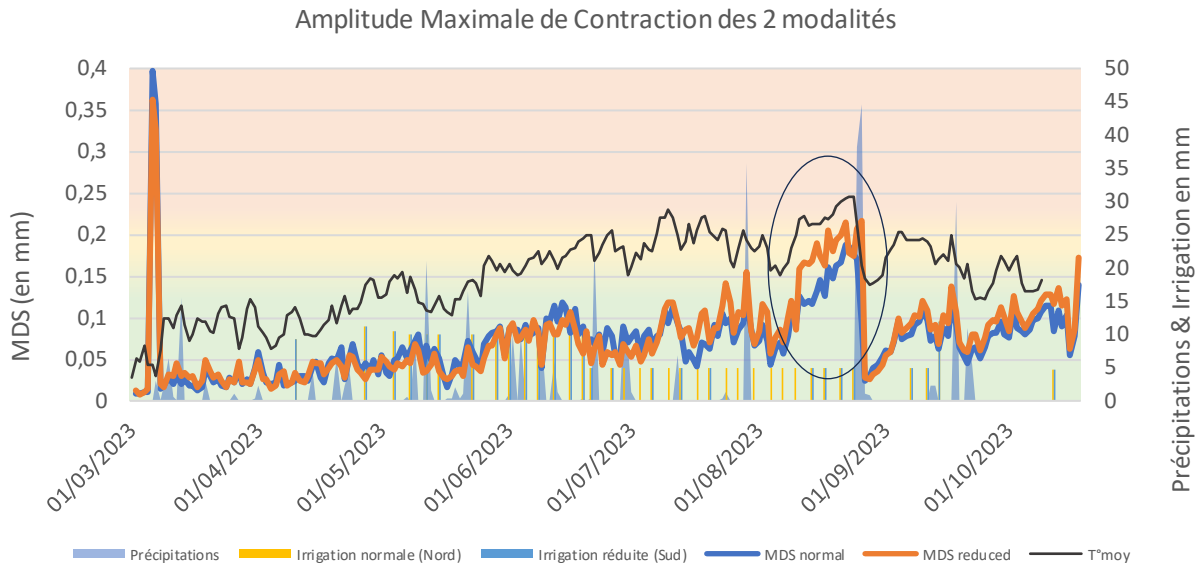


Figure 8 : amplitude maximale de contraction (MDS = maximum daily schrunkage) moyenne par modalité sur toute la saison

La modalité restriction se distingue aussi en regardant cet indicateur de MDS. En zoomant sur la période estivale et la canicule de fin juillet/début août, on observe des valeurs de MDS supérieures pour cette modalité moins irriguée, bien qu'à cette période précise, les apports d'eau étaient équivalents (les restrictions n'ont eu lieu qu'en fin de printemps et fin d'été), figure 9.

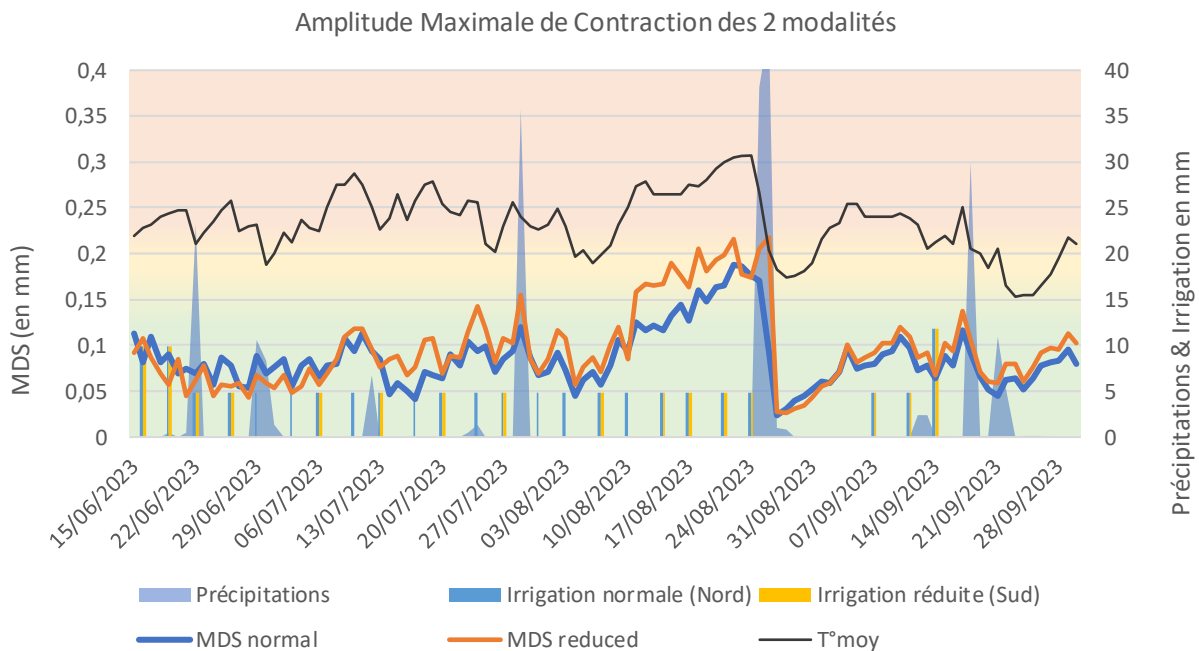


Figure 9 : amplitude maximale de contraction (MDS = maximum daily schrunkage) moyenne par modalité de juillet à août

e. Croissance des rameaux

La croissance des rameaux a été mesurée du mois d'avril au mois d'août (longueur et diamètre des rameaux à la base ainsi que le nombre de pousses de l'année en août). Les résultats ne montrent pas une différence significative de croissance en fonction des modalités d'irrigation.

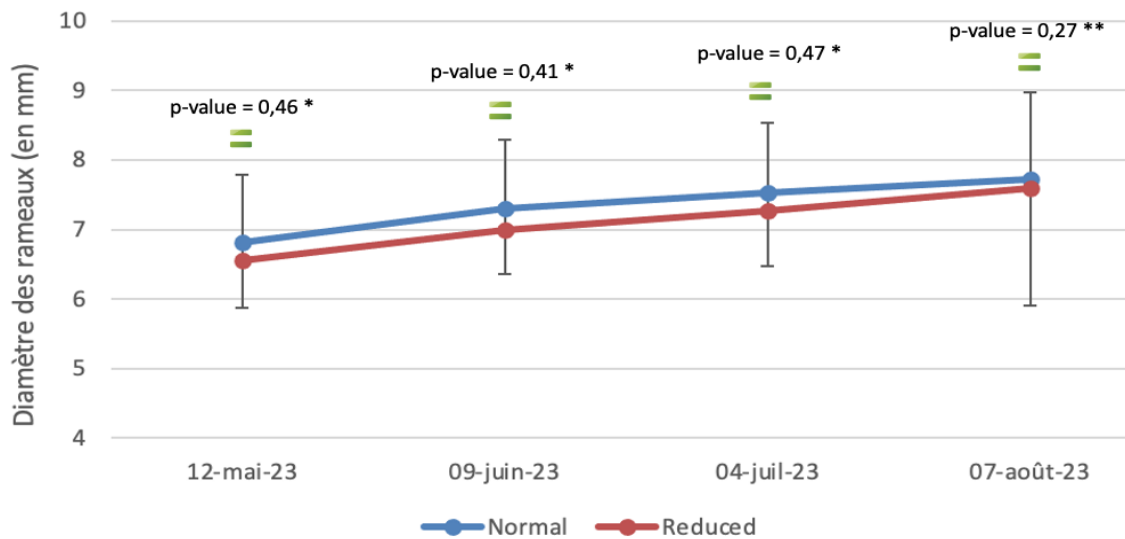


Figure 10 : diamètre des rameaux mesurés au cours de la saison (* Test de Student et ** Test de Wilcoxon Mann-Whitney non significatifs).

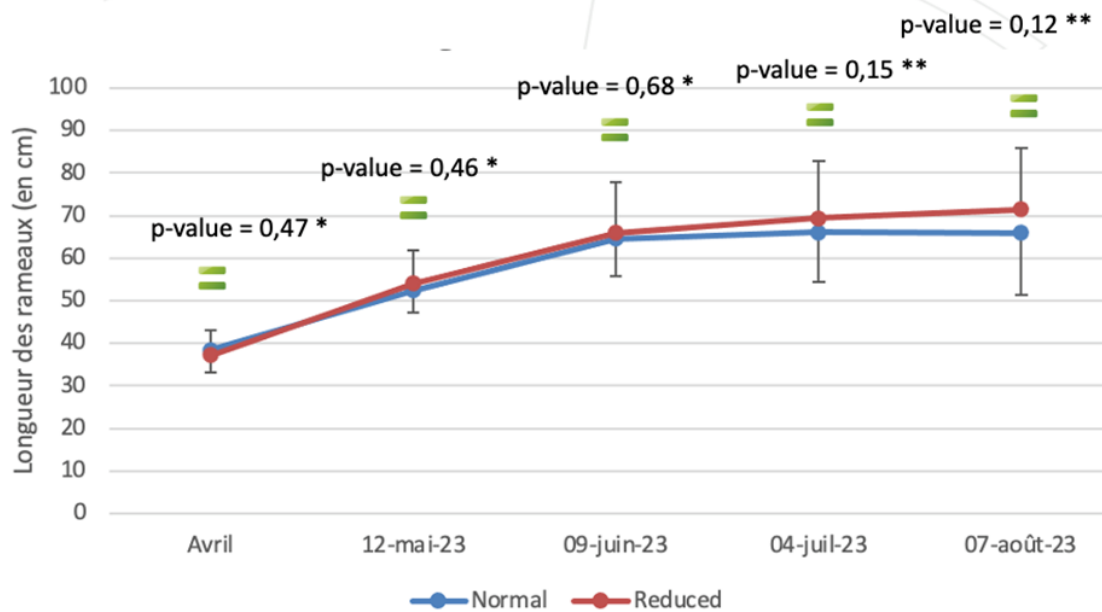


Figure 11 : longueur des rameaux mesurés au cours de la saison (* Test de Student et ** Test de Wilcoxon Mann-Whitney non significatifs)

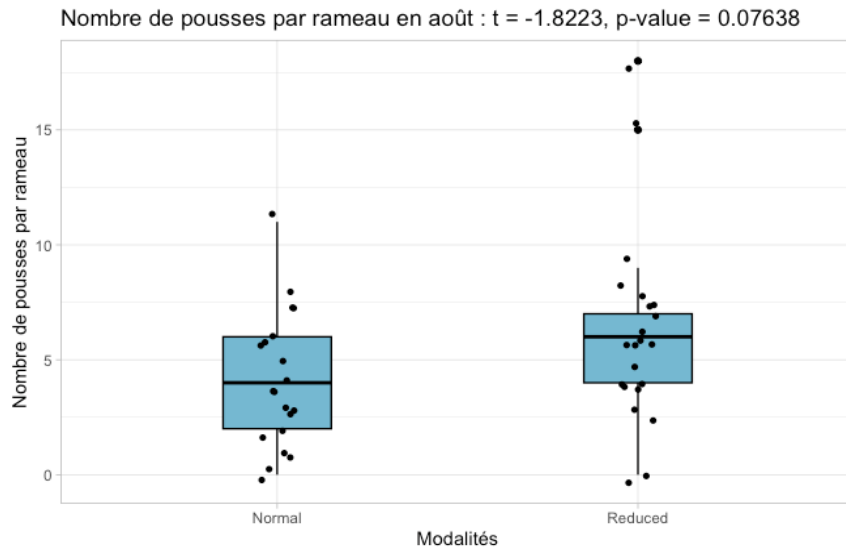


Figure 12 : nombre de pousses des rameaux en août ; la différence entre les 2 modalités n'est pas significative, test Khi-deux, $p\text{-value} = 0,08$

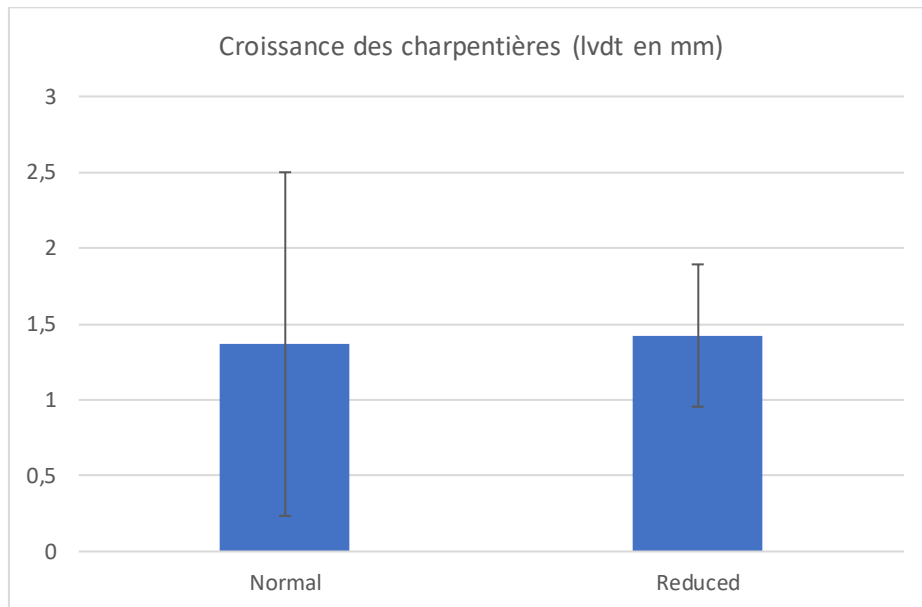


Figure 13 : croissance des charpentières (LVDT) entre mars et octobre, 3 points de mesure par modalité

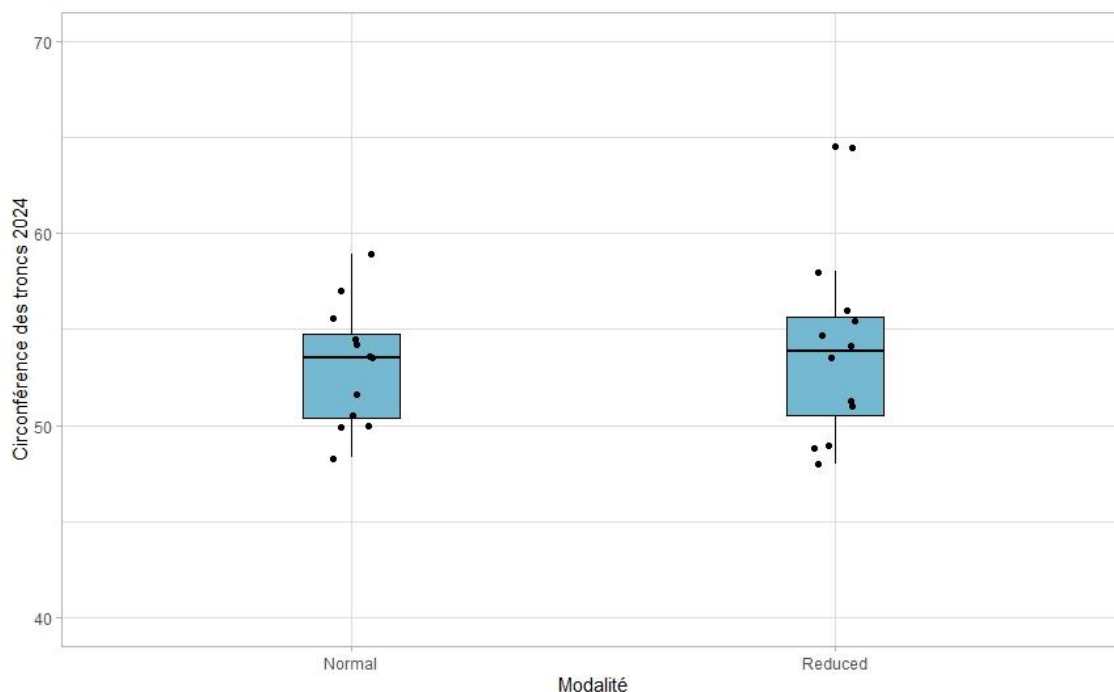


Figure 14 : circonférence des troncs après la saison 2023, aucune différence significative, moyenne de la modalité Normal = 53,1, moyenne de la modalité Reduced = 53,7 (en cm)

f. Croissance des fruits et récolte

La croissance des fruits a été suivie pendant un mois en mesurant le diamètre de fruits marqués, à peu près une fois par semaine du 12 mai au 12 juin (figure 15). Les résultats montrent que la croissance des fruits au cours de ce mois de mesures n'a pas été différenciée (p-value = 0,37 le 12 mai, p-value = 0,41 le 17 mai, p-value = 0,36 le 26 mai, p-value = 0,44 le 5 juin, p-value = 0,9 le 12 juin, Test de Student non significatif).

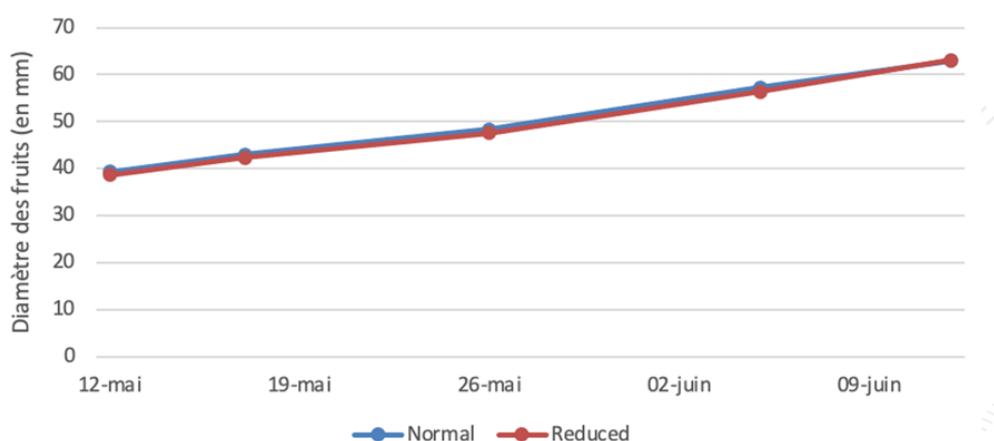


Figure 15 : évolution du diamètre des fruits (en mm) durant le mois de mesure (Test de Student non significatif).

Le potentiel de rendement a été mesuré 1 mois avant récolte, et après éclaircissage, en comptant le nombre de fruits par arbre sur un échantillon de 6 arbres par modalité. La figure 16 montre qu'il n'y

avait pas de différence significative entre les 2 modalités, ainsi le potentiel de rendement était équivalent.

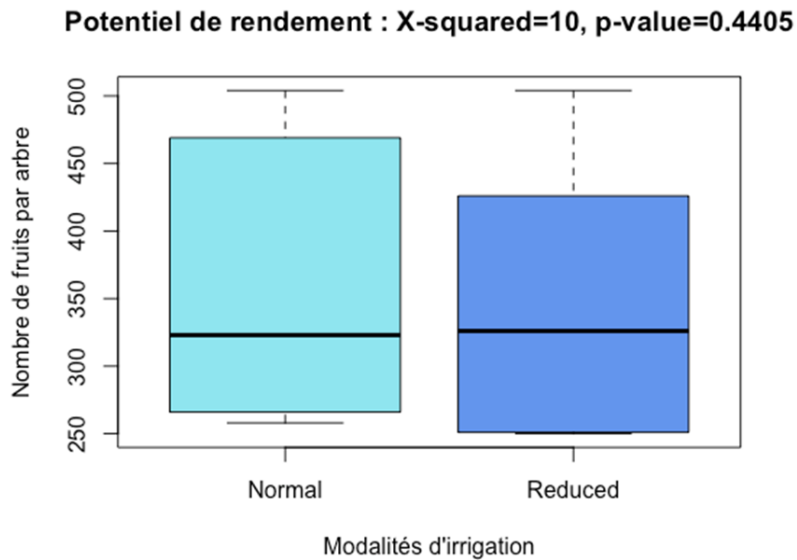


Figure 16 : Potentiel de rendement par modalité d'irrigation

La figure 17 montre les résultats de production des 2 modalités irriguées de manière différenciée. Le rendement total de la parcelle irriguée de manière classique (Normal Irrigation) atteint 34,8 t/ha et celui de la modalité avec restrictions d'eau (Reduced Irrigation) atteint 34,4 t/ha. Aucune différence de rendement est présente lors de la récolte de 2023 contrairement à celle de 2022 où la différence de rendement était perceptible (31,32 t/ha sans restriction contre 29,12 t/ha avec restrictions). De même, le poids moyen d'une pêche est similaire dans les deux modalités (146 g sans restriction et 145 g avec restrictions).

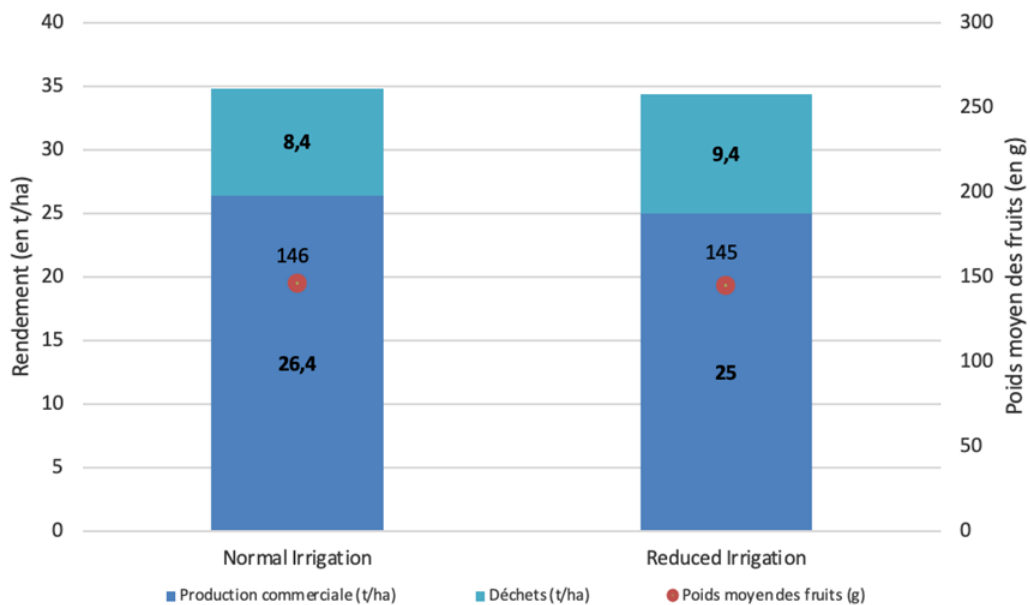


Figure 17 : rendements de production des 2 modalités.

La figure 18 montre la répartition des calibres en fonction des deux modalités de l'essai. Il semble que les fruits de la modalité avec restrictions soient plus gros (45,5% de calibre 2A contre 35,1% de calibre 2A pour la modalité sans restriction). Ce résultat agronomique est difficile à expliquer, car aucune opération de l'itinéraire technique ne peut logiquement expliquer cette différence, à mettre peut-être sur le compte de la variabilité naturelle au verger. Néanmoins, le pourcentage de calibre A et + est similaire dans les deux modalités (85% dans la modalité sans restriction et 87% dans celle avec restrictions).

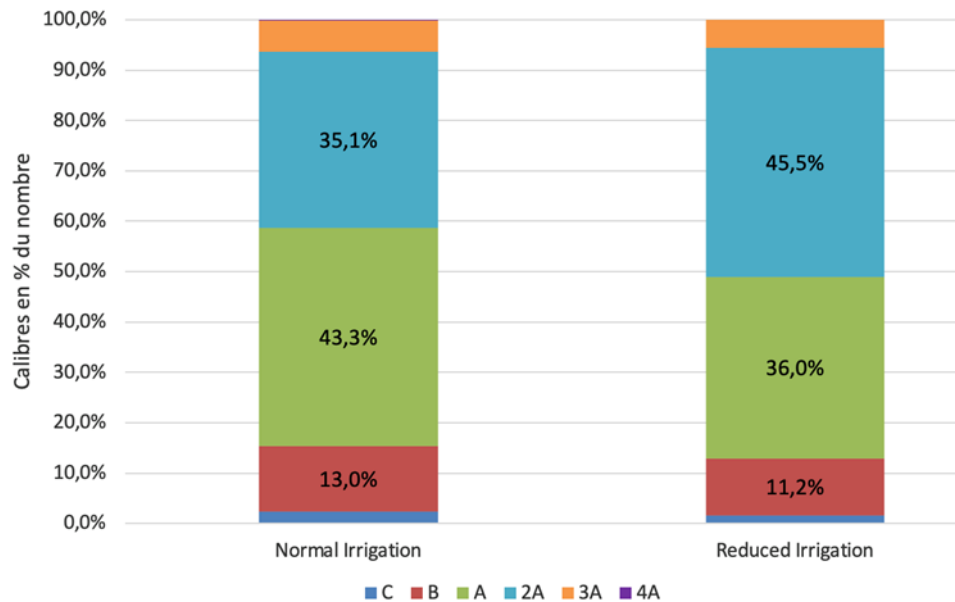


Figure 18 : répartition des calibres au sein des deux modalités.

La figure 19 montre la répartition des déchets en fonction de différentes catégories (« pourritures » incluant les fruits atteints par le monilia, les fruits ayant le « noyau fendu », les fruits attaqués par les « forficules » et la catégorie « autres » regroupant les fruits boisés, les fruits attaqués par les punaises et ceux récoltés trop mûrs). Dans la modalité avec restrictions, les fruits sont plus atteints par les pourritures. De même, la part de déchets par rapport à la production totale semble plus élevée dans la modalité avec restrictions par rapport à la modalité sans restriction, à savoir de 27,3% (Reduced Irrigation) contre 24,2% (Normal Irrigation).

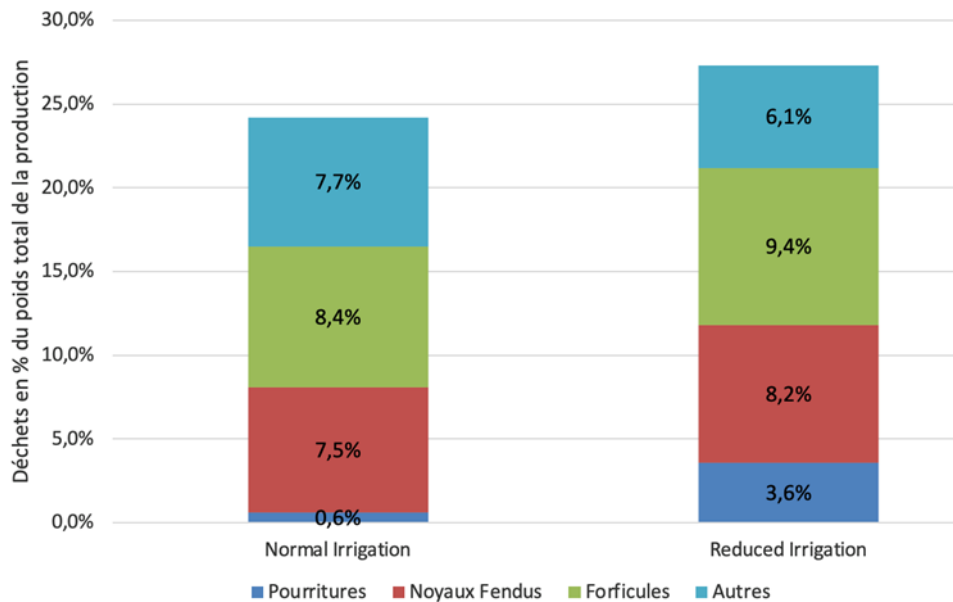


Figure 19 : répartition des déchets au sein des deux modalités.

Le tableau 1 montre les indicateurs de qualité mesurés dans chaque modalité sur un échantillon de 15 fruits. Il semble qu'il n'y ait aucune différence entre les modalités en termes de sucrosité, de fermeté et d'acidité.

Modalités	IR (°brix)	Fermeté	Acidité	Jutosité
Normal Irrigation	7,45	4	15,95	6,15
Reduced Irrigation	7,15	3,9	15,95	6,55

Tableau 1 : mesure des indicateurs de qualité : sucrosité (IR), fermeté, acidité et jutosité au sein des deux modalités.

La figure 20 montre l'évolution des maladies de conservation. Le suivi de l'apparition de moisissures (monilia, rhizopus, penicilium...) a eu lieu pendant deux semaines. L'observation du premier fruit pourri dans la modalité sans restriction a été au 5e jour d'observation et au 3e jour dans la modalité avec restrictions. De plus, 50% des fruits étaient pourris au 12e jour d'observation dans la modalité sans restriction et au 10e jour dans la modalité avec restrictions. La modalité avec restrictions se conserve moins bien dans le temps que celle sans restriction (différence de conservation significative aux jours 7 et 10 d'observation). Cela peut s'expliquer par le fait que la modalité avec restrictions possède des calibres de fruits plus grands (plus de calibres 2A et +) que la modalité sans restriction (figure 10).

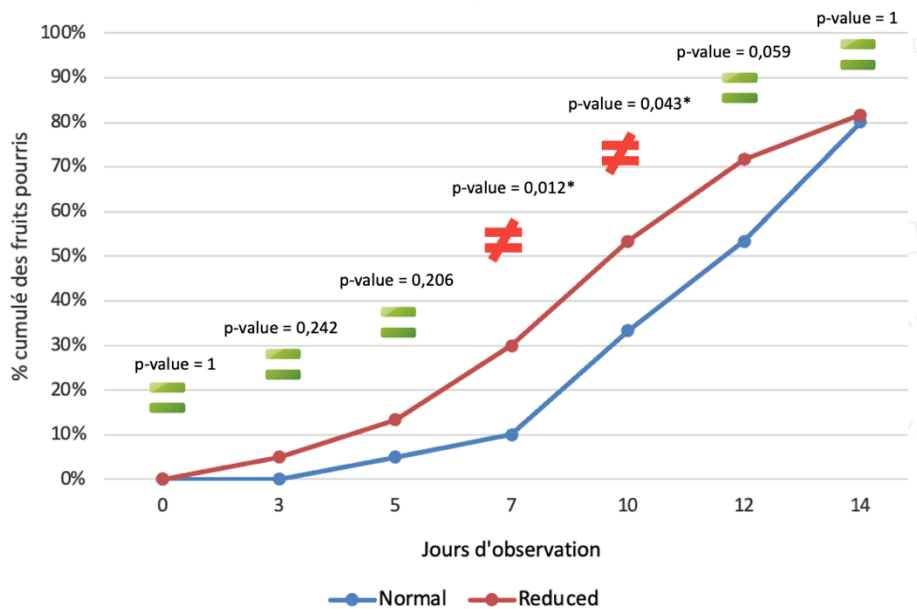


Figure 20 : évolution des maladies de conservation (*monilia*, *rhizopus*, *penicillium*...) au sein des deux modalités. Le *proptest* a été utilisé pour comparer le nombre de fruits pourris en fonction des jours d'observation. Une *p-value* < 0,05 indique une différence significative entre les deux modalités.

En fin de saison, lors de la taille d'hiver, une différence notable a été ressentie au niveau de la taille, avec la présence en quantité réduite de gourmands dans la modalité sud. Aucune notation n'a pu être effectuée mais cette information suggère un point positif pour la modalité avec restriction, par la diminution du temps de main d'œuvre de taille.

Enfin, au début de l'année 2024, une notation de retour à fleur a été réalisée pour mesurer le potentiel de production de l'année 2024, consécutif aux 3 années d'expérimentation durant lesquelles ont été effectuées les restrictions.

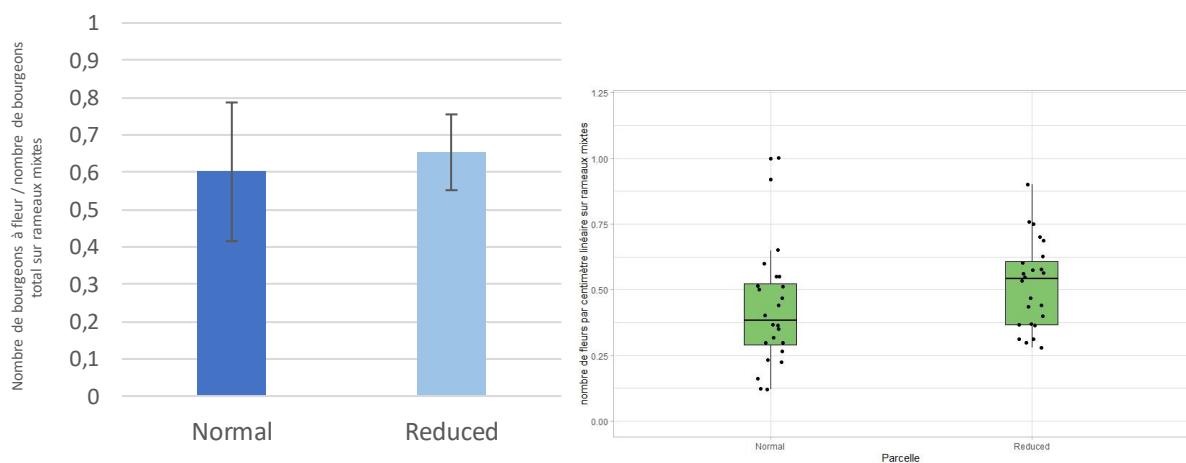


Figure 21 : Niveaux de floraison des 2 modalités en début de saison 2024. Figure 21 A = Nombre de bourgeons à fleur / nombre de bourgeons total sur rameaux mixtes. Figure 21 B = nombre de fleurs par centimètre linéaire sur rameaux mixtes. Aucune différence n'est à noter entre les 2 modalités, si ce n'est une très légère tendance non significative à plus de fleurs dans la modalité avec restriction.

Discussion

Après une année 2021 plutôt pluvieuse suivie d'une année 2022 historiquement sèche et chaude, 2023 fut une année plutôt intermédiaire d'un point de vue du régime hydrique. Plusieurs restrictions d'eau ont été réalisées.

Pour rappel, le dispositif d'irrigation de l'essai ne permet pas une distribution totalement homogène des apports d'eau dans le verger. En effet, la modalité restriction étant en bout de rang, elle subit une perte de pression au niveau des buses d'irrigation, bien qu'autorégulantes, du fait d'un manque de pression général sur le verger. Ainsi, pour un même programme d'irrigation entre les 2 modalités, la modalité restriction reçoit de l'ordre de 5 à 10% de volume d'eau en moins que la modalité classique.

Ainsi les relevés des compteurs effectués tout au long de la saison (figure 21) montrent que la modalité en restriction d'irrigation a été constamment sous-irriguée par rapport à la modalité irriguée normalement. Ce sont plutôt 201 mm qui ont été apportés sur la modalité en restriction (et pas 215), contre 286 mm dans la modalité irriguée de manière classique (et pas 254), soit une réduction réelle de 30% des apports, et pas 15% comme l'indiquait la figure 4.

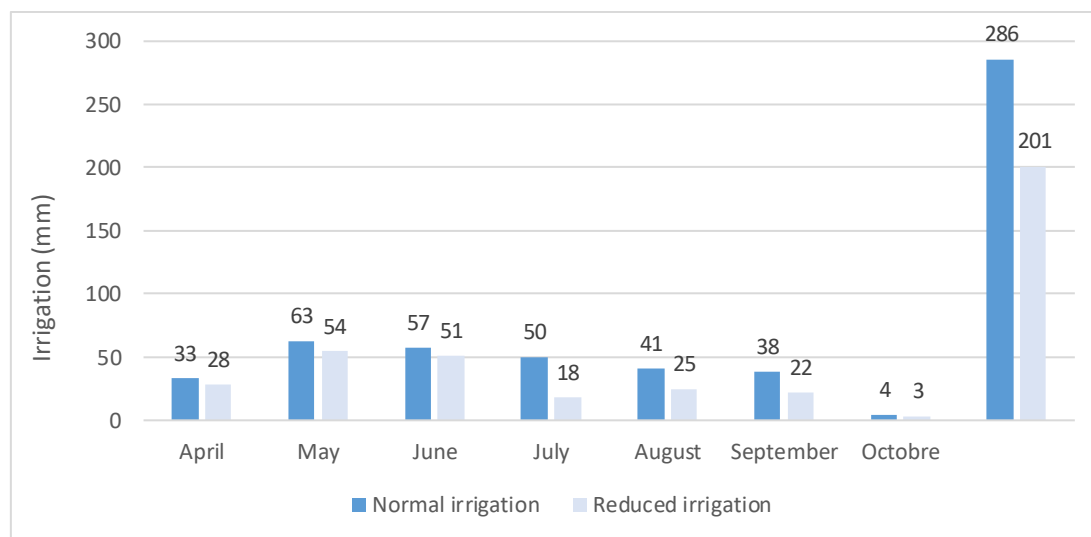


Figure 22 : apports d'irrigation selon les modalités d'après les relevés de compteurs positionnés sur la parcelle.

Plusieurs enseignements sont à tirer après cette saison 2023.

Concernant les restrictions d'irrigation qui peuvent être faites en post-récolte, pour rappel selon De La Rosa et al (2016) sur pêches précoces, cette période n'est pas considérée comme critique pour appliquer des stratégies d'irrigation déficitaires, mais seulement quand le niveau de stress hydrique est considéré de faible intensité, de manière à limiter la baisse de croissance végétative et ne pas affecter les récoltes des prochaines années. Ainsi et considérant ces informations, les restrictions en post-récolte ont été tentées de fin juin (juste après récolte) à mi-août et l'arrivée d'une période de canicule intense et durable qui a stressé fortement le verger, des informations captées par les dendromètres. Alors les restrictions ont été arrêtées.

Ces restrictions ont été effectuées alors que les données des tensiomètres suggéraient de continuer à apporter de l'eau (cf figure 3 et un décrochage début juillet).

Les données des dendromètres et les indicateurs de croissance et de contraction journalière, ainsi que les données concernant les croissances des troncs, des rameaux en longueur et en diamètre, le nombre de pousses, montrent toutes des résultats et performances agronomiques équivalentes pour les 2 modalités testées. Ces résultats suggèrent que les 2 modalités du verger se sont développées de manière égale en termes agronomiques et que les différences d'apports d'eau n'ont pas modifié la physiologie, le comportement et le potentiel de production des arbres.

Les résultats sont tout aussi équivalents sur la croissance des fruits et les données de récolte quantitatives et qualitatives de 2023, ces résultats suggèrent non pas une absence d'effet des restrictions de 2023 sur la récolte, mais plutôt une absence d'effet des restrictions des années précédentes (2021 et 2022) sur le potentiel de production du verger en 2023. Il conviendra de surveiller ces indicateurs en 2024 pour vérifier que les restrictions de 2023 n'ont également pas provoqué d'effets agronomiques négatifs (retour à fleur et production).

Un autre facteur important concernant ces données est le problème d'échantillonnage des rameaux notés. Tous les rameaux suivis étaient des rameaux de 2 ans, mais ils différaient initialement en diamètre, en longueur, en position sur l'arbre, rendant les mesures très hétérogènes.

Dans le cas de notre essai, l'irrigation de la modalité référence est pilotée comme dans une situation réelle de production, fonction de l'ETP, mais aussi fonction des données de tensiométries. Cette année, les apports sur la modalité « normale » sont estimés à hauteur de 90 % de l'évapotranspiration ($k \cdot \text{ETP} - \text{Précipitations}$) mesurée sur la parcelle en saison. Objectivement, cette modalité référence est donc déjà une irrigation bien raisonnée. Les apports d'eau sur la modalité en restriction sont estimés à hauteur de 77% de l'évapotranspiration ($k \cdot \text{ETP} - \text{Précipitations}$)

Quand on parle de restrictions hydriques, tout dépend de la situation initiale ou de référence par rapport à laquelle on se base. Dans la majorité des publications scientifiques, les modalités en irrigation de confort sont arrosées à hauteur de l'évapotranspiration mesurée.

Conclusion

Dans les conditions de 2023, des économies d'eau ont pu être réalisées de l'ordre de 30% par rapport à une situation de référence. Après 3 ans de projet, la modalité qui a subi les restrictions 3 années consécutives ne paraît pas affectée au niveau de la production ni de la croissance des arbres. Cela confirme les résultats obtenus en 2021, tandis qu'en 2022 pour rappel, des conditions hydriques très limitantes n'avaient pas permis de réaliser des économies d'eau sans incidence forte sur les arbres et la production.

Les restrictions hydriques en pêcher restent possibles mais elles dépendent de la situation de départ ou de référence, et surtout, elles sont plus ou moins possibles selon les années.