

Effet du régime hydrique sur le rendement et la qualité de la clémentine de Berkane: vers une agrumiculture de précision

Hadria R. ¹, Elhani S. ², Houmy N. ¹, Benabdelouahab T. ³, Outouya S. ¹, Nazih A. ¹ et Taarabt Y. ¹

rachid.hadria@inra.ma

1 : Institut National de la Recherche Agronomique, CRRA de Oujda, Maroc.

2 : Institut National de la Recherche Agronomique, CRRA de Tanger, Maroc.

3 : Institut National de la Recherche Agronomique, CRRA de Tadla, Maroc.

Résumé

Cette étude consiste à identifier la quantité d'eau d'irrigation optimale pour assurer une meilleure productivité du clémentinier de Berkane en utilisant la méthode d'irrigation déficitaire continue. Trois doses d'irrigation réduites par rapport à un témoin ont été étudiées. Dans le cas du témoin, la quantité d'eau d'irrigation utilisée est estimée à partir de l'évapotranspiration de référence moyenne historique de la région et mise à jour à partir des données climatiques de la saison en cours (stratégie de l'agriculteur). Les trois doses étudiées correspondent à 80%, 60% et 50% de celle utilisée pour le témoin. Les résultats présentés dans cet article sont obtenus à partir d'expérimentations réalisées en plein champs au niveau d'un jeune verger d'agrumes dans la plaine de Triffa (province de Berkane) pendant deux campagnes contrastées en termes de la pluviométrie : une campagne pluvieuse (2017-2018) et une autre au-dessous de la moyenne (2018-2019). Les résultats obtenus montrent que la réduction de la dose de l'irrigation a un effet significatif sur les différentes variables étudiées (rendement par arbre, poids et calibre du fruit, jus produit et taux de sucre). La réduction de 20% de la dose d'irrigation par rapport au témoin n'a pas d'effet significatif sur les variables précitées. Cette étude montre aussi que la sécheresse de la campagne agricole affecte le calibre du fruit malgré la stratégie de l'agrumiculteur qui consiste à augmenter la dose d'irrigation pendant les mois d'avril, mai, juin et juillet. Cette stratégie doit donc être revue pour éviter les pertes dues aux écarts de triage au niveau des stations de conditionnement. Le control continu de l'humidité du sol au niveau de la zone racinaire des arbres et l'exploitation des nouvelles solutions offertes par l'agriculture de précision devraient aider les agrumiculteurs à améliorer leurs stratégies de prise de décision.

Mots clés : irrigation déficitaire, stress hydrique, rendement, clémentine de berkane, semi-aride, agriculture de précision

Effect of water stress on Berkane clementine yield and fruits quality: Towards a precision citrus growing

Abstract

This study consists on identifying the optimal amount of irrigation water to ensure better productivity of Berkane clementine by using deficit irrigation method. Three degrees of irrigation restriction, compared to a control one, were studied. The amount of irrigation water used in the control treatment is estimated from the historical average reference evapotranspiration of the region, updated from the climate data of the current season (farmer's strategy). The amounts of irrigation water used for the three other treatments correspond to 80%, 60% and 50% of that used for the control. Presented results were obtained from an experimental study carried out on a young citrus orchard in Triffa plain (province of Berkane, Morocco) during two contrasting campaigns in term of annual rainfall: Rainy season (2017-2018) and dry season (2018 -2019). Obtained results showed that the amount of irrigation water has a significant effect on the different studied variables (yield, weight of the fruit, produced juice and total soluble solids). Also, reducing the amount of irrigation water by 20% compared to the control had no significant effect on the above-mentioned variables. Finally, this study showed that drought affects the size of the fruit despite the citrus grower's strategy contesting to increase the amount of irrigation water during the period of April-July. This strategy should therefore be reviewed to avoid losses due to fruits size at the packing stations. Continuous monitoring of soil moisture in the trees root zone and the exploitation of the new solutions offered by smart agriculture should help citrus growers to improve their decision-making strategies.

Keywords: deficit irrigation, water stress, yield, Berkane clementine, semi-arid, smart agriculture

دراسة تأثير الإجهاد المائي على مردودية وجودة كليمونتين بركان : نحو

زراعة حمضيات ذكية

رشيد حضرية، سليمان الهاني، نادية هومي، طارق بن عبد الوهاب، سعيد أتهي، نزيه عبد الرحمان،

يونس تعرايت

ملخص

تهدف هذه الدراسة الى تحديد الكمية المثلى من مياه الري الكافية لضمان إنتاج أفضل من كليمونتين بركان باستخدام تقنية الري المتناقص حيث تمت دراسة تأثير ثلاث جرعات من مياه الري ومقارنة تأثيرها مع تأثير الكمية التي يستعملها الفلاح، والتي يتم تقديرها انطلاقاً من المعطيات المناخية المتوسطة بالمنطقة. تم الحصول على النتائج الواردة في هذه المقالة بناء على بيانات الاختبارات الالابائية التي أجريت على اشجار حمضيات في سهل تريفية (إقليم بركان) خلال موسمين متباينين من حيث التساقطات: موسم ممطر (2017-2018) و موسم اقل من المتوسط (2018-2019).

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الانخفاض في كمية مياه الري له تأثير كبير على المتغيرات المختلفة التي تمت دراستها (المردودية، وزن الفاكهة، العصير المنتج ومستوى السكر). كما بينت الدراسة ان تخفيض جرعة الري بنسبة 20% مقارنةً بالكمية التي يستعملها الالال لم يكن له تأثير كبير على المتغيرات المذكورة أعلاه. وأوضحت هذه الدراسة أيضاً أن الجفاف يؤثر على حجم الفاكهة على الرغم من استراتيجية المزارع والملخصة في زيادة جرعة الري خلال ألهلا أبريل ومايو ويونيو ويوليو. لذلك نوصي بمراجعة هذه الاستراتيجية لتجنب الخلل المرتبطة بحجم الفاكهة في محطات التلفيف إذ من شأن المراقبة المستمرة لمستوى رطوبة التربة واستغلال الحلول الجديدة التي تتيحها الزراعة الذكية أن يساعد مزارعي الحمضيات على تحسين استراتيجياتهم في اتخاذ القرارات.

الكلمات المفتاحية: الري للاقص، إجهاد مائي، مردودية، كليمونتين بركان، الزراعة الذكية،

مناخ شبه قاحل

Introduction

Au Maroc, les agrumes n'occupaient en 1933 que 3890 ha et ne produisaient que 14 000 tonnes dont 1300 tonnes étaient destinées à l'exportation. En 1962/1963, leur superficie était 53 700 ha et la production était de l'ordre de 504 745 tonnes dont 72% de cette production était exportée (Chapot et Delucchi, 1964). Depuis l'indépendance, la filière des agrumes est devenue le premier secteur de fruits exportés et considérée comme un domaine stratégique participant à l'équilibre de la balance commerciale (El Hadad, 1995). D'après le dernier recensement général des agrumes réalisé en 2006, l'agrumiculture occupe une superficie de 81 549 ha (MAPM, 2008), soit près de 10% des superficies emblavées en arboriculture. Actuellement, la superficie agrumicole nationale est de l'ordre de 125 000ha (ADA 2018). Ce secteur joue aussi un rôle socio-économique important. Il assure l'emploi de 50 000 ouvriers et procure annuellement plus de 20 millions de journées de travail. Ce secteur représente également une source importante de devises qui est de l'ordre de 2,5 à 3 milliards de Dh/an (MAPMDREF, 2018). En 2018-2019, la production des agrumes a atteint un record de 2.619 millions de tonnes dont 25.8% de cette production a été exportée (MAPMDREF, 2019).

Les superficies plantées en agrumes sont localisées principalement dans les régions de Souss Massa, le Gharb, la Moulouya, Tadla et le Haouz. Le périmètre irrigué de la Moulouya est classé troisième région agrumicole à l'échelle nationale (16% de la surface agrumicole nationale), après le Souss Massa (40%) et le Gharb (17%) (Amlal, 2008). Les agrumes sont concentrés principalement dans la plaine de Triffa (province de Berkane) et occupent environ 21200 ha sur les 36060 ha du périmètre irrigué de la plaine. Le secteur agrumicole joue un rôle socio-économique important dans la région en générant 1300000 jours de travail (ORMVAM, 2009). Le profil variétal agrumicole est dominé par la clémentine sans pépins (clémentine de Berkane) dont la production est de l'ordre de 110000 tonnes/an (Hadria et al. 2019). Les agrumes représentent les premières cultures irriguées dans la région de l'oriental en général et dans la plaine de Triffa en particulier. Ils consomment, d'après nos enquêtes de terrain dans la région et auprès de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Moulouya (ORMVAM), entre 80 et 100 millions de m³ d'eau d'irrigation par an (entre 5000 et 6000m³/ha/an), provenant principalement des trois barrages: Machraa Hammadi, Mohamed V et Hassan II (Hadria, 2011).

Le programme agricole de l'Oriental vise l'intensification de la culture des agrumes pour atteindre une production de l'ordre de 527 500 tonnes en 2020, par rapport aux 200 000 tonnes produites en 2010. Cette intensification va doubler, voire même tripler les quantités d'eau d'irrigation nécessaires pour irriguer cette culture. Et vue les autres contraintes actuelles et futures sur les ressources en eau de la région, dues principalement à la croissance démographique, à la pollution des nappes phréatiques et aux changements climatiques, il s'avère primordial de mettre en place une stratégie robuste et durable pour la bonne gestion de l'irrigation au niveau des périmètres irrigués.

Conscient de l'importance de la bonne gestion de l'irrigation, l'ORMVAM, a lancé depuis 1998, en collaboration avec le ministère de l'agriculture, un grand programme pour la conversion du système d'irrigation gravitaire traditionnel en système d'irrigation moderne goutte à goutte plus efficace et plus économe en eau. Ce programme prévoit l'aménagement de 51200 ha à l'horizon 2022 en irrigation localisée dans le périmètre irrigué de la Moulouya.

Pour atteindre l'objectif final de ce programme, qui vise l'économie d'eau, il est primordial d'adopter des bonnes pratiques d'irrigation à l'échelle du verger d'agrumes. Dans la littérature, les premières méthodes de l'économie de l'eau d'irrigation sont basées sur l'estimation de l'évapotranspiration des cultures, liée à son tour à l'évapotranspiration de référence et au stade phénologique des cultures (Allen et al., 1998). Au début des années 1970, un nouveau concept, appelé irrigation déficitaire, est apparu, et qui consiste à réduire les quantités d'eau fournie à des niveaux inférieurs à l'évapotranspiration de la culture sans que cette réduction affecte considérablement le rendement (James et al. 1971). Les travaux de English and Nuss (1982) et de Hargreaves and Samani (1984) sont les premières études sur la méthode d'irrigation déficitaire. Ensuite, cette méthode a été utilisée dans des centaines d'applications à travers le monde. Une revue intéressante sur cette méthode ainsi que ses dérivées est publiée par Capra et al. (2008).

Dans cet article, nous avons utilisé la méthode de l'irrigation déficitaire pour étudier l'effet du stress hydrique sur la production du clémentinier de Berkane dans une optique de déterminer la quantité d'eau d'irrigation optimale de cette culture dans le contexte environnemental marocain.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude est la plaine de Triffa, la plus grande et la plus importante plaine du périmètre irrigué de la Moulouya avec une superficie de l'ordre de 36060ha. Ledit périmètre est situé au Nord de la région de l'Oriental (Figure 1). Il est limité par la Méditerranée au Nord, par l'Oued Kiss (Frontière avec l'Algérie) à l'Est, par la chaîne des Beni-Snassen au Sud et par différents massifs dont le Rif à l'Ouest. Dernièrement, une extension vers le Sud - Ouest a été réalisée pour inclure la zone de Taourirt.

Le climat de la région est de type méditerranéen semi-aride. La pluviométrie moyenne annuelle est de 350 mm avec des variations allant de 250 à 425 mm selon les années. Les températures sont clémentes et favorables pour les cultures primeurs et sous-abris à cause de l'absence de gelée en zones côtières. Les températures moyennes pendant l'hiver sont autour de 4 à 6°C et de 27 à 30°C en été. Les ressources en eau de la région se divisent en eaux de surface constituées essentiellement par les apports de la Moulouya, les eaux souterraines représentées par les nappes peu profondes dans les plaines de Triffa, du Caret et du Bouareg dont l'eau est saumâtre.

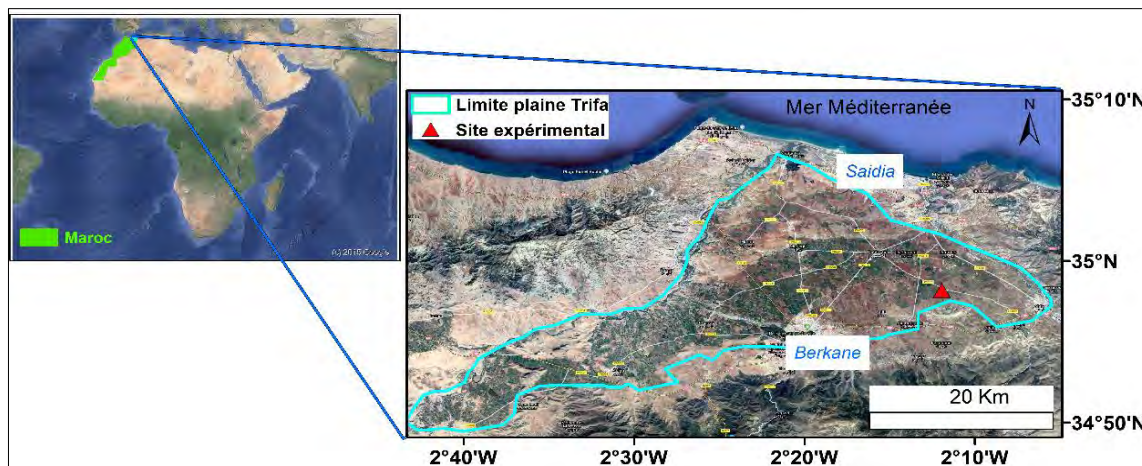


Figure 1. Situation géographique de la plaine de Triffa et du site expérimental. Les images satellites utilisées comme fonds de cartes sont extraites de *Google Maps*.

Les données climatiques utilisées dans cette étude couvrent les deux campagnes agricoles : 2017-2018 et 2018-2019. La **Figure 2** présente les données relatives à la température de l'air, aux précipitations, et à l'évaporation mesurée par le Bac classe A pendant ces deux campagnes. Le tableau 1 résume les valeurs moyennes de ces variables. Ces données montrent que l'année 2019 est plus sèche que l'année 2018. Les moyennes des températures de l'air maximales, moyennes et minimales pendant 2019 sont légèrement supérieures à celles de 2018 de 0.5°C, 0.8°C et 1°C, respectivement. Les différences les plus importantes entre les deux années sont observées pour les précipitations (une réduction de 114mm en 2019 par rapport à 2018) et l'évaporation Bac A (une augmentation de 318mm en 2019 par rapport à 2018). Si on compare les saisons étudiées par rapport à la moyenne de la région en termes de la pluviométrie, la campagne 2017-2018 est classée au-dessus de la moyenne tandis que 2018-2019 est classée au-dessous de la moyenne.

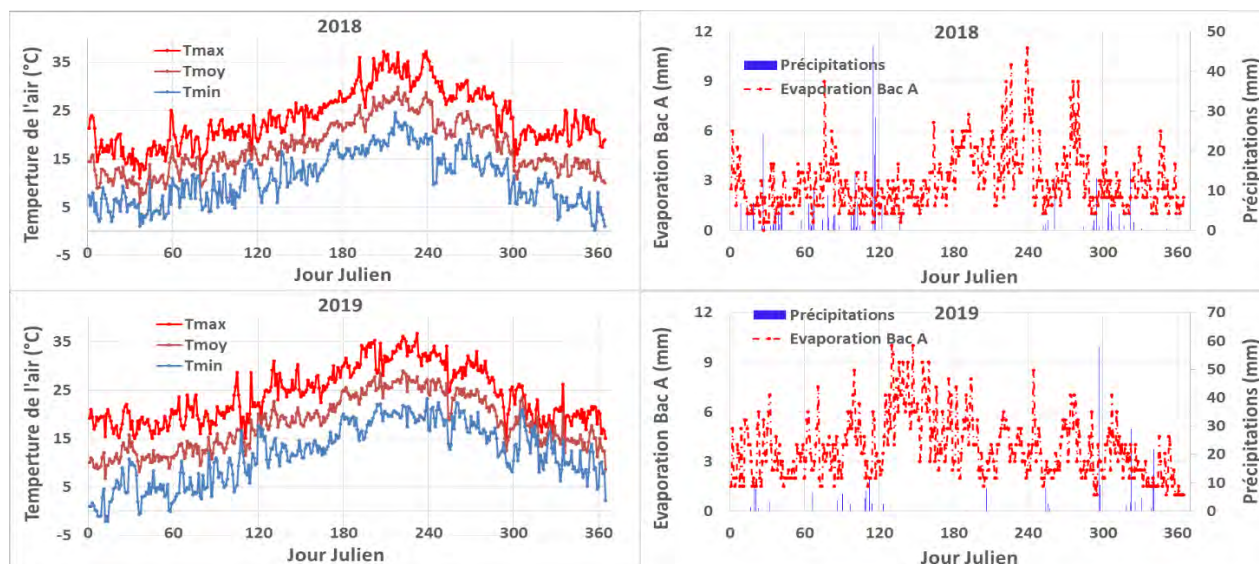


Figure 2. Variation, en fonction du jour julien, de la température de l'air minimale, moyenne et maximale, de l'évaporation mesurée par le Bac classe A et des précipitations dans la zone d'étude pendant les deux années 2018 et 2019.

Tableau 1. Valeurs moyennes des trois composantes de la température de l'air et les cumuls des précipitations et de l'évaporation (Bac classe A) pendant les deux années 2018 et 2019.

	2018	2019
Moyenne de Tmin (°C)	10.9	11.9
Moyenne de Tmax (°C)	23.5	24
Moyenne de Tmoy (°C)	17.2	18
Cumul précipitations (mm)	350	235.8
Cumul evaporation Bac A (mm)	1075.5	1393.6
Quantité d'eau d'irrigation (m ³ /ha)	5678	6441

Le matériel végétal étudié dans ce travail est composé d'arbres de clémentiniers de Berkane, greffés sur le porte greffe *Volkameriana*. Ces arbres, plantés en 2011, font partie d'une parcelle d'agrumes d'une densité de 6x2 et irriguée par goutte à goutte depuis son installation. La quantité d'eau d'irrigation est estimée à partir de l'évapotranspiration de référence en utilisant l'approche basée le coefficient de culture simple. L'agriculteur établit, dès le début de la campagne, un calendrier des besoins en eau de son verger en se basant sur les données historiques de l'évapotranspiration de référence de la région. Ces valeurs sont mises à jour au cours de la campagne en fonction de l'évapotranspiration de référence mesurée au niveau du verger ainsi que de la quantité des précipitations. L'irrigation se fait quotidiennement (par système goutte à goutte) sauf pendant les jours de fortes pluies ou pendant quelques jours qui suivent les jours de fortes précipitations. Ce type de décisions, très répandu dans la zone d'étude, dépend des appréciations de l'humidité du sol par l'agriculteur.

Ainsi, la quantité d'eau d'irrigation est égale à 5678m³/ha en 2018 et 6441m³/ha en 2019. La Figure 3 montre les volumes d'eau d'irrigation mensuels apportés au niveau de la parcelle étudiée pendant les deux campagnes de l'étude. Cette figure montre que la saison d'irrigation commence à partir du mois de janvier jusqu'au moins de novembre, avec un arrêt pendant le mois de décembre. Les quantités d'eau apportées pendant les deux premiers mois de janvier et février restent très faibles (mois de 180 m³/ha) mais continuent à augmenter progressivement à partir du mois de mars, pour atteindre leurs valeurs maximales pendant l'été.

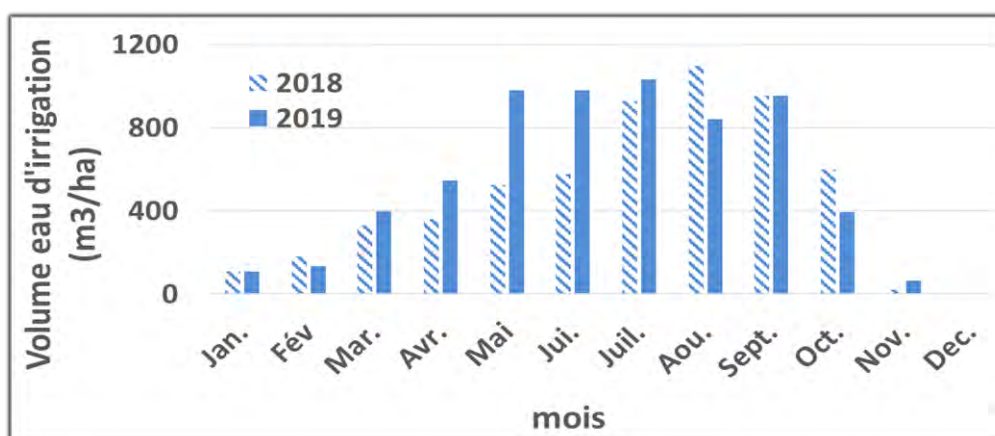


Figure 3. Volumes d'eau d'irrigation mensuels apportés pour le traitement témoin (T100%) pendant les deux années 2018 et 2019.

Protocole expérimental

La méthode utilisée dans cette étude est la méthode d'irrigation déficitaire. Cette méthode d'irrigation est une pratique par laquelle une culture est irriguée avec une quantité d'eau inférieure à celle requise pour sa croissance optimale; il s'agit de réduire la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation des cultures, d'améliorer la réponse des plantes à un certain degré de déficit hydrique de manière positive, et de réduire les quantités d'irrigation ou d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) de la culture (Chai et al. 2016). En d'autres termes, l'irrigation déficitaire consiste à réduire les quantités d'eau fournies à des niveaux inférieurs à l'évapotranspiration de la culture. Lorsque cette réduction est stable et continue tout au long de la saison (cas de cette étude), on parle de l'irrigation déficitaire continue (Costa et al. 2007). On parle aussi de l'irrigation déficitaire régulée lorsque l'application des restrictions hydriques est régulée en fonction du stade phénologique de la culture. Une autre méthode d'irrigation déficitaire vient de gagner du terrain: il s'agit de la méthode de dessèchement partiel des racines (*partial rootzone drying*). Cette méthode et de plus en plus étudiée et comparée aux méthodes d'irrigation déficitaires classiques (Melgar et al., 2010).

Ainsi, quatre traitements ont été appliqués à quatre groupes d'arbres, composé de 10 arbres chacun selon le dispositif expérimental suivant :

T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T80%	T80%	T80%	T80%	T80%	T80%	T80%	T80%	T80%
T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T60%	T60%	T60%	T60%	T60%	T60%	T60%	T60%	T60%
T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T100%	T50%	T50%	T50%	T50%	T50%	T50%	T50%	T50%	T50%

Figure 4. Dispositif adopté dans cette étude. Chaque ligne schématise une ligne d'arbres et chaque cellule représente un arbre. Les cellules surlignées en jaune montrent les arbres équipés par les sondes capacitatives pour le suivi de l'humidité du sol.

Les différents traitements sont décrits comme suit :

- T100% : le témoin, la quantité d'eau d'irrigation utilisée est calculée à partir de l'évapotranspiration de référence moyenne historique de la région et mise à jour à partir des données climatiques de la saison en cours (stratégie de l'agriculteur décrite plus haut).
- T80% : Reçoit 80% de la quantité d'eau de celle appliquée pour le témoin T100%.
- T60% : Reçoit 60% de la quantité d'eau de celle appliquée pour le témoin T100%.
- T50% : Reçoit 50% de la quantité d'eau de celle appliquée pour le témoin T100%.

Dans le but de suivre l'état de l'humidité du sol, quatre arbres, (un de chaque groupe), ont été équipés par des sondes capacitatives de type *Decagon 5TE*, pour mesurer l'humidité du sol avec un pas de temps de 30 minutes. Ainsi, pour chacun des quatre arbres, quatre sondes ont été installées au niveau de deux horizons du sol près du goutteur à 40cm et à 60cm, et au niveau de deux horizons entre deux goutteurs successifs (à un mètre du tronc de l'arbre) à 20cm et à 40 cm, respectivement.

On note à ce niveau que tous les arbres reçoivent les mêmes quantités d'engrais pour se focaliser seulement sur l'effet de la réduction de l'eau d'irrigation.

Évaluation du rendement et des principaux paramètres qualitatifs des fruits

Pour évaluer l'effet de la réduction de la dose d'irrigation sur le rendement des arbres, nous avons récolté et pesé la production totale de trois arbres choisis au hasard de chacun des quatre traitements. Ensuite, 30 fruits murs ont été récoltés, d'une manière aléatoire, à partir de trois arbres du même traitement. Les échantillons collectés sont mis dans des sachets en plastique aérés et codés avant d'être ramenés au laboratoire de valorisation des produits agroalimentaires de l'Agropole de Berkane. Au laboratoire, le poids et le volume des fruits ont été mesurés à l'aide d'une balance électrique et d'un pied à coulisse électronique, respectivement, selon la méthode utilisée par Handaji et al., (2013) et basée sur les standards proposés par Nadori et al. (1988).

Ensuite, le jus de dix fruits issus de chaque arbre a été extrait à l'aide d'un extracteur à toupie tournante. Ce jus est filtré à travers un filtre en plastique puis son volume a été mesuré. Finalement, la teneur en sucre du jus, donnée en degré Brix, a été déterminée par un réfractomètre de paillasse. Le principe de la méthode consiste à déposer une goutte de jus sur le prisme puis effectuer la lecture de l'extrait sec soluble. En fait, la détermination de la teneur en sucre du jus est basée sur la capacité des sucres à faire dévier la lumière (Essalhi et al., 2016).

Les analyses statistiques des données ont consisté en l'analyse de variance (ANOVA) avec deux facteurs : traitement d'irrigation et répétition. L'analyse des moyennes a été réalisée par le test de Fisher (LSD) au seuil de 5%. Ces analyses ont été effectuées en utilisant le programme STATGRAPHICS Plus.

Résultats et discussions

Effet de la dose d'irrigation sur le rendement par arbres

La Figure 5 présente les rendements moyens par arbre et par traitement des deux campagnes 2017-2018 et 2018-2019. Cette figure montre une baisse globale du rendement moyen des arbres avec la réduction de la dose d'irrigation pendant les deux campagnes. Cette baisse de rendement par rapport au témoin pendant la campagne 2017-2018 est de l'ordre de 8%, 22% et 23% pour les traitements T80%, T60% et T50%, respectivement. Le même constat est observé pour la campagne 2018-2019 et la baisse de rendement par rapport au témoin est de l'ordre de 3%, 22% et 34% pour les traitements T80%, T60% et T50%, respectivement. Pour les deux campagnes, la baisse du rendement moyen des arbres est restée inférieure à 10% entre les traitements T100% et T80%. La baisse de rendement entre les traitements T100% et T60% est restée stable au niveau de 22% tandis que la baisse de rendement du entre T100% et T50% est passée de 23% à 34%. L'analyse statistique de ces résultats confirme que la dose d'irrigation a un effet significatif sur le rendement moyen des arbres. Pendant la saison 2017-2018, la différence n'est pas significative entre T50% et T60%, entre T60% et T80% et entre T80% et T100%. Pour la saison 2018-2019, la différence n'est pas significative entre T80% et T100%. Cela veut dire que l'effet de la réduction de la dose d'irrigation est plus prononcé pendant la campagne 2018-2019 que pendant 2017-2018. Cela est dû au fait que la campagne 2018-2019 était plus sèche que 2017-2018 (voir tableau 1).

Un autre constat qu'on peut tirer de la Figure 5 est l'augmentation générale du rendement moyen par arbre entre les deux campagnes étudiées. Cette augmentation est de 15%, 21% et 14.7% pour les trois traitements T100%, T80% et T60%, respectivement. Cependant, le rendement moyen par arbre est resté quasiment stable (une baisse de -2%) pour le traitement T50%. Puisque les conditions climatiques de la saison 2018-2019 sont moins favorables que celles de 2017-2018, l'augmentation observée du rendement entre les deux saisons serait plutôt due à la croissance physiologique des arbres. Pour vérifier ce point, nous comparons dans le tableau 2 suivant le nombre moyen de fruits produits par arbre pendant les deux saisons étudiées et pour les quatre traitements. On constate une augmentation nette du nombre de fruits pour tous les traitements d'une saison à l'autre. Cette augmentation est de 30% pour T100%, 37% pour T80% ; 64% pour T60% et seulement 19% pour le traitement T50%.

Tableau 2. Nombre moyen de fruits produits par arbre pendant les deux saisons étudiées et en fonction du traitement

	Nombre de fruit/arbre	
	2017-2018	2018-2019
T100%	663	864
T80%	616	842
T60%	593	972
T50%	672	800

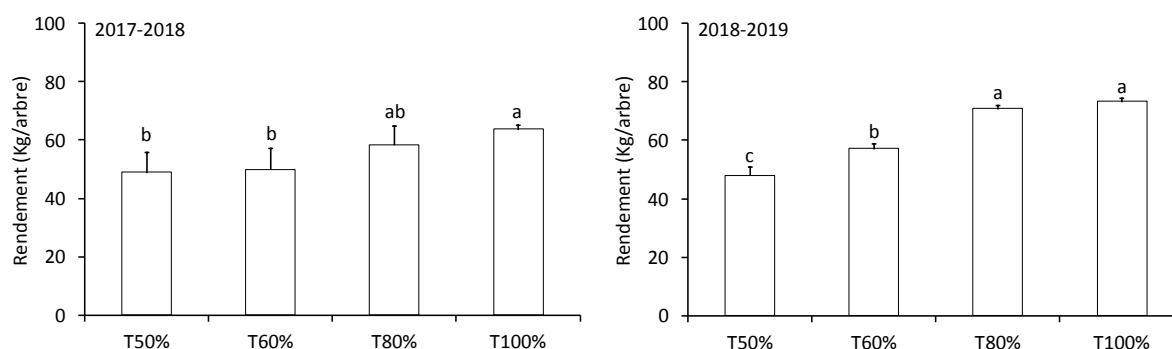


Figure 5. Rendement moyen par arbre (3 arbres/traitement) en fonction de la dose d'irrigation en 2017-2018 (à gauche) et en 2018-2019 (à droite). Les traitements T50%, T60% et T80% reçoivent 50%, 60% et 80% d'eau d'irrigation par rapport au témoin T100%, respectivement. Les différentes lettres indiquent une différence statistique significative entre les traitements ($P < 0.05$).

Effet de la dose d'irrigation sur le poids du fruit

Le poids de la clémentine est un indicateur important du calibre du fruit, qui représente à son tour un critère clé de triage dans les stations de conditionnement. La Figure 6 illustre l'effet de la réduction de la dose d'irrigation sur le poids moyen des fruits issus des différents traitements. Une première analyse visuelle montre une baisse globale du poids de fruit avec la réduction de la dose d'irrigation. Un tel constat a été observé aussi par Ballester, Castel et al. (2013) sur l'effet de l'irrigation déficitaire sur la taille du navel. Statistiquement, la différence n'est pas significative entre T100% et T80% pendant 2017-2018. Pendant 2018-2019, la différence n'est pas significative entre T60% et T50% d'un côté entre T100% et T80% d'un autre côté.

Si on compare la différence entre les saisons en termes du poids de fruit, on note une baisse de ce dernier en 2018-2019 par rapport à 2017-2019. La réduction du poids moyen des fruits est de l'ordre 12%, 11%, 30% et 18% pour les fruits issus des traitements T100%, T80%, T60% et T50%, respectivement. Cette réduction du poids moyen des fruits versus l'augmentation du rendement moyen des arbres observés dans la Figure 5 s'explique par l'augmentation du nombre moyen de fruits produits par arbre (tableau 2).

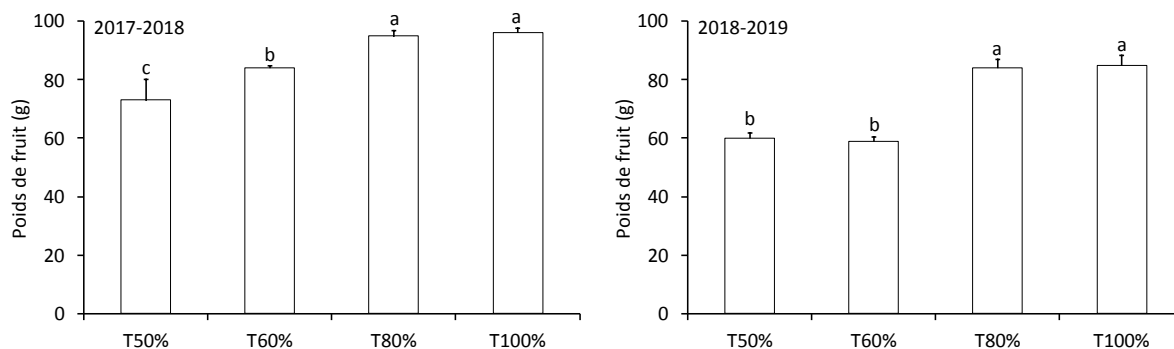


Figure 6. Poids moyen de fruit en fonction de la dose d'irrigation en 2017-2018 (à gauche) et 2018-2019 (à droite). Les traitements T50%, T60% et T80% sont les mêmes que dans la figure 5. Les différentes lettres indiquent une différence statistique significative entre les traitements ($P < 0.05$).

Effet de la dose d'irrigation sur le calibre du fruit

Le calibre est une information très utile pour apprécier la qualité des fruits. Cette grandeur est liée principalement au diamètre équatorial du fruit: plus ce dernier est grand, plus le calibre est petit et donc plus le fruit est apprécié (au moins visuellement). La **Figure 7** montre les variations moyennes du diamètre équatorial des fruits en fonction de la dose d'irrigation pendant les deux saisons étudiées. Là encore, on constate que les différences en termes du diamètre du fruit n'est pas significative entre les traitements T100% et T80% durant les deux saisons. En se référant aux normes de la commission européenne (*Règlement (CE) N° 543/2011*), les fruits issus des deux traitements T100% et T80% en 2017-2018 ont un calibre de 2 tandis que ceux issus des traitements T60% et T50% ont un calibre de 3. Pendant la campagne 2018-2019, on observe une réduction générale des calibres des fruits pour tous les traitements. Les fruits issus des traitements T100% et T80% ont un calibre de 4 tandis que ceux issus des traitements T60% et T50% ont un calibre de 5. Une telle réduction serait due au fait que la campagne 2018-2019 été plus sèche que la campagne 2017-2018 (voir section 2.2).

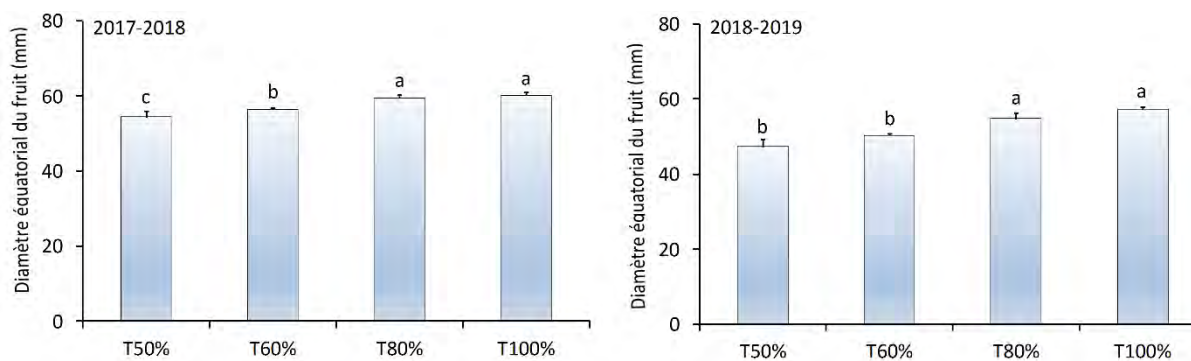


Figure 7. Moyenne de diamètre équatorial du fruit en fonction de la dose d'irrigation en 2017-2018 (à gauche) et 2018-2019 (à droite). Les traitements T50%, T60% et T80% sont les mêmes que dans la figure 5. Les différentes lettres indiquent une différence statistique significative entre les traitements ($P < 0.05$).

Effet de la dose d'irrigation sur le volume du jus

Le volume de jus produit par fruit est un autre indice important pour apprécier la qualité des agrumes. La Figure 8 montre la variation du volume moyen de jus produit par fruit en fonction de la dose d'irrigation. Cette variation suit globalement la même que celle observée pour le poids moyen du fruit présentée dans la Figure 6. Là encore, il ressort que la différence entre les deux traitements T100% et T80% n'est pas significative, notamment pour la saison 2018-2019.

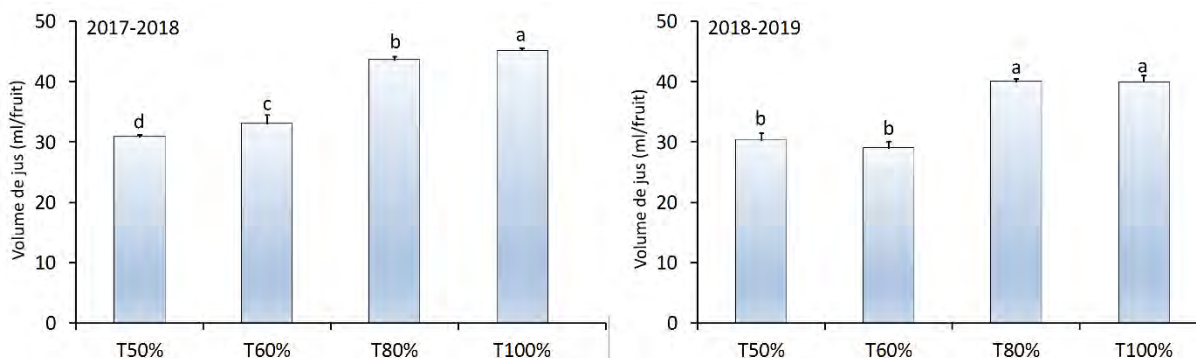


Figure 8. Moyenne du volume de jus produit par fruit en fonction de la dose d'irrigation en 2017-2018 (à gauche) et 2018-2019 (à droite). Les traitements T50%, T60% et T80% sont les mêmes que dans la figure 5. Les différentes lettres indiquent une différence statistique significative entre les traitements ($P < 0.05$).

Effet de la dose d'irrigation sur le degré Brix

Le degré Brix (en °B ou °Bx) est souvent utilisé pour apprécier la teneur en saccharose dans les jus. Plus ce degré est élevé, plus le jus est sucré. La Figure 9 montre que le degré Brix du jus augmente avec la réduction de la dose d'irrigation. Ce résultat est conforme avec ceux déjà obtenus sur l'effet de l'irrigation déficitaire sur la qualité du navel (Ballester, Castel et al. 2013) ainsi que sur d'autres fruits comme les pommes (Ebel et al. 1993) et l'abricot (Pérez-Pastor, Ruiz-Sánchez et al. 2007).

L'analyse statistique a montré que l'effet de la réduction de la dose d'irrigation est significatif sur la production du jus. La différence est significative entre les traitements T80% et T60% et T50% d'un côté et le témoin T100% d'un autre côté.

On note cependant que le degré de Brix varie inversement avec le volume du jus produit (Figure 8). Ce résultat s'explique par le fait que la teneur en eau du jus par fruit diminue avec le stress hydrique, d'où une concentration plus importante du sucre.

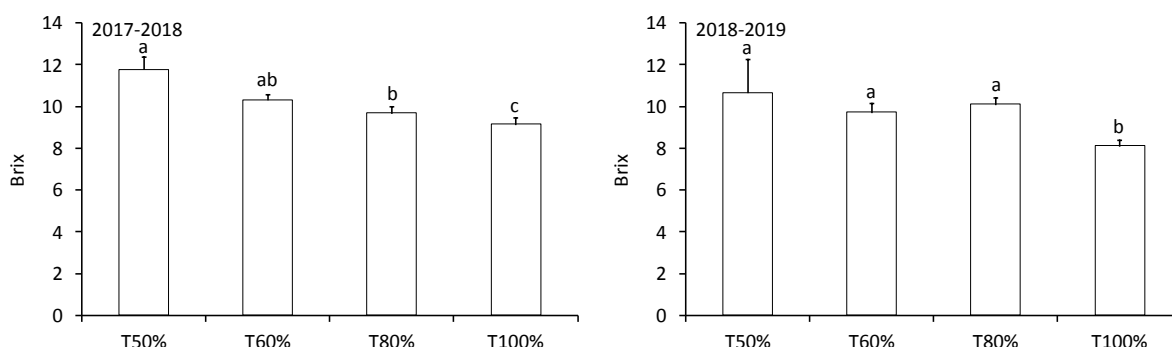


Figure 9. Moyenne de Brix en fonction de la dose d'irrigation en 2017-2018 (à gauche) et 2018-2019 (à droite). Les traitements T50%, T60% et T80% sont les mêmes que dans la figure 5. Les différentes lettres indiquent une différence statistique significative entre les traitements ($P < 0.05$).

Variation de l'humidité du sol selon les traitements

La Figure 10 montre les évolutions de l'humidité du sol dans les horizons 40cm et 60cm près du goutteur pour les quatre traitements étudiés pendant la période entre juin 2018 et janvier 2019. La Figure 11 montre la même chose mais pour les horizons 20cm et 40cm à un mètre du tronc de l'arbre. Le premier constat qui ressort des deux figures est la distinction entre deux périodes : la première commence entre juin et octobre couvrant une grande partie de la période de pointe de l'irrigation tandis que la deuxième couvre la fin de la campagne (réduction ou arrêt de l'irrigation).

D'après la Figure 10, et si on s'intéresse seulement à la première période juin-octobre, on constate que l'humidité du sol oscille autour de la valeur $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ dans l'horizon 40cm et ce pour les quatre traitements. Le même constat est valable pour l'horizon 60cm dans le cas des traitements T100% et T80%.

D'un autre côté, la Figure 11 montre que l'humidité du sol reste supérieure au seuil $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ pour les deux T100% et T80% à partir du mois d'août tandis qu'elle diminue au-dessous de ce seuil pour les traitements T60% et T50%. Sachant que la zone racinaire des arbres étudiés se limite seulement dans l'horizon 10-40 cm, on conclut qu'une quantité importante d'eau d'irrigation est perdue soit par percolation au-dessous de l'horizon de 60cm ou horizontalement entre les arbres. En guise de conclusion, la faible différence en termes d'humidité du sol entre les traitements T100% et T80% explique la différence non significative en termes de rendement observée dans les sections précédentes. Le suivi de l'humidité du sol entre les goutteurs et à un mètre du tronc de l'arbre montre aussi qu'une quantité importante d'eau est perdue horizontalement loin du tronc. Ainsi, le contrôle continu de l'humidité du sol loin de la zone racinaire à l'aide des nouveaux outils et méthodes de l'agriculture de précision permettrait de réduire la dose d'irrigation sans affecter le rendement final des arbres ni la qualité de la production.



Figure 10. Évolution de l’humidité du sol dans les horizons 40 cm et 60cm près du goutteur pour les quatre traitements T100%, T80%, T60% et T50% pendant la période entre juin 2018 et janvier 2019 . Le dernier graphe montre les précipitations pendant la même période.

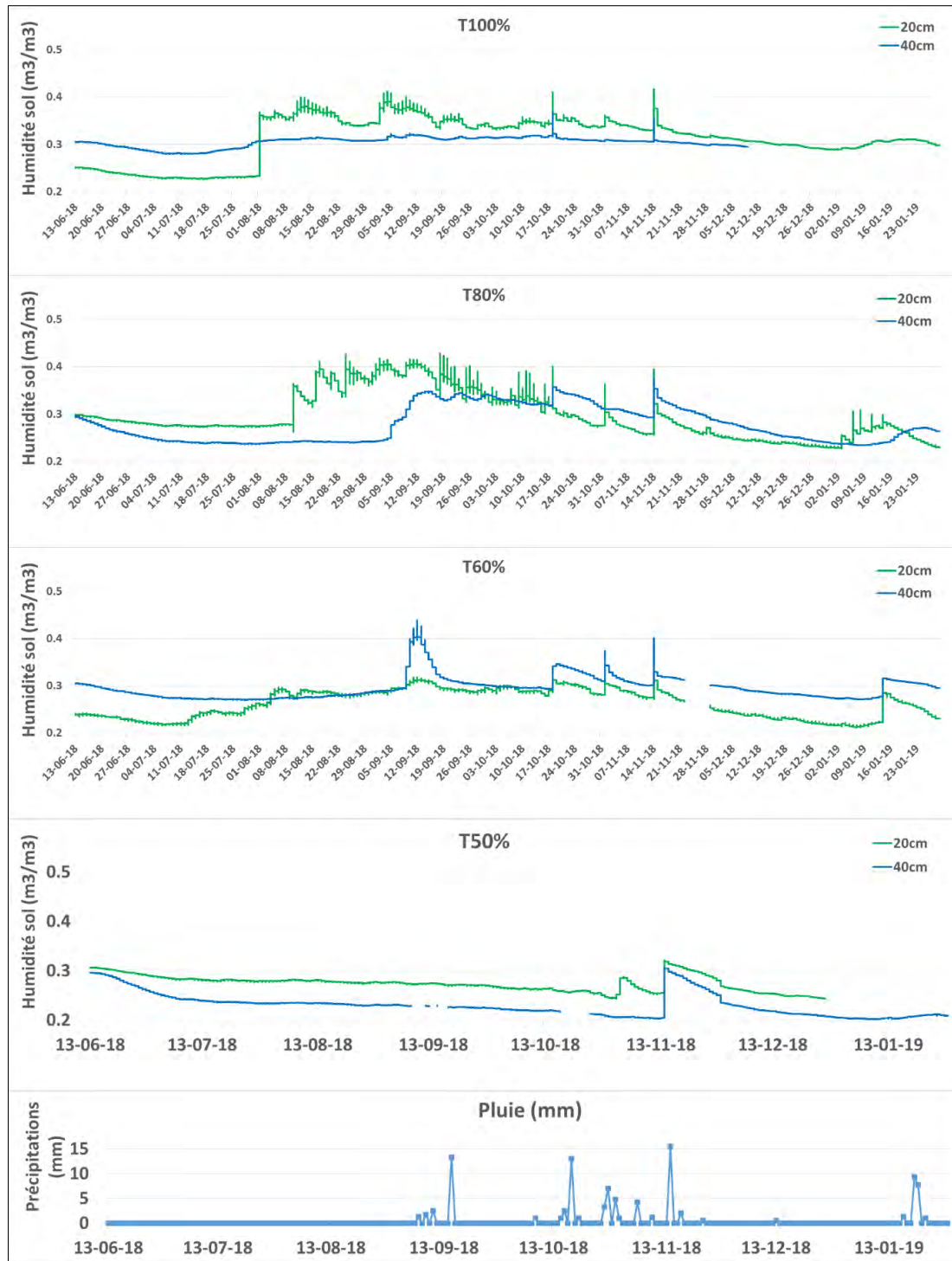


Figure 11. Évolution de l’humidité du sol dans les horizons 20 cm et 40cm entre les goutteurs et à un mètre du tronc d’arbre pour les quatre traitements T100%, T80%, T60% et T50% pendant la période entre juin 2018 et janvier 2019. Le dernier graphe montre les précipitations pendant la même période.

Conclusions et perspectives

Cet article vise l'étude en plein champs de l'effet de la réduction de la dose de l'eau d'irrigation sur le rendement des arbres de clémentinier de Berkane pendant deux campagnes agricoles contrastées en termes de conditions climatiques : Une campagne pluvieuse (2017-2018) classée au-dessus de la moyenne de la région en termes de pluviométrie et une campagne sèche (2018-2019), classée au-dessous de la moyenne de la région.

La méthodologie suivie est basée sur la méthode de l'irrigation déficitaire continue. Trois doses d'irrigation ont été appliquées : 50%, 60% et 80% d'eau d'irrigation par rapport à la dose appliquée par l'agrumiculteur (le témoin). Le rendement moyen par arbre, le poids et le calibre du fruit, le volume du jus produit par fruit et son degré de Brix obtenus pour chaque traitement ont été mesurés, analysés et comparés avec ceux du traitement témoin. Pendant les deux campagnes étudiées, quatre arbres (un de chaque traitement) ont été équipés par des sondes capacitatives pour le suivi de l'humidité du sol à différentes positions (près du tronc et à un mètre du tronc) ainsi qu'à différentes profondeurs du sol.

L'analyse statistique des résultats fait ressortir que la réduction de la dose de l'irrigation a un effet significatif sur les différentes variables étudiées. Cette réduction conduit à une baisse de rendement des arbres pendant les deux campagnes étudiées. Cette baisse de rendement par rapport au témoin pendant la campagne 2017-2018 été de l'ordre de 8%, 22% et 23% pour les traitements T80%, T60% et T50%, respectivement. Le même constat est observé pour la campagne 2018-2019 et la baisse de rendement par rapport au témoin est de l'ordre de 3%, 22% et 34% pour les traitements T80%, T60% et T50%, respectivement. Comme attendu, la réduction de la dose d'irrigation affecte également le poids et le calibre des fruits ainsi que la dose et la qualité du jus produit.

Statistiquement, la différence n'est pas significative entre les traitements T100% et T80%. Un tel résultat montre la possibilité d'économiser jusqu'à 20% d'eau d'irrigation par rapport à celle utilisée par l'agrumiculteur dans ce cas d'étude. Cependant, la teneur en sucre du jus produit augmente avec le stress hydrique. Ce résultat s'explique par le fait que la teneur en eau du jus par fruit diminue avec le stress hydrique, d'où une concentration plus importante du sucre. Un tel résultat pourrait intéresser les producteurs de jus et les orienter vers le choix des meilleurs fruits en termes de concentration en sucre.

Un autre résultat de cette étude stipule que la sécheresse de la campagne agricole affecte le calibre du fruit malgré la stratégie de l'agrumiculteur qui consiste à augmenter la dose d'irrigation pendant les mois d'avril, mai, juin et juillet pour réduire les effets de la sécheresse. Cette stratégie doit donc être revue pour éviter les pertes dues aux écarts de triage au niveau des stations de conditionnement.

Finalement, cette étude a montré que le suivi continu de l'humidité du sol dans la zone racinaire des arbres ainsi que loin de cette zone permet de mieux contrôler la teneur en eau dans le sol et par conséquent, aider à la planification des irrigations (dates et quantités). Un tel suivi permettrait d'éviter les pertes d'eau loin de la zone racinaire des arbres. Les nouveaux capteurs et solutions offertes par l'agriculture de précision devraient donc beaucoup aider les agrumiculteurs à améliorer leurs stratégies de prise

de décision. Cependant, des efforts importants restent à déployer pour les accompagner dans l'adoption de ces nouvelles solutions pour arriver à une agrumiculture de précision dans la région. L'accompagnement devrait se présenter sous différentes formes comme des sites de démonstration, des séances de formation ainsi que des subventions financières pour l'acquisition et l'entretien de ce type de solutions.

En perspective de ce travail, l'extension de l'étude à d'autres vergers de différents âges ainsi qu'à d'autres espèces permettrait de mieux raisonner l'irrigation des agrumes dans la région. Il est également intéressant d'étudier et d'introduire d'autres méthodes dans la région comme l'irrigation déficitaire régulée et la méthode de dessèchement partiel des racines (Partial Rootzone Drying, PRD).

Références bibliographiques

Agence pour le Développement Agricole (ADA). (2018). Guide de l'investisseur dans le secteur agricole au Maroc, édition d'avril 2018. 160 pages.

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., (1998). Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization, Rome.

Amlal F., 2008. Contribution à l'élaboration des normes d'interprétation des résultats d'analyses du sol, des feuilles et des fruits des nouvelles variétés d'agrumes dans la région du Souss. *Mémoire de troisième cycle, ENA Meknès*. 134 p.

Ballester C., Castel J., Intrigliolo D. S. and Castel J. R. (2013). Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. *Irrigation Science* ; 31 (3): 333-341.

Capra S. Consoli and Scicolone B. (2008). Deficit irrigation: theory and practice. Chapter in: In: *Agricultural Irrigation Research Progress*. p. 53-82. Editor: Daniel Alonso and Hugo J. Iglesias, ISBN 978-1-60456-579-9.

Chai Q., Gan Y., Zhao C., Xu H. L., Waskom R. M., Niu Y., Siddique K. H. M. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agron. Sustain. Dev.* ; 36. p. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>.

Chapot H., et Delucchi V. L. (1964). Maladies, troubles et ravageurs des agrumes au Maroc. INRA Rabat. 339 p.

Costa J. M., Ortuño M. F., Chaves M. M. (2007). Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture. *J. Integr. Plant Biol.*; 49. p. 1421–1434. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x>.

El Hadad F. (1995). Enjeux et perspectives de la filière agrumes du Maroc. *Options Méditerranéennes* ; Sér. B / n°14. p. 249-264.

English M. J. and Nuss G. S. (1982). Designing for deficit irrigation. *J. Irrigation and Drainage Engineering* ; ASCE, 108(2). p. 91-106.

Essalhi El M., Handaji N., Brhadda N., Gmira N., Arsalane N., Label K., Aderdour T. and Benyahya H. (2016-). Étude de la variation de la qualité des fruits de dix clones de clémentinier (*Citrus clementina*) dans la région du Gharb. *International Journal of Innovation and Applied Studies* ; 15 (2). p. 319-328.

Hadria R., Elmansouri L., Benabdelouahab T., Ouatiki H., Lebrini Y., Htitiou A., Khellouk R. (2019). Recours aux satellites pour appuyer le management de l'eau d'irrigation :-Estimation des besoins en eau des agrumes par télédétection dans la Plaine de Triffa-Berkane (Maroc). *African Journal of Land Policy and Geospatial Sciences*; 2 (2). p. 135-148.

Hadria R. (2011). État des lieux et analyse de la conduite technique des agrumes dans le périmètre irrigué de la Moulouya, *Rapport de titularisation à l'INRA, Rabat*. 75 pages.

Handaji N., Benyahia H. , Arsalane N. , Ben Azouz A. , Gaboun F. (2013). Evaluation pomologique et organoleptique de 34 variants d'orangers (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) issus de semis apomictique en essai dans la région du Gharb. *Al Awamia*; 127. p. 45-70.

Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1984). Economic considerations of deficit irrigation. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* ; 110 (4). p. 343-358.

James, L.D. and Lee, R. R. (1971). *Economics of water resources planning*. New York, USA, McGraw-Hill. 325.

ORMVAM : l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de la Moulouya-Berkane, (2009). Filière agrumicole dans le périmètre de la Moulouya. Rapport interne.

MAPM. (2008). Présentation des principaux résultats du recensement général des agrumes au Maroc (2006-2007). Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, Direction de la Programmation et des Affaires Économiques, Division des Statistiques et de l'Informatique.

MAPMDREF. (2018). *Agriculture en chiffre au Maroc*. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, Développement Rural et des eaux et Forêts.72p.

MAPMDREF. (2019). *Agriculture en chiffre au Maroc*. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, Développement Rural et des eaux et Forêts, Edition 2019, .31p.

Melgar J. C., Dunlop J. M. and Syvertsen J. P. (2010). Growth and physiological responses of the citrus rootstock Swingle citrumelo seedlings to partial rootzone drying and deficit irrigation. *Journal of Agricultural Science*, Volume 148, Issue 5 October 2010. p. 593-602.

Nadori EB., Ouammou M. et Kayaf M. (1988). Comportement de trois clones de clémentinier sur différents porte-greffes, *Al awamia* ; 64. p. 44-54

Pérez-Pastor A., Ruiz-Sánchez M. C., Martínez J. A., Nortes P. A., Artés F. and Domingo R. (2007). Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*; 87(13). p. 2409-2415.

Règlement (CE) N° 543/2011. (2011). Règlement d'exécution (UE) no 543/2011 de la commission européenne du 7 juin 2011, Journal officiel de l'Union européenne, 15/06/2011.

Robert C. Ebel, Edward L. Proebsting and Max E Patterson. (1993). Regulated Deficit Irrigation May Alter Apple Maturity, Quality, and Storage Life. *HortScience* ; 28 (2). p. 141–143.