

The Partial Root-Zone Drying Irrigation Technique (PRD): An analysis of the theoretical and practical aspects

La technique d'irrigation par dessèchement partiel des racines (PRD): Une analyse de l'aspect théorique et pratique

Scientific Review

B. BEN NOUNA ¹, M. REZIG ¹

¹ National research Institute of rural engineering, Water and Forestry, Hedi Elkarray Street, Ariana, Tunisia.

*Corresponding author: rezigue_mourad@yahoo.fr

Abstract - The availability of water resources is under increasing pressure from the agricultural water demand for irrigation. In the long term, this crucial lack of resources, particularly in semi-arid and arid regions, imperatively require urgent and innovative solution for agricultural water management. In this context, the partial root-zone drying (PRD) will undertake the challenge on the plot scale. This approach provides an alternative irrigation for each side of the root system. It allows the plant, in the case of moderate water stress, triggering a chemical signaling to the leaves through the xylem to reduce the stomatal conductance, and so transpiration with a non-significant yield reduction. In fact, in the semi-arid and arid bioclimatic zones where water resources are limited, the PRD irrigation can be adopted as a technical to regularize the yield and substantial enhancement of agricultural water. This study focuses on the PRD irrigation origin and analyses its theoretical and practical aspects related to the improvement of crop water productivity. In addition, a research summary was conducted under PRD irrigation treatments and the related questions that require further study are presented in this work.

Keywords: Deficit irrigation, Partial root-zone drying (PRD), Water productivity, Stomatal conductance, Conventional irrigation

Résumé - La disponibilité des ressources en eau est soumise à une pression croissante de la demande en eau agricole des terres irriguées. A long terme, ce manque crucial de ces ressources, particulièrement dans les régions semi-arides et arides, nécessitera impérativement une solution urgente et innovatrice de la gestion de l'eau agricole. Dans cet esprit, l'irrigation par dessèchement partiel des racines (PRD) pourra relever le défi à l'échelle de la parcelle. Cette approche prévoit un arrosage alternatif de chaque côté du système racinaire. Elle permet à la plante, dans le cas d'un stress modéré, de déclencher une signalisation chimique vers les feuilles par l'intermédiaire de l'xylème, pour réduire la conductance stomatique, et ainsi la transpiration avec une réduction non significative de rendement. En fait, dans les étages bioclimatiques semi-arides et arides où les ressources en eau sont limitées, l'irrigation PRD pourra être adoptée comme une technique de régularisation du rendement et de valorisation substantielle de l'eau agricole. Cet article, se focalise sur l'origine de l'irrigation PRD et l'analyse de ses aspects théoriques et pratiques relatifs à l'amélioration de la productivité de l'eau des cultures. Ce papier présente aussi une synthèse des travaux de recherche conduits sous régime d'irrigation PRD. Egalement, des questions exigent d'avantage d'étude sont évoquées dans ce travail.

Mots clés: Irrigation déficitaire, Irrigation par dessèchement partiel des racines (PRD), Productivité de l'eau, Conductance stomatique, Irrigation conventionnelle

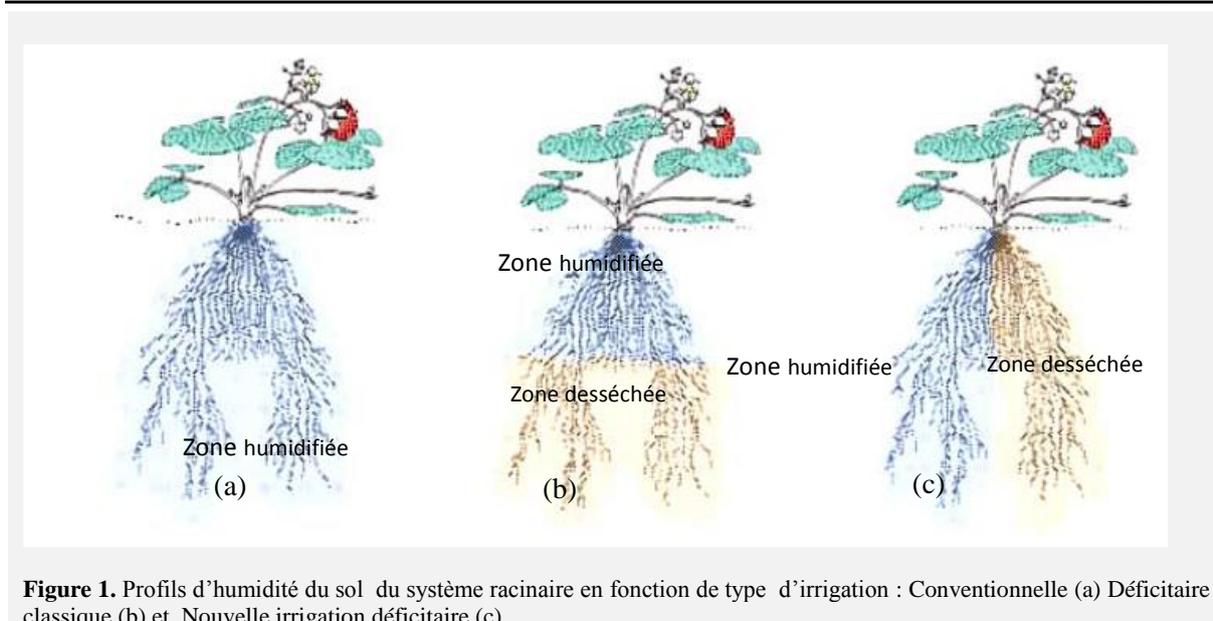


1. Introduction

L'agriculture représente l'usage anthropique majoritaire des ressources en eau, 70% de l'eau douce disponible sur terre sert à l'irrigation des champs. Environ les deux tiers des 3600 km³ d'eau prélevés annuellement sont consommés par évapotranspiration des plantes ainsi que par ruissellement et infiltration dans le sol sans utilité pour la plante. De plus, il y a un conflit entre l'augmentation de la demande alimentaire et la diminution des ressources en eau qui est considéré comme un énorme défi à relever. En fait, la sécurité alimentaire ne peut être assurée en grande partie que par l'agriculture irriguée puisque celle-ci double en moyenne le rendement comparé à des conditions pluviales. Le secteur irrigué devra être augmenté de plus que 20% et la productivité de l'eau en irrigué devra être augmentée de 40% en 2025 afin de garantir la satisfaction de la demande alimentaire de 8 milliards de personnes (Lascano et Sojka, 2007). En effet, les ressources en eau doivent être utilisées avec une forte productivité de l'eau. Pour atteindre cet objectif, l'amélioration de la gestion de l'eau d'irrigation à la parcelle est considérée la voie la plus prometteuse. Plusieurs travaux de recherches ont été conduits afin d'acquérir de l'expérience en matière d'irrigation des cultures permettant l'amélioration de la productivité de l'eau. L'irrigation conventionnelle (basée sur les besoins d'évapotranspiration maximale des cultures) qui est utilisée par les agriculteurs dans les conditions de disponibilité en eau limitée ou non limitée, est considéré de nos jours, comme une utilisation de luxe de l'eau qui peut être réduit avec une réduction non significative du rendement (Kang et Zhang, 2004). Plusieurs techniques d'économie d'eau en irrigation ont été utilisées au cours des dernières années pour l'amélioration de la productivité de l'eau telles que : l'irrigation de complément et l'irrigation déficitaire. D'autres alternatives scientifiques ont été aussi mises en application, à savoir : l'intégration au sol des produits anti-transpirants pouvant réduire la consommation en eau d'irrigation (Mulch), la limitation des phénomènes des percolations et du ruissellement de l'eau par l'incorporation au sol des matériaux à forte rétention de l'eau « hydro-rétenteur », et ainsi que, l'utilisation des variétés tolérantes au stress hydrique. A l'égard de cette multitude de techniques précitées, certains chercheurs se sont orientés à la base des connaissances physiologiques à l'échelle de la plante de mettre au point une nouvelle technique d'irrigation par dessèchement partiel des racines « Partiel Rootzone Drying » (PRD). Cette technique d'irrigation PRD consiste à réduire à la moitié les apports d'eau d'irrigation par rapport à l'irrigation conventionnelle. Cette réduction est très dépendante de type de culture et y est généralement accompagnée d'une réduction non significative de rendement tout en augmentant ainsi la productivité de l'eau (Ahmadi et al., 2010 b). L'objectif de ce travail, se rapporte à une analyse des mécanismes théoriques et des aspects pratiques qui peuvent être issues de la technique d'irrigation PRD.

2. Profil d'humidification du système racinaire en fonction du mode d'irrigation :

L'objectif de l'irrigation conventionnelle consiste à satisfaire les besoins en eau des cultures suivant un régime d'évapotranspiration maximale afin de garantir le maximum du rendement. Ce mode d'irrigation consiste à humidifier le profil entier du système racinaire de la plante (Figure 1a). L'irrigation déficitaire (Figure 1b), permet d'augmenter la productivité de l'eau d'une culture donnée par restriction d'un volume d'eau d'irrigation ayant peu d'impact sur le rendement. La réduction de rendement résultante de cette conduite, peut être négligeable comparée aux économies d'eau réalisées. Pour réussir ladite technique, il est nécessaire de connaître les réponses à l'eau de la culture durant les différents stades du cycle végétatif (Kirda et Kanber., 1999). De même, il est indispensable de prendre en compte les caractéristiques édaphiques du sol. Dans les sols à texture légère les plantes peuvent subir rapidement une contrainte hydrique sous l'irrigation déficitaire, tandis que dans le cas des sols profonds à texture fine les plantes disposent d'un temps suffisant pour s'ajuster à l'état hydrique du sol. Par conséquent, le succès de l'irrigation déficitaire est plus probable dans les sols à texture fine. Plusieurs travaux ont montré une nette amélioration de la productivité de l'eau par l'irrigation déficitaire (Stegman et al., 1980; Musick et Dusck., 1980 ; Shock et al., 1993 ; Boland et al., 1993 b ; Intrigliolo et Castel ., 2005; Goldhamer et al., 2006). En Tunisie, Ben Nouna et al., (2005) et Zairi et al., (2003) ont montré que dans le cas d'une demande climatique faible et moyenne, l'irrigation déficitaire des cultures de tomate et de la pomme de terre est possible sans occasionner de fortes pertes de rendement. Dans le cas d'une demande climatique très forte, l'adoption de l'irrigation déficitaire est difficile. La solution optimale est la maximisation du rendement en réduisant la superficie cultivée. Radhouane et Mellouli (2007) ont montré que l'irrigation déficitaire de millet peut occuper une place de choix dans un contexte de ressources en eau limitées.



Dans cette optique, le nouveau mode d'irrigation déficitaire (Figure 1c) stimule par dessèchement partiel la moitié du système racinaire, des réactions physiologiques, biochimiques, et moléculaires qui sont associées au stress hydrique. L'exploitation de ces réactions, permet d'optimiser la croissance végétative en réalisant un équilibre de croissance entre la vigueur végétale et la partie productive de la plante. Cela conduit à une réduction significative de la croissance végétative et à une amélioration significative du rendement par unité d'eau d'irrigation appliquée (Davies et al., 2000).

3. Origine et principe de l'irrigation par dessèchement partiel des racines (PRD) :

Jusqu'à la fin des années soixante-dix, on pensait que la synthèse de l'ABA était déclenchée par l'abaissement du potentiel hydrique foliaire. Henson (1983) a montré que la biosynthèse d'ABA était trop lente pour expliquer la rapidité de la réponse de fermeture des stomates : de même, Raschke et Hedrich (1985) ont établie que la quantité d'ABA contenue dans les feuilles n'était pas toujours corrélée au degré d'ouverture des stomates. Zhang et al., (1987), utilisant un protocole expérimental où l'appareil racinaire est divisé en deux « split root system » démontre que, lors de la contrainte hydrique, la synthèse d'ABA se produit dans les racines qui jouent alors le rôle de capteurs de l'état hydrique du sol. En effet, le dispositif expérimental permet d'irriguer la moitié de l'appareil racinaire et l'autre moitié subissant la contrainte hydrique. Cet ABA racinaire est alors transporté par le flux d'eau transpiratoire jusqu'aux stomates où il agit. Ces résultats ont été confirmés par Gollan et al., (1992). Davies et Zhang., (1991) ont mis en évidence l'importance des concentrations en ABA dans la sève de l'xylème et le rôle que cette molécule en tant que vecteur des signaux racinaires en situation de stress hydrique. Ils permettent aux plantes de répondre aux changements de la résistance au flux d'eau. Dans le même sens, Tardieu et al., (1992) ont montré sur des plantes de maïs, que la teneur de la sève brute en ABA rend compte de la variabilité de la conductance stomatique, alors que cette même conductance s'est révélée mal reliée aux potentiels foliaires et de turgescence. L'ensemble de ces travaux ont permis de conclure que les signaux racinaires agissent directement sur la régulation du fonctionnement stomatique des feuilles.

De même, Schultz., (2003) a montré que la régulation de la conductance stomatique reste le mécanisme majeur intervenant à court terme pour limiter les pertes en eau et qui peut être proposée comme un seuil pour la gestion de la réponse de la plante au déficit hydrique.

En Tunisie, plusieurs travaux ont mis en évidence l'importance de la régulation de la conductance stomatique dans les mécanismes physiologiques d'adaptation, d'acclimatation et de tolérance à la sécheresse chez le Caroubier (Rejeb., 1989), chez le chêne liège (Ksontini., 1996) et chez l'Acacia Cyanophylla (Albouchi et al., 2001). A la base de l'ensemble de ces travaux de recherches cités, elle a été fondée, la nouvelle technique d'irrigation PRD qui y est en pleine évolution. Le dessèchement partiel des racines (PRD) est donc une nouvelle technique pour l'économie d'eau en irrigation, actuellement elle est étudiée dans beaucoup de pays. Elle consiste à irriguer une moitié de la zone de racinaire, et dessécher l'autre moitié suivant un niveau de déficit hydrique prédéterminé avant la prochaine irrigation

par alternance. Ce mode d'irrigation, permet l'induction d'un système de signalisation chimique à base de l'acide abscissique via l'xylème, pour régler la transpiration d'eau à travers les stomates et augmentant en fait la productivité de l'eau. En effet cette technique permet de créer un déficit hydrique contrôlé en terme d'espace (irriguer une partie des racines) et en terme de temps (alternance d'irrigation entre côté humide et côté sec) (Figure 2).

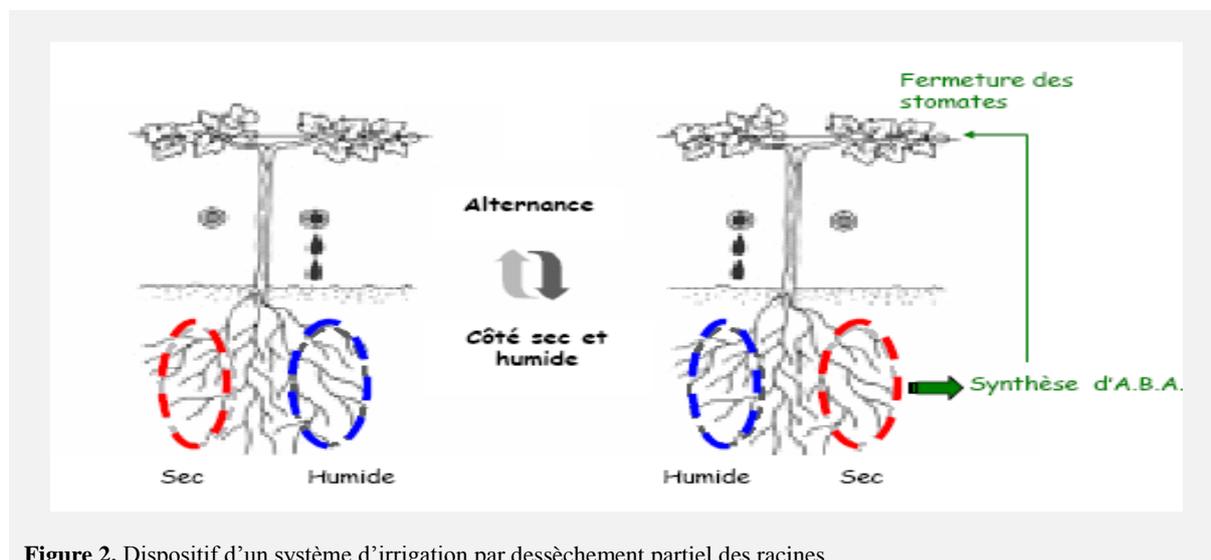


Figure 2. Dispositif d'un système d'irrigation par dessèchement partiel des racines

4. Aspects théoriques de l'irrigation PRD :

La figure 3 résume l'effet du stress hydrique sur les plantes au niveau physiologique, biochimique et moléculaire. Une culture soumise au régime d'irrigation PRD peut avoir diverses réponses au stress hydrique en termes des trois niveaux précités. Cela est en fonction de l'intensité et du moment de déclenchement du stress hydrique. Cependant cet article sera focalisé sur les effets du stress hydrique liés aux mécanismes physiologiques et morphologiques qui jouent un rôle important dans la régulation du développement reproductif des cultures qui est lié directement aux propriétés quantitatives et qualitatives du rendement (Liu et al., 2005 b).

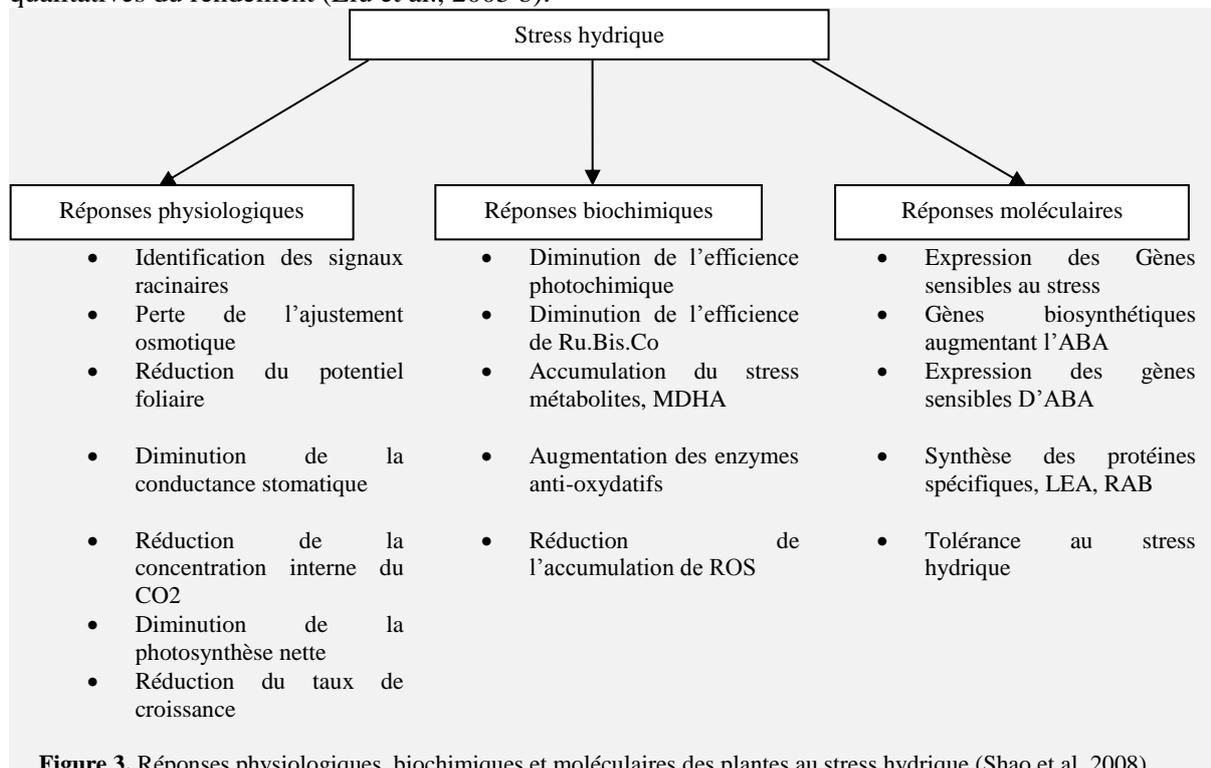


Figure 3. Réponses physiologiques, biochimiques et moléculaires des plantes au stress hydrique (Shao et al. 2008)

4.1. Régulation physiologique par signalisation chimique et hydraulique sous régime PRD :

Sous l'effet d'un stress hydrique modéré, la régulation du processus physiologique de la plante se fait principalement à partir de la signalisation chimique moyennant la synthèse de l'ABA au niveau des racines desséchées. Cela se fait toujours avant le changement de l'état hydrique de la plante qui permet le déclenchement de la régulation par signalisation hydraulique. Cependant, sous l'effet d'un stress hydrique sévère, les signalisations chimiques et hydrauliques sont impliquées ensemble dans la régulation du processus physiologique de la plante. (Ali et al., 1999 ; Liu et al., 2003). En fait, sous régime PRD, on assiste un état d'équilibre entre la régulation par signalisation chimique et celle par signalisation hydraulique. Dans le système PRD, les racines du côté irrigué absorbent assez d'eau permettant ainsi de maintenir un potentiel hydrique élevé alors que celles du côté non irrigué produisent de l'ABA qui permet à son tour une régulation de la conductance stomatique. Ce mécanisme optimise l'utilisation d'eau et augmentant ainsi sa productivité (Kang et al., 2000 b et Ahmadi et al., 2010 b).

4.2. Echange gazeux sous régime PRD :

Plusieurs études sous différentes conditions environnementales, ont montré que la conductance stomatique diminue en régime PRD. Cette diminution rend compte de la sensibilité de la culture au niveau du déficit hydrique. Cependant le taux de photosynthèse n'est pas significativement affecté chez l'irrigation PRD comparé à l'irrigation conventionnelle (Costa et al., 2007; Ahmadi, 2009; Ahmadi et al., 2010 a). Ces résultats corroborent avec ceux obtenus dans les cas : de la pomme de terre (Liu et al., 2008), du piment fort (Kang et al., 2001), du maïs (Du et al., 2010), de la Tomate (Campos et al., 2009), du pommier (Zegbe and Behboudian., 2008), et de vigne (De la Hera et al., 2007). Alors que d'autres études dans le cas de la pomme de terre (Liu et al., 2006 b) et du maïs (Kirda et al., 2005) ont montré que la photosynthèse est affectée significativement par l'irrigation PRD. En effet, le type du cultivar et les conditions environnementales affectent de manière significative les résultats de l'irrigation PRD (Zegbe et Behboudian., 2008).

4.3. Croissance, conductivité hydraulique des racines et dynamique d'absorption des éléments nutritifs sous régime PRD :

Le développement et la distribution des racines sont affectées par la répartition spatiale et temporelle de l'eau dans le sol (Wang et al., 2006). Des études ont indiqué que l'irrigation PRD a favorisé l'émission des racines secondaires (Kang et al., 2000 b), a augmenté le taux de croissance des racines (Dry et al., 2000) et la masse des racines (Kang et al., 2000 a; Mingo et al., 2004), a amélioré la conductivité hydraulique des racines (Taiz and Zeiger., 2006; Thompson et al., 2007) et a augmenté ainsi l'absorption des éléments nutritifs (Wang et al., 2009). Kang et al., (2003 b) ont conduit un protocole expérimental où ils ont prévu trois traitements d'irrigation sur des arbres de poirier. Un traitement témoin TIRR conduit en irrigation conventionnelle, un traitement APRD conduit en irrigation avec alternance entre deux côtés (gauche et droit) du système racinaire de l'arbre, et un traitement FPRD conduit en irrigation fixée sur un seul côté du système racinaire de l'arbre. Les résultats de ce protocole, ont montré dans le cas des traitements APRD et FPRD que la capacité d'absorption d'eau du côté ré-humidifié du système racinaire du poirier était plus importante que celle du côté desséché, et dépassant ainsi celle de deux côtés humides du traitement TIRR (Tableau1). En fait, l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau du côté ré-humidifié du système racinaire, compense celle du côté desséché du même système racinaire. Ce résultat, est confirmé, par des valeurs importantes de flux de sève mesurées dans le côté ré-humidifié du système racinaire des traitements APRD et FPRD par rapport a celles mesurées dans les deux côtés humide du système racinaire du traitement TIRR. A partir de ces mesures, Kang et al., (2003b) ont mis en évidence, que le flux de sève du tronc par unité d'évapotranspiration de référence est bien corrélé avec la teneur en eau moyenne du sol dans la zone racinaire (Figure 4). Cette corrélation montre que pour la même valeur de la teneur en eau du sol de la zone racinaire, les arbres des traitements APRD et FPRD ont véhiculé un flux de sève du tronc plus important que celui dans le cas du traitement témoin TIRR. Cela indique que la conductivité hydraulique des racines des traitements APRD et FPRD a été nettement améliorée par rapport à celle des racines du témoin TIRR. L'amélioration de la conductivité hydraulique peut être expliquée par l'émission des nouvelles racines secondaires qui remplacent les vieilles racines (Kang and Zhang, 2004). D'autres études ont prouvé une absorption plus élevée des éléments nutritifs dans le cas de l'irrigation PRD comparée à celle observée dans le cas de l'irrigation conventionnelle (Kirda et al., 2005; Li et al., 2007; Shahnazari et al., 2008; Wang et al., 2009). Cela est

expliqué par la forme des nouvelles racines grâce à l'irrigation PRD qui ont permis une haute récupération de l'eau à partir du sol et présentant ainsi une haute disponibilité en eau (Kang and Zhang., 2004). Wang et al., (2012 b) ont montré que l'irrigation PRD a permis une accumulation d'azote significativement plus grande dans les feuilles de maïs comparée à celle accumulée dans le cas de l'irrigation conventionnelle. Dans la même étude il a été prouvé que l'irrigation PRD a favorisé l'augmentation de la disponibilité d'azote au niveau du sol. Des travaux de recherches réalisés par Nobel et North., (1993), ont permis aussi de montrer que l'irrigation déficitaire par son exposition prolongée des racines au stress hydrique par rapport à celles au niveau de l'irrigation PRD, peut provoquer des changements importants au niveau de l'anatomie des tissus végétaux tels que l'affectation de l'épiderme, la destruction du cortex et même la perte des racines secondaires.

Tableau 1. Flux d'eau des racines et du tronc d'arbres de poirier conduits sous trois modes d'irrigation (d'après Kang et al, 2002b)

Traitement	Jours après le début du protocole	Irrigation (mm)		Flux de sève dans les racines (l/jour)		Flux de sève du tronc	
		Côté gauche	Côté droit	Côté gauche	Côté droit	l/jour	mm/jour
TIRR	0-26	55,1a	55,1a	6,18a	5,82a	65,57	3,65
	27-35	96,8	96,8	6,60a	6,33a	67,48	3,76
	36-66	98,6	98,6	6,81a	7,05a	92,93	5,17
	67-89	78,4	78,4	7,14a	6,93a	100,65	5,60
APRD	0-89	273,8a	273,8a	6,69a	6,59a	92,11	5,12
	0-26	55,1a	55,1a	6,33a	6,18a	61,48	3,42
	27-35	0	105,9	3,72b	7,08a	53,07* ¹	2,96* ¹
	36-66	106,1	0	7,32a	4,41b	80,02* ¹	4,46* ¹
FPRD	67-89	0	96,3	5,52b	8,73a	98,41* ¹	5,48* ¹
	0-89	106,6b	206,2b	6,06a	6,24a	76,63* ¹	4,26* ¹
	0-26	55,1a	55,1a	5,97a	5,82a	60,81	3,39
	27-35	100,4	0	7,47a	3,81b	53,97*	3,01*
FPRD	36-66	99,3	0	8,70a	4,17b	74,81*	4,17*
	67-89	96,7	0	8,28a	4,92b	84,91*	4,73*
	0-89	296,4b	0b	7,67a	4,81b	71,22*	3,96*

Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes

* Statistiquement significatif au seuil de 0.05 (APRD et FPRD comparés au témoin)

¹ Statistiquement significatif au seuil de 0.05 (APRD comparé au FPRD)

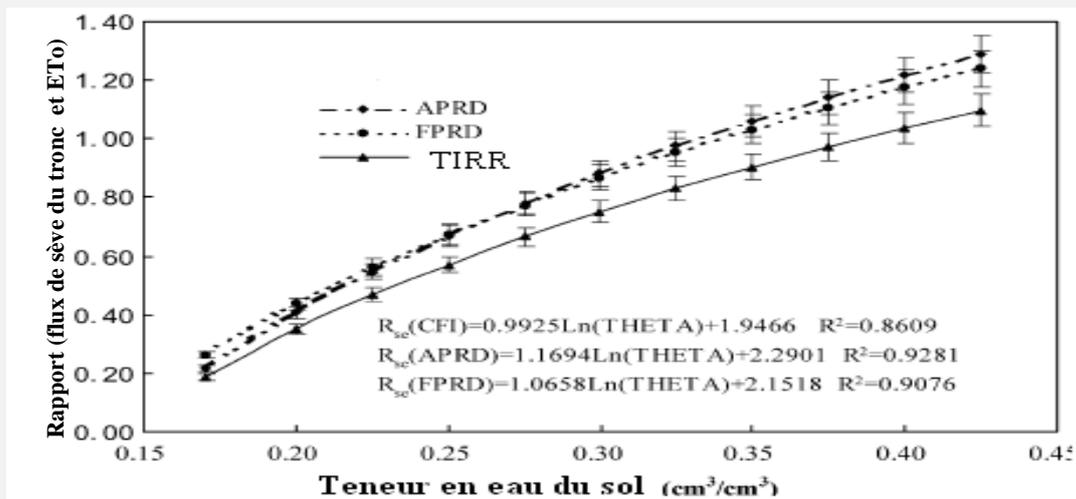


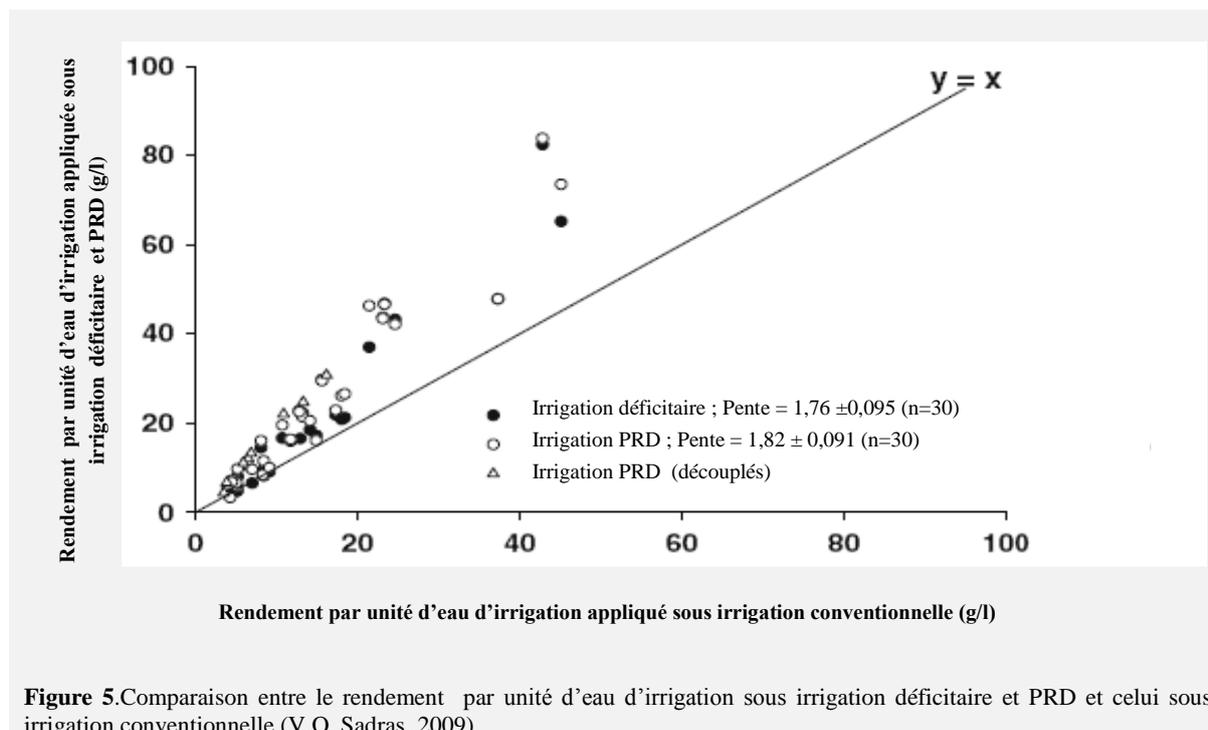
Figure 4. Corrélation entre le flux de sève du tronc par unité d'ETo et la teneur en eau moyenne du sol dans la zone racinaire (d'après Kang et al, 2002b)

5. Aspect pratique de l'irrigation PRD dans l'amélioration de la productivité de l'eau :

Dans cet article, la productivité de l'eau (PE) est définie comme étant le rendement de culture rapporté à l'unité d'eau d'irrigation appliquée (Zhang, 2003). La réduction de la surface foliaire et la fermeture partielle des stomates sont les principales réponses physiologiques des plantes sous régime PRD

permettant la diminution de la transpiration et augmentant donc la productivité de l'eau (Davies et al., 2002).

Plusieurs travaux de recherches ont prouvé une augmentation considérable de la productivité de l'eau sous différents types de cultures (e.g., Sepaskhah and Kamgar-Haghighi, 1997; Davies et al., 2002; Zegbe et al., 2004; Shani-Dashtgol et al., 2006; Fereres and Sariano, 2007; Geerts et Raes, 2009; Ahmadi et al., 2010 b). Récemment dans une méta-analyse réalisée par Sadras (2009), il a été confirmé que l'utilisation de l'irrigation PRD et l'irrigation déficitaire ont permis respectivement une augmentation de la productivité de 82 % et de 76 % comparé à l'irrigation conventionnelle avec une réduction non significative du rendement (figure 5).



Cependant d'autres études ont confirmé que l'irrigation PRD était moins performante en termes d'efficacité d'utilisation en eau que l'irrigation déficitaire (Liu et al., 2006 b; Wakrim et al., 2005 et Kirda et al., 2005). En effet, plusieurs résultats expérimentaux ont prouvé que la technique PRD a permis d'améliorer la productivité de l'eau à la parcelle de 43 à 200 % avec une réduction non significative de rendement. Dans certains cas, on a noté en plus de l'avantage d'économie d'eau d'irrigation, une amélioration de la qualité des fruits (Kirda et al., 2004; Leib et al., 2006; Shahnazari et al., 2007; Guang-Cheng et al., 2008). La majorité des travaux de recherches s'intéressant à l'étude du PRD a été achevée durant la dernière décennie, cependant le développement pratique de la technique PRD se poursuit toujours notamment pour les cultures horticoles (Morison et al., 2008; Ahmadi, 2009). La littérature relative aux études expérimentales de la technique PRD est exhaustive. Néanmoins, nous essayons dans ce paragraphe de présenter une synthèse des études expérimentales réalisées sur la technique PRD et relative à un large gramme de cultures.

5.1. Cas du Blé dur :

La littérature scientifique est très pauvre en travaux de recherches relatifs à l'utilisation de l'irrigation PRD dans le cas du blé dur. De ce fait nous allons citer des résultats expérimentaux relatifs à deux études expérimentales. La première étude a été réalisée par (Sepaskhah et Hosseini, 2008 a) sur le blé d'hiver conduit en irrigation du complément dans une région semi-aride caractérisée par une pluviométrie annuelle de 409 mm. Le travail a eu comme objectif l'effet de l'irrigation de surface par alternance et celle conventionnelle sur le rendement du Blé. Les résultats de cette expérimentation ont montré une réduction des apports d'eau d'irrigation de 41 % avec une diminution non significative du rendement. Autrement dit l'irrigation PRD a amélioré la productivité d'eau à la parcelle du blé de l'ordre de 66 %. Le deuxième travail de recherche effectué en Chine par (Yang et al., 2011) a concerné l'étude de

l'efficacité d'utilisation de l'eau par une culture du blé dur dans un assolement biennal blé/maïs sous trois régimes d'irrigation PRD (30, 40 et 50 % de l'ETM) durant trois années (2006- 2008). Les résultats ont montré une amélioration significative de la productivité de l'eau de 12 à 71,4 %. En fait l'étude a suggéré l'utilisation de l'irrigation PRD comme une méthode très ambitieuse d'économie d'eau dans un contexte d'assolement biennal blé/ maïs et dans des régions arides de la Chine.

5.2. Cas du Maïs :

Kang et al. (2000 a) and Kang et al. (2000 b) ont étudié l'effet de l'irrigation PRD sur la productivité de l'eau d'irrigation dans le cas d'une parcelle de Maïs située dans une région semi-aride de Chine. L'irrigation a été appliquée en adoptant un système d'irrigation de surface. Dans cette étude, le protocole expérimental a été formé par trois modes d'irrigation : irrigation conventionnelle, irrigation fixée sur un seul côté et une irrigation par alternance. Chaque mode d'irrigation est subdivisé en trois traitements différenciés par la dose d'irrigation appliquée (22.5, 30 et 45 mm). Les résultats expérimentaux de ce travail, ont montré que les traitements conduits en mode d'irrigation par alternance ont conservé les rendements du Maïs en grains les plus élevés avec une réduction de 50 % des apports d'irrigation. En fait, on note dans le cas de cette étude que la productivité de l'eau dans la parcelle de Maïs a été doublée sous régime PRD. Un autre travail a été réalisé par Sepaskhah and Parand (2006) concernant l'effet de l'irrigation PRD sur les stades phénologiques du Maïs. Les résultats de ce travail ont indiqué que l'application de l'irrigation PRD durant les stades d'émission de la panicule et du remplissage des grains a permis un épargne d'eau d'irrigation de 30 % avec une réduction non significative du rendement par rapport au témoin.

5.3. Cas du Sorgho à grains :

Dans ce cas de culture, une étude expérimentale a été conduite par (Sepaskhah et Ghasemi, 2008 b) avec un système d'irrigation de surface adoptant la technique PRD et ce dans une région semi-aride d'Iran. Cette étude a prévu un traitement conduit en irrigation conventionnelle et trois traitements conduits en irrigation PRD avec 3 différents intervalles d'alternance (10, 15 et 20 jours). Les résultats de l'étude ont prouvé que seul le traitement d'irrigation PRD conduit avec un intervalle d'alternance de 10 jours a permis de réduire de 11 % les apports d'eau d'irrigation sans chute du rendement.

5.4. Cas de la Pomme de terre de saison :

Liu et al., (2006 b) ont étudié l'effet de l'irrigation PRD sur le rendement et la productivité de la pomme de terre de saison et ce durant le stade de tubérisation. Les résultats ont indiqué que l'irrigation PRD a conduit à une réduction significative du rendement comparé au témoin et ce avec 37% d'eau d'irrigation en moins. Une étude a été entreprise par Shahnazari et al., (2007) avait pour objectif l'étude de l'effet de l'irrigation PRD sur la qualité du rendement et la productivité de l'eau chez la pomme de terre de saison. Les résultats de cette étude ont indiqué une amélioration de 20 % du rendement en tubercules à calibre commercialisable (taille 40 à 50 mm) comparée au témoin. Il a été conclu dans le cadre de cette étude, que l'irrigation PRD a épargné 30 % d'eau irrigation et a amélioré la productivité de l'eau chez la pomme de terre de saison de l'ordre de 60 %. Des résultats semblables obtenus sur la pomme de terre et rapportés par Jovanovic et al, (2010) ont montré que l'irrigation PRD a conduit en deux années successives à une économie d'eau d'irrigation de l'ordre de 33 et 42 % comparé au témoin. Ahmadi et al, (2010 b) ont étudié l'effet de l'irrigation PRD sur la pomme de terre de saison et ce en fonction de la texture du sol. Les résultats de cette étude ont montré une interaction significative entre l'effet de l'irrigation PRD et la texture du sol. Il a été démontré à travers cette étude que l'irrigation PRD a permis une augmentation significative de la productivité de l'eau chez la pomme de terre de saison de l'ordre de 11 % pour un sol sableux et de 36 % pour un sol limoneux-sableux. Ben Nouna et al., (2014) ont prouvé aussi, que le rendement de la pomme de terre de saison a été maintenu par rapport au témoin et ce dans le cas d'une d'irrigation PRD basée sur un régime hydrique correspondant à 50% de l'évapotranspiration maximale.

6. Inconvénients de l'irrigation PRD

L'application de l'irrigation PRD avec un seuil de dessèchement du sol et une fréquence d'alternance d'irrigation incompatibles avec le type du sol et de culture et de son stade végétatif, peut avoir un effet de réduction significatif sur la production de biomasse suite à l'affectation de la composante non

stomatique responsable à la fixation du CO₂. Des travaux de recherches réalisées par McKeering., (2004) montrent l'inadaptation de l'irrigation PRD avec des sols présentant des fonds de retraits. L'économie de l'eau réalisée par l'irrigation PRD devra être équilibrée avec la valeur économique des réductions de rendement et du coût de mise en application de ladite technique par rapport aux systèmes d'irrigation conventionnels.

7. Conclusions et perspectives

La synthèse des résultats des travaux de recherches cités dans cet article, nous a permis d'une part, d'élargir les connaissances sur les aspects théoriques de l'irrigation PRD à savoir ses réponses physiologiques et agronomiques sous une gamme de cultures conduites sous ce régime. Cette synthèse, nous a permis d'autre part, de mesurer l'importance de l'aspect pratique de l'irrigation PRD qui se traduit par une nette amélioration de la productivité de l'eau pour différentes cultures. En effet, la nouvelle Technique d'irrigation PRD, a été généralement adoptée courant la dernière décennie sous une large gamme de cultures permettant ainsi une augmentation pertinente de la productivité de l'eau avec une réduction non significative du rendement.

Globalement, les travaux de recherches discutés dans ce papier, ont considéré que la technique d'irrigation PRD pourra constituer une solution viable en conditions de disponibilité en eau limitées dans les régions agricoles arides et semi-arides. Cependant plus de travail est nécessaire, particulièrement si nous devons réussir l'application de la technique d'irrigation PRD dans des conditions assez différentes du sol, du climat et de variétés des cultures caractérisées par un mécanisme hormonal de réponse considérablement différent des cas étudiés. Beaucoup des questions attendent des réponses tels que :

- Quelle fréquence d'alternance d'irrigation peut-on considérer entre le côté humide et celui desséché pour réussir la technique PRD?
- Quel stade phénologique peut-on considérer pour une application judicieuse de l'irrigation PRD ?
- L'irrigation PRD conserve t'elle ses avantages pour des conditions assez différentes du sol, du climat et de variétés des cultures ?

8. References bibliographiques:

- Ahmadi, S.H (2009)** Agronomic and physiological studies of partial root-zone drying and deficit irrigation on potato in different soil textures. Published Ph.D. Thesis, Department of Basic Sciences and Environment, Faculty of Life Sciences University of Copenhagen, Denmark, 77p.
- Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, R.T., Jensen, C.R., Sepaskhah, A.R., Hansen, S (2010 a)** Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agri. Water Management*, 97: 1486-1494. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.05.002
- Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, R.T., Jensen, C.R., Sepaskhah, A.R., Hansen, S (2010 b)** Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agri. Water Management*. DOI:10.1016/j.agwat.2010.07.007.
- Albouchi A., Sebeïb H., Meznic Majid Y. and Hédi El Aounid M (2001)** Influence de la durée d'acclimatation sur l'endurcissement à la sécheresse d'*Acacia cyanophylla* Lindl. *Ann. For. Sci.* 58: 519–528. DOI: 10.1051/forest:2001142
- Ali, M., Jensen, C.R., Mogensen, V.O., Andersen, M.N., Henson, I.E (1999)** Root signaling and osmotic adjustment during intermittent soil drying sustain grain yield of field grown wheat. *Field Crops Research*, 62: 35-52. DOI:10.1016/S0378-4290(99)00003-9
- Ben Nouna B., Zairi A., Ruelle P., Slatni A., Yacoubi S., Ajmi T et Oueslati T (2005)** Evaluation de la demande en eau et pilotage de l'irrigation déficitaire des cultures annuelles : Exemple de méthodologie et outils de mesure utilisables. Actes du Séminaire «Modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb ». Rabat du 19-23 Avril 2004 pp.
- Ben Nouna B., Ben Ammar H., Hanafi S. Elamami H., Faidi Sana et Ghribi R (2014)** Effet de la technique d'irrigation par assèchement partiel de la zone racinaire sur la productivité de la pomme de terre de saison. Actes du séminaire international " Gestion durable des ressources en eau et en sols : Situation, Défis et Perspectives. 19-20 novembre 2013 Hammamet. *Annales de l'INRGREF*, Numéro spécial (19, 2014).
- Boland, A.-M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H. & Goodwin, I (1993 b)** the effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science*. 68: 261-274. DOI:10.1080/00221589.1993.11516351
- Campos, H., Trejo, C., Pena Valdivia, B.C., Ramirez-Ayala, C., Sanchez-Garcia, P (2009)** Effect of partial root zone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 120: 493-499 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2008.12.014>.

- Costa, J.M., Ortuno, M.F., Chaves, M.M (2007)** Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Jour. of Integrative Plant Biology*, 49: 1421-1434. DOI: 10.1111/j.1672-9072.2007.00556.x
- Davies, W.J and Zhang J (1991)** Root signals and regulation of growth and development of plants in drying soil *Annue Reve Plant Physiole Plant Mole Biolo*, 42, 55-76. DOI: 10.1146/annurev.pp.42.060191.000415.
- Davies WJ, Bacon MA, Thompson DS, Sobeih W, Rodriguez LG (2000)** Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water in agriculture. *Journal of Experimental Botany* 51: 1617-1626. DOI: 10.1093/jexbot/51.352.1949
- Davies, W.J., Wilkinson, S., Loveys, B.R (2002)** Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New phytologist*, 153: 449-460. DOI: 10.1046/j.0028-646X.2001.00345.x
- De la Hera M.L., P. Romero, E. Gomez-Plaza, A. Martinez (2007)** Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agric. Water Manage.* 87: 261–274.
- Dry, P.R., Loveys, B.R., During, H (2000)** Partial drying of the root zone of grape. II. Changes in the pattern of root development. *Vitis*, 39: 9-12.
- Du, T., Kang, S., Sun, J., Zhang, X., Zhang, J (2010)**. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China. *Agri. Water Management*, 97: 66-74. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.08.011.
- Fereres, E., Soriano, M.A (2007)** Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Jour. of Experimental Botany*, 58: 147-159. DOI: 10.1093/jxb/erl165.
- Geerts, S and Raes, D (2009)** Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agri. Water Management*, 96: 1275-1284. DOI:10.1016/j.agwat.2009.04.009.
- Goldhamer, D.A., Viveros, M. and Salinas, M (2006)** Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. *Irrigation Science* 24:101-114. DOI 10.1007/s00271-005-0014-8.
- Gollan T, Schurr U, Schulze ED. (1992)** Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. I. The concentration of cations, anions, amino acids in, and pH of, the xylem sap. *Plant, Cell and Environment* 15, 551–559. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb01488.x
- Guang-Cheng, S., Zhan-Yua, Z., Nac, L., Shuang-Ena, Y., Weng-Ganga, X (2008)** Comparative effects of deficit irrigation (DI) and partial root zone drying (PRD) on soil water distribution, water use, growth and yield in greenhouse grown hot pepper. *Scientia Horti.* 119: 11-16. DOI:10.1016/j.scienta.2008.07.001
- Henson, I.E. (1983)** Effects of light on water stress-induced accumulation of abscisic acid in leaves and seedling shoots of pearl millet (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke). *Z. Pflanzenphysiol.*, 112: 257-68
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel (2005)** Effects of regulated deficit irrigation on growth and yield of young Japanese plum trees. *J. Hort. Sci. Biotech.* 80:177-182.
- Jovanovic, Z., Stikic, R., Vucelic-Radovic, B., Paukovic, M., Brocic, Z., Matovic, G., Rovcanin, S., Mojevic, M (2010)**. Partial root-zone drying increases WUE, N and antioxidant content in field potatoes. *European Journal of Agronomy* 33,124–131. DOI:10.1016/j.eja.2010.04.003.
- Kang, S.Z., Liang, Z.S., Pan, Y.H., Shi, P.Z., Zhang, J.H (2000 a)** Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. *Agri. Water Management*, 45: 267-274. DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00072-X
- Kang, S.Z., Shi, P., Pan, Y.H., Liang, Z.S., Hu, X.T., Zhang, J (2000 b)** Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig. Science*, 19: 181-190. DOI:10.1007/s002710000019.
- Kang, S., Zhang, L., Hu, X., Li, Z., Jerie, P (2001)**. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Scientia Horti.*, 89: 257-267. DOI: 10.1016/S0304-4238(00)00245-4.
- Kang, S., Hu, X., Jerie, P. and Zhang, J (2003 b)** The effects of partial root zone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (*Pyrus communis* L.) orchard. *Journal of Hydrology* 280:192-206.
- Kang, S.Z., Zhang, J.H (2004)**. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Jour. of Experimental Botany*, 55: 2437-2446. DOI: 10.1093/jxb/erh249
- Kirda, C. & Kanber, R (1999)** Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. In: C. Kirda, P. Moutonnet, C. Hera & D.R. Nielsen, eds. *Crop yield response to deficit irrigation*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M.R., Ozguven, A.I (2004)** Yield response of greenhouse grown tomato to partial root-zone drying and conventional deficit irrigation. *Agri. Water Management*, 69: 191-201. DOI:10.1016/j.agwat.2004.04.008

- Kirda, C., Topcu, S., Kaman, H., Ulger, A.C., Yazici, A., Cetin, M., Derici, M.R (2005)** Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research*, 93: 132-141. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.09.015
- Ksontini M (1996)** Etude éco physiologique des réponses à la contrainte hydrique du chêne-liège (*Quercus suber* L.), dans le Nord - Tunisie : comparaison avec le chêne kermès (*Q. coccifera*) et le chêne zen (*Q. faginea*). Thèse université Paris XII, 159 p.
- Lascano, R.J., Sojka, R.E (2007)** Preface. In: *Irrigation of agricultural crops* (Lascano, R.J., and Sojka, R.E. eds.), 2nd edition, Agronomy Monograph no. 30. ASA-CSSA-SSSA publishing, 664 p.
- Leib, B.G., Caspari, H.W., Redulla, C.A., Andrews, P.K., Jabro, J (2006)** Partial root zone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrigation Science*, 24: 85-99. DOI : 10.1007/s00271-005-0013-9.
- Li, F., Liang, J., Kang, Sh., Zhang, J (2007)** Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize. *Plant and Soil*, 295: 279-291. DOI: 10.1007/s11104-007-9283-8.
- Liu, F., Jensen, C.R., Andersen, M.N (2003)** Hydraulic and chemical signals in the control of leaf expansion and stomatal conductance in soybean exposed to drought stress. *Functional Plant Biology*, 30: 65-73. DOI: 10.1071/FP02170
- Liu, F., Jensen, C.R., Andersen, M.N (2005 b)** A review of drought adaptation in crop plants: changes in vegetative and reproductive physiology induced by ABA-based chemical signals. *Australian Jour. of Agri. Research*, 56: 1245-1252. <http://dx.doi.org/10.1071/AR05062>.
- Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R (2006 a)** Physiological response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 57: 3727–3735. DOI: 10.1093/jxb/erl131
- Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R (2006 b)** Effects of deficit irrigation (DI) and partial root zone drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato. *Scientia Horticulture*, 109:113–117. DOI:10.1016/j.scienta.2006.04.004
- Liu, F., Song, R., Zhang, X., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Plauborg, F., Jacobsen, S.E. Jensen, C.R (2008)** Measurement and modeling of ABA signaling in potato (*Solanum tuberosum* L.) during partial root-zone drying. *Environ. and Experimental Botany*, 63: 385-391. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2007.11.015
- McKeering L.M. (2004)** Evaluating the Potential to Impose Partial Root Zone Drying (PRD) on Clay Soils in Commercial Cotton Production Systems.
- Mingo, D.M., Theobald, J., Bacon, M.A., Davies, W.J., Dodd, I.C (2004)** Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial root zone drying: enhancement of root growth. *Functional Plant Biology*, 31: 971-978. <http://dx.doi.org/10.1071/FP04020>.
- Morison, J.I.L., Baker, N.R., Mullineaux, P.M., Davies, W.J (2008)** Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society (London) B*, 363: 639-658. DOI: 10.1098/rstb.2007.2175
- Musick, J.I. & Dusch, D.A. (1980)** Planting date and water deficit effects on development and yield of irrigated winter wheat. *Agronomy Journal*, 72: 45-52. DOI:10.2134/agronj1980.00021962007200010010x.
- Nobel PS, North GB. (1993)** Rectifier-like behaviour of root-soil system: new insights from desert succulents. In: Smith JAC, Griffiths H, eds. *Water deficit: plant response from cell to community*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Limited, 163-76.
- Radhouane L. et Mellouli H.J (2007)** Effets d'un stress hydrique sur les rendements de deux écotypes locaux de mil (*Pennisetum glaucum* L. R. Br.). *Cahiers Agricultures* vol. 16, n° 1, janvier-février 2007.
- Raschke, K. and R. Hedrich (1985)** Simultaneous and independent effects of abscisic acid on stomata and the photosynthetic apparatus in whole leaves. *Planta* 163:105-118.
- Rejeb M.N (1989)**. Mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse du caroubier. *Rev. Réseau Amélior. Prod. Agric. Milieu Aride*, 1, 47-55.
- Sadras, V.O (2009)** Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta analysis. *Irrigation Science*, 27: 183-190. DOI: 10.1007/s00271-008-0141-0.
- Sepaskhah, A.R., Kamgar-Haghighi, A.A (1997)** Water use and yields of sugar beet grown under every-otherfurrow irrigation with different irrigation intervals. *Agri. Water Management*, 34: 71-79. DOI: 10.1016/S0378-3774(96)01290-5.
- Sepaskhah, A.R., Parand, A.R. (2006)** Effects of alternate furrow irrigation with supplemental every-furrow irrigation at different growth stages on the yield of maize (*Zea mays*L.). *Plant production Science*, 9: 415-421. <http://doi.org/10.1626/pps.9.415>.
- Sepaskhah, A.R., Hosseini, S.N (2008 a)** Effects of alternate furrow irrigation and nitrogen application rates on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, water- and nitrogen-use efficiencies. *Plant Production Science*, 11: 250-259. DOI: 10.1626/pps.11.250.
- Sepaskhah, A.R., Ghasemi, M.M (2008 b)** Every-other furrow irrigation with different irrigation intervals for sorghum. *Pakistan Journal of Biological Science*, 11: 9. 1234-1239. DOI: 10.3923/pjbs.2008.1234.1239.

- Schultz HR (2003)** Differences in hydraulic architecture account for near isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. varieties during drought. *Plant, Cell & Environment* 26, 1393–1405. DOI:10.1046/j.1365-3040.2003.01064.x
- Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R (2007)** Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100: 117-124. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.05.010
- Shahnazari, A., Ahmadi, S.H., Lærke, P.E., Liu, F., Plauborg, F., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R., Andersen, M.N (2008)** Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root-zone drying irrigation strategies in potatoes. *Europ. Jour. of Agro.* 28: 65-73. DOI:10.1016/j.eja.2007.05.003
- Shani-Dashtgol, A., Jaafari, S., Abbasi, N., Malaki, A (2006)** Effects of alternate furrow irrigation (PRD) on yield quantity and quality of sugarcane in southern farm in Ahvaz. *Proceeding of national conference on Irrigation and Drainage Networks Management. Shahid Chamran University of Ahvaz.* 2-4 May, Pp: 565-572. [In Farsi].
- Shock, C.C., Holmes, Z.A., Stieber, T.D., Eldredge, E.P. & Zhang P (1993)** The effect of timed water stress on quality, total solids and reducing sugar content of potatoes. *American Potato Journal* 70: 227-241. DOI: 10.1007/BF02849311.
- Stegman, E.C., Musick, J.T. & Stewart, J.I (1980)** Irrigation water management. In: M.E. Jensen ed. *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, Michigan, United States of America, ASAE.
- Taiz L. and Zeiger E. (2006)** Stress physiology in Taiz L. and Zeiger E (Eds.), *Plant Physiology*. Sinauer associates, Inc., Sunderland, MA. pp.671-681
- Tardieu F, Zhang J, Katerji N, Bethenod O, Palmer S, Davies WJ (1992)** Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Plant Cell Environ* 15: 193-197. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb01473.x
- Thompson AJ, Andrews J, Mullholl and BJ (2007)** Overproduction of abscisic acid in tomato increases transpiration efficiency and root hydraulic conductivity and influences leaf expansion. *Plant Physiology* 143:1905-1917.
- Wakrim, R., Wahbi, S., Tahi, H., Aganchich, B., Serraj, R (2005)** Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agri., Ecosystems & Environment*, 106: 275-287. DOI: 10.1016/j.agee.2004.10.019.
- Wang, F.X., Kang, Y., Liu, S.P (2006)** Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. *Agri. Water Management*, 79: 248-264. DOI:10.1016/j.agwat.2005.02.016.
- Wang, H., Liu, F., Andersen, M.N., Jensen, C.R (2009)** Comparative effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen uptake in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Irrigation Science*, 27: 443-448. DOI: 10.1007/s00271-009-0159-y.
- Wang Z, Liu F, Kang S, Jensen CR (2012b)** Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen nutrition in maize (*Zea mays* L.) leaves. *Environ Exp Bot* 75:36–40. DOI:10/1016/j. envexpbot. 2011. 08. 015.
- Wang, Y., Liu, F., Jensen, L.S., de Neergaard, A., Jensen, C.R (2013)** Alternate partial root-zone irrigation improves fertilizer-N use efficiency in tomatoes. *Irrigation Science* 31, 589–598. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0335-3>.
- Yang CH, Huang GB, Chai Q, Luo ZX (2011)** Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of northwest China. *Field Crops Research* 124: 426-432. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.07.013.
- Zairi, A., El Amami, H., Slatni, A., Pereira, L.S., Rodriguez, P.N., Machado, T. (2003)** Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. In: G. Rossi, A. Cancelliere, L.S. Pereira, T. Oweis, M. Shatanawi, A. Zairi (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-201.
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., Clothier, B.E (2004)** Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes. *Agri. Water Management*, 68: 195-206. DOI:10.1016/j.agwat.2004.04.002.
- Zegbe, J.A., Behboudian, M.H (2008)** Plant water status, CO₂ assimilation, yield, and fruit quality of 'Pacific RoseTM' apple under partial root zone drying. *Advances in Horti. Sci.*, 22: 27-32.
- Zhang J, Schurr U, Davies WJ (1987)** Control of stomatal behavior by abscisic acid which apparently originates in the roots. *Journal of Experimental Botany* 38, 1174–1181. DOI: 10.1093/jxb/38.7.1174
- Zhang, H (2003)** Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria, the north China Plain and Oregon, USA. In: *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* (Kijne, J.W., Barker, R., and Molden, D. eds). CABI publishing, 332p.