



EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'EAU DE LA CULTURE DE BLE DUR EN CONDITIONS PLUVIALES ET IRRIGUEES EN TUNISIE

EFFICIENCY OF WATER USE OF THE CULTURE OF THE DURUM WHEAT IN IRRIGATED AND RAINFED CONDITIONS IN TUNISIA

BHOURI KHILA S.¹, DOUH B.¹, MGUIDICHE A.², BOUJELBEN A.¹

¹. Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem. Université de Sousse. Département du génie des systèmes horticoles et du milieu naturel. BP 47, 4042, Chott Meriem, Sousse, Tunisie.

². Centre régional des recherches en grandes cultures. BP 350, 9000, Béja Tunisie.

RESUME

Dans la plupart des pays méditerranéens et ceux d'Afrique du nord, face à la vulnérabilité des ressources en eau disponibles pour l'irrigation et le besoin d'augmenter la production agricole, il est essentiel de se focaliser sur l'efficacité d'utilisation de l'eau des cultures stratégiques. Le présent travail est une synthèse bibliographique visant à étudier la variabilité de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur cultivé en conditions semi-arides, en relation avec le régime hydrique appliqué. En conditions pluviales, l'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau chez le blé dur en Tunisie a été comparée aux valeurs moyennes indiquées par des études réalisées dans des conditions climatiques similaires. En conditions irriguées, l'efficacité d'utilisation de l'eau, étudiée en se référant aux résultats d'essais *expérimentaux menés sur la culture de blé dur en climat semi-aride*, a été analysée par rapport à la consommation en eau de la culture et par rapport aux apports d'eau (irrigation). L'étude met en évidence les effets des contraintes d'ordre hydrique sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur ainsi que les marges de progrès possibles en conditions pluviales et irriguées.

Mots-clés : efficacité d'utilisation de l'eau, blé dur, ressources en eau, rendement, climat

ABSTRACT

In for most Mediterranean and North African countries, given the scarcity of water resources allocated for irrigation and the need to increase agricultural production due to a still growing population, it is important to focus on water use efficiency of strategic crops. This work is a literature review aiming to study water use efficiency of durum wheat grown in semi-arid conditions in Tunisia in relation with the applied water regime. In rainfed conditions, water use efficiency for durum wheat in Tunisia was compared to the mean values indicated by studies conducted under similar climatic conditions. In irrigated conditions, water use efficiency, studied with reference to results of experiments on durum wheat carried out under semi arid conditions, was analyzed in relation to crop water consumption and to water supply (irrigation). The study highlights the effects of water stress on the productivity of durum wheat crop as well as possible margins of progress in terms of efficiency of water use in rainfed and irrigated conditions.

Keywords: water use efficiency, Durum wheat, water resources, yield, climate

INTRODUCTION

Dans les zones à climat aride et semi-aride, le manque d'eau est l'un des principaux facteurs limitant la production agricole (Fanadzo et al., 2010). L'aridité du climat conjuguée à la variabilité de la pluviométrie fait de l'eau une ressource à la fois rare et inégalement répartie dans le temps et dans l'espace (Anderson et Impiglia, 2002). Face à la possibilité de diminution des ressources en eau disponibles pour l'irrigation (Lebdi, 2004), *l'agriculture doit* désormais faire *face* au défi d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau des cultures (Frija et al., 2013). En fait, les efforts déployés par l'état en matière d'économie d'eau (PNUE-PAM, 2006; Blinda, 2009), ont permis l'amélioration de l'efficience des réseaux de distribution d'eau (El Atiri, 2004), mais n'ont pas modifié significativement la productivité de l'eau agricole (Chemak, 2010). Face à la vulnérabilité des ressources en eau disponibles pour l'irrigation et le besoin accru d'augmenter la production agricole en raison d'une population toujours en croissance, il est essentiel d'étudier les possibilités d'amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau des cultures stratégiques. Parmi celles-ci figure le blé dur comme étant une composante essentielle du régime alimentaire des Tunisiens (Latiri et al., 2000). Actuellement, la production moyenne annuelle de blé dur, représentant près de 55% de la production totale de céréales (Ministère

de l'Agriculture, 2010), est nettement en deçà des besoins du pays (Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable, 2008) en raison principalement de contraintes d'ordre hydrique (Lebdi, 2009). Ces problèmes de productivité risquent de s'aggraver par les changements climatiques et les phénomènes météorologiques extrêmes dans les années à venir (Abis, 2012). Ainsi, l'état déploie des efforts considérables pour promouvoir la culture de blé dur en irrigué (Ministère de l'agriculture, 2011; Ammar et al., 2011) afin de s'affranchir de l'insuffisance et de la variabilité des précipitations et garantir une production minimum quel que soit l'année pluviométrique (Lebdi, 2009). La présente étude est une synthèse bibliographique sur la variabilité de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur cultivé en conditions semi-arides en relation avec le régime hydrique appliqué. L'objectif est de contribuer à identifier les potentialités d'amélioration de la productivité de blé dur en Tunisie en conditions pluviales et irriguées. La recherche des références bibliographiques a été basée sur la méthodologie de recherche bibliographique proposée par Pochet (2005).

CULTURE EN REGIME PLUVIAL

Définition

L'efficacité et la productivité de l'eau sont des indicateurs utilisés dans de nombreuses disciplines scientifiques, généralement pour rendre compte des pertes en eau qui surviennent au cours de son usage ou des produits générés par unité d'eau consommée (Kambou *et al.*, 2014). L'efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture permet d'évaluer l'efficacité du processus suivant lequel l'eau est consommée par la plante pour produire la biomasse (Doorenbos et Pruitt, 1997). Dans ce cas, elle est utilisée pour décrire la relation entre le rendement de la plante et la quantité d'eau utilisée pour cela (Palanisami *et al.*, 2006) et permet de juger si la ressource en eau a été utilisée de manière efficace (Edkins, 2006). Depuis l'étude de Viets (1962), différentes définitions de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture ont été proposées et discutées (Katerji *et al.*, 2010). Selon l'approche agronomique, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture représente un indicateur de l'efficacité du processus suivant lequel l'eau est consommée par la plante pour produire la biomasse. Elle est définie comme étant le rapport entre le rendement (grains, biomasse totale, ...etc.) et la quantité d'eau consommée par la culture pour aboutir à cette production (Blumling, 2005). Généralement l'eau consommée est assimilée à l'évapotranspiration de la culture cumulée lors de son cycle de développement

(Steduto et Hsiao, 2005). Ainsi, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture (WUE_c) est généralement définie comme suit:

$$WUE_c = \frac{Y}{ETC} \quad (1)$$

Avec :

ETC : évapotranspiration de la culture (m^3/ha)

Y : rendement de la culture (kg/ha)

D'autres définitions ont été proposées afin de prendre en compte l'influence du régime hydrique appliqué sur la productivité de la culture. En régime pluvial, on peut définir l'efficacité de l'utilisation de la pluie (Oweis, 2000). Alors qu'en conditions irriguées, il est possible d'évaluer la stratégie d'irrigation appliquée en calculant l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation WUE_{ir} (Du *et al.*, 2010).

$$WUE_p = \frac{Y}{P} \quad (2)$$

$$WUE_{ir} = \frac{Y}{V_i} \quad (3)$$

Avec:

P : volume cumulé d'eau précipitée durant le cycle de culture (m^3/ha),

V_i = le volume d'irrigation total appliqué pendant sur la saison de culture (m^3/ha).

En outre, certains auteurs considèrent le volume d'eau total apporté à la culture, englobant les précipitations (P) et les apports d'irrigation (I), pour calculer l'efficacité de l'utilisation de l'eau WUE_{ip} comme suit (Pereira, 2007):

$$WUE_{ip} = \frac{Y_i}{V_i + P} \quad (4)$$

Efficiency of water use

At the national scale, few studies have been dedicated to the efficiency of water use of the crop WUE_c achieved, on average, by the crop of durum wheat grown in a rainfed regime. Trials conducted by Rezgui *et al.* (2005) over a period of seven years in five Tunisian sites with different bioclimates showed that, in a rainfed regime, the efficiency of water use of the crop WUE_c varies for the variety Karim between $0,57 kg/m^3$ in the semi-arid inferior and $1,19 kg/m^3$ in the sub-humid. These values are in accordance with those indicated by Pereira (2007);

Oweis *et al.* (2000) pour des essais expérimentaux menés dans des conditions climatiques similaires. En outre, WUE_c de la culture de blé en pluvial pour les pays d'Afrique du nord est estimée à 0.43 kg m^{-3} en moyenne (de Fraiture et Wichelns, 2007) tandis qu'elle est évaluée à 0.76 kg m^{-3} en moyenne pour l'ensemble des pays du bassin Méditerranéen (Sadras and Angus, 2006). Ces valeurs sont inférieures à 1.5 kg m^{-3} , valeur indiquant une utilisation efficiente de l'eau de pluie par les céréales cultivées en pluvial dans des conditions climatiques méditerranéennes (Faidutti and Zhang, 2003). En régime pluvial, les valeurs faibles de WUE_c peuvent être attribuées principalement à la distribution irrégulière et l'insuffisance de la pluie (French et Schultz, 1984). Les périodes de déficit hydrique mettent la culture dans des conditions de stress hydrique, provoquant ainsi la fermeture de ses stomates et influant négativement sur la photosynthèse (Van de Geijn and Goudriaan, 1996). Cependant, il est possible d'atténuer les effets négatifs des conditions climatiques par l'apport d'engrais lors des premiers stades de développement de la culture qui permet la couverture précoce du sol (Zhang *et al.* 1998). L'apport d'engrais permet d'augmenter la surface foliaire et minimiser ainsi, en fonction du type de sol, le volume d'eau perdu par évapotranspiration (Faidutti et Zhang, 2003). Cela permet d'améliorer l'efficiencia de l'utilisation de l'eau de la culture en minimisant les pertes d'eau par évaporation (Sadras, 2002) qui peuvent dessécher le sol et causer la sénescence et le flétrissement rapide de la plante (Karrou, 1992). Ceci est d'autant plus important en conditions climatiques méditerranéennes où l'évaporation peut atteindre 75% de l'évapotranspiration totale de la culture en fonction du type de sol (Cooper *et al.*, 1987).

D'autre part, on peut noter que l'efficiencia d'utilisation de la pluie par la culture de blé WUE_p , considérée comme la pente de la fonction associant le rendement et la pluviométrie (latiri, 2000), a augmenté au cours de ces 50 dernières années (figure 4). L'efficiencia de l'utilisation de la pluie enregistrée lors des 10 dernières années, est comparable aux moyennes obtenues dans des conditions climatiques similaires (Oweis, 1997).

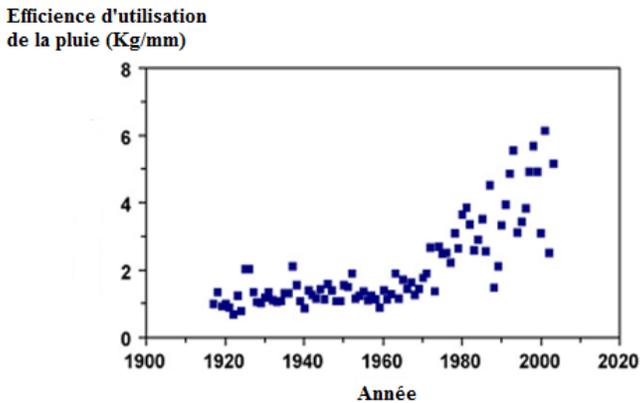


Figure 1 : Evolution de l'efficience d'utilisation de la pluie du blé dur (1917–2005) (latiri *et al.*, 2010)

L'amélioration de l'efficience de l'utilisation de la pluie peut être attribuée à l'apparition de nouvelles variétés caractérisées par un développement et une croissance plus rapides et une surface foliaire plus développée (Tambussi *et al.*, 2007) ainsi que l'amélioration des pratiques culturales (Rezgui *et al.*, 2008). Néanmoins, l'efficience actuelle de l'utilisation de la pluie demeure inférieure aux valeurs atteignables dans des conditions climatiques similaires. En effet, Oweis et Hachum (2009) estiment que WUEp peut atteindre 1 kg.m^{-3} . Cela peut être attribuée aux pertes élevées par ruissellement et par percolation profonde dans les sols à capacité de stockage d'eau limitée localisés dans les zones semi-arides (figure 5) (Karrou, 2000).

En fait, la capacité de stockage du sol a un impact important sur WUEp surtout quand l'intensité de la pluie est forte (latiri, 2000). En effet, les pluies intenses sont en général mal valorisées par les sols ayant une capacité de stockage et une perméabilité faibles (Latiri *et al.*, 2010) à cause des pertes d'eau par ruissellement et par percolation profonde (Oweis *et al.*, 2000). En revanche, les sols ayant une capacité de rétention élevée permettent de stocker l'eau apportée par les pluies automnales (Richards, 1982) et permettent à la plante de puiser l'eau stockée pour atténuer les effets du déficit hydrique pendant les périodes de sécheresse (Anderson et Impiglia, 2002).

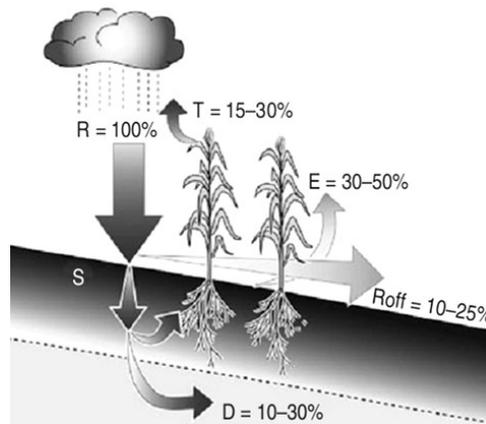


Figure 2 : Distribution de la pluie au niveau du sol pour un climat semi aride (Rockström, *et al.*, 2007)

Pour mieux cerner les problèmes liés à l'insuffisance de la pluie et à sa mauvaise répartition inter et intra-annuelle, il est nécessaire de gérer cette ressource naturelle d'une façon rationnelle et plus efficiente (French et Schultz, 1984). Il est possible de d'améliorer le potentiel de disponibilité de l'eau des précipitations (Karrou, 2000) en mettant en place des infrastructures permettant de collecter l'eau de pluie perdue par ruissellement (Oweis et Hachum, 2005) et par un travail de sol permettant d'améliorer sa capacité de stockage de l'eau. Par exemple, l'implantation de bassins, dont le volume ne dépasse pas les 60 m³, pour la collecte de l'eau ruisselée peut améliorer la WUE_p de 20%. La quantité stockée pourrait être utilisée en irrigation d'appoint pour alimenter la culture lors des périodes de sécheresse fréquentes durant le cycle de culture du blé. L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de la pluie permet d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau de la culture WUE_c (Oweis *et al.*, 2000). En effet, l'étude menée par Oweis (1997) a montré que la valeur de WUE_c peut doubler moyennant une bonne gestion de l'eau de pluie et des pratiques culturales adaptées aux conditions pédoclimatiques locales.

CULTURE EN CONDITIONS IRRIGUEES

Efficienc e d'utilisation de l'eau en relation avec les contraintes hydrique

La Tunisie, avec une pluie moyenne inférieure à 500 mm/an et un volume d'eau disponible inférieur à 1000 m³/habitant/an, est considérée comme un pays à ressources limitées (Lebdi, 2009). La limite des ressources en eau est apparue très vite, limitant ainsi les surfaces irriguées (Lebdi, 2009) et la production agricole (Fanadzo *et al.*, 2010). La rareté et la vulnérabilité des ressources en eau expliquent que tous les efforts ont été axés sur la mobilisation du maximum possible de ressources disponibles pour répondre aux besoins, et corriger l'handicap d'irrégularité naturelle. Actuellement, la mobilisation des ressources en eau conventionnelles approche le potentiel existant. Cependant, les eaux mobilisées actuellement risquent de voir leurs potentialités décroître à cause de l'envasement des retenues barrages (Lebdi, 2004), la surexploitation des ressources en eau souterraines (filali, 2004) et le potentiel limité de production des eaux usées traitées (Lebdi, 2004). D'autre part, comme dans la plupart des pays à climat aride et semi-aride, l'agriculture irriguée est le plus grand consommateur des ressources en eau toutes qualités confondues (Lebdi, 2004). Même si les volumes alloués à l'agriculture irriguée tendront vers la baisse avec un taux de décroissance annuel de l'ordre de 1,3 %, l'agriculture restera de loin le principal consommateur d'eau au-delà de l'horizon 2030 (Lebdi, 2009). Outre le fait que l'agriculture irriguée consomme plus d'eau que d'autres secteurs productifs, sa gestion est loin d'être optimale. En effet, les calendriers d'irrigation appliqués par les agriculteurs ne sont souvent pas appropriés aux conditions pédoclimatiques locales et ne sont pas adaptés aux besoins réels des cultures (Lebdi, 2009). Une étude menée par Frija *et al.* (2013) dans la région de Kairouan a révélé que, pour 31.7% des agriculteurs, le volume apporté dépassait le volume optimum et que, pour 50%, ce volume était inférieur au volume optimal. En général, les agriculteurs ont un comportement "anti-risques" dans la conduite des céréales qui a tendance à minimiser les coûts de production pour limiter les pertes économiques éventuelles (Jouve *et al.*, 1995). En effet, 25% seulement des agriculteurs pratiquent l'irrigation de complément dans la conduite des céréales en Tunisie (Mougou *et al.*, 2008) bien que celle-ci soit particulièrement recommandée lorsque les ressources en eau sont limitées (Shneider et Howell, 2001). D'autre part, l'irrigation à doses déficitaires par rapport à l'évapotranspiration maximale n'est pas encore bien maîtrisée par les agriculteurs. Cette technique suppose des connaissances approfondies, par type de cultures, de l'impact d'un déficit en eau, sur la croissance de la plante lors

d'une phase végétative donnée (Lebdi, 2004). La demande en eau agricole, aux yeux de l'agriculteur, peut ne pas correspondre au besoin agro climatique (Lebdi, 2004). Ainsi, l'agriculteur applique parfois un volume d'irrigation supérieur à celui nécessaire de façon à garantir une production maximale et minimiser les risques de chute de rendement (Karrou et el Mourid, 2009). Dans ce cas, une partie de l'eau appliquée à la culture risque d'être perdue (Sun *et al.*, 2006; Cox *et al.*, 2002). En plus, les pertes d'eau dans les réseaux d'adduction et de distribution (Lebdi, 2009; el Atiri, 2004) se traduisent par une efficacité faible et une pression résiduelle à la borne d'irrigation insuffisante pour l'utilisation des techniques modernes d'irrigation (Al Atiri, 2004). Ainsi, la plupart des agriculteurs utilisent les méthodes d'irrigation gravitaire qui n'assurent qu'une efficacité limitée (Clemens, 2002).

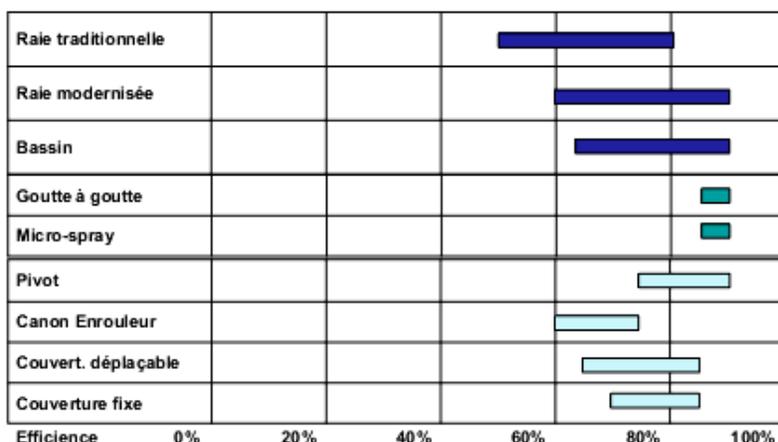


Figure 3 : Efficacité d'application selon la technique d'irrigation (Clemens, 2002)

L'état a déployé des efforts considérables pour une utilisation plus efficace des ressources en eau. Ainsi, dans le cadre de la mise en œuvre du Programme national d'économie d'eau (PNEE) et de la Stratégie Méditerranéenne pour le Développement Durable, d'importants projets d'économie d'eau dans les réseaux collectifs d'irrigation ont été programmés. Ceux-ci consistent en la réhabilitation et la modernisation des réseaux collectifs de distribution d'eau, la reformulation de la tarification de l'eau et l'incitation à l'utilisation des techniques d'économie d'eau au niveau des exploitations agricoles (Lebdi, 2009). Grâce à ces projets, l'efficacité globale d'irrigation, calculée comme le produit de l'efficacité des réseaux d'adduction et de distribution d'eau par

l'efficacité de l'irrigation à la parcelle, a augmenté de 25%. Néanmoins, les efforts en matière d'économie d'eau n'ont pas modifié significativement l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la parcelle (Chemak, 2010). Ainsi, l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les cultures reste généralement en deçà des performances escomptées.

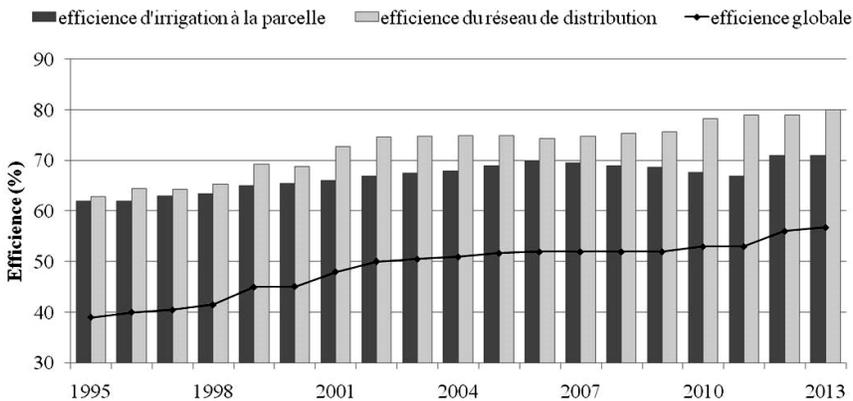


Figure 4 : Evolution de l'efficacité d'irrigation en Tunisie (1995-2013) (Blinda, 2009)

Rôle de l'irrigation dans l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau

A l'échelle nationale, peu d'études (Mellouli et al., 2006., Ben Nouna et al., 2004; Rezgui et al., 2005) ont été consacrées à l'analyse expérimentale des effets des régimes hydrique et azoté sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture de blé dur. Rezgui et al (2005) ont étudié la consommation et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez la variété de blé dur "Karim" cultivée en conditions pluviales et irriguées dans cinq sites de bioclimats différents de Tunisie. Les résultats ont montré, qu'en conditions d'irrigation, l'efficacité d'utilisation de l'eau varie entre 0,99 et 1,66 kg/m³. La réponse de cette même variété a été étudiée par Mellouli et al. (2006) et Ben Nouna et al (2004) en conditions climatiques tunisiennes. Les résultats de ces deux études ont montré que WUEc varie respectivement de 1.2 à 1.4 kg/m³ et de 0,8 à 1,3 kg/m³. Ces valeurs sont en concordance avec celles trouvées par Corbeels et al. (1998), van Hoorn et al. (1993), Sezen et Yazar (1996) et Zhang et al. (1999) à l'issue d'études menées dans des climats similaires. Ces valeurs sont également en concordance avec l'étude menée par Zhu et al (1994) indiquant que l'efficacité de l'utilisation de l'eau par le blé dur est généralement inférieure à 1,48 Kg/m³ dans les régions à

climat semi aride. Toutefois, Qiu et al. (2008) ont montré que l'efficiencia de l'utilisation de l'eau du blé varie entre 1.1 et 2.1 kg/m³. Alors qu'Oweis (1997) a montré que WUEc peut même atteindre 2.5 kg/m³ dans un climat similaire avec une bonne gestion de l'irrigation.

En fait, la conduite du blé en irrigué contribue à augmenter et stabiliser le rendement mais permet aussi d'améliorer l'efficiencia de l'utilisation de l'eau de la culture (Oweis et al., 1999), particulièrement en climat Méditerranéen (Tambussi et al., 2007). La différence entre l'efficiencia de l'utilisation de l'eau d'une culture conduite en régime pluvial et celle obtenue en conditions irriguées peut atteindre 44% en fonction des conditions pédoclimatiques et des pratiques culturales (Steduto et al., 2011). Toutefois, l'application de doses élevées d'irrigation est susceptible d'être associée à des valeurs relativement faibles de l'efficiencia de l'utilisation de l'eau de la culture (Huang et al., 2005). En effet, WUEc peut augmenter avec l'augmentation de l'évapotranspiration de la culture jusqu'à atteindre une valeur seuil à partir de laquelle l'efficiencia a tendance à diminuer avec l'augmentation de la consommation en eau de la culture. Dans ce cas, la relation entre WUEc et l'évapotranspiration est décrite graphiquement par une fonction parabolique (Du et al., 2010). Toutefois, cette relation peut être de type linéaire (Zhang et Oweis, 1999; Rezgui et sl., 2005). En conditions irriguées, les valeurs relativement élevées de l'efficiencia de l'utilisation de l'eau peuvent être attribuées à un développement rapide de la surface foliaire (Zhang et al., 1998) ainsi qu'un système racinaire bien développé permettant une meilleure extraction de l'eau à partir du sol (Cooper et al., 1987). Le développement rapide de la surface foliaire constitue un avantage considérable dans les régions où l'évaporation du sol est une composante importante de l'évapotranspiration de la culture (Araus et al, 2007; Gregory et al 2000). En effet, cela favorise la transpiration de la culture aux dépens de l'évaporation de l'eau du sol par la réduction du rayonnement absorbé par le sol (Gregory et al. 2000). Néanmoins, l'augmentation de la dose d'irrigation est susceptible de diminuer l'efficiencia de l'utilisation de l'eau d'irrigation WUE_{ir}. En effet, le régime hydrique associé à un rendement maximal peut ne pas correspondre à une efficiencia de l'utilisation de l'eau d'irrigation WUE_{ir} maximale (Molden et al., 2003). Oweis (1997) a montré que l'efficiencia d'utilisation de l'eau d'irrigation WUE_{ir} du blé dur peut être trois fois supérieure en irrigation d'appoint à celle obtenue en irrigation complète. En effet, Oweis et al. (2000) ont montré qu'il est possible de maintenir un rendement élevé en apportant seulement 2/3 des besoins en eau de la culture. Néanmoins, lorsque l'on compare les résultats des études portant sur l'efficiencia de l'utilisation de l'eau en conditions irriguées, il faut garder à l'esprit que les

calendriers d'irrigation appliqués dans ces études peuvent être très différents (Katerji et al. 2008). En fait même si la quantité totale d'eau appliquée est le même, la variabilité de la fréquence des apports peut influencer considérablement la réponse de la culture à l'irrigation

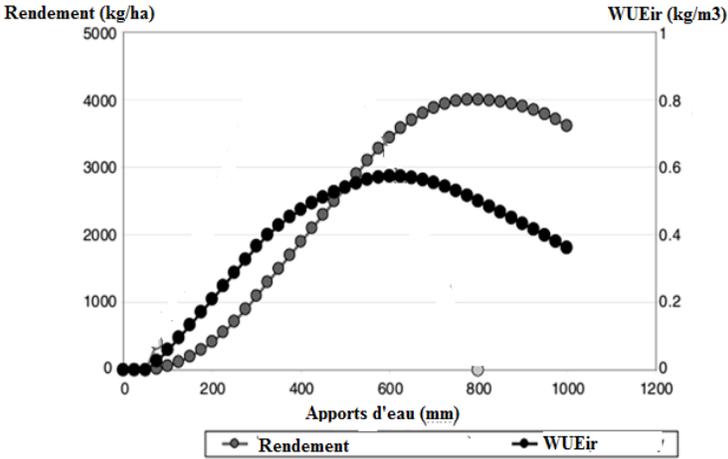


Figure 5 : Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation WUE_{ir} et rendement en fonction de la dose d'irrigation (Molden *et al.*, 2003)

CONCLUSION

Malgré les efforts déployés par l'état en termes de mobilisation des ressources en eau et d'amélioration de la performance des réseaux de distribution d'eau, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture de blé dur reste en deçà des performances escomptées. De grandes marges de progrès existent aussi bien en régime pluvial qu'en conditions irriguées. En régime pluvial, la mise en place d'infrastructures permettant d'augmenter le potentiel de disponibilité de l'eau de pluie au niveau des exploitations agricoles permettrait de mieux cerner les problèmes liés à l'insuffisance de la pluie et à sa mauvaise répartition inter et intra-annuelle. En conditions irriguées, il est essentiel d'appliquer des stratégies d'irrigation adaptées aux conditions pédoclimatiques et au potentiel en eaux disponibles. Ainsi, la détermination des stratégies optimales d'irrigation devrait désormais être basée sur la maximisation de l'efficacité d'utilisation de l'eau en considérant les aspects agronomiques ainsi que la pratique d'irrigation.

Conclusions: En régime pluvial, il est possible d'améliorer l'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau du blé dur en climat semi aride en augmentant le potentiel de disponibilité de l'eau de pluie au niveau des exploitations agricoles. En conditions irriguées, il est essentiel de distinguer la stratégie d'irrigation associée à une efficacité maximale d'utilisation de l'eau de celle permettant d'obtenir un rendement élevé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL ATIRI R. (2004). Les efforts de modernisation de l'agriculture irriguée en Tunisie. *Revue H.T.E.*, 130, 12-18.
- AMMAR K., GHARBI M.S., DEGHAIS, M. (2011). Wheat in Tunisia. In: Angus, W., Bonjean, A., Van Ginkel, M., eds. *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding, Volume 2. Vol2. Lavoisier Publishing, Paris, 443-465.*
- ANDERSON W.K., IMPIGLIA A. (2002). Management of dryland wheat. In: Curtis, B.C., Rajaram, S., Gómez Macpherson, H., eds. *Wheat: Improvement and Production. Plant Production and Protection Series N°. 30. FAO, Rome, p. 567.*
- BELAID A., HADJEL M., HASSINI N. (2012). Effects of drought on winter wheat yields in a semi-arid region. In Gâstescu P., Lewis Jr. W., Breţcan P. eds. *Water resources and wetlands. Conference Proceedings, www.limnology.ro/water2012/Paper.html.(13/07/2015)*
- BEN NOUNA B., ZAIRI A., RUELLE P., SLATNI A., YACOUBI S., AJMI T. (2004). Évaluation de la demande en eau et pilotage de l'irrigation déficitaire des cultures annuelles: méthodologie et outils de mesure. *Projet INCO-WADEMED. Actes du Séminaire modernisation de l'agriculture irriguée, Rabat, 19-23 avril 2004.*
- BLINDA M. (2009). *Stratégie Méditerranéenne pour le développement durable - Efficacité d'utilisation de l'eau. rapport de synthèse du plan bleu, 58 pp.*
- BLUMLING B., YANG H., PAHL-WOSTL C. (2005). Proposal for the integration of irrigation efficiency and agricultural water productivity. *Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity. Bari, Italie, 269 – 286.*
- BRISSON N., LEVRAULT F. (2010). *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR Ademe, France.*
- CHEMAK F., BOUSSEMART J.P., Jacquet F. (2010). Farming system performance and water use efficiency in the Tunisian semi-arid: data envelopment analysis. *International Transactions in operational research, 17, 381-396*
- CHEN D.X., COUGHENOUR M.B. (2004). Photosynthesis, transpiration, and primary productivity: Scaling up from leaves to canopies and regions using process models and remotely sensed data. *Global Biogeochem. Cycles, 18 (GB4033), 1–15.*

- COOPER P.J., GREGORY D., TULLY H.C. (1987). Harris Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture*, 23, 113–158.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O. (1997). La petite irrigation dans les zones arides Principes et options. Collection FAO: développement 2. Rome. Italie.
- 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. *Agricultural Water Management*, 97, 66–74.
- EDKINS R. (2006). Irrigation Efficiency Gaps – Review and Stock Take. Report No L05264/2, Aqualinc Research Limited. New Zeland.
- GREGORY P.J., SIMMONDS L.P., PILBEAM, C.J. (2000). Soil type, climatic regime and the response of water use efficiency to crop management. *Agronomy Journal*, 92, 814-820.
- HSIAO T.C. (1993). Effects of drought and elevated CO₂ on plant water use efficiency and productivity. In Jackson, M.D. and Black, C.R. eds. *Global Environmental Change. Interacting Stresses on Plants in a Changing Climate*. NATO ASI Series. Springer-Verlag, New York, 435-465.
- HSIAO T., STEDUTO P., FERERES E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrig. Sci*, 25, 209–231.
- HUANG Y., CHEN L., FU B., HUANG Z., GONG, J. (2005). The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects. *Agricultural Water Management*, 72, 209-222.
- JOUVE A.M. KHEFFACHE Y., BELGHAZI S. (1995). La filière des céréales dans les pays du Maghreb: constante des enjeux, évolution des politiques. In: Allaya M. ed. *Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n.14*. Montpellier: CIHEAM, 169-192.
- KAMBOU D., XANTHOULIS D., OUATTARA K., AURORE D. (2014). Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 18 (1), 1-13.
- KATERJI N., BETHENOD O. (1997). Comparaison du comportement hydrique et de la capacité photosynthétique du maïs et du tournesol en condition de contrainte hydrique. *Conclusions sur l'efficience de l'eau*. *Agronomie*, 17, 17–24.
- KATERJI N., MASTRORILLI M., CHERNI H.E. (2010). Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. A 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. *Europ. J. Agronomy*, 32 (2010), 177–185.
- KATERJI N., MASTRORILLI M., RANA G. (2008). Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*, 28, 493–507

- LATIRI K. (2000). Conditions climatiques, production et fertilisation azotée. In: Royo, C., Nachit, M.M., Di Fonzo, N., Araus, J.L. (Eds.), *Durum Wheat Improvement in the Mediterranean Region: New challenges. Options Méditerranéennes, Série A*, vol. 40. CIHEAM, pp. 591–593.
- LATIRI K., LHOMME J.P., ANNABI M., SETTER, T.L. (2010). Wheat production in Tunisia: Progress, inter-annual variability and relation to rainfall. *Europ. J. Agronomy* 33 (2010) 33–42
- LEBDI F. (2009). Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché, cas de la Tunisie, Les notes d'analyse du CIHEAM, N°51, IAMB, Bari, Italie.
- MONTENY E.A. (1970). Bilans hydriques et énergétiques d'une culture de blé en région semi-aride. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*. Vol.43. Tunis, Tunisie.
- Observatoire Tunisien de l'Environnement et du Développement Durable. (2008). *Gestion Durable des Ressources en Eau*. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Tunis, Tunisie.
- OWEIS T. (1997). Supplemental irrigation: A highly efficient water-use practice. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, Aleppo, Syria.
- OWEIS T., ZHANG H., PALA M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 92, 232-238
- PALANISAMI K., SENTHILVEL S., RANGANATHAN C.R., RAMESH T. (2006). Water productivity at different scales under canal, tank and well irrigation systems. Centre for Agricultural and Rural Development Studies (CARDS). Tamil Nadu Agricultural University.
- PEREIRA L.S. (2005). Relating water productivity and crop evapotranspiration. In: Lamaddalena, N., Shatanawi, M., Todorovic, M., Bogliotti, C., Albrizio, R. eds. *Water Use Efficiency and Water Productivity. Proceedings of WASAMED Workshop*. Options Méditerranéennes Ser. B 57, Amman, Jordan, 31–50.
- REZGUI M., ZAIRI A., BIZID E., BEN MECHLIA N. (2005). Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivé en conditions pluuias et irriguées en Tunisie. *Cahiers Agricultures* vol. 14, n° 4, 391-397.
- RUBINO P., CANTORE V., MASTRO M.A. (1999). Studio dell'efficienza dell'uso dell'acqua di alcune specie erbacee in un ambiente dell'Italia meridionale. *Riv. Irr. e Dren.*, 46, 2: 39-46.
- SADRAS V., GRASSINI P., STEDUTO P. (2011). Status of water use efficiency of main crops. In: *The state of world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)*. FAO, Rome and Earthscan, London. http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/TR_07_web.pdf

- SADRAS V., MCDONALD G. (2012). Water use efficiency of grain crops in Australia: principles, benchmarks and management. Grains Research Development Corporation, Canberra.
- SHIVANI V.U.N., PAL S.K., THAKUR R., KUMAR S. (2001). Production potential and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum*) cultivars under different dates of seeding and irrigation levels. *Indian J Agronomy*, 46(4), 659-664.
- STEDUTO P., ALBRIZIO R. (2005). Resource-use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water Use Efficiency and comparison with Radiation Use Efficiency. *Agric. For. Meteorol.*, 130, 269-281
- STEDUTO P., HSIAO T. (2005). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity*, 59 – 62
- STEDUTO P., KATERJI N., PUERTOS-MOLINA H., UNLU M., MASTRORILLI M., RANA, G. (1997). Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas-exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crops Res.*, 54, 221–234
- TAMBUSSI E.A., BORT J., ARAUS J.L. (2007). Water use efficiency in c3 cereals under mediterranean conditions: a review of some physiological aspects. *Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity*, 192 – 206.
- TODOROVIC M., CALIANDRO A., ALBRIZIO R. (2005). Irrigated agriculture and water use efficiency in Italy. *Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity*, 9–19.
- VAN DE GEIJN S.C., GOUDRIAAN J. (1996). The effects of elevated CO₂ and temperature on transpiration and crop water use. – In: Bazzaz, F., Sombroek, W. (eds.) *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*, FAO and John Wiley & Sons, Chichester, UK
- VIETS F.G. (1962). Fertilizers and the efficient use of water, *Adv. Agron.* 14, 223-264.
- ZHANG H., OWEIS T., GARABET S., PALA, M. (1998). Water use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rainfed and irrigation conditions in Mediterranean environment. *Plant Soil.*, 201, 295-305.