



## **SYNTHESE DES PRINCIPAUX INDICATEURS DE PERFORMANCE DES SYSTEMES IRRIGUES**

***BHOURI KHILA S., DOUH B., MGUIDICHE A., BOUJELBEN A.***

Département du Génie des Systèmes horticoles et du Milieu Naturel  
Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem  
Université de Sousse, Sousse, Tunisie

*sami.khila@yahoo.fr*

### **RESUME**

La plupart des pays à climat aride et semi-aride sont en situation de stress hydrique important en raison d'une forte demande en eau agricole d'une part et de la rareté des ressources en eau disponibles d'autre part. Ces pays sont confrontés, et seront encore plus dans les années à venir, à l'enjeu majeur d'améliorer la gestion de leur ressources en eau. Face à la nécessité de préserver les ressources en eau et le besoin d'augmenter la production agricole en raison d'une population toujours en croissance, il devient impératif de se focaliser sur l'efficacité d'utilisation de l'eau en agriculture irriguée. Le présent travail fait une synthèse de la littérature traitant des principaux indicateurs de performance hydraulique et agronomique d'un système irrigué, en se focalisant sur l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture.

**Mots-clés:** ressources en eau, efficacité, irrigation.

### **ABSTRACT**

Most of the arid and semi-arid countries are facing water stress due to high agricultural water demand on one hand and the scarcity of available water resources on the other. These countries face, and will be even more in the

coming years, with water resources management issue. Faced with the scarcity of water resources and the need to increase agricultural production due to an ever growing population, it becomes imperative to promote water use efficiency in irrigated agriculture. This work is literature review on main indicators used to assess performance in irrigated agriculture, with a focus on crop water use efficiency.

**Keywords:** water resources, efficiency, irrigation.

## **INTRODUCTION**

L'utilisation de l'eau d'irrigation pour la production agricole suit une chaîne séquentielle d'étapes interdépendantes (Hsiao et al., 2007). En effet, l'eau d'irrigation est d'abord prélevée à partir d'une source (forage, barrage...) puis transportée, à travers un réseau de conduites ou de canaux, jusqu'aux exploitations agricoles. Lorsque l'eau arrive en tête des exploitations agricoles, elle est stockée puis distribuée aux parcelles pour l'irrigation des plantes par l'intermédiaire d'un réseau de conduites ou de canaux. Ensuite, une partie seulement de l'eau stockée dans la zone racinaire est consommée par la plante sous forme de transpiration tandis que l'autre partie est "perdue" par évaporation à partir du sol (Howell, 2003). Enfin, l'eau consommée (transpirée) par la plante permet la production de biomasse grâce à l'ouverture des stomates et l'assimilation du dioxyde de carbone. Des pertes d'eau peuvent se produire aussi bien au niveau du réseau de distribution qu'au niveau de la parcelle. A l'échelle de la parcelle, des pertes d'eau peuvent se produire au niveau du système d'irrigation ainsi que lors de l'application de l'eau à la culture. Ces pertes induisent qu'une partie seulement de l'eau disponible en tête de l'exploitation agricole est fournie aux plantes (Hsiao, 2005). L'efficacité globale du processus est définie comme le produit des efficacités associées à chacune de ces étapes (Farahani et al. 1998). Le présent article est une revue bibliographique concernant les différents concepts d'efficacité et de productivité de l'eau des systèmes irrigués ainsi que les facteurs qui les affectent.

## PERFORMANCE HYDRAULIQUE

### Efficiencce des réseaux d'adduction et distribution

L'efficiencce des réseaux d'adduction et de distribution permet d'estimer le rendement hydraulique de ces réseaux (Hamdy, 2005; Bos et Nugteren. 1990). En fait, il se produit généralement des pertes au niveau des réseaux d'adduction et de distribution de l'eau (Soutter et al., 2007), ce qui signifie que l'eau fournie aux exploitations est généralement inférieure à l'eau prélevée à partir de la source. Les pertes d'eau dépendent de l'état des canaux ou des conduites qui permettent le transport de l'eau à partir de la source d'eau jusqu'aux exploitations agricoles. Les pertes d'eau dans le réseau proviennent généralement de l'évaporation de l'eau à partir des canaux et des fuites dans les conduites (Bos et Nugteren, 1990).



Figure 1 : Circuit de distribution de l'eau agricole (Blinda, 2009)

L'efficiencce des réseaux de transport de l'eau a été définie pour la première fois par Israelsen (1932). D'après Hamdy (2005), les efficiencces du réseau d'adduction ( $E_a$ ) et du réseau de distribution ( $E_d$ ) sont généralement définies comme suit:

$$E_a = V_a / V_s \quad (1)$$

$$E_d = V_f / V_a \quad (2)$$

Avec:

$V_a$  : volume d'eau mesuré à la sortie du réseau d'adduction

$V_s$ : volume prélevé à partir de la source.

$V_f$ : volume mesuré en tête des exploitations agricoles.

## **Efficiencce d'irrigation à la parcelle**

L'efficiencce d'irrigation à l'échelle de la parcelle exprime le degré de pertes d'eau pouvant se produire dans le système d'irrigation installé à la parcelle ainsi que lors de l'application de l'eau à la culture. En fait, des pertes d'eau peuvent se produire à cause de l'évaporation de l'eau à partir des rigoles d'irrigation (pour l'irrigation de surface), des fuites dans les conduites (pour les systèmes d'irrigation sous pression) ainsi que des pertes par ruissellement ou par percolation profonde lors de l'irrigation de la culture.

### ***Efficiencce d'application***

L'efficiencce d'application permet d'évaluer la technique avec laquelle l'eau est appliquée à la culture dans l'objectif de la stocker dans la zone racinaire et satisfaire ainsi les besoins en eau de la culture (Irmak et al., 2011). Elle dépend du système d'irrigation utilisé ainsi que du degré de connaissances de l'agriculteur concernant les caractéristiques du sol (Howell, 2003). L'efficiencce d'application relie le volume d'eau stocké dans la zone racinaire à celui appliqué lors de l'arrosage. Elle est définie généralement comme suit (Howell, 2003 ; Irmak et al., 2011):

$$E_a = V_s / V_a \quad (3)$$

Avec:

$E_a$  efficiencce d'application

$V_s$  volume d'eau stocké dans la zone racinaire

$V_a$  volume d'eau appliqué lors de l'arrosage

### ***Efficiencce de stockage***

L'efficiencce de stockage dépend du pourcentage d'eau stockée dans la zone racinaire par rapport à la capacité de stockage maximale du sol (Irmak et al., 2011). Elle est souvent utilisée pour évaluer la performance des techniques d'irrigation de surface (Howell, 2003). Elle est, généralement, définie comme suit (Irmak et al., 2011; Howell, 2003) :

$$E_s = V_s / V_{rz} \quad (4)$$

Avec:

$V_s$  : volume stocké dans la zone racinaire

$V_{rz}$  : volume maximal de stockage dans la zone racinaire

### ***Efficienc e d'uniformité***

L'efficienc e d'application ne permet pas d'évaluer l'uniformité de l'irrigation (Wang et al., 1996). L'efficienc e d'uniformité décrit l'homogénéité spatiale de la dose d'irrigation par rapport à la surface irriguée. Cette homogénéité dépend de nombreux facteurs liés à la technique d'irrigation, la topographie, la perméabilité du sol, et les caractéristiques hydraulique (pression, débit, etc) du système d'irrigation (Howell, 2003). La définition utilisée par Christiansen (1942) pour évaluer l'uniformité de l'irrigation par aspersion demeure la plus utilisée dans l'évaluation de l'uniformité d'irrigation :

$$CU(\%) = 100 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - h_m|}{nh_m} \right) \quad (5)$$

Avec :

$h_i$  : hauteur d'eau apportée par irrigation mesurée en un point  $i$  de la surface irriguée (mm)

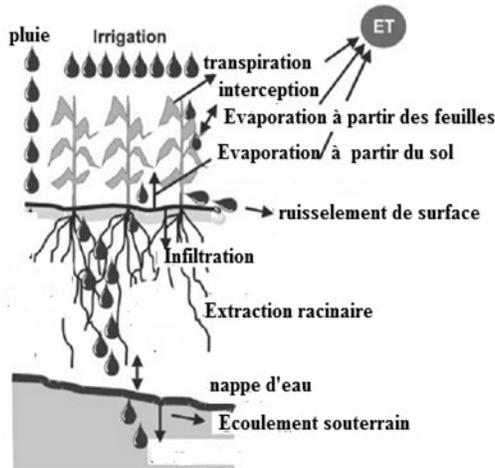
$h_m$  : la hauteur d'eau moyenne appliquée à la parcelle irriguée (mm).

$n$  : le nombre de points de mesure

## **EFFICIENC E D'UTILISATION DE L'EAU PAR LA CULTURE**

### **Définition**

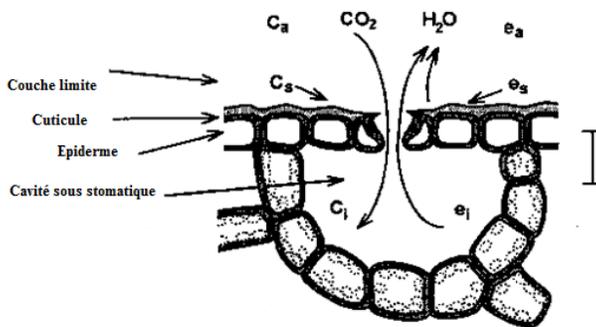
L'efficienc e de l'utilisation de l'eau par la culture permet d'évaluer l'efficacité du processus suivant lequel l'eau est consommée par la plante pour produire la biomasse (Doorenbos et Pruitt, 1997).



**Figure 2 :** Processus impliqués dans la détermination de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante (Howell, 2003)

Depuis l'étude de Viets (1962), différentes définitions de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture ont été proposées et discutées (Ritchie, 1983; Zwart et Bastiaanssen, 2004, Katerji et al, 2010). En général, celle-ci est définie soit par approche éco-physiologique soit par approche agronomique.

La démarche éco physiologique est fondée sur l'analyse de la relation entre la photosynthèse et la transpiration de la culture par l'intermédiaire de ses feuilles (Chen et Coughenour, 2004). En fait, via la photosynthèse, la plante absorbe le  $CO_2$  par l'intermédiaire de ses stomates et rejette de l'eau sous forme de vapeur.



**Figure 3 :** Coupe transversale d'un stomate de feuille montrant le parcours du  $CO_2$  et de  $H_2O$  en période lumineuse (Van De Geijn and Goudriaan, 1996).  
( $C_i$ ,  $C_s$ ,  $C_a$ : teneur en  $CO_2$  interne, en surface et ambiant;  
 $e_i$ ,  $e_s$ ,  $e_a$ : humidité de l'air interne, en surface et ambiant).

L'état d'ouverture des stomates est un compromis entre la transpiration de la plante et l'assimilation de CO<sub>2</sub> à partir de l'atmosphère (Stanghellini et Bunce, 1994). Ainsi, selon l'approche écophysio-logique, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture (WUE<sub>ec</sub>) est définie comme étant le rapport entre la quantité de CO<sub>2</sub> absorbé par la plante et la quantité d'eau transpirée (T) (Tambussi et al., 2007) :

$$WUE = CO_2 / T \quad (6)$$

L'efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture dépend des caractéristiques physiologiques de la plante à savoir sa conductance stomatique (Ashraf and Bashir 2003) et sa capacité photosynthétique (Condon et al. 2002). En effet, la transpiration de la plante dépend de la conductivité des stomates et de la densité stomatique variable entre 300 et 800 stomates/mm<sup>2</sup> en fonction des espèces (Woodward, 1993). En fait, la démarche écophysio-logique permet de décrire les processus qui déterminent l'efficacité de l'eau (Hsiao, 1993) ainsi que d'évaluer les capacités de photosynthèse et de transpiration foliaires chez les espèces cultivées dans des conditions hydriques contrastées (Katerji et Bethenod 1997). Toutefois, il n'est pas possible d'appréhender directement le rendement agronomique à partir de la photosynthèse foliaire, car d'autres facteurs entrent en jeu tels que la croissance foliaire, le transfert des assimilats et la mise en place des organes reproducteurs (Steduto et al. 1997).

De point de vue agronomique, on s'accorde généralement pour admettre que l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture 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 utilisée est assimilée à l'évapotranspiration de la culture cumulée lors de son cycle de développement (Steduto et Hsiao, 2005; Hamdy, 2005; Cooper et al., 1987; Zwart et Bastiaanssen, 2004). Ainsi, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture (WUE<sub>c</sub>) est définie généralement comme suit :

$$WUE_c = Y / ETC \quad (7)$$

Avec :

ETC : évapotranspiration de la culture

Y : rendement de la culture

L'analyse de WUEc permet d'étudier les effets des conditions environnementales et des pratiques culturales sur la productivité de la plante (Blümling et al. (2007). D'autres définitions ont été proposées afin de prendre en compte l'influence du régime hydrique appliqué sur la productivité de la culture. Ainsi, il est possible de définir l'efficience de l'utilisation de la pluie  $WUE_p$  (Latiri, 2000) et l'efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation  $WUE_{ir}$  (Katerji et al., 2010; Edkins, 2006; Du et al., 2010) en conditions pluviales et irriguées respectivement. En outre, en conditions irriguées, l'efficience de l'utilisation de l'eau  $WUE_{ip}$  peut être calculée par rapport au volume d'eau total apporté à la plante pendant son cycle cultural en tenant compte de la pluie (Perreira, 2005) :

$$WUE_p = Y_p / P \quad (8)$$

$$WUE_{ir} = Y_i / V_i \quad (9)$$

$$WUE_{ip} = Y_i / (V_i + P) \quad (10)$$

Avec:

P : volume cumulé d'eau précipitée durant le cycle de culture

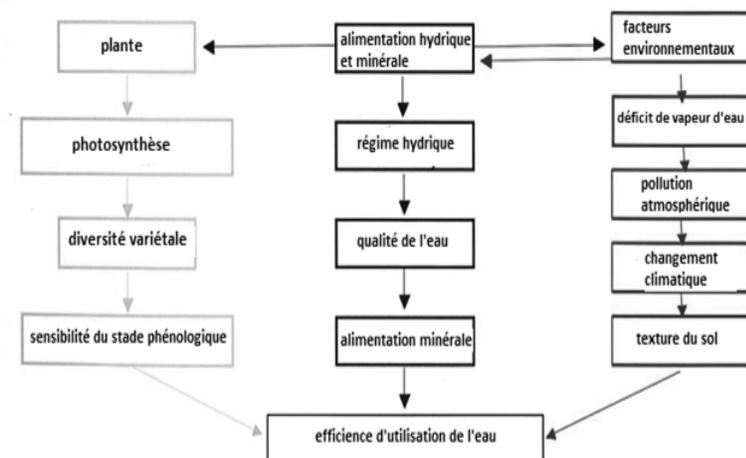
$V_i$  = le volume d'irrigation total appliqué pendant sur la saison de culture

Par ailleurs, il est possible d'évaluer une stratégie d'irrigation donnée par rapport à la conduite de la culture en pluvial en se basant sur la définition suivante (Rinaldi et Ubaldo, 2007):

$$dWUE_{ir} = (Y_i - Y_p) / V_i \quad (11)$$

### **Paramètres influants sur l'efficience d'utilisation de l'eau par la culture**

L'efficience de l'utilisation de l'eau pour une espèce donnée est modifiée par plusieurs facteurs relatifs à la plante, à l'environnement et aux méthodes de gestion des cultures (figure 4).



**Figure 4 :** Origines de la variabilité de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Katerji et al, 2006)

### Rôle de l'espèce et des variétés

Pour un climat donné, l'efficacité d'utilisation de l'eau peut être très différente selon les espèces végétales. En effet, le rapport entre la quantité de biomasse produite et la quantité d'eau transpirée, a une variabilité génétique importante (Todorovic et al., 2005). En général, les plantes à métabolisme photosynthétique C4 sont caractérisés par une WUEc supérieure à celle des espèces en C3, en raison de leur plus grande aptitude à fixer le CO<sub>2</sub> (Rubino et al., 1999). Plusieurs chercheurs se sont intéressés à comparer WUEc entre cultures. Karam et al. (2005) ont étudié pendant six ans le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau de quatre cultures annuelles (maïs, soja, Cotton, tournesol). Les résultats ont montré que le maïs produit l'efficacité d'utilisation de l'eau la plus élevée avec 1.88 kg/m<sup>3</sup>. Alors que les valeurs de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le coton, le soja et le tournesol étaient respectivement de 0,64, 0,54 et 0,86 kg/m<sup>3</sup>. Tarantino et al. (1997) ont étudié les mêmes paramètres pour 4 cultures (maïs, sorgho, tournesol, blé dur). Il s'est avéré que les valeurs les plus élevées ont été obtenues en moyenne pour le sorgho et le blé dur. En général, pour le blé dur, la valeur maximale de WUEc varie de 1.2 (Tarantino et al 1997; Rezgui et al, 2005; ben nouna, 2004) à 1.7 kg/m<sup>3</sup> (Rubino., et al., 1999) et peut atteindre 2.5 kg/m<sup>3</sup> (Oweis., 1997). Pour la tomate, WUEc peut atteindre 14 kg/m<sup>3</sup>. Alors qu'elle varie entre 6 et 12 kg/m<sup>3</sup> pour la pomme de terre (Ben

Nouna et al., 2004). D'autre part, WUEc d'une espèce végétale donnée peut être très variable selon les variétés (Singh et al., 2012). Ceci a été démontré, par exemple, pour le blé par Singh et al. (1998), Shivani et al. (2001). WUEc est également variable suivant les phases de développement de la culture (Geerts and Raes, 2009). Durant la première phase de développement, elle est très faible excepté pour les apports importants d'eau (Geerts et al., 2008). Un déficit hydrique pendant cette phase du cycle affecte le développement de la culture et cause une chute de rendement très importante (Yazar and Sezen, 2006). WUEc a tendance à augmenter au cours du cycle de développement de la culture au fur et à mesure que la part de la transpiration du couvert végétal devient prépondérante du fait de la diminution progressive de l'énergie l'évaporation de l'eau à partir du sol (Monteny, 1970). Lorsque l'évapotranspiration réelle de la culture s'approche de celle maximale, WUEc a tendance à diminuer pour la majorité des cultures.

### **Rôle des conditions pédoclimatiques**

Le climat a un rôle essentiel dans l'explication de la variabilité de WUEc (Molden et al., 2007). En général, l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture est élevée pour les climats caractérisés par une faible demande évaporative de l'air (Sadras et al., 2011). L'efficacité d'utilisation de l'eau chez une variété de blé dur a été étudiée par Rezgui et al. (2005) dans 5 régions appartenant à des étages bioclimatiques différents en Tunisie. Les résultats ont révélé que WUEc varie de 0.57 kg/m<sup>3</sup> à l'étage semi aride inférieur à 1.19 kg/m<sup>3</sup> à l'étage sub humide (Rezgui, et al., 2005). La variabilité de WUEc en fonction du climat peut aussi être attribuée à la différence de latitude. En effet, Zwart et Bastiaanssen (2004) ont démontré que WUEc augmente avec l'augmentation de la latitude pour le blé, le Maïs, le riz et le coton. Par ailleurs, Le rôle des propriétés du sol, comme facteur susceptible de modifier WUEc, n'a pas été beaucoup abordé dans les recherches consacrées à l'efficacité de l'utilisation de l'eau malgré l'influence de la réserve utile et la texture du sol (Katerji et al., 2010). Katerji et al (2006) ont analysé l'impact de la variabilité de la texture du sol sur l'efficacité de l'eau pour 8 espèces végétales cultivées dans des sols argileux et limoneux en région méditerranéenne. Cette étude a montré que l'efficacité de l'eau chez certaines espèces diminue significativement lorsqu'elles sont cultivées dans des sols argileux par rapport aux sols limoneux.

## **Rôle de l'alimentation minérale**

Les effets de l'alimentation minérale sur WUEc a été démontré à l'issue de plusieurs recherches consacrées à l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Sadras et al. (2011) ont montré qu'une bonne gestion des apports d'azote est essentielle pour obtenir un rendement élevé par unité d'eau évapotranspirée. En général, l'apport d'engrais peut augmenter la production et l'efficacité d'utilisation de l'eau (Rinaldi et al., 1996; Todorovic et al., 2005). L'effet positif de la fertilisation sur WUEc a été vérifié pour le blé (Zhang et al. 1998, Oweis 1997) et l'orge (Gregory et al. 2000). En fait, la fertilisation favorise la croissance précoce ce qui permet l'augmentation de la surface du couvert végétal et, par conséquent de la proportion d'eau transpirée aux dépend de l'évaporation (Steduto and Albrizio, 2005). En revanche, un déficit en azote réduit la taille du couvert végétal ce qui augmente le pourcentage d'évaporation par rapport à l'évapotranspiration. Un déficit en azote réduit la photosynthèse, et par conséquent la biomasse par unité d'eau transpirée. Néanmoins, l'apport d'engrais doit être adapté aux conditions environnementales (Tambussi et al., 2007).

## **Rôle de du régime hydrique**

Malgré la variabilité de WUEc selon les facteurs cités précédemment, le régime hydrique appliqué lors de la conduite de la culture est largement responsable de la fluctuation de l'efficacité de l'eau (Oweis., 1997). Le choix d'une stratégie d'irrigation adaptée aux conditions pédoclimatiques, en particulier dans les régions à ressources en eau limitées, est essentiel (Katerji et al, 2008, Musick et al., 1994) pour l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture. Une stratégie d'irrigation inadaptée aux conditions locales peut même être préjudiciable à la productivité des cultures (Zwart and Bastiaanssen, 2004). Le régime hydrique optimal peut être différent selon la culture considérée. Dans le cas de la tomate, Tarantino et al (1997) ont démontré que celle-ci peut varier de 70% selon le régime hydrique appliqué. Pour le maïs et le soja, Karam et al (2005) ont conclu que WUEc peut varier respectivement de 1.34 kg/m<sup>3</sup> à 1.88 kg/m<sup>3</sup> et de 0.47 kg/m<sup>3</sup> to 0.54 kg m<sup>-3</sup>, en variant la dose d'irrigation. Pour le blé dur, Tarantino et al (1997) ont conclu que la variation du régime hydrique appliqué peut causer une variation de WUE<sub>c</sub> pouvant atteindre 1.2 kg/m<sup>3</sup>. Alors qu'Oweis (1997) a montré que WUEc du blé dur, en irrigation de complément, peut-être 3 à 4 fois supérieure à celle obtenue en irrigation complète et en pluvial respectivement. Rezgui et al (2005), en considérant différents niveaux

seuils de la réserve en eau du sol pour déclencher l'irrigation, ont montré que l'efficacité de l'utilisation de l'eau du blé dur varie entre 0.99 et 1.66 kg/m<sup>3</sup>. Alors que Losavio et al. (1999) ont conclu que WUEc du riz est maximale en fournissant 70% des besoins en eau de la culture. Pour le soja, Tarantino et al (1997) ont montré que la WUEc maximale est obtenue en fournissant 100% des besoins en eau de la culture. D'autre part, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture dépend de la répartition des apports d'eau sur son cycle de culture. En effet, un stress hydrique modéré pendant un stade phénologique sensible, peut avoir un effet considérable sur le rendement par unité d'eau consommée (Katerji et al., 2000; Zhang et al., 1998).

## CONCLUSION

L'efficacité d'utilisation de l'eau permet d'évaluer le niveau d'efficacité technique des zones irriguées depuis la source d'eau jusqu'aux exploitations agricoles. La performance des réseaux de transport et de distribution d'eau est évaluée par l'intermédiaire des efficacités d'adduction et de distribution. Alors que l'efficacité d'irrigation à l'échelle de la parcelle permet d'évaluer la gestion de l'eau au niveau de l'exploitation agricole en estimant les pertes d'eau possibles dans le système d'irrigation et lors de l'apport d'eau à la culture.

Enfin, l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture indique l'efficacité du processus suivant lequel l'eau est consommée par la plante pour produire la biomasse.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASHRAF, M., BASHIR, A. 2003. Relationship of Photosynthetic Capacity at the Vegetative Stage and during Grain Development with Grain Yield of Two Hexaploid Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars Differing in Yield. *Eur. J. Agron.* 19: 277-287.
- BEN NOUNA, B., ZAÏRI, A., RUELLE, P., SLATNI, A., YACOUBI, S., AJMI, T., OUESLATI, T. 2004. Evaluation de la demande en eau et pilotage de l'irrigation déficitaire des cultures annuelles : méthodologie et outils de mesure. Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée, du 19 au 23 avril 2004. Rabat, Maroc.

- BOS, M.G. 1980. Irrigation Efficiencies at Crop Production Level. ICID Bulletin 29.2: 18-26. New Delhi.
- BOS, M.G., NUGTEREN, J. 1990. On Irrigation Efficiencies. Publication 19. 4th Edition 1990. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen. pp. 117.
- 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
- CHRISTIANSEN, J.E. 1942. Irrigation by Sprinkling. California Agricultural Experiment Station. Bulletin No. 670. Berkeley.
- CONDON, A.G., RICHARDS, R.A., REBETZKE, G.J., FARQUHAR, G.D. 2002. Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Science* 42, 122–131.
- COOPER, P.J. GREGORY, D. TULLY, H.C. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa *Experimental Agriculture*, 23, pp. 113–158.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. 1997. La petite irrigation dans les zones arides Principes et options. Collection FAO: développement. Rome
- 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
- FARAHANI, H., PETERSON, G., WESTFALL, D., SHERROD, L., AHUJA, L. 1998. Soil water storage in dryland cropping systems: the significance of cropping intensification. *Soil Science Society of America Journal* 62, 984-991.
- PETERSON, G.A., SCHLEGEL, A., TANAKA, D.L., JONES, O.R. 1996. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 180-186.
- GEERTS, S., RAES, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96 (2009) 1275–1284
- GEERTS, S., RAES, D., GARCIA, M., CONDORI, O., MAMANI, J., MIRANDA, R., CUSICANQUI, J., TABOADA, C., VACHER, J. 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? *Agr. Water Manage.* 95, 909–917.
- 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.

- HAMDY, A. 2005. Technical interventions to improve water use efficiency in irrigated agriculture. Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity. pp 63 – 70.
- HOWELL, T.A. 2003. Irrigation efficiency. pp. 467-472. In: B.A. Stewart and T.A. Howell (eds.) *Encyclopedia of Water Science*, Marcel-Dekker, Inc.
- HSIAO T.C. 1993. Effects of drought and elevated CO<sub>2</sub> 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, pp. 435-465.
- HSIAO, T. 2005. Systematic approach to the improvement of agricultural water use efficiency. Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity. pp 51 – 58.
- 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.
- IRMAK, S., ODHIAMBO, L.O, KRANZ, W.L and EISENHAEUER, D.E. 2011. Irrigation efficiency and uniformity and crop water use efficiency. 732.p. Institute of Agriculture and Natural Resources at the University of Nebraska-Lincoln.
- ISRAELSEN, O.W. 1932. *Irrigation Principles and Practices* (1st Edition). John Wiley, New York.
- KARAM, F., KARAA, K., TARABEY, N. 2005. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of some crops under semi-arid conditions of the Bekaa valley of Lebanon. Cahier Options méditerranéennes, Series B, n°57. Water Use Efficiency and Water Productivity pp139 – 154
- 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'efficacité 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
- KATERJI, N., VAN HOORM, J.W., HAMDY, A., MASTRORILLI, M., FARES, C., CECCARELLI, S., GRANDO, S., OWEIS, T. 2006. Classification and Salt Tolerance Analysis of Barley Varieties. *agriculture water management*, 85: 184-192

- 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.
- LOSAVIO, N., VENTRELLA, D., VONELLA, A.V. 1999. Consumi idrici, efficienza dell'uso dell'acqua e della conversione dell'energia in biomassa: parametri per valutare l'introduzione di nuove colture nell'ambiente mediterraneo. *Riv. Irr. e Dren.*, 46, 2: 34-38
- MOLDEN, D., OWEIS, T., STEDUTO, P., KIJNE, J.W., HANJRA, M., BENDRABAN, P. 2007. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: Molden, David, (Eds.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan; IWMI, London, UK; Colombo, Sri Lanka, pp. 485–514.
- MONTENY, E. A. 1970. Bilans hydriques et energetiques d'une culture de ble en region semi-aride. *Annales de l'Institut national de la recherche agronomique de Tunisie*. Vol.43-Fasc. 136p.
- MUSICK, J.T., JONES, O.R., STEWART, B., DUSEK, D.A. 1994. Water-yield relationship for irrigated and dryland wheat in the US southern plains. *Agron. J.*, 86: 980-986
- OWEIS, T. 1997. Supplemental irrigation: A highly efficient water-use practice. Aleppo, Syria: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
- 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. 64pp
- PEREIRA, L.S. 2005. Relating Water Productivity and Crop Evapotranspiration. Options méditerranéennes, Series B, n: 57 Water Use Efficiency and Water Productivity. Proceedings of 4th WASAMED Workshop. Edited by: Nicola Lamaddalena, Muhammad Shatanawi, Mladen Todorovic, Claudio Bogliotti, Rossella Albrizio.
- 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 pluviales et irriguées en Tunisie. *Cahiers Agricultures* vol. 14, n° 4.
- RINALDI, M., UBALDO, R. 2007. Spatial simulation of water use efficiency in a Mediterranean environment. In Lamaddalena N. (ed.), Bogliotti C. (ed.), Todorovic M. (ed.), Scardigno A. (ed.). *Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs [Vol. 1]*. Bari : CIHEAM. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 56 Vol.I. pages 121-141
- RINALDI, M., VENTRELLA, D., FORNARO F. 1996. Analisi di crescita, bilancio idrico e produzione di soia (*Glicine max* (L.) Merr.) in secondo raccolto dopo

- frumento duro (*Triticum durum* Desf.) sottoposta a due livelli di input agrotecnico. *Riv. di Agron.*, 30, 2: 160-167
- RITCHIE, J.T. 1983. Efficient water use in crop production: generality of relations between biomass production and evapotranspiration. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R. and Sinclair, T.R., eds, *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. American Society of Agronomy, Madison, 29–44.
- 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
- SADRAS, V., MCDONALD, G. 2012. *Water use efficiency of grain crops in Australia: principles, benchmarks and management*. Grains Research Development Corporation, Canberra.
- SARMA, A., SINGH, H., NANWAL, R.K. 2007. Effect of integrated nutrient management on productivity of wheat (*Triticum aestivum*) under limited and adequate irrigation supplies. *Indian J Agron.* 52 (2), 120-123.
- 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.)
- SINGH, A., AGGARWAL, N., SINGH, A., HUNDAL, R.K. 2012. Ways to Maximize the Water Use Efficiency in Field Crops – A review. *Greener Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 2 (4), pp. 108-129
- SOUTTER, M., MERMOUD, A., MUSY, A. 2007. *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,..pp
- STANGHELLINI, C., BUNCE, J.A. 1994. Response of photosynthesis and conductance to light, CO<sub>2</sub>, temperature and humidity in tomato plants acclimated to ambient and elevated CO<sub>2</sub>. *Photosynthetica* 29: 487-47
- 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. pp 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 pp 192 – 206)
- TARANTINO, E., RIVELLI, A.R., PERNIOLA, M., NARDIELLO, I. 1997. Efficienza nell'uso dell'acqua di alcune colture erbacee sottoposte a differenti regimi irrigui: valutazione a livello di pieno campo. Riv. di Irr. e Dren., 44, 1: 8-16.
- 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 pp 9–19.
- VAN DE GEIJN, S.C., GOUDRIAAN, J. 1996. The effects of elevated CO<sub>2</sub> 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., Jr. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Adv. Agron. 14:223-264.
- WOODWARD, F.I. 1993. Plant responses to past concentrations of CO<sub>2</sub>. Vegetation, 104/105: 145-155.
- YAZAR, A., SEZEN, S.M. 2006. Effects of full and deficit irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the arid southeast Anatolia region of Turkey. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Land and Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture, CD-rom.
- 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.
- ZWART, S.J., BASTIAANSEN, W.G.M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize. Agric. Water Manag. 69, 115–133