

Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) cultivé en conditions pluviales et irriguées en Tunisie

Mohsen Rezgui¹
Abdelaziz Zairi²
Essia Bizid³
Netij Ben Mechlia⁴

¹ Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat), Station de Boulifa, 7100 Kef, Tunisie
<rezguimohsen@yahoo.fr>

² Institut national de recherche en génie rural, eaux et forêts (INRGREF), BP n° 10, 2080 Ariana, Tunisie
<zairi.abdelaziz@iresa.agrinet.tn>

³ Faculté des sciences, Campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie
<bizid_essia@yahoo.fr>

⁴ Institut national agronomique de Tunisie (Inrat), 43, avenue Charles Nicolle 1082, Tunis, Tunisie
<netij.benmechlia@iresa.agrinet.tn>

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude de la consommation et de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez la variété de blé dur Karim cultivée en conditions pluviales et irriguées. À cet effet, des essais ont été conduits sur une période de sept années, dans cinq sites de bioclimats différents : Bou-Salem (subhumide), Essaida (semi-aride supérieur), Hendi Zitoun, Chébika et Sidi Ahmed Salah (semi-aride inférieur). Outre une condition pluviale (P), deux conditions irriguées (I1 et I2) reposant sur le bilan hydrique du sol et le niveau d'épuisement de la réserve utile (90 % et 60 % respectivement) ont été mises en place sur certains sites. En conditions pluviales (P), les quantités d'eau consommées par le blé varient, dans l'ensemble des sites entre 100 et 462 mm et les rendements en grains sont linéairement corrélés à la consommation en eau. Le seuil de consommation en eau, pour garantir une production de grains, s'établit autour d'une valeur de 210 mm. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie quant à elle entre 0,57 kg de grains/m³ d'eau dans le semi-aride inférieur et 1,19 kg/m³ dans le subhumide. En condition d'irrigation, la consommation en eau fluctue entre 250 et 616 mm et les rendements entre 11 et 81 q.ha⁻¹. Le rendement maximal est atteint pour une consommation en eau d'environ 400 mm. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie entre 0,99 et 1,66 kg de grains/m³. L'irrigation augmente sensiblement l'efficacité d'utilisation de l'eau comparativement au traitement pluvial et réduit sa variation interannuelle. Néanmoins, on observe la même tendance qu'en conditions pluviales quant à l'effet du climat.

Mots clés : Productions végétales ; Eau ; Agronomie.

Abstract

Consumption and water use efficiency of Durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under rainfed and irrigated conditions in Tunisia

The water use efficiency of Durum wheat (Karim variety) was investigated under rainfed conditions (P) and under two irrigated conditions (I1 and I2) in the regions of Bou-Salem, Essaida, Hendi Zitoun, Chébika and Sidi Ahmed Salah for seven years. Irrigation occurred when available water depletion reached 90% for treatment I1 and 60% for treatment I2. Water consumption in rainfed conditions varied from 100 to 462 mm in the different regions. A linear relationship between yield and consumption was obtained. However, durum wheat produced grain only when water consumption was greater than 210 mm. Water use efficiency (WUE_{net}) increased from 0.57 kg/m³ in the lower semi-arid to 1.19 kg/m³ in the subhumid climates. With irrigation, water consumption varied from 250 to 616 mm. Grain yield varied from 11 to 81 q/ha. However, the maximum yield was obtained with 400 mm. Globally WUE_{net} doubled, but the effect of irrigation varied between years and regions. The interannual variation is very important in semiarid environments.

Key words: Vegetal productions; Water; Agronomy.

Le terme efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) est généralement utilisé pour exprimer le rapport de la matière sèche totale produite à l'évapotranspiration pendant une période donnée [1]. Si cette période est spécifique au cycle cultural, on parle d'efficacité d'utilisation nette (EUE_{nette}); si elle s'étale durant toute l'année, on parle d'efficacité d'utilisation brute (EUE_{brute}) [2].

Lorsque la production considérée n'est pas la biomasse totale, mais une partie de celle-ci, telles que les grains ou les fruits, on parle alors d'efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement.

D'un point de vue économique, l'efficacité de l'eau est définie comme le rapport du rendement économique à la quantité d'eau utilisée [3]. L'EUE dépend de l'efficacité de transpiration (TE), de l'évaporation (Es) et de la transpiration (T) comme le montre la formule suivante [4] :

$$EUE = TE / (1 + Es/T)$$

Il a été démontré que l'efficacité de la transpiration chez les épis avec barbes est 2 ou 3 fois supérieure à celle des épis sans barbe au cours du remplissage des grains. De même, le poids sec des grains mûrs est supérieur chez le génotype avec barbes [5].

Pendant les premières phases de croissance de la plante, la fraction de l'évaporation est plus grande que la transpiration et dépend de l'humidité de la couche superficielle du sol. L'évaporation de l'eau du sol représente chez le blé 40 % de l'évapotranspiration [1]. Par ailleurs, liée à la surface du sol exposée aux radiations solaires, l'évaporation peut atteindre 50 % de l'évapotranspiration [6]. Pour tenir compte de l'humidité de surface et de la croissance de la plante, on introduit le coefficient cultural [7]. Actuellement, les modèles permettent de simuler l'évapotranspiration des cultures pour de larges gammes de conditions de sols et de climats [8].

Pour produire 1 kilo de grains, le blé a besoin de transpirer entre 500 et 1 000 litres d'eau, dont 200 à 400 litres entre l'anthèse et la maturité [9]. L'efficacité de l'eau dépend toutefois non seulement des caractéristiques biologiques propres à l'espèce [10], mais aussi de la durée de la saison de culture [9], de la fertilisation [11, 12], du rapport système racinaire sur partie aérienne [13] et de facteurs climatiques tels que le déficit de saturation de l'air [14]. En général, plus le climat est sec, plus le végétal consomme de l'eau pour synthétiser la même quantité de matière sèche. Sous climat médi-

terranéen, le déficit de saturation de l'air, faible en hiver, augmente sensiblement vers la fin du printemps [15].

Bien qu'elle soit en mesure de caractériser le comportement des plantes sous des conditions de stress, l'EUE ne permet pas de faire ressortir à elle seule les potentialités du comportement des différentes variétés vis-à-vis de la sécheresse ainsi que leur adaptation au déficit hydrique. En effet, l'aptitude des végétaux à produire en présence d'une contrainte hydrique n'est pas nécessairement liée à une efficacité d'utilisation de l'eau élevée [16]. Cela a été expliqué par l'efficacité d'absorption de l'humidité des couches profondes du sol. Ces plantes sont ainsi appelées « prodigues » par opposition à celles qui fonctionnent en mode « économie » [17].

Vu que les travaux sur l'EUE sont rares en Tunisie, nous avons jugé intéressant d'évaluer cette efficacité chez le blé dur, variété Karim, sous différents environnements.

Matériel et méthode

Sites expérimentaux

Les essais ont été menés en plein champ durant sept campagnes (1992/1993-1998/1999) dans différents sites (tableau 1).

Chaque site est caractérisé par la texture du sol, le bioclimat, la pluviométrie

moyenne annuelle et celle enregistrée durant le cycle cultural.

Protocole expérimental

Le semis est effectué, suivant les sites et les années, entre la troisième et la dernière semaine du mois de novembre. La densité de semis est de 350 grains/m² à Bou-Salem et Essaïda et de 400 grains/m² à Hendi Zitoun, Chebika et Sidi Ahmed Salah [18]. La fumure est apportée sous forme de superphosphate 45 % à raison de 180 kg.ha⁻¹ et d'ammonitrate 33,5 %, fractionnée comme suit : 100 kg.ha⁻¹ à la levée, 150 kg.ha⁻¹ au tallage et 150 kg.ha⁻¹ à la montaison.

Les essais sont conduits sur des parcelles de 1 hectare. Outre un traitement pluvial (P), deux traitements irrigués (I1 et I2) ont été mis en place sur certains sites. La méthode de pilotage des irrigations repose sur le suivi de l'humidité du sol et le calcul du bilan hydrique. L'évapotranspiration réelle (ETR) est déterminée comme suit :

$$ETR = \text{Pluie} + \text{Irrigation} + \Delta \text{Stock}$$

Le stock d'eau est déterminé tous les quinze jours par méthode gravimétrique sur une profondeur de 105 cm, avec un pas d'échantillonnage de 15 cm. La densité apparente du sol a été déterminée au niveau de chaque site dès la mise en place de l'essai [19]. Étant donné que les parcelles se trouvent sur des terrains dont la pente est inférieure à 2 % et que la nappe est loin de la surface du sol, le drainage et le ruissellement sont négligés.

Tableau 1. Bioclimats et pluviométries des sites d'essai.

Table 1. Soil texture, bioclimates, and rainfall of the experimental locations.

Sites	Bou-Salem	Essaïda	H.Zitoun	Chebika	S.A.Salah
Texture du sol	Argileuse	Limono - Argileuse	Argilo - Limoneuse	Argilo - Limoneuse	Argileuse
Etage bioclima.	S.H.	S.A.S.	S.A.I.	S.A.I.	S.A.I.
Pluv. moy. (mm)	450	420	320	325	347
1992/93	302,0	248,2	213,9	177,0	269,1
1993/94	334,5	130,0	69,5	139,0	139,5
1994/95	245,0	167,0	28,4	11,2	11,5
1995/96	472,0	595,2	236,6	224,8	264,5
1996/97	-	227,0	128,2	100,0	214,7
1997/98	-	296,0	83,8	115,0	211,2
1998/99	-	362,0	153,6	126,0	239,0
Moyenne	313,4	28,3	130,6	127,6	192,8
CV (%)	35,1	53,7	50,2	52,1	47,2

S.H. : subhumide ; S.A.S : semi-aride supérieur ; S.A.I. : semi-aride inférieur.

Des niveaux seuils de la réserve en eau du sol sont adoptés pour déclencher l'irrigation. Le traitement P correspond au régime pluvial. Les parcelles correspondant au traitement I1 sont irriguées lorsque 90 % de la réserve utile (RU) est épuisée alors que celles correspondant au traitement I2 sont irriguées lorsque 60 % de la RU est épuisée. Pour éviter les chevauchements au cours de l'irrigation, les traitements sont séparés par des bandes de 5 m de largeur. Pour atténuer la variabilité liée à la nature du sol et à l'irrigation, chaque traitement hydrique est représenté par trois profils hydriques. Malgré ses limites, la méthode gravimétrique reste la moins chère, la plus pratique et constitue une méthode de référence utilisable pour standardiser les autres méthodes [20].

Mesure du rendement et de l'efficacité d'utilisation de l'eau

Trois placettes d'observation d'un mètre carré chacune sont installées sur les différentes parcelles élémentaires pour estimer le rendement et ses composantes. La délimitation des placettes dès la levée permet d'éviter le piétinement au cours des opérations culturales et des mesures. L'efficacité d'utilisation nette, EUE_{nette} , exprimée en $kg.m^{-3}$ est déterminée par le rapport rendement en grains/consommation nette au cours du cycle. La consommation nette de la culture est déduite du calcul du bilan hydrique du sol. Ainsi, chaque traitement est représenté par trois profils hydriques au semis (stock initial) et à la récolte (stock final).

Résultats et discussion

Conditions générales de l'essai

Le *tableau 1* donne les quantités de pluie enregistrées pendant les cycles culturaux sur les différents sites d'essai. L'année agricole la plus sèche est 1994-1995, année au cours de laquelle est enregistrée une pluviométrie voisine de 11 mm à Chébika et à Sidi Ahmed Salah durant le cycle cultural. L'année agricole la plus pluvieuse est 1995-1996 avec des pluviométries dépassant parfois 450 mm.

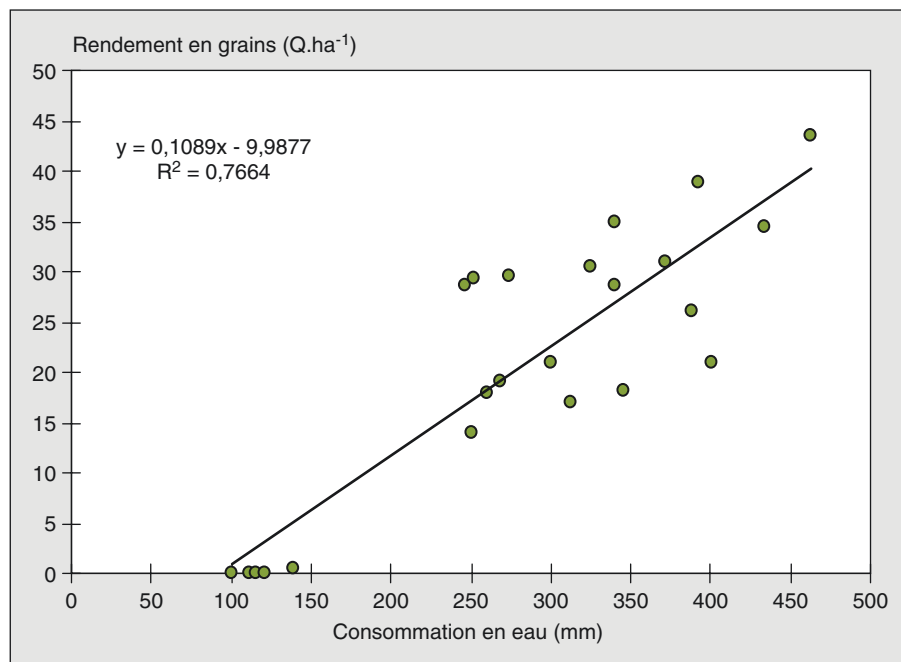


Figure 1. Variation du rendement en grains en fonction de la consommation en eau en conditions pluviales (P) dans les sites étudiés.

Figure 1. Relationship of grain yield to water consumption in different locations under rainfed conditions (P).

Consommation en eau et rendement en grains

En conditions pluviales (P), les quantités d'eau consommées dans les cinq sites varient entre 100 et 462 mm (*figure 1*). Celles qui sont à l'origine d'une production en grains sont généralement supérieures à 240 mm.

Les rendements en grains (Y) sont linéairement corrélés aux quantités d'eau réellement consommées durant le cycle cultural (ETR) :

$$Y = 0,109 \text{ ETR} - 9,99 \quad (r^2 = 0,77)$$

Le *tableau 2*, représentant la tendance générale de la distribution des rendements par classe de consommation, montre que le supplément de rendement diminue si la consommation en eau augmente. Il s'ensuit que le rendement est moins lié à la consommation lorsque celle-ci est supérieure à 400 mm.

En conditions d'irrigation, la consommation en eau est comprise entre 250 et 616 mm (*figure 2*). Exceptionnellement, un rendement moyen de 81 q.ha^{-1} est observé sous I2. Le *tableau 3* montre qu'on peut obtenir un rendement de 30 q.ha^{-1} moyennant une consommation en eau voisine de 250 mm. En outre, des rendements supérieurs à 50 q.ha^{-1} sont obtenus moyennant une consommation de 400 mm.

Les résultats montrent que le supplément de rendement est plus élevé en conditions d'irrigation qu'en conditions pluviales. Cela semble démontrer une amélioration de l'EUE suite à l'irrigation.)

La relation entre rendement en grains et consommation en eau révèle que dans la majorité des sites un rendement de 60 q.ha^{-1} peut être obtenu pour une consommation d'environ 450 mm. La *figure 2* confirme que la plupart des ren-

Tableau 2. Distribution des rendements par classe de consommation en conditions pluviales.

Table 2. Yields distribution by consumption class in rainfall conditions.

Consommation (mm)	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500	500-550
Rendement (q.ha^{-1})	14-22	22-28	28-34	34-38	38-41	43-45
Supplément de rendement (q.ha^{-1})	8	6	6	4	3	2

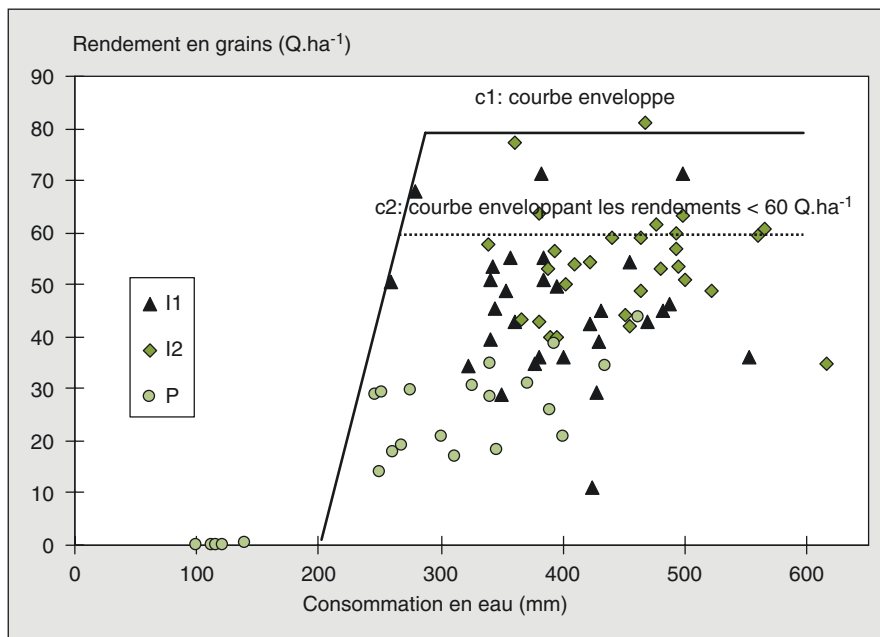


Figure 2. Variation du rendement en grains en fonction de la consommation en eau sous différents régimes hydriques et dans les sites étudiés.

Figure 2. Relationship of grain yield to water consumption under different water treatments and locations.

Tableau 3. Distribution des rendements par classe de consommation en conditions d'irrigation.

Table 3. Yields distribution by consumption class in irrigated conditions.

Consommation (mm)	250-300	300-350	350-400	400-450	450-500	> 550
Rend. moyen (q ha ⁻¹)	30-40	40-46	46-51	51-56	56-60	56-60
Supplément de rend. (q ha ⁻¹)	-	10	6	6	5	4

dements sont observés au-dessous de la courbe enveloppe c2 (plateau de rendement). La quantité d'eau consommée semble représenter l'évapotranspiration réelle maximum de la plante. Quant au rendement maximum, il peut être attribué à la variété, aux conditions environnementales et à la précision de la méthode de calcul du bilan hydrique [19]. Exceptionnellement, des rendements supérieurs à 60 q.ha⁻¹ sont obtenus pour des conditions climatiques favorables. Par ailleurs, le plateau de rendement en conditions pluviales se situe à 30 q.ha⁻¹ correspondant à une consommation en eau de l'ordre de 300 mm [21].

Les résultats des essais montrent aussi que le blé ne peut produire de grains qu'au-delà de 210 mm. Ces résultats corroborent les travaux [22] qui montrent que la limite inférieure de production en grains se situe à un niveau de consommation en eau de l'ordre de 208 mm. Dans les conditions de l'essai, des rendements supérieurs à 30 q.ha⁻¹ sont obtenus généralement à partir d'une consommation de 300 mm (figure 2).

Pour étudier l'effet de l'environnement sur la relation consommation en eau-rendement, nous avons utilisé l'équation de Stewart [23], généralisée ultérieurement [24] entre la baisse du rendement relatif (1-Ya/Ym) et le déficit de l'évapotranspiration relative (1-ETa/ETm) :

$$(1-Ya/Ym) = Ky(1-ETa/ETm)$$

Où :

- Ya = rendement sous conditions de déficit hydrique ;
- Ym = rendement maximal (obtenu ici dans le traitement I2) ;
- ETm = évapotranspiration maximale ;
- ETa = évapotranspiration actuelle ;
- Ky = coefficient reliant la baisse du rendement relatif au déficit de l'évapotranspiration relative.

Les résultats montrent que le coefficient Ky obtenu sur l'ensemble des sites est de 1,4 (figure 3). Ce coefficient varie suivant les sites entre 0,77 à Bou-Salem et 1,92 à Chébika. On remarque aussi que Ky est plus faible sous climat subhumide qu'en milieu semi-aride. La valeur moyenne de Ky semble être relativement élevée comparativement aux valeurs rapportées par Doorenboss et [24] et Baird *et al.* [25] chez le blé de printemps (Ky = 1,16). La différence pourrait être attribuée non seulement aux conditions environnementales mais aussi à la variété.

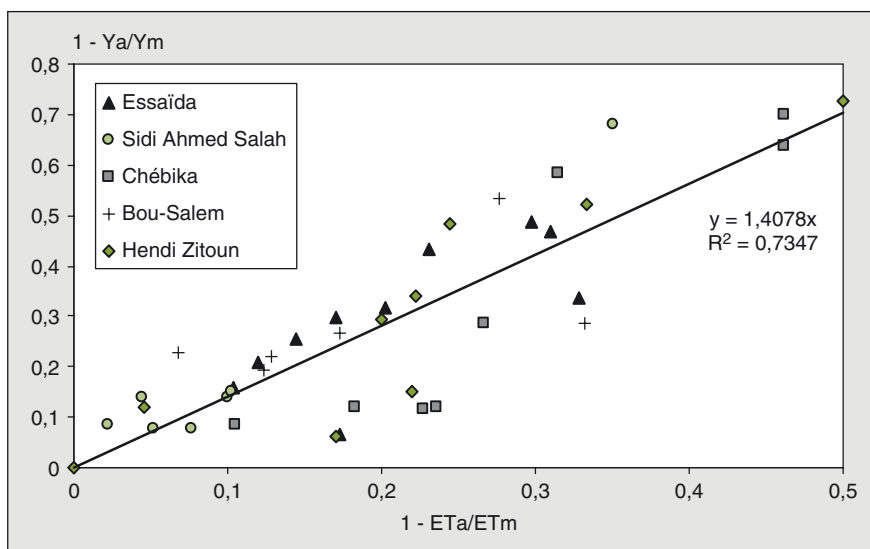


Figure 3. Variation de la baisse du rendement relatif en fonction du déficit de l'évapotranspiration relative à Essaïda, Sidi Ahmed Salah, Chébika, Bou-Salem et Hendi Zitoun.

Figure 3. Relationship of relative yield reduction to relative evapotranspiration deficit in Essaïda, Sidi Ahmed Salah, Chébika, Bou-Salem, and Hendi Zitoun.

Tableau 4. Moyenne et variation de l'efficacité d'utilisation de l'eau nette sous les différents traitements hydriques et dans les différents sites d'essai.

Table 4. Average net water use efficiency and variation under different water regimes and locations.

Site	EUE _{nette}			Moy.	Coef. de variation		
	I2	I1	P		I2	I1	P
Bou-Salem	1,39	1,22	1,19	1,27	22,1	19,2	26,3
Essaida	1,19	1,14	0,94	1,09	8,8	18,8	15,5
Chébika	1,36	1,66	0,90	1,31	21,2	26,5	26,3
Hendi Zitoun	1,20	1,15	0,70	1,02	13,6	24,7	19,6
Sidi Ahmed Salah	1,05	0,99	0,57	0,87	11,5	11,2	14,2
Moyenne	1,24	1,23	0,86				
C V (%)	11,2	18,4	24,8				

PPDS (5 %) : site = 0,202 ; traitement = 0,139 ; interaction = 0,312.

Efficacité d'utilisation de l'eau

Le *tableau 4* regroupe les valeurs moyennes annuelles d'efficacité d'utilisation de l'eau nette (EUE_{nette}) pour les différents sites d'essai. On observe une augmentation significative (PPDS = 0,139) de ce paramètre avec la disponibilité en eau. En conditions d'irrigation, l'EUE dépasse généralement l'unité qui est la valeur recommandée par les bulletins de la FAO, pour des rendements de blé situés entre 40 et 60 q.ha⁻¹ [24].

En effet, l'irrigation permet une levée précoce et une couverture rapide du sol, diminuant l'évaporation de l'eau du sol et augmentant l'EUE_{nette}. Cela s'exprime d'autant plus que la variété a une vitesse de mise en place du système foliaire très rapide [26]. En effet, l'évaporation de l'eau du sol sous climat méditerranéen représente chez le blé 40 % de l'évapotranspiration [1].

Une diminution de l'EUE est observée à Chébika lorsqu'on passe de I1 à I2, avec des coefficients de variation plus élevés que dans les autres sites. Cela peut être attribué à la verse [27], ou à l'effet de l'état hydrique du sol sur la mise en place et la durée de vie des racines. En effet, il a été signalé qu'un déficit hydrique limité dans le temps peut avoir pour effet un maintien, voire une augmentation momentanée, de la vitesse d'allongement racinaire, ainsi que l'apparition de nouvelles racines [28]. Une variation hautement significative de l'EUE_{nette} est notée entre les différents sites (PPDS = 0,202). De même, on observe une interaction site*traitement hydrique significative (PPDS = 0,312). La valeur de l'EUE_{nette} la plus élevée est observée sous I1 à Chébika (1,66).

Cependant, dans les autres sites, l'EUE_{nette} la plus élevée est observée sous I2. La valeur moyenne la plus faible (0,57) est enregistrée en conditions pluviales à Sidi Ahmed Salah. Dans ce dernier site, l'efficacité demeure relativement faible malgré une nette amélioration de l'ordre de 74 % sous I1 et de 84 % sous I2 par rapport au pluvial (P). Ces faibles valeurs d'efficacité chez le blé semblent être attribuables aux gelées. Le déficit de saturation hydrique de l'air [14], ainsi que l'occurrence de gelées [29] pourraient être à l'origine de ces variations.

Plusieurs auteurs ont montré que le rendement est linéairement corrélé à la consommation en eau. En cas de contrainte hydrique modérée, l'EUE est plus liée au rendement en grains qu'à la consommation en eau (*figure 4*). Cette relation devient d'autant plus faible lorsqu'on passe du traitement pluvial au traitement le plus arrosé. La *figure 4a* montre que, lorsque la consommation est de l'ordre de 400 mm, l'EUE_{nette} peut varier du simple au triple, alors que cette même variation de l'EUE est obtenue lorsque le rendement en grains passe de 30 à 60 q.ha⁻¹ (*figure 4d*). Il semble qu'en conditions de déficit hydrique, la fermeture stomatique affecte davantage la transpiration que la photosynthèse [30]. Il en résulte une plus grande variation de la consommation en eau par rapport au rendement en grains.

En ce qui concerne l'efficacité intersite, on remarque que le coefficient de variation reste faible lorsqu'il s'agit du traitement le plus arrosé (I2). Dans ce cas, la variation d'EUE (CV = 4 %) est essentiellement imputable à la variation des rendements entre les sites (CV = 10,8).

Choix d'une conduite d'irrigation en conditions de déficit hydrique

Les résultats des essais montrent que l'EUE_{nette} est maximale lorsque la consommation est généralement comprise entre 350 et 450 mm et les rendements supérieurs à 40 q.ha⁻¹. L'EUE_{nette} dépend non seulement de la quantité d'eau disponible pour la plante mais surtout de la période d'apport et des conditions pédoclimatiques, le rendement en grains étant largement conditionné par le rationnement de l'irrigation pendant la phase de maturation. À Chébika, l'irrigation s'est montrée plus efficace que I2. Il est donc recommandé, sur ce site, d'irriguer lorsque la réserve du sol est proche de 10 % RU ce qui permet de mieux valoriser l'eau, d'augmenter les superficies irriguées et d'augmenter par conséquent la production. L'amélioration de l'EUE_{nette} à l'échelle de la parcelle est conditionnée par l'objectif de rendement. Ce dernier tient compte, outre le facteur eau, des conditions pédoclimatiques. En Tunisie, si on vise un rendement compris entre 40 et 60 q.ha⁻¹, l'application d'eau est plus efficace lorsque le déficit hydrique du sol est compris entre 60 et 90 % RU. Il est donc recommandé de rechercher le rendement optimal dans cette plage.

Conclusion

En conditions pluviales (P), les quantités d'eau consommées par le blé dans l'ensemble des sites varient entre 100 et 462 mm et les rendements en grains sont linéairement corrélés à cette consommation. Néanmoins, les résultats montrent que le seuil de consommation en eau pour garantir une production de grains, s'établit autour de 210 mm. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie aussi entre une moyenne interannuelle de 0,57 kilo de grains/m³ d'eau, obtenue en zone semi-aride inférieure et de 1,19 kg.m⁻³ en zone subhumide avec un coefficient de variation compris entre 14 et 26 %.

En irrigué, la consommation en eau fluctue entre 250 et 616 mm pour des rendements variables entre 11 et 81 q.ha⁻¹. L'EUE_{nette} augmente sensiblement par rapport au pluvial avec une baisse nette de la variation interannuelle. Néanmoins, on observe la même tendance qu'en pluvial quant à l'effet du climat (variation

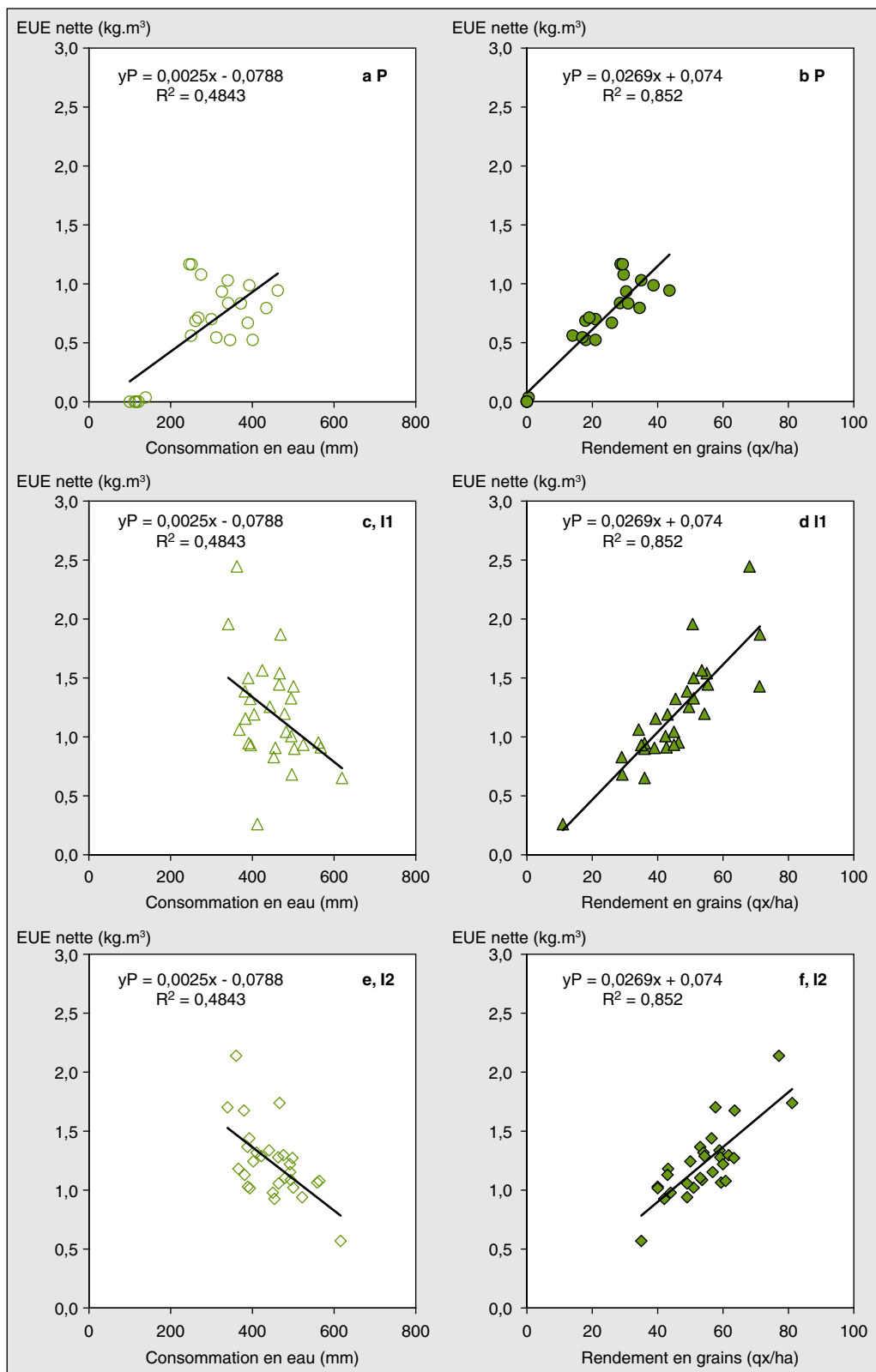


Figure 4. Variation de l'efficacité d'utilisation de l'eau nette (EUE nette) en fonction de la consommation en eau (a, c, e) et du rendement en grains (b, d, f) en conditions pluviales (P) et en conditions d'irrigation (I1 et I2).

Figure 4. Relationship of net water use efficiency to water consumption (a, c, e) and grain yield (b, d, f) under rainfed (P) and irrigated conditions (I1 et I2).

interannuelle plus importante en milieu semi-aride). À Chebika, l'EUE_{nette} est plus élevée sous I1 (déficit de 90 % RU) que sous I2. Toutefois, dans les autres sites, l'application d'eau est généralement plus efficace lorsque le déficit hydrique du sol est proche de 60 % RU (I2). Il est donc recommandé de rechercher dans cette plage le rendement optimal pour chaque environnement.

L'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la parcelle est conditionnée par l'objectif de rendement. Si on vise un rendement compris entre 40 et 60 q.ha⁻¹, l'efficacité d'utilisation de l'eau diminue généralement en année pluvieuse dans les régions semi-arides supérieures et subhumides. En année particulièrement sèche, elle peut augmenter en même temps que le rendement, avec l'irrigation. ■

Remerciements

Nous remercions vivement Messieurs Kalboussi Rabeh (ingénieur au CRDA-Kairouan) et Rafik Hayouni (ingénieur au CRDA-Kef) pour leurs aides précieuses au cours de l'installation et le suivi des essais.

Références

- Richards RA, Rebetzke GJ, Condon AG, Van Herwaarden AF. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci* 2002 ; 42 : 111-21.
- Bos MG. Summary of ICID definitions on irrigation efficiencies. In : *Les besoins en eau des cultures*. Conférence internationale, Paris, 11-14 septembre 1984. Paris : Institut national de la recherche agronomique (Inra), 1985 : 889-99.
- Gardner FP, Pearce RB, Michell RL. *Physiology of crop plants*. Ames (Iowa, États-Unis) : Iowa State University Press, 1985 ; 336 p.
- Richards RA. Crop improvement for temperate Australia : future opportunities. *Field Crop Res* 1991 ; 26 : 141-96.
- Bort J, Febrero A, Amaro T, Araus JL. Role of awns in ear Water-Use Efficiency and grains weight in barley. *Agronomie* 1994 ; 2 : 133-9.
- Acevedo E, Silva P, Silva H. Wheat growth and physiology. In : Curtis BC ; Rajaram S, MacPherson HG, eds. *Bread wheat : improvement and production*. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO), 2002 : 39-70.
- Jensen ME, Robb DC, Franzoy CE. Scheduling irrigation using climate-crop-soil data. *J Irrig Drain* 1970 ; 96 : 25-8.
- Hatfield JL. Methods of estimating evapotranspiration. In : Stewart BA, Nielson DR, eds. *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy Monograph 30. Madison (Wisconsin, États-Unis) : American Society of Agronomy (ASA), 1990 : 323-42.
- Rawson MH, MacPherson HG. Water use efficiency. In : *Irrigated wheat*. Rome : Food and Agriculture Organization (FAO), 2000 : 96 p.
- Thomas AB, Fukai S. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in Southeast Queensland. I. Light interception crop growth and grain yield. *Aust J Agric Res* 1995 ; 46 : 17-33.
- Farquhar GD, Richards RA. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. *Aust J Plant Physiol* 1984 ; 11 : 539-52.
- Brück H, Waayene WA, Sattelmacher B. Effects of phosphorus and water supply on yield, Transpirational water-use efficiency and carbon isotope discrimination of Pearl millet. *Crop Sci* 2000 ; 40 : 120-5.
- Steduto P. Water use efficiency. In : Pereira LS, et al., eds. *Sustainability of irrigated Agriculture*. Dordrecht (Pays-Bas) ; Boston (États-Unis) : Kluwer Academic Publishers, 1996 : 193-209.
- Stanhill G. Water Use Efficiency. *Advances in Agronomy* 1986 ; 39 : 53-85.
- Cooper PJM, Gregory PJ, Tully D, Harris H. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of west Asia and North Africa. *Exp Agric* 1987 ; 23 : 113-58.
- Levitt J. *Response of plants to environmental stress. Vol II Water, radiation, salt and other stresses*. 2nd ed. New York ; London ; Sydney ; San Francisco : Academic Press, 1980 : 25-229.
- Passioura JB. The control of water movement through plants. In : Wardlaw IF, Passioura JB, eds. *Transport and transfer processes in plant*. New York : Academic Press, 1982 : 373-80.
- Ministère de l'Agriculture de Tunisie. CCDA-Projet d'appui au programme National d'irrigation d'appoint des céréales (PNUD/FAO/TUN 86/014). *Paquet technologique, Régions du Nord-Régions du Centre*. Tunis : Ministère de l'Agriculture, 1989 ; 30 p.
- Rezgui M. *Réponses écophysiological et agronomiques à la contrainte hydrique de trois variétés de blé dur cultivées dans trois régions pédoclimatiques différentes*. DEA université de Tunis II, faculté des sciences de Tunis, 1995, 76 p.
- Katerji N. Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. In : Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds. *L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau*. Universités Francophones. Paris : Aupelf-Uref ; Inra éditions, 1997 : 169-77.
- French RJ, Schultz JE. Water-use efficiency in a Mediterranean type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Aust J Agr Res* 1984 ; 35 : 743-64.
- Musick JT, Jones OR, Stewart B, Dusek DA. Water-yield relationship for irrigated and dryland wheat in the US Southern plains. *Agron J* 1994 ; 86 : 980-6.
- Stewart JI. Optimising production through control of water and salinity levels in the soil. *Utah Water Lab Tech Rep* 1977 ; 151 : 1-191.
- Doorenboss J, Kassam AN. Yield response to water. Irrigation and drainage, Paper N° 33. Rome : Food and Agriculture Organization (FAO), 1979 ; 193 p.
- Baird JR, Gallagher JN, Reid JB. Modelling the influence of flood irrigation on wheat and barley yields, a comparison of nine different models. *Advances in Irrigation* 1987 ; 4 : 243-306.
- Thomas AB, Fukai S. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast Queensland. III. Water Use Efficiency, Transpiration Efficiency and soil evaporation. *Aust J Agric Res* 1995 ; 46 : 49-60.
- Rezgui M, Ben Meçhia N, Bizid E, Kalboussi R, Hayouni R. Étude de la stabilité du rendement de blé dur dans différentes régions de la Tunisie. In : L'amélioration du blé dur dans la région méditerranéenne : nouveaux défis. *Options méditerranéennes, Sér A : Séminaires Méditerranéennes* 2000 ; (40) : 167-72.
- Pagès L, Bruckler L, Pellerin S, Lafolie F. Architecture racinaire et absorption hydrique. In : Riou C, Bonhomme R, Chassin P, Neveu A, Papy F, eds. *L'eau dans l'espace rural, production végétale et qualité de l'eau*. Universités Francophones. Paris : Aupelf-Uref ; Inra éditions, 1997 : 61-84.
- Hirth JR, Haines PJ, Ridley AM, Wilson KF. Lucerne in crop rotations on the riverine plains 2. Biomass and grain yields, water use efficiency, soil nitrogen and profitability. *Aust J Agr Res* 2001 ; 52 : 279-93.
- Riou C. L'eau et la production végétale. *Sécheresse* 1993 ; 4 : 75-83.