

Effets d'un stress hydrique sur les rendements de deux écotypes locaux de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

Leila Radhouane
Hafedh Jamil Mellouli

Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat),
Rue Hédi Karray,
2049 Ariana
Tunisie
<radhouane.leila@iresa.agrinet.tn>
<mellouli.hafedhjamil@iresa.agrinet.tn>

Résumé

L'irrigation déficitaire est l'un des moyens permettant l'économie d'eau dans les régions à ressources hydriques limitées, sans toutefois pénaliser les rendements des cultures. L'efficacité de cette approche peut être testée en établissant de façon expérimentale la relation eau-rendement. Ces paramètres ont été déterminés sous trois régimes d'apport d'eau titrant 1 g de sel/L (40, 70 et 100 % évapotranspiration maximale sans aucun stress, ETM) pour deux écotypes locaux du mil en Tunisie (Djerba : DJ ; et Kairouan : KN). Les consommations maximales en eau, calculées par la méthode du bilan hydrique du sol, ont été de 497 mm et 562 mm respectivement pour les écotypes DJ et KN. Ces consommations sont significativement réduites respectivement par les régimes hydriques 70 % ETM et 40 % ETM de 25 et 58 % pour l'écotype DJ et de 29 et 57 % pour l'écotype KN. Il en est résulté une différence de rendement (grains et paille) non significative entre les deux écotypes au seuil de 5 %. En outre, une légère perte de rendement a été constatée par rapport aux témoins conduits à l'ETM, ce qui donne lieu à des coefficients de réponse des rendements à l'eau (Ky) proches de l'unité. La résistance au stress hydrique des deux écotypes étudiés est ainsi démontrée. Les résultats de ce travail montrent que le millet peut occuper une place de choix dans un contexte de ressources en eau limitées.

Mots clés : *Pennisetum glaucum* ; stress dû à la sécheresse ; rendement.

Thèmes : productions végétales ; physiologie ; eau.

Abstract

Yield responses of two local ecotypes of Pear Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) under water stress

Deficit or regulated deficit irrigation is one way of saving water in regions with limited water resources, without negatively affecting crop yields. The effectiveness of this approach can be assessed using coefficients of yield responses to water supply. For the purpose of this study, this parameter was monitored using 1g of salt/L of irrigation water, under 3 levels of water supply (40, 70, and 100% ETM) applied to 2 local ecotypes of millet available in Tunisia (Djerba, DJ; and Kairouan, KN). The results showed that the maximum crop water consumptions (ETM) were 497mm and 562mm for ecotypes DJ and KN, respectively. Under the 70% ETM and 40% ETM irrigation regime, crop water consumption was significantly reduced, by 25 and 58% respectively for ecotype DJ, and by 29 and 57% respectively for ecotype KN. The yield reduction obtained was slightly less than that observed under unrestricted water conditions, and with no significant difference between the 2 ecotypes. As a consequence, a yield response factor (Ky) close to 1 was adjusted. This shows the capability of the two millet ecotypes to cope with water scarcity and confirms the importance of pear millet in regions with limited water resources.

Key words: *Pennisetum glaucum*; water stress; yields.

Subjects: vegetal productions; physiology; water.

La rareté des eaux douces et l'utilisation concurrentielle que font les divers secteurs économiques de cette ressource, en particulier sur la rive sud du Bassin méditerranéen (FAO, 1994 ; Gadelle, 1995) implique une utilisation efficiente et raisonnée ; cette nécessité en fait l'un des principaux objectifs de la gestion intégrée des ressources hydriques en Tunisie (Khanfir *et al.*, 1998 ; DGBGTH, 2001). Cet objectif pourrait être atteint par la rationalisation de la demande en eau et l'optimisation de son utilisation. De ce fait, il est nécessaire de connaître les réponses des rendements des cultures à l'eau, c'est-à-dire leurs consommations ainsi que les rendements escomptés sous différentes conditions d'alimentation hydrique (Doorenbos et Kassam, 1980 ; FAO, 2002).

L'irrigation déficitaire raisonnée (IDR) est une stratégie qui permet, en maintenant la culture sous un certain niveau de déficit hydrique durant une période particulière (ou durant tout son cycle végétatif), d'obtenir une réduction du rendement non significative par rapport à celui de la même culture conduite en conditions d'eau non restrictives. Cette technique réduit les coûts de production et augmente substantiellement les revenus de l'agriculteur (FAO, 2002). Certains travaux ont montré qu'elle permettrait des économies d'eau liées surtout à une réduction de la transpiration pouvant atteindre 50 % (Boland *et al.*, 1993) et également à des mécanismes écophysologiques d'adaptation au stress hydrique (Mitchell *et al.*, 1984 ; Turner, 1986 ; Baldy *et al.*, 1993). Ainsi, l'économie d'eau réalisée permettrait d'irriguer d'autres cultures ou de surmonter soit la rareté des ressources en eau, soit une sécheresse pénalisant les rendements quantitatifs.

En Tunisie, le mil ne constitue pas l'alimentation de base des populations rurales comme dans d'autres pays d'Afrique. Pourtant, il occupe une part très importante des surfaces mises en culture chaque année au centre et au sud du pays. En raison de sa valeur nutritionnelle (Cournac *et al.*, 1993), cette espèce sert à la fois à l'alimentation humaine et animale.

En outre, le mil est une culture estivale conduite en irrigué. Or, en Tunisie, et particulièrement au sud, les ressources en eau sont de plus en plus rares, ce qui fait que la sélection de génotypes basée sur les caractéristiques physiologiques de tolérance à la sécheresse reste parmi les moyens les plus efficaces de lutte contre ce stress abiotique. L'étude des mécanis-

mes d'adaptation des plantes à la sécheresse et l'identification des gènes impliqués a pour but l'obtention de plantes capables de produire dans des situations de manque d'eau modéré. Afin d'optimiser l'usage de l'eau, il est d'une grande importance d'identifier les réponses du rendement à l'eau. Les références bibliographiques relatives à cette espèce sous stress hydrique étant quasi inexistantes, particulièrement en climat méditerranéen, nous avons fait appel à deux écotypes locaux de mil (Djerba (DJ) et Kairouan (KN)) les plus représentés en Tunisie, et pour lesquels nous avons cherché à établir la réponse des rendements à l'eau.

Matériel et méthode

Site expérimental

L'expérimentation a été conduite en 2002 au domaine expérimental de l'Institut national de la recherche agronomique de Tunisie (Inrat), à Tunis. Le sol est d'apport alluvial ; il est profond, homogène et de texture argileuse, avec une teneur en éléments fins supérieure à 70 %. Les teneurs en eau du sol à la capacité au champ (pF 2,7) sont de $0,394 \pm 0,008$; $0,411 \pm 0,007$ et $0,418 \pm 0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivement pour les horizons 0-30 cm, 30-60 cm et 60-130 cm, alors que les humidités au point de flétrissement permanent (pF 4,2) sont de $0,239 \pm 0,006 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour l'horizon de surface et de $0,245 \pm 0,010$ et $0,245 \pm 0,014 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pour les deux autres.

Matériel végétal

L'étude a porté sur deux écotypes locaux de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), originaires de deux milieux écologiques arides de Tunisie, Djerba (DJ) et Kairouan (KN). Les principales caractéristiques de ces deux écotypes sont les suivantes (Radhouane *et al.*, 2003) :

- KN est vigoureux, présente des tiges rigides, hautes de plus de 2 m, avec beaucoup d'entre-nœuds (supérieur à 10) ; ses chandelles sont très longues, bien garnies, lourdes et assez productives ;
- DJ est de petite taille (inférieur à 2 m), possède des tiges moins rigides et plus fines, avec un nombre d'entre-nœuds inférieur à 9 ; ses chandelles sont plus courtes et moins productives que celles de KN.

Dispositif expérimental

Chaque écotype a été soumis à trois régimes hydriques (100, 70 et 40 % évapo-

transpiration maximale sans aucun stress, ETM), désignés respectivement par T_{100} , T_{70} et T_{40} , l'eau d'irrigation titrant 1 g de sel/L (ETM étant égale à 580 mm). Chaque parcelle élémentaire (pour une répétition donnée) couvre 4 m^2 et est entourée dans toutes les directions de 3 m de bordure. Le semis a été réalisé le 20 juin 2002 à raison de 20 plants/ m^2 .

Le dispositif expérimental est un *split-plot* ou traitement à parcelles subdivisées, avec le régime hydrique (les traitements) comme facteur principal et les écotypes comme facteur secondaire. Le schéma statistique a été appliqué avec trois répétitions. La mise en évidence des différences significatives entre les traitements a été réalisée au moyen du test de Newman-Keuls au seuil de 5 % de probabilité.

Irrigation

En adoptant les valeurs de l'évapotranspiration de référence mesurées à la station de Tunis au niveau des cases lysimétriques (Damagniez *et al.*, 1962 ; De Villele, 1965) et celles des coefficients culturaux déterminés selon la méthode de la FAO (Allen *et al.*, 1998), nous avons estimé les besoins théoriques en eau (ETM) à 580 mm afin de piloter les irrigations.

Compte tenu des caractéristiques physiques du sol, les irrigations par submersion ont été apportées avec la même fréquence (10 jours au début, puis une semaine), à des doses différentes selon le régime hydrique adopté : 2 irrigations de 26 mm chacune pour tous les traitements ; ensuite 7 irrigations successives de doses 75, 52 et 26 mm ont été effectuées respectivement pour les traitements 100, 70 et 40 % ETM. Les apports d'eau ont été réalisés à l'aide de réservoirs gradués. Pendant toute la durée de l'expérimentation, le sol a été maintenu à sa capacité de rétention dans le cas du traitement T_{100} . Durant l'essai, on a enregistré 18,9 mm de pluie répartie comme suit : une de 7,1 mm, deux de 2,5 mm, et sept ayant des quantités négligeables allant de 0,2 à 1,5 mm.

Évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration (ETR) peut être évaluée en déterminant le « bilan hydrique » du sol dont les différents termes sont liés par l'équation suivante (Katerji *et al.*, 1984 ; Vachaud *et al.*, 1991) :

$$ETR = (P + I - R) - \Delta Sr - D \quad (1)$$

Où :

– ETR, P et I sont respectivement l'évapotranspiration réelle, les pluies et l'irrigation pendant un intervalle de temps (ΔT) compris entre t et t + Δt ;

– R : le ruissellement, qui est nul, compte tenu du système d'irrigation par bassin appliqué dans ce travail ;

– ΔS_r : la variation du stock hydrique entre t et t + Δt , pour l'horizon du sol compris entre la surface et la profondeur de référence Z_r , située sous la zone racinaire. La profondeur du système racinaire a été estimée, au niveau du même sol d'essai (Radhouane *et al.*, 2004), à 65 et 70 cm respectivement pour les écotypes DJ et KN ;

– D : le flux vertical d'eau à la profondeur de référence Z_r , située dans la zone racinaire, pendant le même intervalle de temps, exprimé positivement pour un drainage et négativement en cas de remontée capillaire.

L'évolution de l'humidité volumique, Hv (m^3/m^3), a été suivie avant et après chaque irrigation, par pas de 10 cm, pour chaque traitement moyennant des comptages neutroniques réduits (N^*) au niveau des tubes d'accès, jusqu'à une profondeur de référence située sous la zone racinaire : $Z_r = 1,30$ m, à l'aide d'un humidimètre neutronique (TROXLER 3322). Les stocks hydriques ont été calculés en effectuant une intégration trapézoïdale des valeurs d'humidité volumique, déterminées par des équations d'étalonnage de l'humidimètre neutronique pour le site expérimental.

Le flux (D) à partir de la profondeur 1,30 m a été estimé pour les différents traitements à l'aide de la loi de Darcy appliquée pour les écoulements unidirectionnels en milieu non saturé (Vachaud *et al.*, 1991) :

$$D = -K(Hv) \frac{\Delta H}{\Delta Z} \Delta T = -K(Hv) \frac{\Delta(h-Z)}{\Delta Z} \Delta T \quad (2)$$

Où :

– K (Hv) est la conductivité hydraulique à l'état non saturé et correspondant à la valeur moyenne de Hv à la cote Z = Z_r entre t et t + Δt (ΔT) ;

– $\Delta H/\Delta Z$ est le gradient de charge hydraulique à cette même cote durant le même intervalle de temps avec $H = h - Z$ où h est la pression effective de l'eau ou le potentiel matriciel du sol.

Les irrigations ont été réalisées de façon à maintenir non humidifié l'horizon situé

au-delà de la profondeur maximale du système racinaire Z_c . À ce niveau, les humidités mesurées avant et après chaque irrigation étaient inférieures à la capacité au champ et n'avaient pratiquement pas varié (de l'ordre de $0,37 m^3/m^3$). De ce fait, puisque la nappe phréatique est profonde et en supposant l'absence de l'hystérèse, le gradient du potentiel matriciel à la cote Z_r serait nul ($dh/dZ = 0$). Il en résulte un gradient de charge hydraulique égal à -1 et l'échange d'humidité pendant un intervalle de temps ΔT , se limiterait à un flux de drainage dû au gradient du potentiel de gravité et il serait équivalent à la conductivité hydraulique.

La relation K (Hv), avec Hv exprimée en m^3/m^3 , obtenue moyennant un essai de drainage interne est la suivante :

$$K \text{ (mm/j)} = 3,1225 \times 10^{36} \times Hv^{88,795} \\ R^2 = 0,939 \quad (3)$$

Ainsi, les valeurs du drainage durant tout le cycle de développement ont été faibles (de 0,1 à 0,4 mm/j), la teneur du sol en éléments fins étant supérieure à 70 % et la conductivité hydraulique faible.

Coefficients de réponse du rendement à l'eau

Un déficit hydrique induit un stress pour la plante et affecte l'évapotranspiration de la culture (ET) et son rendement. Pour quantifier l'effet d'un déficit hydrique, il est nécessaire de dériver une relation entre la baisse de rendement relatif ($1 - Y_R/Y_M$) et le déficit de l'évapotranspiration relative ($1 - ETR/ETM$) aboutissant ainsi à l'obtention d'un coefficient empirique (Ky) de réponse des rendements à l'eau (Doorenbos et Kassam, 1980) :

$$(1 - Y_R/Y_M) = Ky(1 - ETR/ETM) \quad (4)$$

Où :

Y_R = rendement réel selon le régime d'irrigation ;

Y_M = rendement maximum sans aucun stress ;

ETR = évapotranspiration réelle selon le régime d'irrigation ;

ETM = évapotranspiration maximale sans aucun stress.

Il en ressort que plus le coefficient de réponse des rendements à l'eau (Ky) est faible, plus la culture est résistante au stress, c'est-à-dire toute réduction relative de la consommation d'eau est non significative en comparaison avec celle des

rendements (FAO, 2002). Selon Doorenbos et Kassam (1980), le sorgho (*Sorghum bicolor*), une culture voisine du mil, est classé comme tolérant à la sécheresse avec un Ky relatif au rendement en grain de l'ordre de 0,9 pour tout le cycle. Le terme ($1 - ETR/ETM$) est appelé également indice de stress hydrique (CWSI, *Crop Water Stress Index*) (Sepaskhah et Ilampour, 1996). Ainsi, pour les différents traitements, les composantes de l'équation de la réponse des rendements à l'eau ont été déterminées et analysées. Les indices CWSI et les coefficients Kyg (pour le rendement en grain) et Kyt (pour le rendement total : grain + paille) obtenus ont servi pour identifier la résistance des deux écotypes aux stress hydriques.

Résultats et discussion

Évapotranspiration mesurée

L'analyse statistique (*tableau 1*) relative à l'évapotranspiration réelle (ETR) durant tout le cycle de développement des deux écotypes (*tableau 2*) montre, au seuil de probabilité (5 %), des différences significatives entre les écotypes, entre les régimes hydriques et pour les interactions (écotype \times traitement). Cela indique que chaque écotype a son propre régime d'ETR, que les traitements sont différents et que chaque écotype a agi différemment suivant l'intensité du stress hydrique.

La consommation d'eau dans le cas du traitement (S1-100) montre que les besoins maximaux en eau des deux écotypes du mil, significativement différents (*tableau 1*), sont de 497 mm et 562 mm respectivement pour les écotypes DJ et KN (*tableau 2*). Ces valeurs rejoignent celles mentionnées, dans le cas du sorgho fourrager (*Sorghum bicolor*), culture estivale proche du mil, par De Villele *et al.* (1965) et par Damagnez *et al.* (1962) pour la région de Tunis (568 mm), ainsi que par Dancette (1991) en zone soudano-sahélienne (de 418 à 598 mm) pour le mil ; elles sont en revanche assez élevées comparées à celles obtenues par (Baldy *et al.*, 1993) à Montpellier (pluie + irrigation = 414 mm) dans le cas du sorgho-grain.

Déficit de l'évapotranspiration relative ($1 - ETR/ETM$)

Sous l'effet d'un stress hydrique, la consommation d'eau de la culture a été

Tableau 1. Analyse de la variance relative à l'effet du stress hydrique sur différents paramètres étudiés (PPDS).

Table 1. Variance analysis of the effect of water stress on different parameters (lowest significance level).

Paramètres	Écotype 1	Traitement 2	Interaction 1x2	CV (1) %	CV (2) %
ET (mm)	32,89*	19,08*	26,99*	4,4	2,9
Y grain (g/m ²)	35,08*	119,85*	NS	25,5	6,5
Y (paille)	233,66*	125,08*	NS	26,8	16,3
Ytotal (g/m ²)	190,74*	128,44*	NS	14,6	11,2
(Y _a /Y _m)g	NS	0,31*	NS	6,1	24,2
(Y _a /Y _m)t	NS	0,12*	NS	12,5	9,2
(ET _a /ET _m)	NS	0,04*	NS	3,9	2,9

NS : non significatif ; * : significatif au seuil de 5 % ; PPDS : plus petite différence significative.

réduite respectivement par les régimes hydriques 70 % ETM et 40 % ETM de 25 et 58 % pour l'écotype DJ et de 29 et 57 % pour l'écotype KN (figure 1). Ces réductions, significatives aussi bien pour les écotypes que pour les traitements hydriques (tableau 1), montrent que les deux écotypes possèdent des capacités de régulation de leur consommation d'eau selon l'intensité du déficit hydrique appliqué. Les taux de consommation d'eau, proches des taux des régimes hydriques, indiquent que chacun des deux écotypes a dû valoriser l'eau qui est à sa disposition.

Baisse du rendement relatif (1-Y_R/Y_M)

Un stress hydrique induit une réduction significative du rendement aussi bien total qu'en grains (figure 2) de la même manière chez les deux écotypes

(tableau 1). Ce même résultat a été également rapporté par Winkel *et al.* (2001) et par Karam *et al.* (2002). Quelle que soit l'intensité du stress appliqué, (1-Y_R/Y_M) est plus faible dans le cas de KN que dans celui de DJ. KN est donc plus résistant.

Coefficient de réponse des rendements à l'eau (Ky)

Plus le coefficient de réponse des rendements à l'eau (Ky) est faible, plus la culture est résistante au stress, c'est-à-dire toute réduction relative de la consommation d'eau est non significative par comparaison avec celle des rendements (FAO, 2002).

La relation linéaire, hautement corrélée, entre les valeurs de (1-Y_R/Y_M) et les valeurs de (1-ETR/ETM) ou CWSI (figure 3) montre, d'une manière globale, que Ky qui représente la pente de la

Tableau 2. Durée du cycle de développement des deux écotypes de mil et leur évapotranspiration réelle totale et journalière mesurée selon les régimes hydriques.

Table 2. Growing cycle duration of the two mil ecotypes and their total and daily actual evapotranspiration measured as affected by irrigation regimes.

Traitement	Écotype	Cycle (j)	ETR (mm)	ETR (mm/j)
S1-100	DJ	78	497	6,4
	KN	87	562	6,5
S1-70	DJ	78	375	4,8
	KN	84	396	4,7
S1-40	DJ	71	208	2,9
	KN	80	240	3,0

ETR : évapotranspiration réelle.

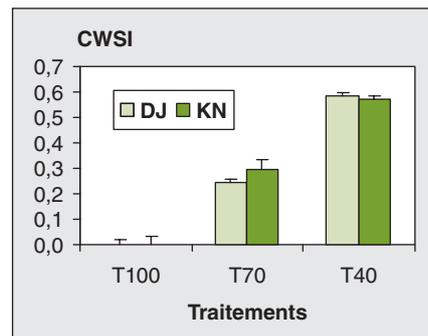


Figure 1. Déficit de l'évapotranspiration relative ou indice de stress hydrique (Crop Water Stress Index, CWSI) des deux écotypes selon le régime d'irrigation.

Figure 1. Relative evapotranspiration deficit or Crop Water Stress Index (CWSI) of the two ecotypes depending on the irrigation regimes.

Les barres représentent les erreurs standard sur la base de trois répétitions pour chaque traitement).

droite de régression, est plus faible pour KN que pour DJ, ce qui plaide encore en faveur d'une résistance plus importante de l'écotype KN.

Les valeurs de Ky ont été relativement faibles et proches de l'unité pour les deux écotypes, même dans les cas des stress hydriques extrêmes (figure 3). Ces valeurs se rapprochent de celles obtenues

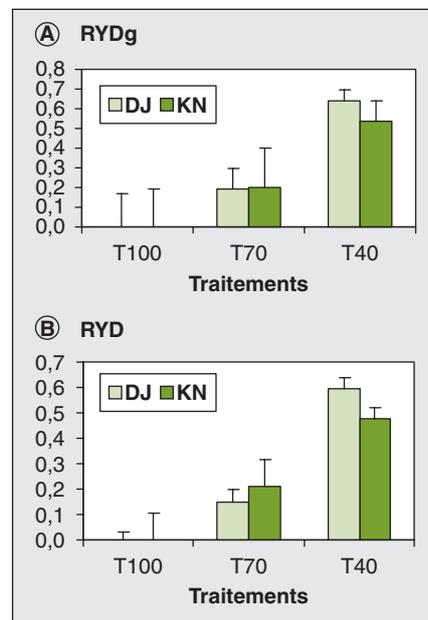


Figure 2. Baisse du rendement relatifs en grain RYDg (A) et totaux RYDt (B) des deux écotypes selon le régime d'irrigation.

Figure 2. Relative grain and total yield decrease (RYDg (A) and RYDt (B) of the two ecotypes depending on the irrigation regimes.

Les barres représentent les erreurs standard sur la base de trois répétitions pour chaque traitement).

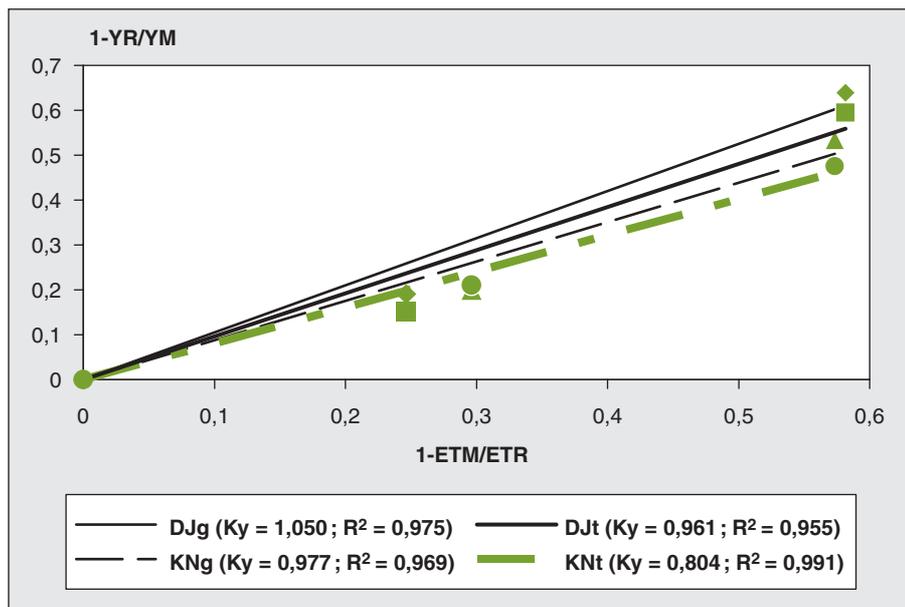


Figure 3. Corrélation linéaire entre les baisses des rendements relatifs (RYD) en grain et totaux et le déficit d'évapotranspiration relative ou l'indice de stress hydrique (*Crop Water Stress Index*, CWSI) des deux écotypes.

Figure 3. Linear correlation between the relative yield decreases (RYD) and the relative evapotranspiration deficit or *Crop Water stress index* (CWSI) of the two ecotypes.

Les valeurs de K_y et de R^2 sont indiquées respectivement entre parenthèses.

par Doorenbos et Kassam (1980) dans le cas du sorgho (*Sorghum bicolor*) et également dans le cas du blé (FAO, 2002). Elles sont nettement inférieures à celles qui dépassent l'unité, obtenues dans le cas du maïs, de la pomme de terre, de la betterave sucrière et du coton (FAO, 2002).

Conclusion

Ce travail a permis de montrer que les deux écotypes de mil – Djerba (DJ) et Kairouan (KN) – originaires de milieux écologiques arides en Tunisie, possèdent des capacités de régulation de leur consommation d'eau selon les apports d'irrigation, sans engendrer des pertes de rendement significatives.

Les besoins en eau maximums des deux écotypes du mil sont significativement différents. Ils sont de 497 mm et 562 mm respectivement pour les écotypes DJ et KN, soit une moyenne de l'ordre de 530 mm.

La consommation d'eau de la culture a été réduite de 25 et 58 % pour l'écotype DJ et de 29 et 57 % pour l'écotype KN respectivement pour T_{70} et T_{40} . Les taux de consommation d'eau proches des taux

des régimes hydriques indiquent que chacun des deux écotypes a dû valoriser l'eau mise à sa disponibilité.

Les coefficients de réponse des rendements en grains et totaux à l'eau, ont montré que l'écotype KN est légèrement plus tolérant au stress hydrique que l'écotype DJ. Ces coefficients, proches de l'unité, démontrent une résistance au stress hydrique des deux écotypes étudiés. Comme ces résultats ont évalué l'effet des stress hydriques durant tout le cycle végétatif de la culture du mil, il est recommandé d'effectuer des travaux afin d'évaluer les effets de ces stress appliqués durant une phase indépendamment des autres et d'identifier ainsi les phases les plus sensibles chez les écotypes locaux étudiés.

Il apparaît également que le millet peut occuper une place de choix dans un contexte de ressources en eau limitées. ■

Références

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper, n° 56. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

Baldy C, Konate JM, Olufayo A, Ruelle P, Fernandes A. Résistance à la sécheresse du sorgho-grain en climat méditerranéen et gestion optimale d'une quantité d'eau limitée. *Sécheresse* 1993 ; 4 : 85-93.

Boland AM, Mitchell PD, Jeri PH, Goodwin I. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *J Horticult Sci* 1993 ; 68 : 261-74.

Cournac I, Do F, Winkel T. *Élaboration d'un modèle de réponse de la croissance et du rendement du mil à un déficit hydrique de fin de cycle*. Milstress. Rapport interne, université de Niamey, Institut des radio-isotopes, 1993.

Damagnez J, Riou C, De Villele O, El Ammani S. Problèmes d'évapotranspiration potentielle en Tunisie. *Ann Inrat* 1962 ; 35 : 161-84.

Dancette C. Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne. In : Sivakumar M V K, Wallace JS, Renard C, Giroux C, eds. *Proc. Inter. Soil Water Balance in the Soudano-Sahelian Zone Workshop*. Niamey, Niger, February 1991. IAHS Publ. N° 199. Wallingford (United Kingdom) : IAHS Press ; Institute of Hydrology, 1991.

De Villele O. *Cinq années d'expérimentation sur les besoins en eau des cultures*. Document Technique, 11. Tunis : Institut national de la recherche agronomique de Tunisie, 1965.

Direction Générale des barrages et des Grands Travaux Hydraulique de Tunisie (DGBGTH) ; Coopération Technique Tuniso-Allemande (GTZ). *Projet GE.O.R.E. : Gestion optimale des ressources en eau. Plan guide relatif à la mise en œuvre de gestion en temps réel des ressources en eau en Tunisie*. 8 volumes. Tunis : DGBGTH & GTZ, 2001.

Doorenbos J, Kassam AH. *Réponse des rendements à l'eau*. Série irrigation et drainage, n° 33. Rome : Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), 1980.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Deficit Irrigation Practices*. Water Report, n° 22. Rome : FAO, 2002.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Water policies and agriculture*. In : *The state of food and agriculture*. Agriculture Series, n° 25. Rome : FAO, 1994.

Gadelle F. Le monde manquera-t-il bientôt d'eau? *Sécheresse* 1995 ; 6 : 9-14.

Karam F, Breidy J, Roupheal J, Lahoud R. Stress hydrique, comportement physiologique et rendement du maïs hybride (*cv Manuel*) au Liban. *Cah Agric* 2002 ; 11 : 285-91.

Katerji N, Daudet F, Valancogne C. Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures : Détermination et importance. *Agronomie* 1984 ; 4 : 779-87.

Khanfir R, El Echi ML, Louati ME, Marzouk A, Frigui HL, Alouini A. *Eau 21 : Stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme - 2030*. Tunis : Ministère de l'Agriculture de Tunisie, 1998.

Mitchell PD, Jeri PH, Chalmers DJ. The effect of regulated water deficit on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *J Am Soc Horticult Sci* 1984 ; 109 : 15-9.

Radhouane L, Ben El Hadj S, Ben Salem M. Étude du système racinaire chez quelques écotypes de Mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Ann Inrat* 2004 ; 77 : 53-67.

Radhouane L, Ben Salem M, Ben El Hadj S. Influence du stress salin sur la croissance et le rendement de 6 écotypes de Mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Ann Inrat* 2003 ; 76 : 53-71.

Sepaskhah AR, Ilampour S. Relation between yield, crop water stress index (CWSI) and transpiration of cowpea (*Vigna sinensis* L). *Agronomie* 1996 ; 16 : 269-79.

Turner NC. Adaptation to water deficits : A changing perspective. *Aust J Plant Physiol* 1986 ; 13 : 175-90.

Vachaud G, Vauclin M, Cisse, L. Mesures *in situ* de la consommation en eau de cultures pluviales par humidimétrie neutronique. In : Sivakumar M V K, Wallace JS, Renard C, Giroux C, eds. *Proc. Inter. Soil Water Balance in the Soudano-Sahelian Zone Workshop*. Niamey, Niger, February 1991. IAHS Publ. N° 199. Wallingford (United Kingdom) : IAHS Press ; Institute of Hydrology, 1991.

Winkel T, Payne W, Renno JF. Ontogeny modifies the effects of water stress on stomatal control, leaf area duration and biomass partitioning of *Pennisetum glaucum*. *New Phytologist* 2001 ; 149 : 71-82.