



EFFETS DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTIVITE DU BLE DUR EN CONDITIONS CLIMATIQUES SEMI ARIDES DE TUNISIE

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

Département du Génie Rural
Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem
Université de Sousse, Sousse, Tunisie

sami.khila@yahoo.fr

RESUMÉ

La céréaliculture a toujours constitué une composante essentielle de l'agriculture tunisienne. Néanmoins, la production nationale de céréales reste nettement en deçà des besoins du pays en raison surtout des contraintes d'ordre hydrique. En plus, la productivité de la céréaliculture risque d'être affectée à l'avenir sous l'effet des changements climatiques et la diminution possible des ressources en eau disponibles. L'évaluation de l'impact éventuel des hausses des émissions des GES sur la productivité agricole est nécessaire afin de sensibiliser les parties prenantes en agriculture à mettre en œuvre des mesures d'adaptation appropriées. La présente étude fait la synthèse de la littérature traitant des effets de la contrainte hydrique sur la productivité du blé dur cultivé en conditions climatiques semi arides. Elle vise également à mettre en évidence les effets potentiels de l'augmentation de la concentration du CO₂ et de l'élévation de la température sur la productivité de la culture de blé dur.

Mots clés: Blé dur, ressources en eau, rendement, évapotranspiration, changement climatique.

ABSTRACT

Cereal crops have always been an essential component of Tunisian agriculture. Nevertheless, cereal production is still insufficient to meet population needs

mainly due to inadequate rainfall and seasonal moisture deficits. In addition, the productivity of cereal crops may be affected in the future as a result of climate change and possible decline in available water resources. The assessment of potential future impacts of increase in greenhouse gas emissions on agricultural productivity is required to help stakeholders in agriculture to implement suitable adaptation measures. This study provides a synthesis of the literature dealing with the effects of water stress on the productivity of durum wheat crop grown in semi-arid climatic conditions. Moreover, it aims to highlight the possible combined effect of elevated CO₂ concentration and high temperature on the productivity of the durum wheat.

Keywords: durum wheat, water resources, yield, climate change.

INTRODUCTION

Historiquement, les céréales ont toujours été un élément important de l'agriculture tunisienne (Latiri et al., 2010) et une composante essentielle du régime alimentaire des Tunisiens (Jouve et al., 1995). Le blé dur, occupant un peu plus de 50% de la superficie semées en céréales, représente la céréale la plus cultivée en Tunisie (Latiri et al., 2010). Toutefois, la production moyenne actuelle du blé dur en Tunisie demeure nettement en deçà des potentialités et des besoins du pays (El Hani, 1997). Cela est attribué aux pertes de production causées par les maladies cryptogamiques (Ammar et al., 2011), la nature des sols (Anderson et Impiglia, 2002), l'inadéquation de la date de semis avec les variétés et les conditions environnementales (Murray et al., 1990) et la rotation inappropriée des cultures (López-Bellido et López-Bellido, 2001). Néanmoins, malgré la variabilité des facteurs cités précédemment, la contrainte hydrique demeure le principal facteur limitant la production de blé dur en Tunisie (Lebdi, 2009). En outre, la productivité de la culture risque d'être affectée à l'avenir sous l'effet des changements potentiels des conditions climatiques (Smith and Skinner, 2002). En effet, la hausse des concentrations de gaz à effet de serre anthropiques (IPPC, 2001) risque d'affecter directement ou indirectement la productivité agricole (Reilly, 1996). L'évaluation de l'impact éventuel des hausses des émissions des gaz à effet de serre sur le climat et la productivité agricole est nécessaire afin de sensibiliser les gestionnaires des périmètres irrigués et les décideurs publics et contribuer à mettre en œuvre des mesures d'adaptation appropriées.

PRODUCTION DE BLE DUR EN FONCTION DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE

Culture en régime pluvial

Le rendement du blé dur cultivé en pluvial a sensiblement augmenté depuis 1970 (Ammar et al., 2011) grâce au développement des variétés permettant d'atténuer les effets négatifs des périodes de sécheresse (El Hafid et al., 1998) et à l'amélioration des pratiques culturales (Ammar et al., 2011). Toutefois, la production de blé en conditions pluviales demeure limitée par le régime pluviométrique (Anderson et Impiglia, 2002; Belaid et al., 2012) caractérisé par une pluviométrie faible, irrégulière et extrêmement variable (Skouri, 1994). Ainsi, les rendements sont sujets à une importante fluctuation pouvant atteindre 2 t.ha^{-1} (Oweis et Hachum, 2009) compte tenu de la variabilité de la pluviométrie interannuelle (Belaid et al., 2012). D'autre part, la distribution irrégulière de la pluie favorise l'apparition de périodes de sécheresse durant le cycle de culture du blé (Belaid et al., 2012).

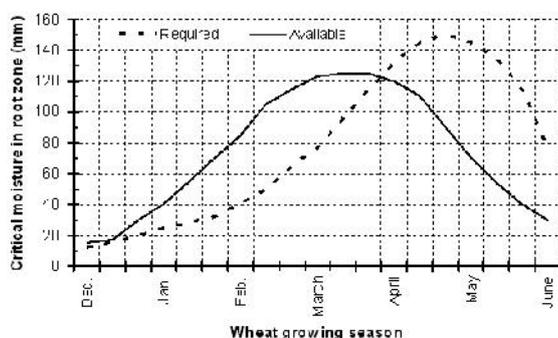


Figure 1 : Évolution de la teneur en eau disponible dans le sol et celle requise par la culture de blé dans des conditions climatiques méditerranéennes (Oweis et Hachum, 2004)

Lors de ces périodes, l'augmentation de la demande évaporative de l'atmosphère au delà de l'évapotranspiration de la culture met la plante dans des conditions de stress hydrique (Acevedo et al., 2002). En fait, le blé, dont le cycle dure entre 100 et 250 jours (Kassam, 1981) est confronté à un stress hydrique fréquent durant les mois de mars, avril et mai avec une probabilité d'occurrence supérieure à 79,5% (Mouhouche et Bourahla, 2007). Les périodes de déficit hydrique coïncident fréquemment avec les phases critiques du cycle de la culture de blé (montaison, floraison, remplissage du grain) (Belaid et al., 2012). Ainsi, le rendement du blé cultivé en pluvial est principalement sous la dépendance de la probabilité des pluies reçues par la culture durant son cycle de développement et surtout des pluies automnales (Lebdi, 2009; Monteny, 1970).

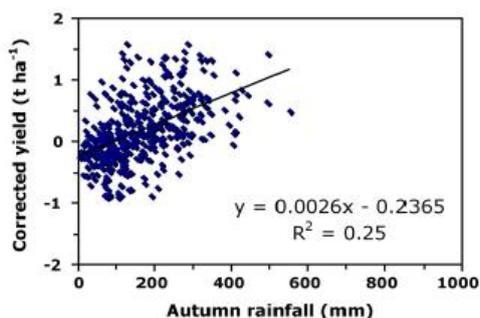


Figure 2 : Corrélation entre le rendement moyen du blé (en pluvial) à l'échelle régionale du blé et les précipitations automnales reçues par la culture pendant son cycle de développement (Latiri et al., 2010)

Le stress hydrique souvent associé au stress thermique (Amigues et al., 2006) limite la croissance des jeunes organes reproducteurs et affecte négativement le rendement (Latiri et al., 2010). Pour la culture de blé, un stress hydrique pendant les premières phases de développement cause une levée retardée et incomplète qui crée un peuplement défectueux et hétérogène jusqu'à la récolte ainsi qu'une implantation racinaire médiocre et superficielle (Amigues et al., 2006). Alors qu'un manque d'eau au moment de la montaison cause un arrêt de croissance des talles et une réduction du nombre d'épis par unité de surface (Kimurto et al., 2003). Par ailleurs, le stade reproductif du blé est très sensible au stress hydrique (El Hafid et al., 1998; Kimurto et al., 2003). En fait, un déficit hydrique pendant la phase épiaison-début floraison entraîne une diminution de la surface photosynthétisante des feuilles et du poids sec des grains à la récolte (Monteny, 1970). La plante s'adapte à ce déficit en réduisant la photosynthèse, le nombre de graines et la production de biomasse, dans le but d'assurer la production de graines moins nombreuses mais viables (Amigues et al., 2006; Kimurto et al. (2003). Alors qu'un stress hydrique pendant la phase de remplissage de grains affecte fortement le rendement en grains en limitant le poids des grains (Fischer 1985).

Culture en conditions irriguées

L'état continue de déployer des efforts considérables afin de promouvoir la culture de blé en irrigué (Ammar et al., 2011). Toutefois, le rendement moyen du blé dur en irrigué pendant ces dix dernières années (3.8 t/ha) (Ammar et al., 2011) a été largement inférieur au rendement potentiel (7 t/ha) (Mailhol et al., 2004). Cela est attribué principalement à la rareté et la vulnérabilité des ressources en eau disponibles pour l'agriculture irriguée, l'efficacité des réseaux de transport d'eau et les calendriers d'irrigation appliqués par les agriculteurs. En fait, La Tunisie comme la plupart des pays du Sud de la Méditerranée est en

situation de stress hydrique important (Milano et al., 2013) en raison d'une forte demande en eau surtout de la part du secteur agricole et de la rareté des ressources en eau disponibles d'autre part. La rareté et la vulnérabilité des ressources en eau expliquent que tous les efforts ont été axés sur la mobilisation du maximum possible de ressources disponibles pour répondre aux besoins, et corriger l'handicap d'irrégularité naturelle.

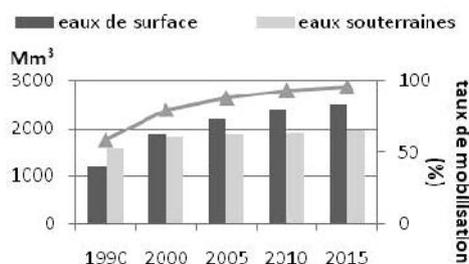


Figure 3 : Mobilisation des ressources en eau en Tunisie à l'horizon 2015

D'autre part, même si les volumes alloués à l'agriculture irriguée tendront vers la baisse avec un taux de décroissance annuel de l'ordre de 1,3%, l'agriculture restera de loin le principal consommateur d'eau au-delà de l'horizon 2030 (Mekki, 2009). En même temps, les eaux mobilisées actuellement risquent de voir leurs potentialités décroître à cause de l'envasement des retenues des barrages (Lebdi, 2009), la surexploitation des nappes (Filali, 2004) et le potentiel limité de production des eaux usées traitées (Lebdi, 2004). Ainsi, on prévoit une réduction des ressources en eau d'ici à 2030 : -28% pour nappes phréatiques, nappes littorales et aquifères non renouvelables, -5% pour les eaux de surface (Thibault, 2009). Par ailleurs, outre le fait que l'agriculture consomme plus d'eau que d'autres secteurs productifs, la gestion de l'eau dans les zones irriguées est loin d'être optimale. Des pertes d'eau peuvent se produire aussi bien au niveau du réseau de distribution que celui installé à la parcelle. En fait, les réseaux collectifs d'irrigation, devenus vétustes, sont sujets à des affaissements et à des casses fréquentes qui engendrent des pertes importantes en eau (El Atiri, 2004). Ces pertes se traduisent par une efficacité faible des réseaux d'adduction et de distribution. En plus, les réseaux collectifs fonctionnent souvent au tour d'eau (Lebdi, 2004) avec une pression résiduelle à la borne insuffisante, ne permettant pas l'utilisation des techniques modernes d'irrigation (el Atiri, 2004). Ainsi, la plupart des agriculteurs utilisent les méthodes d'irrigation gravitaire (Lebdi, 2009) qui n'assurent qu'une efficacité limitée.

Toutefois, le rendement faible de la culture de blé dur en irrigué est surtout du aux calendriers d'irrigation et de fertilisation appliqués par les agriculteurs qui ne sont souvent pas appropriés aux conditions pédoclimatiques locales et ne sont pas adaptés aux besoins réels des cultures (Lebdi, 2009). Une étude menée

par Frija et al. (2013) dans la région de Kairouan a révélé que, pour 31.7% des agriculteurs, le volume apporté dépassait le volume optimum et que, pour 50%, ce volume était inférieur au volume optimal. En général, les agriculteurs ont un comportement "anti-risques" dans la conduite des céréales qui a tendance à minimiser les coûts de production pour limiter les pertes économiques éventuelles (Jouve et al., 1995). En effet, 25% seulement des agriculteurs pratiquent l'irrigation de complément dans la conduite des céréales en Tunisie (Mougou et al., 2008) bien que celle-ci soit particulièrement recommandée lorsque les ressources en eau sont limitées (Shneider et Howell, 2001). D'autre part, l'irrigation à doses déficitaires par rapport à l'évapotranspiration maximale n'est pas encore bien maîtrisée par les agriculteurs. Cette technique suppose des connaissances approfondies, par type de cultures, de l'impact d'un déficit en eau, sur la croissance de la plante lors d'une phase végétative donnée (Lebdi, 2004). La demande en eau agricole, aux yeux de l'agriculteur, peut ne pas correspondre au besoin agro climatique (Lebdi, 2004). Ainsi, l'agriculteur applique parfois un volume d'irrigation supérieur à celui nécessaire de façon à garantir une production maximale et minimiser les risques de chute de rendement (Karrou et El Mourid, 2009). Dans ce cas, une partie de l'eau appliquée à la culture risque d'être perdue (Sun et al., 2006). En plus, Les scénarios d'irrigation appropriés ne sont pas facilement accessibles aux agriculteurs (Dugoni, 2001).

IMPACT POTENTIELS DES CONDITIONS CLIMATIQUES FUTURES SUR LA PRODUCTIVITE DU BLE DUR

Besoins en eau de la culture

En ce qui concerne la transpiration de la culture, l'enrichissement de l'atmosphère en dioxyde de carbone a potentiellement deux implications contradictoires. D'une part, on peut s'attendre à ce que les pertes par transpiration augmentent en raison du réchauffement climatique (McKenney et Rosenberg, 1993). En fait, des concentrations plus élevées de CO₂ peuvent accélérer la croissance des plantes, donnant lieu à une augmentation de la surface foliaire et, par conséquent, à une transpiration accrue (Gedney et al., 2006). Toutefois, des concentrations plus élevées de CO₂ peuvent réduire la transpiration du fait que les stomates des feuilles, grâce auxquelles la transpiration des plantes n'ont pas besoin de s'ouvrir autant afin d'absorber la même quantité de CO₂ pour la photosynthèse (Paez et al., 1984). L'ampleur relative de ces deux impacts varie entre les types de plantes et en fonction d'autres facteurs tels que la disponibilité des nutriments et les impacts des variations de la température et des quantités d'eau disponible (Bates et al., 2008).

En outre, même si les précipitations totales enregistrées pendant le cycle de culture restent identiques, une pluviométrie plus aléatoire conjuguée à des températures plus élevées peut conduire à une hausse de la demande en eau d'irrigation (Bates et al., 2008; Brisson et levrant, 2010). D'après une étude de l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), une augmentation de 14% du prélèvement de l'eau pour l'irrigation est prévue dans le cas des pays en voie de développement d'ici 2030 (Bruinsma, 2003). Des études régionales prévoient également l'augmentation des besoins en irrigation dans les pays de l'Afrique du nord (Abou-Hadid et al., 2003). En outre, l'adoption de méthodes particulières de conduite culturale (modification des dates des semis ou des cultivars) pour l'adaptation au changement climatique pourrait nécessiter jusqu'à 40 % d'eau supplémentaire pour l'irrigation (Van Grunderbeeck et Tourre, 2008)

Rendement

L'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère peut avoir un effet fertilisant, qui, en général, a un effet positif sur la biomasse produite (Betts et al. 2007) et le rendement des cultures (Kimball et al., 2002; Ainsworth et Long, 2005). Cet effet positif est attribué à l'augmentation de la photosynthèse nette des plantes en présence d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ (Brisson, 2004) particulièrement avec l'augmentation du rayonnement intercepté par la plante (Boote et Loomis, 1991). Des études ont montré que le rendement des céréales pourrait augmenter sous l'effet de l'augmentation du taux de CO₂ (Harrison and Butterfield, 2000). Cette augmentation pourrait varier entre 10% (Long et al., 2006) et 30% (Kimball et al., 2002). Des expérimentations en conditions contrôlées ont permis de montrer que le rendement du blé pourrait augmenter de 33% suite à un doublement de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère (Cure et Acock, 1986). Cependant, l'augmentation de la température pourrait contrebalancer l'effet positif de l'augmentation du CO₂ sur le rendement (Brisson et levrant, 2010). L'étude menée par Brown (2002) a révélé qu'un réchauffement de la température de l'air de 1°C peut causer une diminution de 10% des rendements agricoles. Ainsi, des études prévoient une diminution de la production des céréales à l'échelle mondiale (Parry et al., 1999; 2005) et dans les pays de la rive sud de la méditerranée en particulier (Giannakopoulos et al., 2005). En Tunisie, le rendement du blé dur pourrait diminuer de 19% si la température augmente de 3.5°C (Gasmi et al., 2011). En effet, l'augmentation de la température peut avoir des effets négatifs sur le nombre et la fertilité des épis du blé (Kolderup, 1979) et par conséquent sur le rendement en grains. Alors que des températures élevées pendant la floraison peuvent réduire le nombre, la taille, et la qualité des graines (Thomas et al., 2003). L'augmentation de la température, principal moteur de développement de la plante (Hodges, 1991), peut provoquer

également le raccourcissement du cycle de culture (Singh et al. 1998) et ainsi la diminution du rendement (Olesen et al., 2000). Si le raccourcissement du cycle cultural permet que les derniers stades du cycle végétatif ne se produisent dans des conditions de déficit hydrique, son inconvénient est de réduire le rayonnement total intercepté par la plante et donc le rendement maximum potentiel (Amigues et al., 2006). D'autre part, l'augmentation de la production agricole suite à l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère peut également être compensée par l'amplification possible du stress hydrique pendant les phases critiques du cycle de croissance du blé (Aggarwal, 2003). En effet, lorsque la contrainte hydrique se renforcera nettement, ses effets dépréciateurs l'emporteront sur les effets positifs de la fertilisation carbonée et les rendements seront à la baisse (Brisson et Levrant, 2010). Bates et al. (2008) ont démontré que le rendement en grains d'une culture de blé non irriguée cultivée dans une atmosphère de 450 ppm de CO₂ s'accroît pour une augmentation de la température jusqu'à 0,8 °C, mais diminue si le réchauffement se poursuit au-delà de 1.5 °C. En fait, l'augmentation de la production, dans des conditions de stress hydrique, dépend des mécanismes de tolérance qui assurent l'hydratation cellulaire et diminuent la perte en eau (Sorrells et al., 2000).

Efficienc e d'utilisation de l'eau

Dans l'analyse des impacts attendus des modifications environnementales sur l'efficienc e d'utilisation de l'eau par la culture, il importe de prendre en compte les effets liés à l'augmentation du CO₂, à la température, aux ressources hydriques et leurs interactions (Brisson et levrant, 2010). L'augmentation de la température lors des premiers stades de développement de la culture pourrait favoriser le développement précoce du couvert végétal (Chaudhury et al., 1990) et l'augmentation de l'indice foliaire (Grashoff et al., 1995) contribuant à l'augmentation de l'efficienc e d'utilisation de l'eau par la culture (Gedney et al. 2006). Toutefois, l'élévation de la température au-delà de certaines valeurs peut diminuer l'efficienc e de l'utilisation de l'eau du blé (Rinaldi, 2009). En outre, l'augmentation de la concentration de CO₂ aurait un effet positif sur l'efficienc e d'utilisation de l'eau du blé grâce à l'augmentation de la photosynthèse (Stoddard et al., 2011) et ainsi de la production de grains par unité d'eau transpirée (Fischer et al., 2006). L'efficienc e d'utilisation de l'eau du blé pourrait augmenter de 50 à 60% en fonctions des conditions hydriques sous une concentration double de CO₂ dans l'air (Dowing et al., 2000). Cependant, une concentration élevée en CO₂ résulte également en une fermeture stomatique partielle (Mott, 1990) reflétée dans la réduction de la conductance au niveau de la feuille (Atkinson et al., 1991). A une concentration en CO₂ double de celle actuelle, la conductance est réduite de 30-40% en fonction de l'espèce végétale (Van De Geijn et Goudriaan, 1996). La réduction de la conductance stomatique

serait accompagnée par une diminution de la densité stomatique (Erchidi et al., 2000) même si cette dernière pourrait être modifiée par d'autres facteurs environnementaux (Van De Geijn et Goudriaan, 1996). Toutefois, l'augmentation de la densité stomatique pourrait être un des facteurs de résistance au déficit hydrique chez les céréales si elle est accompagnée par une bonne activité physiologique (Slama et al., 2002). En effet, une étude menée par Erchidi et al. (2000) a permis de montrer que des variétés de blé dur sont capables de garder une densité de stomates élevée en conditions de stress hydrique sévère. L'augmentation de la densité des stomates, à la suite de la diminution de la conductance stomatique, peut engendrer des stomates de petite taille et à fermeture rapide engendrant la diminution des pertes en eau par transpiration (Slama et al., 2005). une transpiration réduite peut provoquer une hausse de la température dans la cavité stomatique et à la surface foliaire (Kimball et al., 1995) engendrant l'accélération du vieillissement du feuillage et la diminution de la capacité photosynthétique de la plante (Ellis et al., 1990)

Mesures d'adaptation

L'élévation des températures et l'augmentation de la fréquence des sécheresses devraient engendrer une série d'impacts directs et indirects qui nécessitent une anticipation rapprochée (Ministère de l'agriculture et GIZ, 2011). L'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques est une priorité étant donné le poids relatif de la production agricole dans l'économie du pays. L'adaptation peut être définie comme l'ensemble des évolutions politiques, techniques, institutionnelles, sociétales et comportementales que les sociétés dans leur ensemble ou plus spécifiquement les acteurs d'un secteur devront conduire pour limiter les impacts négatifs ou tirer profit des opportunités engendrées par l'évolution du climat qu'elle soit progressive, brutale, permanente ou ponctuelle (Benblidia, 2011). Le rôle du secteur public est déterminant à la fois dans la diffusion de l'information et l'orientation des mesures à adopter pour qu'elles soient les plus efficaces possibles (Challinor et al., 2007). Toutefois, l'adaptation passe, en amont, par le développement des capacités du pays en terme de recherche scientifique, à la fois dans le domaine météorologique et agronomique (Gimet, 2008). L'adaptation nécessite le développement de mesures susceptibles de modérer les impacts des changements prévus et de profiter de nouvelles opportunités qui en découle (Smit et al., 2000). La gamme des mesures d'adaptation est très large, allant de mesures purement techniques aux stratégies nationales de développement et les réformes des politiques (Falkenmark, 2007). Les mesures techniques englobent le développement de nouvelles variétés adaptées aux conditions climatiques futures (Tingem et Rivington, 2009) et la modification des itinéraires techniques appliqués dans la conduite des cultures (Bates et al., 2008). Par exemple, l'avancement des dates de semis permet d'éviter la coïncidence entre périodes de forte demande

évaporative ou de faible pluviométrie et phases critiques du cycle de culture et d'achever le cycle cultural avant l'apparition d'une sécheresse terminale (Amigues et al., 2006). En outre, il convient d'accorder plus d'importance aux techniques d'économie d'eau en irrigation (Bates et al., 2008) et à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau afin de lutter contre l'augmentation des sécheresses (Benblidia, 2011). Certaines analyses des impacts du changement climatique sur la croissance et les besoins en eau des cultures ont montré la nécessité d'adapter les pratiques d'irrigation pour maintenir ou améliorer les rendements à la parcelle (Causapé et al., 2004). L'adaptation au changement climatique par changement des stratégies d'irrigation doit être étudiée de façon intégrée avec la possibilité de l'avancement des dates de semis (Brisson et levrout, 2010). En effet, les impacts du changement des dates de semis et des variétés sur les besoins en irrigation restent à étudier de façon exhaustive (Levrout, 2010). L'utilisation des modèles de cultures, combinés à des scénarios de changement climatique, constitue un outil intéressant pour tester l'efficacité de différentes mesures d'adaptation au changement climatique en simulant leurs effets sur le comportement des cultures (Thian et al., 2008).

CONCLUSION

En régime pluvial, la variabilité inter annuelle et la distribution irrégulière de la pluie constituent les principales contraintes limitant la production de blé dur en Tunisie. Alors qu'en conditions irriguées, la productivité de cette culture est limitée par la rareté et le mode de gestion des ressources en eau disponibles. D'autre part, le réchauffement climatique et l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère risquent d'affecter la productivité de la culture de blé dur. Ainsi, l'amélioration de la productivité de la culture de blé dur en Tunisie est possible en appliquant des mesures techniques valorisant au mieux les ressources en eau disponibles et prenant en considération compte des effets possibles des changements climatiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABOU-HADID A.F., MOUGOU R., MOKSSIT A., IGLESIAS A. (2003). Assessment of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources. AIACC AF90 Semi-Annual Progress Report, 37p.
- ACEVEDO E., SILVA P., SILVA H. (2002). Wheat growth and physiology, 567 p. In: Curtis BC (Ed.). Bread Wheat: Improvement and Production, FAO Plant Production and Protection Series No. 30. Rome, Italy.

- AGGARWAL P.K. (2003). Impact of climate change on Indian agriculture. *J. Plant Biol.*, Vol. 30, 189–198.
- AMIGUES J.P., DEBAEKE B.I., LEMAIRE G., SEGUIN B., TARDIEU F., THOMAS A. (2006). Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72p.
- AMMAR K., GHARBI M.S., DEGHAIS M. (2011). Wheat in Tunisia. In *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding, Volume 2*. Angus, W., Bonjean, A., Van Ginkel, M.(Eds). Lavoisier. 1201p.
- ANDERSON W.K., IMPIGLIA A. (2002). Management of dryland wheat. In: Curtis, B.C., Rajaram, S., Gomez Macpherson, H.(Eds.), *Wheat: Improvement and Production*. Plant Production and Protection Series No. 30. FAO, Rome, p. 567.
- ATKINSON C.J., WOOKEY P.A., MANSFIELD T.A. (1991). Atmospheric pollution and the sensitivity of stomata on barley leaves to abscisic acid and carbon dioxide, *NewPhytol*, Vol.117, 535-541.
- BATES B.C., KUNDZEWICZ Z.W., WU S., PALUTIKOF J.P. (2008). *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.
- BELAID A., HADJEL M., HASSINI N. (2012). Effects of drought on winter wheat yields in a semi-arid region, *Water resources and wetlands*, Editors: Petre Gâ tescu, William Lewis Jr., Petre Bre can. Conference Proceedings, 14-16 September 2012, Tulcea – Romania
- BENBLIDIA M. (2011). Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et approche économique de la gestion de la demande en eau : Rapport national de l'Algérie. Etude réalisée pour le Plan Bleu.
- BETTS R.A., BOUCHER O., COLLINS M., COX P.M., FALLOON P.D., GEDNEY N., HEMMING D.L., HUNTINGFORD C., JONES C.D., SEXTON D.M., WEBB M.J. (2007). Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide, *Nature*, Vol.448, N°7157, 1037-1041.
- BRISSON N., LEVRAULT F. (2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. *Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*. Ademe, 336 p.
- BROWN J.K.M. (2002). Yield penalties of disease resistance in crops. *Current Opinion in Plant Biology*, Vol. 5, 339-344.
- BRUINSMA J. (2003). *World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective*, UK: Earthscan)
- BURAK S. (2002). Politiques de l'eau des pays méditerranéens, synthèse régionale des dossiers pays (Pays du sud et de l'est), PNUE / Plan Bleu.
- CAUSAPE J., QUILEZ D., ARAGÜES R. (2004). Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level I, *Irrigation quality*. *Agric. Water Manage.*, Vol.70, 159-209.

- CHALLINOR A., WHEELER GARFORTH C., CRAUFURD P., KASSAM A. (2007). Assessing the vulnerability of food crop system in Africa to climate change, *Climatic Change*, Vol. 83, N°3, 381-399.
- CHAUDHURY U.N., KIRKHAM M.B., KANEMASU E.T. (1990). Carbon dioxide and water level effects on yield and water use of winter wheat, *Agron. J.*, Vol.82, 637-641.
- CLEMMENS A.J. (2002). Measuring and improving irrigation performance at the field level, *Transaction of ASAE*, Vol. 22, N°8, 89-96.
- CURE J.D., ACOCK B. (1986). Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey, *Agr. For. Meteorol.*, Vol. 38, 127-145.
- DOORENBOSS J., KASSAM A.N. (1979). Yield response to water. Irrigation and drainage, Paper N° 33, Rome: Food and Agriculture Organization (FAO), 193p.
- DOWNING T.E., BARROW E.M., BROOKS R.J., BUTTERFIELD R.E., CARTER T.R., HULME M., OLESEN J.E., PORTER J.R., SCHELLBERG J., SEMENOV M.A., VINTHER F.P., WHEELER T.R., WOLF J. (2000). Quantification of uncertainty in climate change impact assessment. In: Downing, T.E., Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Lonsdale, K.G. (Eds.), *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe*, Environmental Change Unit, University of Oxford, UK, 415-434.
- DUGONI F. (2001). Il piano di gestione agronomica nelle strategie per un'agricoltura ecocompatibile: metodologie, strumenti e applicazioni reali. *Genio Rurale*, Vol. 5, 42.
- EL ATIRI R.(2004). Les efforts de modernisation de l'agriculture irriguée en Tunisie, *Projet INCO-WADEMED, Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée*, Rabat, 2004, 19 au 23 avril.
- EL HAFID R., SMITH D.H., KARROU M., SAMIR K. (1998). Physiological attributes associated with early-season drought resistance in spring durum wheat cultivars, *Can. J. Plant Sci.*, Vol.78, 227-237.
- EL HANI M. (1997). La céréaliculture tunisienne face aux facteurs économique et climatiqueMedit, Vol. 8, N°1, 29-35
- ELLIS R.H., HADLEY P., ROBERTS E.H., SUMMERFIELD R.J. (1990). Quantitative relations between temperature and crop development and growth, In: *Climate Change and Genetic Resources*. M. Jackson, B.V. Ford-Lloyd and M.L. Parry (eds.). Belhaven Press, London, 85-115.
- ERCHIDI A.E., TALOUIZTE A., BEN BELLA M. Relation entre certains paramètres contrôlant les pertes en eau et le rendement grain chez neuf variétés de blé dur soumises au stress hydrique. In: Royo, C. (ed.), Nachit, M. (ed.), Di Fonzo, N. (ed.), Araus J.L. (ed.). *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza: CIHEAM, 2000. p.279-282 (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens;n.40.

- FALKENMARK M. (2007). Global Warming: Water the Main Mediator. Stockholm Water Front, No. 2, 6-7, Stockholm International Water Institute (SIWI), Stockholm, Sweden.
- FILALI B.A. (2004). Enjeux stratégiques et défis majeurs de l'irrigation dans les pays du Maghreb. Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée, Rabat, du 19 au 23 avril 2004.
- FISCHER R.A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature, *J. Agricul. Sci., Cambridge*, Vol. 105, 447-461
- FISCHER G., TUBIELLO F.N., VAN VELTHUIZEN H., WIBERG D. (2006). Climate change impacts on irrigation water requirements: global and regional effects of mitigation, 1990-2080, *Tech.Forecasting Soc. Ch.*
- FRIJA A., CHEBIL A., CHEIKH M'HAMED H. (2013). Marginal value of irrigation water in Wheat production systems of central Tunisia, 4th International Conference of the African Association of Agricultural Economists, September 22-25, 2013, Hammamet, Tunisia.
- GASMI F., BELLOUMI M., MATOUSSI M.S. (2010). Climate Change Impacts on Wheat Yields in Tunisia: An Econometric Analysis", paper presented at ERF 17th Annual Conference, 20-22 March, 2011, Antalya, Turkey.
- GEDNEY N., COX P.M., BETTS R.A., BOUCHER O., HUNTINGFORD C., STOTT P.A. (2006). Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records, *Nature*, Vol.439, N°7078, 835-838.
- GIANNAKOPOULOS C., BINDI M., MORIONDO M., LESAGER P., TIN T. (2005). Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise, *WWF Report*, Gland, Switzerland, WWF.
- GRASHOFF C., DIJKSTRA P., NONHEBEL S., SCHAPENDONK A.H.C.M., VAN DE GEIJN S.C. (1995). Effects of climate change on productivity of cereals and legumes, model evaluation of observed year-to-year variability of the CO₂ response, *Global Change Biol.*, Vol.1, N°6, 417-428.
- HODGES T. (1991). *Predicting Crop Phenology*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- IPCC. (2001). *Climate change: Impacts, Adaptations and Vulnerability, contribution of WG II to the third assessment report of the Intergovernmental panel on Climate Change*, edited by M.C. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Cambridge University press, 547p.
- JOUBE A.M., KHEFFACHE Y., BELGHAZI S. (2000). La filière des céréales dans les pays du Maghreb: constante des en jeux, évolution des politiques. In: Allaya M. (ed.). *Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000*. Montpellier: CIHEAM, 1995. Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; N°14. 169-192.
- KASSAM A.H. (1981). Climate, soil and land resources in North Africa and West Asia, In J. Monteith & C. Webb, eds. *Soil water and nitrogen*, 1-29. The Hague, Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk.

- KIMBALL B.A., KOBAYASHI K., BINDI M. (2002). Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment, *Adv. Agron.*, Vol.77, 293-368
- KIMBALL B.A., PINTER J.R. P.J., GARCIA R.L., LAMORTE R.L., WALL G.W., HUNSAKER D.J., WECHSUNG G., WECHSUNG F., KARTSCHALL T. (1995). Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment, *Global Change Biol.*, Vol.1, 429-442.
- KIMURTO P.K., KINYUA M.G., NJOROGE J.M. (2003). Response of bread wheat genotypes to drought simulation under a mobile rain shelter in Kenya, *African Crop Sci. J.*, Vol.11, 225-234
- KOLDERUP I. (1979). Application of different temperatures in three growth phases of wheat, II. Effects on ear size and seed setting, *Acta Agriculturae Scandinavica*, Vol.29, 11-116.
- LATIRI K., LHOMME J.P., ANNABI M., SETTER T.L. (2010). Wheat production in Tunisia: Progress, inter-annual variability and relation to rainfall., *Europ. J. Agron.*, Vol.33, 33-42
- LEBDI F. (2004). Appui pour l'irrigation et la gestion des systèmes hydrauliques, *Cahier Options méditerranéennes, Series B, N°52. Irrigation Systems Performance*, 203-213.
- LEBDI F. (2009). Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché, cas de la Tunisie, *Les notes d'analyse du CIHEAM. N°51*, 83p.
- LEVRAULT F. (2010). Changement climatique et irrigation. Actes du colloque CLIMATOR, pp. 44-46, 17-18 juin 2010, INRA Versailles.
- LONG S.P., AINSWORTH E.A., LEAKEY A.D.B., NOSBERGER J., ORT D.R. (2006). Food for thought: lower expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations, *Science* 312, 1918–1921 et 30%.
- LÓPEZ-BELLIDO R.J., LÓPEZ-BELLIDO L. (2001). Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization, *Field Crops Res.*, Vol.71, 31-46.
- MAILHOL J.C., ZAIRI A., SLATNI A., BEN NOUMA B., EL AMANI H. (2004). Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia, *Agricul. Water Manage.*, Vol.70, 19-37.
- MCKENNEY M.S., ROSENBERG N.J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change, *Agric. For. Meteorol.*, Vol.64, 81-110.
- MEKKI K. (2009). La politique de l'eau en Tunisie, un portrait, conférence régionale sur la gouvernance de l'eau. CITET – Tunis, Juillet, 2009.
- MILANO M., RUELLAND D., FERNANDEZ S., DEZETTER A., ARDOIN-BARDIN S., FABRE J., THIVET G., SERVAT E. (2013). Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes, *Hydrol. Sci. J.*, Vol.58, N°3,498-518
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE et GIZ. (2011). Elaboration de la "Stratégie Nationale sur le Changement Climatique" de la Tunisie. Rapport de diagnostic, 148p.

- MONTENY E.A. (1970). Bilans hydriques et énergétiques d'une culture de blé en région semi-aride, Annales de L'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, Vol.43, 136 p.
- MOTT K.A. (1990). Sensing of atmospheric CO₂ by plants, Plant Cell Environ., Vol.13, 731-737.
- MOUGOU R., ABOU-HADID A., IGLESIAS A., MEDANY M., NAFTI A., CHETALI R., MANSOUR M., EID H. (2008). Adapting dryland and irrigated cereal farming to climate change in Tunisia and Egypt. In: Leary N, Adejuwon J, Barros V, Burton I, Kulkarni J, Lasco R (Ed.), Climate change and adaptation book, Earthscan.
- MOUHOUCHE A., BOURAHLA A. (2007). Optimisation de l'irrigation d'appoint apportée a différentes phases phénologiques d'une culture de blé dur (triticum durum), Sci. Technol., C – N°25, 53-58.
- MURRAY G.M., MARTIN R.H., CULLIS B.R. (1990). Relationship of the severity of Septoria tritici Blotch of wheat to sowing time, rainfall at heading and average susceptibility of wheat cultivars in the area, Austr. J. Agric. Res., Vol.41, 307-315.
- OLESEN J.E., JENSEN T., PETERSEN J. (2000). Sensitivity of field-scale winter wheat production in Denmark to climate variability and climate change, Clim. Res., Vol.15, 221-238.
- OWEIS T, HACHUM A.(2004). Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa, 4th international crop science congress 26th, September to 1st October 2004, Queensland, Australia.
- OWEIS T. HACHUM A.(2009). Supplemental irrigation for improved rainfed agriculture in WANA region. In: Wani, S.P., Rockström, J. and Oweis, T. (Ed.), Rainfed agriculture: Unlocking the potential. London: CAB International, 182-196
- OWEIS T., ZHANG H., PALA M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment, Agron. J., Vol.92, 232-238.
- PAEZ A., HELLMERS H., STRAIN B.R. (1984). Carbon dioxide enrichment and water stress interaction on growth of two tomato cultivars, J. Agric. Sci., Vol.102, 687-693.
- PARRY M., ROSENZWEIG C., LIVERMORE M. (2005). Climate change, global food supply and risk of hunger, Phil. Trans. R. Soc. B (2005), N° 360, 2125-2138.
- PARRY M.L., FISCHER C., LIVERMORE M., ROSENZWEIG C., IGLESIAS A. (1999). Climate change and world food security: a new assessment, Global Environ. Change, Vol.9, 51-67.
- REILLY J. (1996). Climate Change, Global Agriculture and regional vulnerability. In: F. Bazzaz and W. Sombroek (Ed.), 237-265.

- RINALDI M. (2009). A simulation approach to investigate options for mitigation and crop adaption to climate change in Mediterranean area, IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 6 (2009) 372038.
- SHNEIDER A.D., HOWELL T.A. (2001). Scheduling deficit wheat irrigation with data from an evapotranspiration network, Trans. Amer. Soc. Civil Eng., Vol.44, N°6, 1617-1623.
- SINGH B., EL MAAYAR M., ANDRÉ P., BRYANT C.R., THOUEZ J.P. (1998). Impacts of a GHG-induced climate change on crop yields: effects of acceleration in maturation, moisture stress and optimal temperature, Clim. Change., Vol.38, 51-86.
- SKOURI M. (1994). Les dégradations du milieu et les mesures de protection- Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, 80, N°9, 49-82.
- SLAMA A. (2002). Étude comparative de la contribution des différentes parties du plant du blé dur dans la contribution du rendement en grains en irrigué et en conditions de déficit hydrique, Thèse de doctorat en biologie, faculté des sciences de Tunis.
- SLAMA A., BEN SALEM M., BEN NACEUR M., ZID, E. (2005). Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance, Science et changements planétaires / Sécheresse, Vol.16, N° 3.
- SMIT B., BURTON B., KLEIN R.J.T., WANDEL J. (2000). An Anatomy of Adaptation to Climate Change and Variability, Clim. Change, Vol.45, 223-251.
- SMITH B., SKINNER M. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a topology, Mitig. Adapt. Strateg. Glob Change, Vol.7, 85-114.
- SORRELLS M.E., DIAB A., NACHIT M. (2000). Comparative genetics of drought tolerance, Options méditerranéennes, série A (Séminaires méditerranéens), N°40, 191-201.
- STODDARD F., MÄKELÄ P., PUHAKAINEN T.A. (2011). Adaptation of boreal field crop production to climate change, in J Blanco & H Kheradmand (eds), Climate Change—Research and Technology for Adaptation and Mitigation InTech , Rijeka, Croatia , 403-430.
- SUN H.Y., LIU C.M., ZHANG W.Y., SHEN Y.J., ZHANG Y.Q. (2006). Effects of irrigation on xater balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricul. Water Manage.*, Vol.85, 211-218.
- THIBAUT H.L.(2009). Les arbitrages concernant l'eau agricole dans un contexte de raréfaction de la ressource, Conférence « Crise alimentaire et raréfaction de l'eau au Maghreb », Paris, février.
- THOMAS J.M.G., BOOTE K.J., ALLEN J.R., GALLO-MEAGHER L.H., DAVIS J.M. (2003). Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance, *Crop Science*, Vol.43, N°4, 1548-1557.
- TIAN Z., SHI J., GAO Z., TUBIELLO F.N. (2008). Assessing the impact of future climate change on wheat production in Huang-Huai-Hai Plain in China based on GIS and crop model. *Remote Sensing and Modeling of*

Ecosystems for Sustainability V., Edited by Gao, Wei; Wang, Hao. Proceedings of the SPIE, Volume 7083, article id. 70830H, 10 p.

TINGEM M., RIVINGTON M. (2009). Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Vol.14, 153-168.

VAN DE GEIJN S.C., GOUDRIAAN J. (1996). The effects of elevated CO₂ and temperature on transpiration and crop water use. In: Bazzaz, F., Sombroek, W. (eds.) Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes, FAO and John Wiley & Sons, Chichester, UK.

VAN GRUNDERBEECK P., TOURRE Y.M. (2008). Bassin méditerranéen: changement climatique et impacts au cours du XXI^e siècle. In : Thibault H.-L. et Quéfélec S. (ss dir.): Changement climatique et énergie en Méditerranée (partie I, chap. 1), 558 p