

## Calibration du modèle FAO *AquaCrop* pour la culture du blé en conditions méditerranéennes

F.E. Belkhiri<sup>\*(1)</sup>, M. Semiani<sup>(1)</sup>, L. Heng<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> INRAA - Division de Recherche Bioclimatologie et Hydraulique Agricole, Station de recherche de Mehdi Boualem, Alger. Algérie.

<sup>(2)</sup> IAEA - International Atomic Energy Agency, Section of Soil and Water Management and Crop Nutrition (SWMCN), Vienna, Austria.

\*Auteur de correspondance : fed\_belkhiri@yahoo.fr

---

Reçu : 14 juin 2019

Révisé : 06 novembre 2019

Accepté : 11 novembre 2019

---

**Résumé :** Le modèle AquaCrop de la FAO est mis à contribution pour une meilleure compréhension de la réponse des cultures au climat et aux scénarios de gestion en conditions méditerranéennes. Le but de la présente étude est la calibration d'AquaCrop pour une culture de blé au niveau de la station INRAA de Mehdi Boualem (Alger). Des données expérimentales collectées durant 2 campagnes successives (2015-2016 et 2016-2017) ont été utilisées pour calibrer le modèle en fonction des paramètres de la teneur en eau du sol (*SWC*), de la biomasse aérienne (*B*) et de la couverture de la canopée (*CC*) du blé en conditions pluviales. Par comparaison entre les données simulées et celles mesurées *in situ*, la performance du modèle a été évalué via les indicateurs statistiques : erreur quadratique normalisée *nRMSE* et indice de Willmott *d*. Les résultats ont montré de bons ajustements entre ces deux types de données pendant les 2 campagnes successives et une simulation jugée excellente notamment pour les paramètres *SWC* et *CC* avec des *nRMSE* respectives de 8,0% et 11,3% en 1<sup>ère</sup> campagne et de 3,7% et 1,8% en 2<sup>ème</sup> campagne. Les valeurs de l'indice *d*, proches de l'unité, variait au cours des 2 campagnes entre 0,86 et 0,97 et 0,96 et 0,98 pour les mêmes paramètres. En terme de prédiction, AquaCrop a montré une réponse adéquate en relation avec le stress hydrique survenu au printemps de la 2<sup>ème</sup> campagne induisant une réduction du rendement en grain de 2,9 ton/ha par rapport à la 1<sup>ère</sup> campagne caractérisée par une meilleure répartition des pluies. Le modèle serait un outil d'un grand intérêt au service du programme du secteur de l'agriculture notamment pour le développement de stratégies d'irrigation d'appoint des céréales à l'échelle nationale.

**Mots Clés :** modèle, blé dur, teneur en eau du sol, couvert végétal, biomasse végétale aérienne.

**Summary :** The FAO AquaCrop model is used for a better understanding of the response of crops to climate and management scenarios under Mediterranean conditions. The aim of the present study is the calibration of AquaCrop for a wheat crop at the INRAA station of Mehdi Boualem (Algiers). Experimental data collected during 2 successive growth seasons (2015-2016 and 2016-2017) were used to calibrate the model in relation with the parameters of the soil water content (*SWC*), the aboveground biomass (*B*) and the canopy cover (*CC*) of wheat under rainfed conditions. By comparison between the data simulated by the model and those measured in situ, the performance of the modeling was evaluated via the statistical indicators: normalized squared error *nRMSE* and Willmott index *d*. The results showed good adjustments between these two types of data for the 2 successive growing seasons and an excellent simulation especially for the *SWC* and *CC* parameters with *nRMSE* of 8.0% and 11.3% respectively in the first season and 3.7% and 1.8% in the 2nd season. Index *d* values close to unity ranged over the two seasons between 0.86 and 0.97 and 0.96 and 0.98 for the same parameters. In terms of prediction, AquaCrop showed an adequate response in relation to the water stress that occurred in the spring of season 2 inducing a reduction in grain yield of 2.9 ton/ha compared to the 1st season characterized by a good distribution of rainfall during the crop cycle. The model would be a tool of great interest for the agriculture sector program, particularly for the development of supplementary irrigation strategies for cereals at the national level.

**Key Words :** Model, durum wheat, soil water content, crop biomass, canopy cover.

## INTRODUCTION

En raison de leur intérêt stratégique, les céréales sont cultivées en Algérie sur de vastes étendues du territoire, principalement dans les hautes plaines et les hauts plateaux, avec en moyenne 3,3 Millions d'hectares emblavées chaque année en blé dur, blé tendre et orge (jachère non comprise), soit 29% de la SAU dont 62% cultivés

uniquement en blés (DSASI, 2018). Dans ces régions semi-arides, les précipitations conditionnent fortement le développement des céréales ainsi que leur rendement. Dans les cas extrêmes, la sécheresse provoque souvent leur avortement. Ainsi, la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations a un impact direct sur la production céréalière qui fluctue, bon an mal an, entre 50 et 30 Millions de quintaux produits

annuellement. Afin de maintenir un niveau de production céréalière acceptable, l'irrégularité du climat a conduit les pouvoirs publics à recourir à une politique d'emblavement massif afin d'atténuer la faiblesse des rendements en cas de sécheresse durant le cycle de la céréale. Ainsi, la hausse des surfaces emblavées permettrait tout juste, dans le meilleur des cas, une augmentation sensible de la production céréalière mais pas la productivité à l'hectare qui reste tributaire du principal facteur limitant qu'est le stress hydrique, et cela malgré l'effort consenti par les pouvoirs publics dans l'amélioration du paquet technologique.

Particulièrement en milieux arides, des modèles de simulation, mettant en relation le développement d'espèces herbacées avec l'efficacité de l'eau, sont fréquemment utilisés par le monde. Ils tendent à analyser les réactions des cultures aux stress environnementaux et pour tester les pratiques de gestion (Boote *et al.*, 1996 ; Sinclair et Seligman, 1996) ainsi que des stratégies prometteuses pour l'irrigation (Lobell et Ortiz-Monasterio, 2006 ; Heng *et al.* (2007). Historiquement, la modélisation de ces aspects a débuté dans les années 60 dans l'objectif de prévoir l'évolution de la production agricole à l'échelle régionale. Depuis, plusieurs modèles parmi lesquels WOFOST (Diepen Van, 1989), EPIC (Williams, 1989), DSSAT (Jones *et al.*, 2003) et CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), ont été validés et comparés (Touré *et al.*, 1995 ; Todorovic *et al.*, 2009) dans le but

d'une meilleure compréhension de la réponse des cultures au climat et aux scénarios de gestion, sachant que chaque modèle possède ses propres forces et faiblesses (Fraisie *et al.*, 2006 ; Resop *et al.*, 2012). Ces logiciels sont principalement utilisés par des scientifiques et certains utilisateurs dans les domaines avancés d'agriculture hautement commerciale (Toumi *et al.*, 2016). C'est pour surmonter ces complications que, en 2009, l'*United Nations Food and Agriculture Organization* (FAO) a développé le modèle AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2009) à partir de l'algorithme de réponse du rendement des cultures à l'eau (Doorenbos et Kassam, 1979). Ce nouveau modèle est basé essentiellement sur la productivité de l'eau pour la simulation de la croissance et la production des cultures herbacées en fonction de leurs besoins en eau sous différents régimes : pluvial, irrigation totale, irrigation d'appoint et irrigation déficitaire. Depuis son lancement, il a été paramétré et testé sous différentes conditions environnementales et pour une large gamme de cultures comme le maïs, le tournesol et la betterave sucrière (Stricevic *et al.*, 2011), l'orge (Abrha *et al.*, 2012), le blé d'hiver (Iqbal *et al.*, 2014)...

Actuellement, on ne recense qu'un seul article publié sur AquaCrop en relation avec le blé cultivé à l'est du pays dont les rendements sont souvent limités par le déficit hydrique (Guendouz *et al.*, 2014). Pourtant, avec ses performances éprouvées

en matière de prédiction des productions et rendements d'une large gamme d'espèces herbacées, cet outil pourrait être d'un grand intérêt au service du développement agricole. Une option envisageable serait son utilisation en appui au programme d'intensification des céréales du secteur de l'agriculture avec une conception de scénarios de gestion de l'irrigation d'appoint pour l'amélioration des rendements céréaliers à l'échelle nationale.

La présente étude rentre dans le cadre du projet de coopération INRAA-AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique), intitulé : “*Enhancing Crop Nutrition and Soil and Water Management and Technology Transfer in Irrigated Systems for Increased Food Production and Income Generation (AFRA, RAF/5/071)*”. Elle a pour objet la calibration du modèle AquaCrop sur l'apport hydrique en rapport à la productivité du blé cultivé durant 2 saisons différenciées par la densité de semis et les conditions climatiques. Les résultats de la calibration sont évalués dans le but de la connaissance de la performance du modèle dans les conditions environnementales du nord algérien.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1. Description du modèle AquaCrop

Facile à utiliser, le modèle nécessite aussi qu'un nombre réduit de paramètres explicites qui sont principalement des variables d'entrée pour son fonctionne-

ment: climat, sol, techniques agricoles et caractéristiques des cultures. Ces variables peuvent être facilement dérivés de la recherche expérimentale (Steduto *et al.*, 2009, Vanuytrecht *et al.*, 2014).

AquaCrop différencie entre les paramètres conservatifs (fixés) et non-conservatifs (spécifiques). Les paramètres conservatifs ne changent pas avec le site géographique, les pratiques de gestion à la parcelle ou le temps, qui sont déterminés avec des données obtenues dans des conditions favorables et sans limitations, mais restent applicables pour les conditions de stress via la modulation de leurs fonctions de stress-réponses (Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009). Ces paramètres incluent le couvert végétal de croissance et de déclin de la canopée, le coefficient cultural de transpiration au couvert maximal, WP pour la biomasse, et les seuils de tarissement de la réserve en eau du sol. Ces paramètres sont censés être applicables pour un large spectre de conditions et ne sont pas spécifiques pour un cultivar donné (Steduto *et al.*, 2012).

En revanche, les paramètres non-conservatifs nécessitent un ajustement des conditions environnementales ; à savoir :

- la densité de plantation,
- les paramètres phénologiques,
- les durées nécessaires pour atteindre les stades végétatifs remarquables de la culture : l'émergence, le couvert végétal maximal, la floraison, la sénescence et la maturité physiologique.

D'autres paramètres non-conservatifs sont affectés par le climat, l'itinéraire technique ou la propriété intrinsèque des sols. Ils nécessitent d'être corrigés par l'opérateur ; et s'ils ne sont pas disponibles, ils pourront être estimés par le modèle (Raes *et al.*, 2009, 2011).

## 2. Site d'Essai

L'expérimentation a été menée durant 2 campagnes agricoles successives, entre 2015-2016 et 2016-2017, appelées ici saison 1 et saison 2, au niveau de la station de recherche INRAA de Mehdi Boualem à Baraki (latitude : 36,6835° nord, longitude : 3,1080° est, altitude : 18 m asl). La station est située dans la plaine de la Mitidja-Centre, caractérisée par des sols riches, profonds et lourds, à forte teneur en argile. L'analyse des sols a révélé l'existence de 3 horizons à texture argilo-limoneuse avec des taux élevés en argile augmentant en fonction de la profondeur du sol. A des profils de 0-25 cm, 25-55 cm et au-delà de 55 cm de profondeur, ces taux sont respectivement de 41, 49 et 52%. Le pH des sols de la station est généralement légèrement basique avec 7,8, la CEC varie entre 17,9 et 15 meq/100g et le calcaire total a un taux compris entre 7,9 et 7,8 %. Le taux de matière organique est de 2,02 % en surface et de 0,69 % en profondeur. Il est recommandé de recourir aux apports d'engrais en début de campagne même si les propriétés physiques et chimiques de ces sols indiquent de bonnes aptitudes culturales qui,

généralement, sont dédiés aux cultures à forte valeur ajoutée comme l'arboriculture fruitière et le maraichage en toutes saisons.

En collaboration avec l'université de l'Etat de Washington (Saxton, 2009), le service de recherche agronomique de l'USDA a développé un calculateur SPAW (Soil-Plant-Air-Water) qui aura permis de restituer les bonnes valeurs indicatives des caractéristiques physiques du sol requises en tenant compte de sa teneur en argile et en sable. Les sols de la station sont à texture argilo-limoneuse avec des humidités volumiques, jusqu'à une profondeur de 1 m, estimées à 42, 28 et 53 % vol, respectivement pour les humidités à la capacité au champ ( $\theta_{CC}$ ), au point de flétrissement permanent ( $\theta_{PPF}$ ) et à la saturation ( $\theta_{SAT}$ ). La réserve utile du sol étant de 140 mm/m. La densité apparente est en moyenne de 1,23 g/cm<sup>3</sup>, depuis les couches superficielles jusqu'en profondeur. Les conductivités hydrauliques à saturation  $K_{SAT}$  sont de l'ordre de 110 mm/jour dans l'horizon de surface et 81 mm/m au niveau de l'horizon sous-jacent, ce qui dénote une prédisposition de ces sols à l'engorgement après les fortes pluies d'hiver.

## 3. Culture

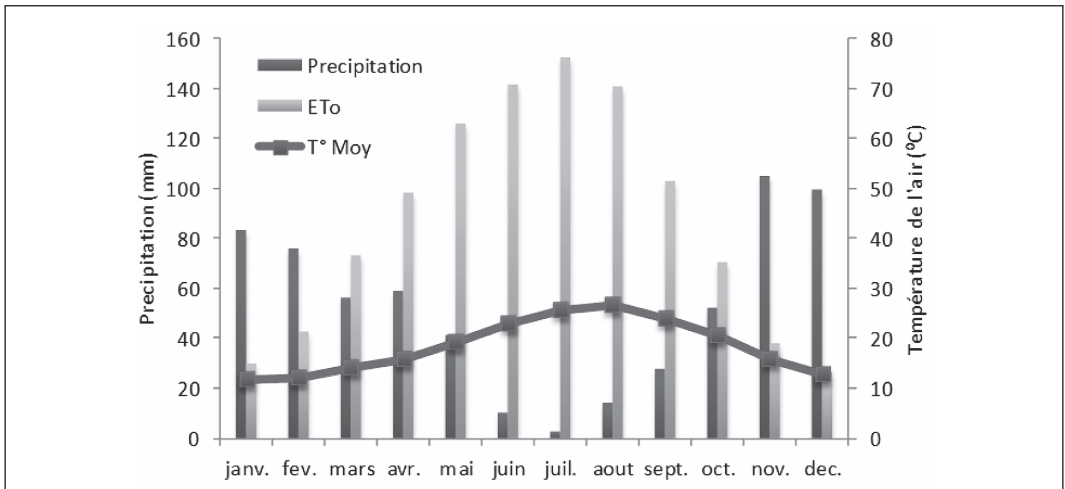
*Vitron* est la variété de blé dur (*Triticum turgidum durum*) testée en régime pluvial pendant 2 saisons successives, de mi-décembre à mi-juin sur une parcelle carrée de 1600 m<sup>2</sup>. La préparation du lit de

semences démarre en fin-octobre par un labour, suivi d'un passage du cover-crop puis de la herse en début-décembre. Les besoins totaux de la culture en éléments fertilisants sont apportés en une seule fois en début de campagne. L'engrais tertiaire N P K dosé à 15% pour chacun des 3 éléments majeurs est apporté à raison de 1 q/ha selon les recommandations de l'Institut Technique des Grandes Cultures. Dans notre cas, la simulation AquaCrop ne tient pas compte de la réponse de la culture au stress dû à la faiblesse de la fertilité du sol qui peut générer une contrainte à l'accroissement du couvert végétal. Les semis sont réalisés à la mi-décembre, à la faveur des pluies automnales, à l'aide d'un semoir en ligne avec des densités de semis de 340 et 310 grains/m<sup>2</sup> respectivement en saison 1 et 2, normes calculées selon la zone géographique et la variété. A l'observation de l'état général des essais, la culture a été jugé

indemne de tout problème phytosanitaire et donc ne nécessitant pas de traitement à base de pesticides.

#### 4. Analyse des Données Climatiques

Le climat de la région est du type méditerranéen avec des hivers doux et pluvieux et des étés chauds et secs. Le diagramme ombro-thermique de Bagnouls-Gausson situe la saison sèche entre mai et septembre, période au cours de laquelle les cultures d'été nécessitent un apport en eau par l'irrigation (Fig.1). Les enregistrements réalisés localement sur 25 ans (1990-2014) affichent une normale annuelle des précipitations de 628 mm dont une forte proportion (76 %) est enregistrée entre novembre et avril. Cette quantité subvient largement aux besoins en eau du blé sans recourir à l'irrigation. Pour une température moyenne annuelle de 18,4 °C, les extrêmes oscillent



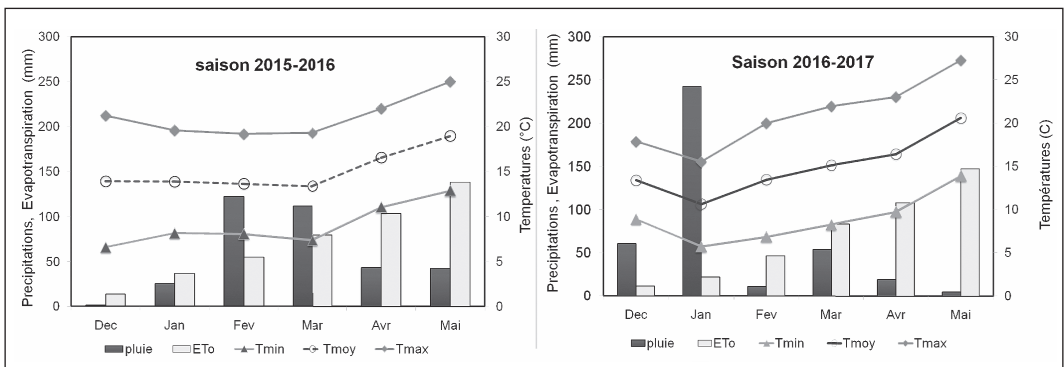
**Figure 1 :** Moyennes mensuelles des précipitations, évapotranspiration et température de l'air enregistrées à la station INRAA de Mehdi Boualem (Alger) en 25 années (1990-2014).

autour de 6,6 °C pour le mois le plus froid de janvier et 31,8 °C pendant les fortes chaleurs du mois d'août. L'évapotranspiration est de 1042 mm/an pour une moyenne journalière de 2,8 mm, avec une tendance à la hausse de janvier (1 mm/j) à août (5 mm/j). Le déficit hydrique annuel « ETP-P » est de 414 mm dont une grande partie est enregistrée entre juin et septembre.

La simulation avec le logiciel *AquaCrop* (ver. 6.0) a nécessité l'utilisation de paramètres climatiques journaliers qui ont été enregistrés à l'aide d'une station météo automatique « iMetos » installée sur le site. Il s'agit des températures mini et maxi de l'air (°C), la vitesse du vent à une hauteur de 2 m (m/s), la radiation solaire (W/m<sup>2</sup>), l'humidité relative de l'air (%) et la pluviométrie (mm/j). Ces variables d'entrée sont utilisées pour la modélisation des composantes du bilan hydrique et pour le calcul de l'évapotranspiration de référence selon la méthode FAO 56 Penman-

Monteith : EToPMF56 (Allen *et al.*, 1998). Le régime thermique est directement dérivé à partir de l'accumulation des températures servant à estimer la durée des phases phénologiques du blé par la détermination des degrés-jours de croissance. La concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> est extraite à partir des données projetées de 1902 à 2099 de l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaï qui servent à la simulation de la production de la biomasse aérienne par le modèle.

La Figure 2 montre l'évolution mensuelle des principaux paramètres climatiques pour les 2 saisons. Le cumul des précipitations enregistrées entre mi-décembre et fin mai est de 347 et 392 mm respectivement pour les saisons 1 et 2. Malgré un écart de 45 mm au bénéfice de la saison 2, la comparaison des anomalies pluviométriques respectives rapportés à la normale 1990-2014 montre une faible différence (-5% et +7%). Toutefois, une meilleure répartition des pluies est observé en saison



**Figure 2 :** Evolution des cumuls mensuels des précipitations, de l'ETo et des températures de l'air enregistrées à la station INRAA de Mehdi Boualem (Alger) au cours des saisons expérimentales successives 2015-2016 et 2016-2017.



1 avec 82% des apports enregistrés entre, contre seulement 23% pour la saison 2 qui est beaucoup plus caractérisée par la sécheresse durant cette même période succédant à de fortes pluies en janvier (242 mm). A cause de cet épisode sec entre février à mai, le cumul des pluies n'a été que de 89 mm en saison 2 contre 320 mm en saison 1 (Fig. 2). Rapporté à la normale des 25 années, ce déficit pluviométrique en saison 2 est estimé à -62%. Son impact s'est traduit par l'apparition d'un stress hydrique persistant auquel une sénescence précoce de la culture a succédé au printemps 2017. Un autre facteur associé à cela est l'observation, à la surface du sol, de fentes de retrait habituellement perceptibles en plein été.

Les températures de l'air ont des tendances similaires. En janvier 2017, il est à signaler une chute brutale de 3 °C de la température après le passage d'un front froid accompagné de pluies abondantes. Les températures moyennes sont comprises entre 13 et 14 °C en janvier et 19 et 21 °C en mai en saison 1 et 2. Les cumuls des évapotranspirations entre mi-décembre et fin mai sont de 425 et 419 mm et les déficits hydriques, de 78 et 27 mm. Ce déficit en faveur de la saison 2 cache, néanmoins, une mauvaise répartition des pluies constatée au cours de cette saison.

## 5. Données culturales

Les données d'entrée issues des mesures in-situ sont utilisées pour l'évaluation de la performance du modèle prenant en compte

: la teneur en eau du sol sur 1 m de profondeur (*SWC en % vol.*), la production en biomasse végétale aérienne (*B en ton/ha*) et le taux de couverture de la canopée (*CC en %*). La méthode de mesure de l'humidité du sol (*SWC*) a changé dans le temps: elle est pratiquée par la méthode gravimétrique en saison 1 puis à l'aide de la sonde capacitive portable Diviner 2000 de Sentek (<https://sentektechnologies.com/product-range/soil-data-probes/diviner-2000/>) en saison 2. Contrairement à la méthode classique, le Diviner 2000 permet une répétitivité plus accrue des mesures avec une meilleure précision.

La quantité de biomasse aérienne (*B*) produite par unité de surface est déterminée à partir des plants de blé prélevés sur des microparcelles de ¼m<sup>2</sup> qui sont mis à sécher à l'étuve pendant 48 h à 68 °C jusqu'à obtention d'un poids constant (Raes, 2015).

Le taux de couverture de la canopée (*CC*) est réalisé par photographie à midi, à l'aplomb du couvert végétal. Les images sont ensuite traitées avec le logiciel de cartographie ArcGIS 10.1 pour la classification des objets de l'image par la méthode *Maximum Likelihood Classification*. Le taux de couverture de la canopée est déterminé, par la suite, à partir du rapport entre le nombre de pixels de l'image réservés à la culture et le nombre total de pixels de l'image.

Des observations ont également été réalisées sur la parcelle afin de détecter l'apparition des phases phénologiques du blé, en relation avec les paramètres non-conservatifs de la culture, qui sont utiles à la calibra-



tion du modèle. Le Tableau I reprend, dans l'ordre de datation, les informations recueillies ainsi que les mesures réalisées.

## 6. Calibration du modèle

La simulation utilise ici 4 types de données d'entrée qui sont des fichiers de données élaborées pour le climat, la culture avec les dates des principales phases phénologiques, les caractéristiques physiques du

sol et enfin les conditions d'humidité initiales du sol. D'après Greets *et al.*, (2009), les conditions initiales du sol sont importantes à préciser car un changement minime de l'humidité du sol, par exemple de 8,5 à 10,5% vol., peut résulter, à la sortie du modèle, par une augmentation de 400 kg/ha en biomasse et un rendement supplémentaire de 250 kg/ha. Dans notre cas, cette contrainte a été contournée en fixant le démarrage de la simulation au 15 août de

**Tableau I.** Dates d'apparition des stades phénologiques du blé en relation avec les mesures de terrain réalisées à la station INRAA de Mehdi Boualem au cours des 2 saisons expérimentales 2015-2016 et 2016-2017.

Saison 2015-2016				Saison 2016-2017			
Stade du blé	Date	JAS	Mesures	Stade du blé	Date	JAS	Mesures
Semis	14-déc-15		SWC	Semis	16-déc-16		
Emergence 90%	27-déc-15	13		Emergence 90%	26-déc-16	10	
3-feuilles	03-janv-16	20	SWC, CC, B		12-janv-17	27	SWC
3-4 talles	01-févr-16	49	SWC, CC, B	3-feuilles	13-janv-17	28	
Epi 1 cm	29-févr-16	77	CC, B		18-janv-17	33	SWC
Epiaison	28-mar-16	105	SWC, CC, B		02-févr-17	48	SWC
Début floraison	11-avr-16	119	CC		17-févr-17	63	SWC
Début sénesc <sup>ce</sup>	18-avr-16	126		3-4 talles	19-févr-17	65	
Grain laiteux	03-mai-16	141	CC, B	Plein tallage	23-févr-17	69	CC, B
Grain pâteux	10-mai-16	148		Début redresse <sup>t</sup>	01-mars-17	75	SWC
	04-juin-16	173	SWC		07-mars-17	81	CC
Maturité	06-juin-16	175		Epi 1 cm	15-mars-17	89	
<i>JAS: Jours-Après-Semis, SWC: Soil Water Content (teneur en eau du sol en mm), CC: Canopy Cover (couverture de la canopée en %), B: Biomass (biomasse aérienne en t/ha).</i>				Début gonflement	20-mars-17	94	CC, B
				Epiaison	29-mars-17	103	CC
				Début floraison	05-avr-17	110	SWC, CC, B
					19-avr-17	124	SWC
				Sénescence préc.	26-avr-17	131	
				Grain pâteux	02-mai-17	137	
					05-mai-17	140	B
				Maturité	01-juin-17	167	

chaque année, date à laquelle l'humidité du sol en zone méditerranéenne est supposée être au point de flétrissement permanent à cause de la sécheresse des mois d'été.

La calibration de la couverture de la canopée ( $CC$ ) est essentielle pour la simulation de croissance des cultures (Andarzian *et al.*, 2011) parce qu'elle est prise comme base de calcul de la transpiration (Steduto *et al.*, 2007). Pour une meilleure appréciation des quantités d'eau effectivement utilisées par la plante pour sa croissance, l'évapotranspiration est séparée en évaporation et transpiration. Selon Raes *et al.* (2015), la transpiration de la culture ( $Tr$ ) est calculée automatiquement par le modèle en multipliant le pouvoir évaporant de l'atmosphère ( $ET_o$ ) par le taux de couverture ( $CC$ ) avec le coefficient cultural ( $K_{c_{Tr}}$ ) et en considérant le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ ) (Eq. (1)):

$$Tr = K_s (K_{c_{Tr}} CC) ET_o \quad (1)$$

La production en biomasse est proportionnelle à l'accumulation de la transpiration, c'est la relation conceptuelle qui est au cœur du fonctionnement d'AquaCrop. Ainsi pour un intervalle de temps donné, la biomasse cumulée ( $B$ ) est le résultat de de productivité de l'eau ( $WP$ ) et de la transpiration cumulée ( $\sum Tr$ ) (Steduto *et al.*, 2007) (Eq. (2)):

$$B = WP \sum_{j=1}^{j=n} Tr \quad (2)$$

AquaCrop permet de visualiser l'évolution de la phénologie du blé pour 4 stades de développement: émergence, couverture maximale de la canopée, sénescence et maturité. Après l'émergence ( $CC_o$ ), la transpiration augmente progressivement en même temps que la couverture de la canopée se développe pour atteindre sa valeur maximale ( $CC_x$ ) puis vient la phase de déclin enclenchée par le modèle et matérialisée par le coefficient de déclin de la culture CDC (Crop Decline Coefficient) qui se traduit par une diminution graduelle de l'activité photosynthétique et de la transpiration jusqu'à maturité des grains (Toumia *et al.*, 2015). La valeur de  $CC_x$  est souvent atteinte juste avant l'épiaison, au stade montaison.

Dans la présente étude, on a considéré que la surface foliaire du jeune plant de blé prise par défaut par le modèle est de 1,50  $cm^2$ /plant. Au stade émergence à 90%, la couverture initiale de la canopée ( $CC_o$ ) a été estimée sur la base de la densité des jeunes plants à la parcelle. Une estimation moyenne de la densité de plantation à l'hectare indiquant 3 226 667 et 2 723 915 plants/ha respectivement pour les saison 1 et 2 donne des  $CC_o$  de l'ordre de 4,84 et 4,09%, soient des taux très élevés mentionnés par le modèle. L'expansion du couvert végétal est simulée par AquaCrop après introduction dans le logiciel des dates d'apparition des 5 stades végétatifs du blé: émergence, couverture maximale de la canopée, floraison, début-sénescence et maturité physiologique.

A ce stade, le mode de développement de la couverture végétale est basé sur les jours calendaires. Le régime thermique intervient lorsqu'il est procédé à la reconversion du mode calendaire en mode thermique ou degrés-jours de croissance. Au même titre que les durées des phases phénologiques, AquaCrop utilise aussi les degrés-jours de croissance (GDD: Growing Degree Days) comme horloge interne par défaut pour tenir compte des effets des régimes de température sur la phénologie (Steduto *et al.*, 2012). La température moyenne pour un développement optimal du blé se situe entre 15 et 23 °C. Avec AquaCrop, la somme des degrés-jours du blé est calculée à partir d'une température de base ou zéro végétatif égal à 0°C et une température maximale atteignant les 26 °C. Cela signifie qu'au-delà de ce seuil maximal, il n'existe pas d'augmentation notable du développement de la culture. Le remplissage du grain apparaît habituellement durant les période chaudes de l'année quand la température moyenne est entre 20-30 °C (Steduto *et al.*, 2012).

## 7. Evaluation du modèle

La variation dans le temps de la teneur en eau du sol dans la zone racinaire jusqu'à 1 m de profondeur (*SWC*), l'évolution de la couverture de la canopée (*CC*), la production en biomasse aérienne (*B*) sont les variables qui ont fait l'objet d'évaluation de leur qualité par AquaCrop. Les données simulées (prédites) et observées (mesurées) ont été comparées dans le but de l'évaluation de

la performance du modèle par le biais de la combinaison d'indicateurs statistiques: les coefficients de corrélation de Pearson *r* et d'efficacité de Nash-Sutcliffe *EF*, l'Indice d'Accord *d* de Willmott, les erreurs quadratiques moyennes *nRMSE* et *RMSE*. Certains auteurs privilégient l'emploi des *nRMSE* et indice *d* pour la pertinence des résultats obtenus comparés aux autres indicateurs (Willmott, 1984 ; Legates et McCabe, 1999).

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ou *RMSE* (*Root Mean Square Error*) est l'un des indicateurs statistiques les plus largement utilisés (Jacovides and Kontoyiannis, 1995) qui mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions et les observations. Il évolue entre 0 et l'infini, avec 0 indiquant une bonne performance et l'infini, un modèle pauvre. La *RMSE* peut être normalisée en utilisant la moyenne de la variable observée (*O*). La *RMSE* normalisée (*nRMSE*) comme décrite par Loague et Green (1991) donne la mesure en pourcentage de la différence relative entre les données simulées et observées (Eq. (3)):

$$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \times \frac{100}{M} \quad (3)$$

où *S<sub>i</sub>* et *O<sub>i</sub>* sont respectivement les données simulées et observées, *M* est la moyenne des données observées et *n* est le nombre d'observations. La simulation est considérée comme excellente si la *nRMSE* est inférieure à 10%, bonne si elle est entre 10% et

20%, acceptable si elle est entre 20% et 30% et faible quand elle est supérieure à 30% (Jamieson *et al.*, 1991).

L'Indice d'Accord  $d$  a été proposé par Willmott en 1982 pour mesurer le degré auquel les données observées sont approchées par les données prédites. Il surpasse l'insensibilité du coefficient de corrélation  $r$  et le coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe  $EF$  aux surestimations ou sous-estimations systématiques par le modèle (Willmott, 1984 ; Legates et McCabe, 1999). Il va de 0 à 1, avec 0 indiquant aucun accord et 1 indiquant un parfait accord entre les données prédites et observées. L'équation de Willmott *et al.* (1985) présente le calcul de l'indice  $d$  comme suit (Eq. (4)):

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - M| + |O_i - M|)^2} \right] \quad (4)$$

où  $S_i$ ,  $O_i$  et  $M$  sont les mêmes que précédemment.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le Tableau II reprend les paramètres physiologiques du blé utilisés pour la calibration. Il identifie la source des termes utilisés: *conservé* concernant les paramètres maintenus identiques au modèle du blé pris par défaut, *mesuré* ceux ayant fait l'objet de mesures *in situ* puis introduit dans le modèle et enfin *calibré* ceux que le modèle a ajusté automatiquement en fonction des données d'entrée. Le terme *conservé* repré-

sente les paramètres conservatifs (fixés) de la culture, ne subissant aucun changement en relation avec le site géographique. De même, les paramètres non-conservatifs (spécifiques), nécessitant un ajustement en relation avec les conditions environnementales, sont concernés par le terme *mesuré*.

Les blés cultivés en Méditerranée sont essentiellement des cultivars de printemps à cycle intermédiaire entre 158-178 jours pour arriver à maturité, qui ne nécessitent pas ou peu de période de froid pour l'initiation de l'épiaison comme c'est le cas pour les blés d'hiver (Steduto *et al.*, 2012). Le tableau I indique que les durées du cycle du cultivar expérimenté, du semis à la maturité physiologique, sont dans les normes avec 176 et 168 jours pour les saisons 1 et 2. On observe comme même des durées plus courtes respectivement de 21 et 29 jours par rapport au blé pris par défaut paramétré à Bari en Italie. Les températures plus élevées de ce côté sud de la méditerranée ont pu induire une vitesse de croissance du blé sensiblement plus élevée conduisant à un raccourcissement du cycle. A ce titre, Porter et Gawith (1999) précisent que le développement ou la phénologie du blé dépend surtout de la température journalière ambiante. Les degrés-jours du semis à la maturité physiologique sont de 2400, 2673 et 2483 °C respectivement pour le blé pris par défaut et le blé cultivé localement. Le facteur du stress hydrique de la saison 2 a aussi influencé la phénologie du blé puisque, au printemps 2017, un jaunissement précoce des strates inférieures du blé avec une sénescence pré-

**Tableau II.** Paramètres physiologiques du blé utilisés dans *AquaCrop* pour la productivité de l'eau.

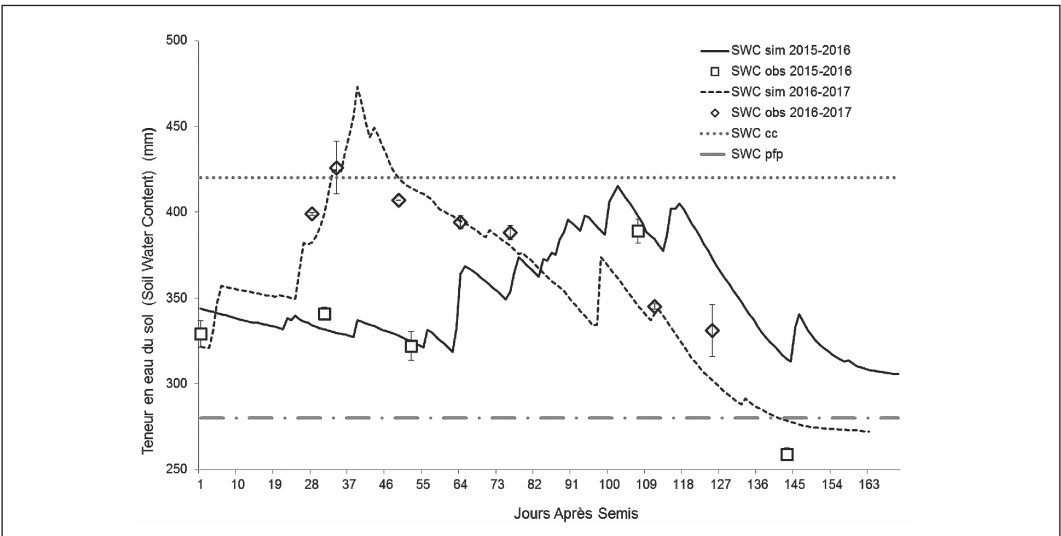
Paramètres	Par défaut	Saison 2015-2016	Saison 2016-2017	Source
Température de base (°C)	0,0	0,0	0,0	conservé
Température maximale (°C)	26,0	26,0	26,0	conservé
Nombre de plants à l'hectare	4 500 000	3 226 667	2 723 915	mesuré
Longueur totale du cycle de la culture (GDD) (°C)	2400	2673	2483	calibré
Couvert végétal initial (CC <sub>0</sub> ) (%)	6,75	4,84	4,09	calibré
Couvert végétal maximal (CC <sub>x</sub> ) (%)	96	91	76	calibré
Coefficient cultural maximal	1,10	1,10	1,10	conservé
Profondeur d'enracinement effective minimale (m)	0,30	0,30	0,30	conservé
Profondeur d'enracinement effective maximale (m)	1,50	1,10	1,10	adapté
Coefficient de croissance végétale (CGC) (%)	4,9	6,0	5,8	calibré
Coefficient de déclin de la végétation (CDC) (%)	7,2	6,4	7,6	calibré
Productivité de l'eau (WP*) (gram/m <sup>2</sup> )	15,0	15,0	15,0	conservé
GDD du semis à l'émergence (°C)	150	185	138	calibré
GDD du semis à l'enracinement maximal (°C)	864	1734	1780	calibré
GDD du semis au début de la sénescence (°C)	1700	1734	1780	calibré
GDD du semis à la maturité physiologique (°C)	2400	2673	2483	calibré
GDD du semis à la floraison (°C)	1250	1632	1430	calibré
GDD pour le stade floraison (°C)	200	252	221	calibré
Durée du semis à l'émergence (jours)	13	13	11	mesuré
Durée du semis au début de la sénescence (jours)	158	132	126	mesuré
Durée du semis à la maturité physiologique (jours)	197	176	168	mesuré
Durée du semis à la floraison (jours)	127	120	110	mesuré
Building up of Harvest Index during yield formation (GDD)	1100	1001	997	calibré
Building up of Harvest Index starting at flowering (days)	67	55	56	calibré
Indice de Récolte de Référence (HI <sub>0</sub> ) (%)	48	48	48	conservé
<i>GDD (Growing Degree Days): degrés-jours de croissance.</i>				

coce de la culture ont été observé au niveau de la parcelle. De même, durant cette même saison, la floraison a été plus précoce de 10 jours par rapport à la saison 1.

Les principaux paramètres climatiques mesurés *in situ* ont permis la modélisation des mouvements de l'eau dans la zone racinaire qui sont schématisés par les flux d'eau

composant le bilan hydrique du sol : flux d'entrée (pluie) et de sortie (transpiration, évaporation, ruissellement, percolation, remontée capillaire). Comme résultante de ces flux, la variation du stock d'eau dans le sol est le paramètre mesuré. La Figure 3 montre l'évolution, du semis à la maturité, de la teneur en eau du sol (*SWC*) à 1 m de profondeur et les *SWCC* et *SWCPFP* symbolisant les seuils d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent prises à partir des paramètres physiques du sol. On observe un bon ajustement entre les données simulées (*sim*) et celles observées (*obs*) issues des mesures au cours du cycle de la culture pour les 2 saisons. La simulation indique des *SWC* au semis de l'ordre de 46% et 30% fois la réserve utile du sol respectivement en sai-

son 1 et 2. Toutefois, en saison 1, un confort hydrique pour la culture est mis en évidence par l'allure de la courbe de la *SWC* comprise entre les 2 seuils extrêmes (*SWCC* et *SWCPFP*). En revanche, la saison suivante débute par un épisode très humide occasionné par les pluies intenses (242 mm) de janvier 2017, causant même une saturation du sol en eau (la courbe dépassant la droite *SWCC*), suivi d'une sécheresse matérialisée par une tendance à la baisse de l'humidité du sol qui s'amorce depuis février jusqu'à atteindre un niveau inférieur à la *SWCPFP* en fin de saison. On constate une réponse du modèle en parfaite adéquation avec les conditions climatiques qui ont prévalu en cette saison. La sénescence précoce de la culture, observée à partir du 131<sup>ème</sup> Jour-Après-Semis (*JAS*) suite au stress



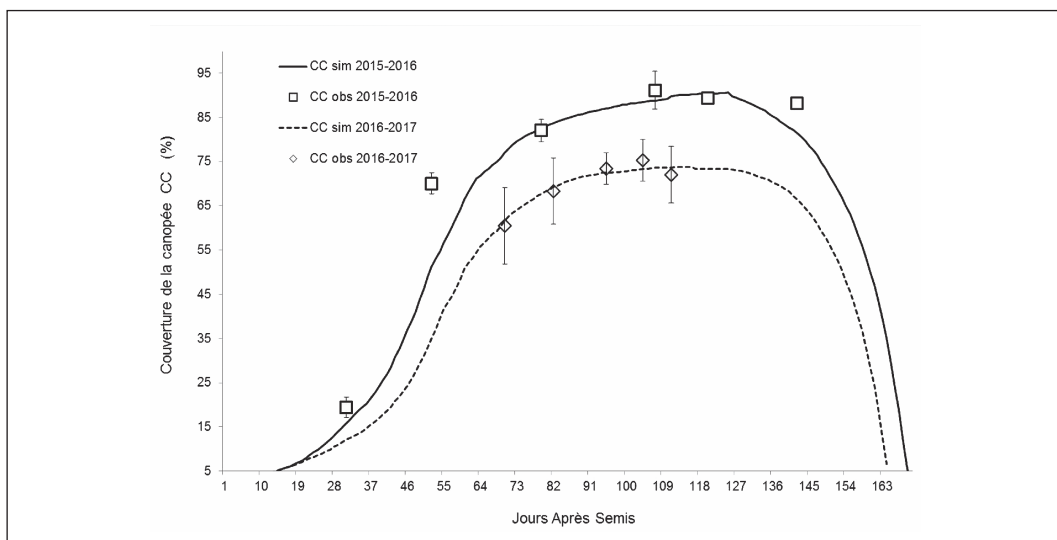
**Figure 3 :** Evolution des données simulées par AquaCrop (*sim*) et mesurées (*obs*) de la teneur en eau du sol (*SWC*) dans la zone racinaire du blé au cours des saisons expérimentales 2015-2016 et 2016-2017. Chaque point des valeurs observées représente la moyenne de 3 mesures et les barres verticales sont  $\pm 1$  écart-type.

hydrique, a succédé à la baisse de la SWC en dessous des 2/3 de la RU à partir du 124<sup>ème</sup> JAS coïncidant avec le stade de remplissage du grain (Tableau I).

La Figure 4 illustre la simulation du développement dans le temps de la couverture de la canopée sous la forme d'une courbe en cloche, similaire à celle du coefficient cultural Kc. On observe également ici un bon ajustement entre les données mesurées et simulées. En date du 13<sup>ème</sup> JAS, les couvertures initiales  $CC_0$ , calculées automatiquement par le modèle en fonction de la densité des jeunes plants à l'émergence à 90%, sont de 4,84% et 4,09% pour les saisons 1 et 2. Sur le graphique, les couvertures mesurées évoluent en relation avec l'expansion de canopée jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales  $CC_x$

respectives, de 91% et 76 %, les 120<sup>ème</sup> et 110<sup>ème</sup> JAS coïncidant avec les phases de fin épiaison et de début floraison (Tableau I). Les valeurs de ces  $CC_x$  diffèrent en fonction de leurs densités de semis respectives. Etant relativement moins importante en saison 2, la densité de semis a engendré par la suite une couverture maximale ( $CC_x$ ) plus faible qu'en saison 1 (76 % contre 91%). Stedutto *et al.* (2009) confirment la relation linéaire qui existe entre la densité de plantation et la couverture maximale de la canopée ( $CC_x$ ) qui apparaît au stade fin montaison-début épiaison du blé.

Le Tableau III présente les résultats issus de l'évaluation de la performance de calibration du modèle réalisée via les différents indicateurs statistiques. Par comparaison,



**Figure 4 :** Evolution des données simulées par AquaCrop (sim) et mesurées (obs) de la couverture de la canopée (CC) du blé au cours des saisons expérimentales 2015-2016 et 2016-2017. Chaque point des valeurs observées représente la moyenne de 3 mesures et les barres verticales sont  $\pm 1$  écart-type.



**Tableau III.** Indicateurs statistiques d'évaluation de la performance de calibration du modèle *AquaCrop* entre les données simulées et mesurées à la station INRAA de Mehdi Boualem au cours des 2 saisons expérimentales 2015-2016 et 2016-2017.

Indicateurs	Saison 2015-2016			Saison 2016-2017		
	CC (%)	B (tonnes/ha)	SWC (mm/m)	CC (%)	B (tonnes/ha)	SWC (mm/m)
<i>r</i>	0,97	0,96	0,87	0,98	1,00	0,97
<i>RMSE</i>	8,3	2,1	26,3	1,2	2,6	14,1
<i>nRMSE</i>	11,3%	34,5%	8,0%	1,8%	27,2%	3,7%
<i>EF</i>	0,89	0,90	0,60	0,94	0,74	0,80
<i>d</i>	0,97	0,97	0,86	0,98	0,91	0,96
<i>Déviation</i>	-6,8%	9,1%	4,4%	1,0%	-17,6%	-1,6%

CC: Canopy Cover (couverture de la canopée), B: biomasse aérienne sèche, SWC: Soil Water Content (teneur en eau du sol), *r*: coefficient de corrélation de Pearson, RMSE: Root Mean Squared Error (Erreur quadratique), nRMSE: Normalized Root Mean Squared Error (Erreur quadratique normalisée), EF: coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe, *d*: Indice d'Accord de Willmott, déviation: pourcentage d'écart entre les données simulées et mesurées.

une meilleure performance est observée en saison 2 qui est illustrée par des valeurs plus faibles des erreurs quadratiques moyennes *nRMSE* et *RMSE* et par des valeurs élevées de l'indice de Willmott *d*, proches de l'unité. Des *nRMSE* inférieures à 10% des paramètres *CC* et *SWC* indiquent une simulation jugée excellente par le modèle pour les 2 saisons (Jamieson *et al.*, 1991). Des résultats similaires de la *SWC* ont également été rapportées dans des études variées (Hussein *et al.*, 2011 ; Iqbal *et al.*, 2014 ; Toumi *et al.*, 2016). En saison 2, la *nRMSE* de la *SWC* affiche la valeur de 3,7% contre 8,0% en saison 1, ce qui dénote une nette amélioration dans la précision des mesures de l'humidité du sol réalisées avec l'appareil Diviner 2000 en comparaison avec la

méthode gravimétrique de la saison 1. Cette amélioration est aussi perceptible à travers la réduction de la *RMSE* de 12 mm/m et de la hausse de l'indice *d* de 10%. Le même constat est fait pour la *CC* où la simulation est jugée bonne à excellente au vue de la régression de la *nRMSE*, passant de 11,3 % à 1,8% au cours des saisons successives.

La simulation de la biomasse végétale aérienne (B) est considérée faible ou à peine acceptable pour des 2 saisons selon les critères (Jamieson *et al.*, 1991), et cela malgré la performance très satisfaisante des coefficients de corrélation *r* et de Willmott *d* très proches de 1 (Tableau III). Les valeurs 34,5% et 27,2% de la *nRMSE* des saisons 1 et 2 révèlent des écarts non négligeables

entre les données simulées et observées. Araya *et al.* (2010a), dans leur étude sur l'orge (*Hordeum vulgare*), ont obtenu un écart de 8,5% pour la simulation de la biomasse, considéré également comme le plus élevé parmi les autres paramètres. Dans notre cas, l'hétérogénéité des surfaces de prélèvements d'échantillons à l'échelle de la parcelle ainsi que la taille réduite des surfaces prélevées à chaque fois (1/4 m<sup>2</sup>) pourraient être l'explication. Néanmoins, le coefficient de variation (*CV*) indique une meilleure homogénéité des mesures réalisées en 2<sup>ème</sup> saison (*CV* = 8,8%) qu'en 1<sup>ère</sup> saison où les valeurs sont plus dispersées (*CV* = 16,4%).

Les résidus ont été testés pour leur normalité à l'aide de la déviation relative qui est l'écart entre les données simulées et observées rapporté à la moyenne des données observées (Tableau III). Cet indicateur confirme aussi les résultats précédents avec des déviations très faibles pour les *SWC* et *CC* (1% et -1,6%) que pour la biomasse *B* qui affiche une sous-estimation beaucoup plus élevée en saison 2 (-17,6%).

La prédiction AquaCrop en saison 1 affiche une biomasse aérienne sèche totale à maturation de 16,338 ton/ha, un rendement en grain de 6,555 ton/ha et un indice de récolte ajusté  $HI_{adj}$  de 40 % (rendement en grain/biomasse aérienne sèche x 100). Pour la saison suivante, ces valeurs ont baissé pour atteindre 11,302 ton/ha, 3,628 ton/ha et 32 % respectivement pour les mêmes paramètres physiologiques. Cette

baisse générale des performances s'explique par l'effet du stress hydrique au cours du stade formation du grain.

L'Indice de Récolte de Référence ( $HI_0$ ), fixé par le modèle, est de 48% pour le blé (Tableau II). Conceptuellement et au fur et à mesure de la progression de la simulation, AquaCrop procède au réajustement de cet indice en fonction des niveaux atteints par 3 types de stress liés au tarissement de l'eau dans le sol qui provoquent la réduction de la transpiration. Avec leur persistance au fil du temps, ces stress induisent une diminution de l'expansion de la couverture de la canopée, la fermeture stomatique, la sénescence précoce et, in fine, une réduction de la biomasse aérienne sèche totale à maturation et du rendement. En saison 2, le tarissement de l'eau dans le sol, descendu en dessous des 2/3 de la RU à partir du 124<sup>ème</sup> JAS et coïncidant avec le stade de remplissage du grain (Tableau I), a provoqué une baisse de 16 % de l'indice HI par rapport à sa valeur de référence, contre seulement 8% en saison 1.

L'efficacité d'utilisation de l'eau, qui quantifie un output (rendement en grain) obtenu à partir d'un input donné (quantité d'eau perdue par évapotranspiration), est un paramètre non-conservatif nécessitant une optimisation pour l'amélioration du rendement à l'hectare. Pratiquement, cette optimisation pourrait se concrétiser par des apports en eau par l'irrigation lors des phases de développement du blé post-anthésis reconnues comme les plus critiques notam-

ment en cas d'un stress hydrique sévère. Dans cette étude, AquaCrop a montré une réponse adéquate en relation avec les conditions climatiques sèches au printemps de la saison 2 induisant une réduction du rendement en grain de 2,9 ton/ha par rapport à la 1<sup>ère</sup> saison. Consécutivement, l'efficacité d'utilisation de l'eau, estimée à 1,46 kg de grain produit par m<sup>3</sup> d'eau évapotranspirée, a baissé de 26% par rapport à sa valeur de 1,97 en saison 1 qui a été plus caractérisée par une bonne répartition des pluies durant le cycle de la culture.

## CONCLUSION

L'essai mené durant 2 campagnes successives à la station INRAA de Mehdi Boualem avait pour objectif la calibration du modèle AquaCrop pour la culture du blé dans les conditions environnementales du nord algérien.

Par l'intermédiaire d'indicateurs statistiques de comparaison entre les données simulées par AquaCrop et les données mesurées *in situ*, les résultats obtenus ont montré que le modèle peut simuler avec précision les paramètres de teneur en eau du sol (*SWC*) et de couverture de la canopée (*CC*), alors que la biomasse aérienne (*B*) a été en deçà des prédictions, sûrement en raison des erreurs commises en relation avec la technique d'échantillonnage utilisée au champ. Araya *et al.* (2010a) ont également conclu sur une moindre performance de la simulation du paramètre biomasse par AquaCrop dans leur étude sur l'orge.

Comme réponse aux conditions environnementales, le modèle a montré la possibilité d'obtenir davantage de biomasse et de rendement en grain d'une parcelle de blé lors d'une saison où la pluviométrie est mieux répartie dans le temps.

Afin de confirmer les résultats actuels de la performance de la calibration, il serait judicieux de procéder à leur validation future avec une autre saison expérimentale.

Malgré sa simplicité, AquaCrop a démontré sa justesse dans la simulation ainsi que sa robustesse pour appréhender la problématique de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la culture au cours de son cycle végétatif.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements sont adressés à Mrs Heng Lee, Head of Section of Soil and Water Management and Crop Nutrition (SWMCN), IAEA - Vienna, Austria, et coordinatrice générale du projet AFRA-RAF/5/071, pour son support en équipements scientifiques et en formation sur AquaCrop.

## RÉFÉRENCES

**Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Man, S., Pathak, H., Ahmad, T., 2012.** Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid Environment. *Agric. Water Manage.* 110, 55-66.

- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-vila, M., Deckers, S., 2012.** Sowing Strategies for Barley (*Hordeum Vulgare* L.) Based on Modelled Yield Response to Water with *AquaCrop*. *Experimental Agriculture* 48, 252-271.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998.** Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56*, Rome, Italy, 300 pp.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnama, A., 2011.** Validation and testing of the *AquaCrop* model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100, 1-8.
- Araya, A., Solomon, H., Kiros, M.H., Afewerk, K., Taddese, D., 2010a.** Test of *AquaCrop* model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agric. Water Manage.* 97, 1838-1846.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996.** Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88, 704-716.
- Diepen Van, C.A., 1989.** Application of simple interpolation methods in agrometeorology. In: Gozzini, B., Hims, M. (Eds.), *Proceedings of workshop on dealing on spatialisation*, 24–25 September 1996, Toulouse. EUR 18473 EN. Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp. 3–17.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979.** Yield Response to Water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*. FAO, Rome, Italy, pp. 193.
- DSASI, 2018.** Statistiques Agricoles de la Direction des Statistiques et des Systèmes Informatiques du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche, 2014-2018.
- Fraisse, C.W., Breuer, N.E., Zierden, D., Bellow, J.G., Paz, J., Cabrera, V.E., Garcia y Garcia, A., Ingram, K.T., Hatch, U., Hoogenboom, G., Jones, J.W., O'Brien, J.J., 2006.** AgClimate: A climate forecast information system for agricultural risk management in the southeastern USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 53, 13-27.
- Greets, S., Dirk, R., Magali, G., Roberto, M., Jorge, A.C., Cristal, T., Jorge, M., Ruben, H., Armando, M., Octavio, C., Judith, M., Bernardo, M., Victor, O., Pasquale, S., 2009.** Simulating yield response of Quinoa to water availability with *AquaCrop*. *Agron. J.* 101, 499-508.
- Guendouz, A., Hafsi, M., Moumeni, L., Khebbat, Z., Achiri, A., 2014.**

Performance evaluation of *aquacrop* model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi arid conditions in Eastern. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, vol. 3, n°2, 168-172.

**Heng, L.K., Asseng, S., Mejahed, K., Rusan, M., 2007.** Optimizing wheat productivity in two rainfed environments of the west Asia-North Africa region using a simulation model. Eur. J. Agron. 26, 121–129.

**Hussein, F., Janat, M., Yakoub, A., 2011.** Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. Spanish Journal of Agricultural Research 9: 1319-1330.

**Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., del Rio, S., 2014.** Evaluation of the FAO *AquaCrop* model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management 135, 61-72.

**Jacovides, C.P., Kontoyiannis, H., 1995.** Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. Agricultural Water Management, vol. 27, issue 3-4, 365-371.

**Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1991.** A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops

grown in New Zealand. Field Crops Research 27, 337–350.

**Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P., Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J., 2003.** The DSSAT cropping system model. European journal of agronomy 18, 235-265.

**Legates, D.R., Mc Cabe, G.J., 1999.** Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, vol. 35, issue 1.

**Loague, K., Green, R.E., 1991.** Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. Journal of Contaminant Hydrology 7, 51-73.

**Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., 2006.** Evaluating strategies for improved water use in spring wheat with CERES. Agric. Water Manage. 84, 249–258.

**Minet, J., Tychon, B., n.d.** Cours: Calibration et optimisation de modèles. Arlon Campus Environnement, Université de Liège.

**Porter, J.R., Gawith, M., 1999.** Temperatures and the growth and development of wheat: a review. European Journal of Agronomy 10, 23-36.

- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009.** *AquaCrop* The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101, 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, D., 2011.** *AquaCrop* – the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual (accessed 22.04.13)  
[www.fao.org/nr/water/aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html)
- Raes, D., 2015.** Book I. Understanding *AquaCrop*. Food and Agriculture Organization Land and Water Division.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2015.** *AquaCrop* crop-water model productivity to simulate yield response to water. Reference manual, Food and Agriculture Organization Land and Water Division.
- Resop, J.P., Fleisher, D.H., Wang, Q., Timlin, D.J., Reddy, V.R., 2012.** Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units. *Computers and Electronics in Agriculture* 89, 51- 61.
- Saxton, K.E., 2009.** SPAW - Soil-Plant-Atmosphere-Water Field and Pond Hydrology. <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/Index.htm>.
- Sinclair, T.R., Seligman, N.G., 1996.** Crop modeling. From infancy to maturity. *Agron. J.* 88, 698–704.
- Steduto, P.E., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2007.** On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25 (3), 189–207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009.** *AquaCrop*—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101, 426-437.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2012.** Crop yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003.** CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., Maksimovic, L., 2011.** Assessment of the FAO *AquaCrop* model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98, 1615-1621.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M., Stöckle, C., Steduto, P., 2009.** Assessment of *AquaCrop*, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sun-

flower growth under different water regimes. *Agronomy Journal* 101, 509-521.

**Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., Chehbouni, A., 2016.** Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management* 163, 219-235.

**Toumia J., Er-Rakib S., Ezzaharc J., Khabbaa S., Jarlan L., Chehbounid A., 2015.** Performance assessment of *AquaCrop* model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, vol 163. p. 219 – 235.

**Touré, A., Major, D., Lindwall, C., 1995.** Comparison of five wheat simulation models in southern Alberta. *Canadian journal of plant science* 75, 61-68.

**Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Henh, L.K., Garcia-Vila, M., Moreno, P.M., 2014.** AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model *Environmental Modelling and Software* 62, 351-360.

**Williams, J., 1989.** The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE* 32, 497-511.

**Willmott, C.J., 1982.** Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313.

**Willmott, C.J., 1984.** On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. In: *Spatial Statistics and Models*, Springer, Berlin, 443-460.

**Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowes, C.M., 1985.** Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of geophysical research*, vol. 90, NO.C5, pages 8995-9005.