

Évaluation du modèle AquaCrop-FAO pour la simulation du rendement du blé tendre pluvial dans le Domaine Agricole Louata (Maroc)

Mohamed Belmahi¹, Mohamed Hanchane², El Houssaine Bouras³, Khalid Dhassi⁴⁻⁵

¹Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc.,

² Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc,

³ Université Mohammed VI Polytechnique, Ben Guérir, Maroc,

^{4,5} Ecole Supérieure de Technologie D'El Kelaa Des Sraghna. Laboratoire de Biotechnologies Microbiennes, Agrosiences et Environnement (BioMAgE), Unité de Recherche Labellisée-CNRST N° 4, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

Résumé

AquaCrop-FAO est un modèle agropédoclimatique permet de simuler divers aspects de la culture, tels que la phénologie, la profondeur d'enracinement, la production de biomasse, le rendement en grains, le bilan hydrique et l'évapotranspiration réelle. L'objectif principal du modèle est d'évaluer l'impact de l'environnement sur la productivité des cultures et d'assurer la sécurité alimentaire. Cette étude vise de calibrer et de valider le modèle AquaCrop pour la simulation du rendement du blé tendre rendements céréalières dans le Domaine Agricole Louata entre 2016-2019. Les résultats obtenus de la simulation du blé tendre révèlent une erreur quadratique moyenne (EQM) de 1.58 quintal/ha entre le rendement observé et celui simulé, avec un coefficient de corrélation, un coefficient de détermination et un indice de Willmott de 0,99. Le modèle a donc légèrement surestimé les rendements observés.

Mots clés : AquaCrop, Calibration, Validation, Blé tendre, Domaine Agricole Louata

Evaluation of the AquaCrop-FAO model for simulating rainfed soft wheat yields in the Louata Agricultural Domaine (Morocco)

Abstract

AquaCrop-FAO is an agropedoclimatic model that can be used to simulate various aspects of the crop, such as phenology, rooting depth, biomass production, grain yield, water balance and actual evapotranspiration. The main objective of the model is to assess the impact of the environment on crop productivity and to ensure food security. The aim of this study is to calibrate and validate the AquaCrop model for simulating soft wheat yields in the Louata Agricultural Estate between 2016 and 2019. The results obtained from the soft wheat simulation reveal a root mean square error (RMSE) of 1.9 quintals/ha between the observed yield and the simulated yield, with a correlation coefficient, a coefficient of determination and a Willmott index of 0.99. The model therefore slightly overestimated observed yields.

Keywords: AquaCrop, Calibration, Validation, Soft wheat, Domaine Agricole Louata

¹ Corresponding author: mohamed.belmahdi2@usmba.ac.ma

INTRODUCTION

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) est une espèce de type graminée annuelle ou bisannuelle, cultivée depuis l'antiquité. Il est utilisé à des fins diverses : blés pour la panification, blés pour la biscuiterie, pour la fabrication de carburant et pour l'alimentation animale, en particulier dans quelques pays développés et émergents [1]. La culture du blé est pratiquée dans la plupart des endroits du monde, de l'équateur aux zones tempérées et jusqu'à une altitude de 3000 m [2]. Le blé était la troisième céréale la plus produite après le maïs et le riz, avec une moyenne annuelle de production mondiale de 740,40 millions de tonnes durant la décennie 2013-2023, sur une superficie cultivée de 217,4 millions d'hectares [3]. Au Maroc, les céréales d'automne occupent une place prépondérante dans l'agriculture nationale et peuvent être considérées comme le tableau de bord de l'agriculture [4], [5]. La consommation de céréales par habitant au Maroc est parmi les plus élevées au monde, chaque Marocain consommant en moyenne 255 kg de blé par habitant/an, soit quatre fois la moyenne mondiale, ce qui reflète son rôle clé dans la sécurité alimentaire nationale [6]. En effet, les céréales restent l'un des produits alimentaires de base, présents dans tous les repas quotidiens des Marocains. La moyenne annuelle de la production était de $35,5 \times 10^3$ quintaux sur une superficie emblavée de 1951×10^3 ha. et un rendement moyen annuel de 17 quintal/ha durant la période 2013-2023 [7]. La modélisation constitue un outil permettant d'évaluer l'impact de l'environnement et de la gestion sur la productivité des cultures, et de mettre au point des stratégies pratiques agricoles pour accroître la productivité de l'eau des cultures. La variabilité du rendement due aux variations saisonnières des précipitations ne peut être déterminée à l'aide de méthodes traditionnelles. Des modèles de simulation de la croissance des cultures constituent une alternative appropriée. Grâce à ces modèles, on peut simuler la croissance des cultures, le bilan hydrique du sol, la transpiration de la culture, et l'évapotranspiration maximale, ainsi que le rendement des cultures. Ceux-ci peuvent être appliqués pour évaluer les options de gestion et de planifications des exploitations agricoles [8]. Le modèle AquaCrop a été employé pour simuler les rendements de plusieurs cultures [9], [10], [11], [12], [13]. Par ailleurs, le modèle ne permet pas de simuler des cultures pérennes d'arbres ou de vignes, car la réaction du rendement vis-à-vis des processus de répartition de l'eau ou de la biomasse est bien plus complexe et reste mal appréhendée [14]. Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de calibrer et de valider AquaCrop pour la simulation des rendements céréaliers, et de de simuler, à l'aide du modèle, les effets de différents scénarios d'irrigation sur le rendement du blé tendre, ainsi que de dériver des indices agropédoclimatiques qui peuvent être utilisés pour expliquer la variabilité des rendements.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Description du site et collecte de données

Les données des trois saisons cérésières successives 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 du Domaine Agricole Louata, qui est situé dans la province du Séfrou, ont été utilisées pour la calibration et la validation du modèle. Ce domaine constitue une grande exploitation agricole dont l'altitude varie de 410 à 760 m, et qui couvre environ 3000 ha, dont 2000 ha réservés aux cultures cérésières d'automne du blé et de l'orge [15]. Le climat est semi-aride, avec une pluviométrie moyenne de 360,4 mm. La majorité des précipitations tombent entre octobre et avril, avec des fluctuations annuelles modérées, dont le coefficient de variation était de 31 % au cours de la période 1992-2018. Le sol est de type limoneux-argileux. Les caractéristiques des champs de blé tendre et du matériel végétal qui ont été utilisés pour calibrer et valider le modèle sont indiquées dans le tableau 1. Dans un premier temps, la calibration du modèle a été réalisée sur deux champs au cours de la campagne agricole 2016/2017. Par la suite, la validation a été effectuée sur sept champs au cours de deux campagnes agricoles 2017-2018 et 2018-2019. Les champs de la calibration et de validation sont indiquées dans le tableau. Tous les champs étaient cultivés en blé tendre avec des variétés différentes.

Tableau 1: Champs de calibration et de validation du modelé AquaCrop dans la zone d'étude

	N° parcelle	Surface en hectare	Date de semis	Densité de semis (q/ha)	Variété
Champs de calibration	2004-1	68	29/10/2016	1,86	Bandera
	2005-1	61	8/11/2016	1,84	Resultat
Champs de validation	3002	31	06/12/2017	1,89	Bandera
	3004-1	29	02/12/2017	1,99	Rahma
	3004-2	19	03/12/2017	2,15	Setin
	3003-0	85	29/11 au 07/12/2018	1,7	Arehamne
	3006-2	24	28/11/2018	1,9	Remax
	3007-1	90	22/11 au 30/11/2018	1,9	Resulton
	3008-2	90	30/11 au 08/12/2018	1,8	Achtar

Brève description du modèle AquaCrop -FAO et les paramètres de calibration-validation

AquaCrop est un modèle de culture gratuit. Il est élaboré la FAO en 2009, disponible sur le site de la FAO https://www.fao.org/aq_uacrop/en/. L'objectif du modèle est de garantir la sécurité alimentaire et d'évaluer l'impact de l'environnement et de la gestion sur la productivité de l'eau de quatre types de cultures pluviales et irriguées et pour affronter la pénurie d'eau dans le monde [16], [17], [18]. Il fournit une estimation des besoins en irrigation, une comparaison entre le rendement potentiel dans des conditions optimales et le rendement réel, et permet de planifier les meilleures mesures de gestion des champs et des cultures. En outre, Il permet de connaître les réactions des cultures au stress hydrique par quatre mécanismes végétaux principales : expansion de la canopée, contrôle stomatique de la transpiration, sénescence du couvert et indice de récolte. Le modèle AquaCrop permet de calculer de manière distincte la transpiration de la plante et l'évaporation du sol, et donc de déterminer la quantité d'eau productive et le non consommée par la végétation. Le modèle AquaCrop a été choisi pour sa facilité d'utilisation, sa parcimonie et ses résultats nombreux, pertinents et robustes [19], [20]. Il nécessite peu de données d'entrée : les précipitations journalières, température minimales et maximales journalières, l'évapotranspiration journalières, les données relatives au sol et au culture. Ces données sont fournies par la Direction Provinciale de l'Agriculture de Séfrou. Cependant, le modèle offre un large éventail de résultats.

Calibration des paramètres physiologiques et phénologiques du blé tendre

Conformément aux directives du modèle AquaCrop, les paramètres physiologiques et phénologiques doivent être calibrés pour simuler les effets des facteurs climatiques et agronomiques sur la croissance et le rendement du blé tendre, ainsi que sur le bilan hydrique du sol et la productivité de l'eau de pluie. Cette calibration concerne les paramètres ci-après : expansion du couvert végétal ; coefficients de stress hydrique ; productivité de l'eau de pluie ; caractéristiques du sol ; profondeur d'enracinement basée sur les données du sol et la densité de semis. Les valeurs conservatrices et calibrées des cultures sont issues de la littérature et du fichier de référence du blé appelé "WheatGDD", en prenant en compte les paramètres affichés dans le tableau 2 :

Tableau 2: Paramètres de culture conservatifs et calibrés utilisés dans AquaCrop

Paramètres	Valeurs								
	Champs de calibration		Champs de validation						
	2004-1	2005-1	3002	3004-1	3004-2	3003-0	3006-2	3007-1	3008-2
Température en dessous de laquelle la croissance s'arrête	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Température au-dessus de laquelle la croissance s'arrête	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Le taux de la couverture maximale de la canopée	90	90	88	90	90	90	70	64	64
Le taux de la couverture de la canopée à 90% de la levée (CC0)	5.5	5.38	5.53	5.88	6.38	5.85	5.53	5.53	5.85
Coefficient de croissance de canopée (CGC)	6.5	5.8	6.9	7	7.1	7.6	6.4	5.9	5.6
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)	0.76	0.76	0.78	0.76	0.76	0.76	0.57	0.69	0.69
Seuil supérieur pour l'expansion de la canopée	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Seuil inférieur pour l'expansion de la canopée	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Seuil supérieur pour la fermeture des stomates	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Facteur de la forme du coefficient de stress pour la fermeture des stomates	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Profondeur d'enracinement effective maximale	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Productivité d'eau	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Indice de récolte	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Durée du semis à l'émergence	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Du semis à la couverture maximale	678	580	556	580	522	592	676	706	758
Du semis à la profondeur maximale d'enracinement	602	602	414	602	602	602	602	602	602
Du semis au début de la sénescence	1103	1103	1103	1103	1103	1103	1103	1103	1103
Du semis à la maturité	1316	1278	1430	1278	1278	1278	1278	1278	1278
Du semis à la floraison	507	678	507	678	678	678	678	678	678

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Rendement simulé du blé tendre par le modèle AquaCrop

Les résultats obtenus de la simulation du blé tendre montrent une erreur quadratique moyenne (EQM) de 1.9 quintal/ha entre le rendement observé et celui simulé, avec un coefficient de corrélation, un coefficient de détermination et un indice de Willmott de 0,99. Le modèle a donc légèrement surestimé les rendements observés. Ce résultat très satisfaisant nous amené à vérifier la robustesse du modèle. En effet, ce résultat est meilleur que celui observé par [11] (EQM = 5,8 Qx/ha) pour le blé tendre dans la province de Meknès. Aussi, il est plus performant que ceux obtenus par [21], où les auteurs ont obtenu un écart (EQM) de 10,2 q/ha entre le rendement du blé dur observé et celui simulé à la commune Marchouch dans la province de Khémisset. Cependant, [22] ont obtenu un EQM de 3,7 q/ha qui est comparable à nos résultats. De même, [9] ont obtenu un EQM de 2,4 q/ha. Cependant, [23] ont obtenu un EQM de 0,6 Qx/ha beaucoup meilleur que le nôtre. Il faut souligner qu'il s'agit d'une simulation du rendement en grains du blé d'hiver en irrigué dans la plaine de Tensift au Maroc. Dans un autre contexte climatique, [24] ont obtenu un EQM de 3 Qx/ha dans région du Terai, au nord de l'Inde.

Tableau 3: Rendements observés et simulés du blé tendre à la station d'expérimentation agronomique de Louata à l'aide du modèle AquaCrop-FAO

	N° parcelle	Rendement observé	Rendement simulé	R	R ²	EQM	Indice de concordance (d)
Champs de calibration	2004-1	63.44	63.6	0.99	0.99	1.9	0.99
	2005-1	62.50	63.50				
	3002	15.93	16.64				
Champs de validation	3004/1	28.94	29.05				
	3004/2	33.29	31.27				
	3003/0	19.47	20.7				
	3006/2	6.32	7.6				
	3007/1	5.41	9.97				
	3008/2	7.02	8.8				

Conclusion

Enfin, le modèle AquaCrop est un outil performant destiné à analyser divers aspects agronomiques relatifs à la production agricole, notamment le bilan hydrique du sol, la croissance et le développement des cultures, et le rendement en fonction de diverses pratiques d'utilisation et de gestion de l'eau. Ce modèle est également utile pour déterminer la date de semis la plus propice à la culture des céréales dans un contexte de stress hydrique. Le modèle nécessite des données locales observées pour le calibrer. Les résultats obtenus révèlent que le modèle est parfaitement capable à simuler la réponse des cultures aux conditions de l'environnement et à la gestion des champs agricoles. Le modèle AquaCrop peut être utilisé pour planifier l'irrigation et améliorer le rendement des céréales.

Références

- [11] S. Demerre, « Evaluation de la performance du modèle Aquacrop pour la prévision des rendements du blé tendre (*triticum aestivum*) au Maroc (province de Meknès) », Master en sciences et gestion de l'environnement, Université de Liège, Faculté des Sciences, Belgique, 2017.
- [12] H. J. Farahani, G. Izzi, et T. Y. Oweis, « Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton », *Agron. J.*, vol. 101, n° 3, Art. n° 3, 2009, doi: 10.2134/agronj2008.0182s.
- [13] R. Sandhu et S. Irmak, « Assessment of AquaCrop model in simulating maize canopy cover, soil-water, evapotranspiration, yield, and water productivity for different planting dates and densities under irrigated and rainfed conditions », *Agric. Water Manag.*, vol. 224, p. 105753, sept. 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2019.105753.
- [14] T. Foster et al., « AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model », *Agric. Water Manag.*, vol. 181, p. 18-22, févr. 2017, doi: 10.1016/j.agwat.2016.11.015.
- [15] A. Ait Houssa et al., « Éléments agro-économiques pour réussir la culture du blé tendre en Bour », *Bull. Transf. Technol. En Agric.*, n° 202, p. 1-8, 2016.
- [16] Food and Agriculture Organization of the United Nations, « AquaCrop », Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consulté le: 4 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/>
- [17] A. Idrissi, S. Nadem, A. Boudhar, et T. Benabdouahab, « Review of wheat yield estimating methods in Morocco », *Afr. J. Land Policy Geospatial Sci.*, vol. 5, n° 4, Art. n° 4, 2022.
- [18] P. Steduto, T. C. Hsiao, D. Raes, et E. Fereres, « AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles », *Agron. J.*, vol. 101, n° 3, Art. n° 3, 2009.
- [19] S. Adla, F. Bruckmaier, L. F. Arias-Rodriguez, S. Tripathi, S. Pande, et M. Disse, « Impact of calibrating a low-cost capacitance-based soil moisture sensor on AquaCrop model performance », *J. Environ. Manage.*, vol. 353, p. 120248, févr. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120248.
- [20] D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, et E. Fereres, « AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description », *Agron. J.*, vol. 101, n° 3, Art. n° 3, 2009, doi: 10.2134/agronj2008.0140s.
- [21] O. Ibn Halima, H. Ilaich, A. Kerfati, R. Moussadek, N. Mazen, et I. Jnad, « Application du modèle FAO-AquaCrop à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la productivité du blé dans la zone pluviale de Zaer », *Afr. Mediterr. Agric. J.-Al Awamia*, n° 133, p. 170-187, 2021.
- [22] S. Khabba et al., « A simple light-use-efficiency model to estimate wheat yield in the semi-arid areas », *Agronomy*, vol. 10, n° 10, p. 1524, 2020.
- [23] J. Toumi, S. Er-Raki, J. Ezzahar, S. Khabba, L. Jarlan, et A. Chehbouni, « 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 », *Agric. Water Manag.*, vol. 163, p. 219-235, 2016.
- [24] N. Pareek, S. Roy, S. Saha, et A. S. Nain, « Calibration & validation of Aquacrop model for wheat crop in Tarai region of Uttarakhand », *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 6, n° 5, p. 1442-1445, 2017.