

Simulation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum Sol-Plante - Atmosphère sous un climat semi-aride en utilisant le modèle AquaCrop: Etude d'une culture du blé dans la région Tensift Al Haouz - Marrakech

Jihad TOUMI¹, Salah ER-RAKI², Jamal EZZAHAR³, Saïd KHABBA¹, El Mehdi HAMZAOU³,
Hamid MARAH³, Michel LE PAGE⁴, Abdelghani CHEHBOUNI⁴

¹LMME, Département de physique, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc;

²LP2M2E, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

³Centre National d'Énergie des Science et Techniques Nucléaire, Rabat, Maroc

⁴Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère, Toulouse, France

(jihadtoui6@gmail.com, s.erraki@gmail.com, j.ezzahar@gmail.com, khanna@ucam.ac.ma,
hmzcen@gmail.com, h_marah@yahoo.com, Michel.Le_page@ird.fr, ghani.chehbouni@ird.fr)

Résumé : Dans ce travail, la validité du modèle AquaCrop, développé par l'Unité Mixte FAO/IAEA, à simuler les échanges d'eau et d'énergie est testée. Cette étude est réalisée sur trois parcelles de blé conduites, avec des itinéraires contrastées, sous le climat semi-aride de la région de Tensift Al Haouz.

Dans un premier temps, l'évapotranspiration réelle ETR simulée par le modèle est confrontée à la mesure terrain, réalisée par le système d'Eddy Covariance. Les résultats obtenus sont encourageantes; le coefficient de détermination R^2 et de l'écart quadratique moyenne RMSE pour les trois parcelles sont $R^2 = 0.66, 0.72$ et 0.74 ; et $RMSE = 1.04, 0.62$ et 0.94 mm/j. Dans un second temps, nous avons utilisé le modèle AquaCrop pour évaluer l'efficacité de l'irrigation pratiquée. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation d'AquaCrop, comme outil de pilotage d'irrigation, peut conduire à une réduction de 33% de l'eau utilisée.

Mots clés : AquaCrop, blé, évapotranspiration, flux d'énergie, région semi-aride, rendement.

1. Introduction

Bien que doté d'une position géographique favorable au Nord-Ouest de l'Afrique, le Maroc reste dans la majeure partie de son territoire, un pays à climat essentiellement semi-aride [1]. Les ressources en eau sur l'ensemble du territoire sont limitées et que les céréales représentent l'ossature de l'agriculture du pays. Ces ressources en eau sont caractérisées par une forte sensibilité aux aléas climatiques. D'ailleurs, les prévisions de la GIEC annoncent une pénurie hydraulique au Maroc en 2025-2030. Il s'avère donc nécessaire de réfléchir à l'élaboration de nouvelles stratégies fiables pour anticiper et remédier à ces problèmes. Sachant que l'agriculture consomme plus de 86% des ressources en eau du pays, et connaissant aussi sa contribution dans l'économie nationale (autour de 16% du PNB), on conclut très vite qu'une bonne gestion d'eau d'irrigation est indispensable. Ceci est valable pour l'agriculture en général et la céréaliculture en particulier, qui représente 63% de la surface agricole utile du pays [2].

Dans ce contexte, la communauté scientifique s'est mobilisée autour de vastes programmes de recherche (HAPEX-Sahel¹ [3], SALSA² [4] et SUDMED³ [5]) afin de comprendre et évaluer les impacts environnementaux de la surexploitation des ressources hydriques, notamment par l'utilisation et le développement de modèles simples à l'échelle parcellaire (ex. FAO-56) ou régionale (ex : SAMIR) et des modèles de fonctionnement (ex. STICS et CERES). Ces outils permettent de simuler les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère en fonction du climat, caractéristiques du sol, pratiques

¹ Hydrological-Atmospherical Pilot Experiment in the Sahel

² Semi-Arid-Land-Surface-Atmosphere

³ Fonctionnement Hydrologique et Ressources du Bassin Versant de Tensift (Marrakech)

agricoles et des paramètres variétaux. Ils permettent en particulier d'estimer les besoins en eau de la culture et donc de mieux gérer les ressources hydriques.

Dans ce travail, nous proposons d'adapter le modèle AquaCrop comme outil d'optimisation de la gestion de l'eau de l'irrigation du blé en conditions semi-arides (Haouz de Marrakech). Ce modèle est la nouvelle version de FAO-56 avec un module rendement. Cette adaptation concerne en particulier les paramètres variétaux et ceux du bilan hydrique du modèle.

2. Modèle AquaCrop

L'estimation de la production qui peut être obtenue en conditions de limitation d'eau est capitale dans les environnements arides, semi-arides et sujets à la sécheresse. Afin de faire face à cette exigence, la FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nation) par sa division des terres et des eaux, a développé un outil simple et robuste, pour la simulation de la réponse productive des cultures herbacées à la disponibilité hydrique, dénommé « AquaCrop ». Par rapport à d'autres, le modèle AquaCrop nécessite un faible nombre de paramètres, atteignant un équilibre entre simplicité, précision et robustesse. La teneur en eau dans la zone racinaire est simulée à travers la quantification des flux d'eau en entrée et en sortie du système, considérant le sol comme un réservoir d'eau constitué par plusieurs couches. AquaCrop utilise le pourcentage de couverture du sol (CC) au lieu de l'indice foliaire, comme suit :

$$CC = CCx - (CCx - CC0) * \exp^{-CCC*t} \quad (1)$$

La simulation de la transpiration détermine l'accumulation journalière de biomasse, au moyen de la productivité de l'eau de la culture (Equation 2). Ce dernier paramètre est normalisé pour « l'évapotranspiration de référence ET_0 », permettant de faire des simulations en zones et périodes différentes, ainsi que pour des scénarios climatiques futures. AquaCrop simule l'agriculture pluviale, l'irrigation supplémentaire, déficitaire et totale. Les simulations peuvent être conduites en jours ou sur la base du régime thermique.

$$Tr = \frac{\sum B}{WP} \quad (2)$$

Parmi les principaux processus simulés, on trouve celui de l'évapotranspiration réelle (ETR) Appellée aussi l'évapotranspiration sous des conditions non standard. Elle est définie comme la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel. Elle est intégrée dans le modèle sous forme de l'équation suivante :

$$ETR = Ks * ETc = Ks * Kc * ETc \quad (3)$$

3. Matériels et méthode

3.1. Site d'étude

Le bassin versant du Tensift, situé dans la région de Marrakech, couvre une superficie d'environ 22 000 km² (Figure 1). Il est caractérisé par un climat semi-aride avec une faible pluviométrie et irrégulière en espace et en temps et reste de l'ordre de 240 mm/an en moyenne. La température est très élevée en été (37.7°C en moyenne des maxima) et basse en hiver (4.9 °C comme moyenne des minima). La demande climatique est très importante ($ET_0 = 1600$ mm/an). Concernant l'irrigation la méthode la plus utilisée est la gravitaire.

3.2. Mesures expérimentales

Durant la saison 2002/2003, une station météorologique a été installée à la proximité des trois parcelles étudiées. Cette station est équipée par des instruments pour mesurer le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité de l'air ainsi que la pluie. Ces données de forçage climatiques, disponibles à un pas de temps demi horaire, sont stockées sur des centrales d'acquisition, avant d'être téléchargées et ramenées pour les traiter et analyser au laboratoire.

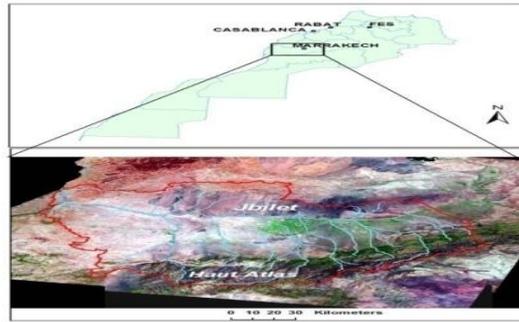


Figure 1: Localisation générale du bassin versant du Tensift.

3.3. Mesure des flux d'eau et d'énergie

Les flux d'eau et d'énergie ont été mesurés à l'aide d'un système d'Eddy Covariance installé sur chaque parcelle (figure 2). Ce système est constitué d'un 3D anémomètre sonique (CSAT3, Campbell Scientific Ltd.) et un Licor (Li7500, LicorInc). Les données brutes sont prises à une fréquence de 20Hz et enregistrées dans une centrale d'acquisition CR5000 (Campbell Scientific Ltd). Les flux d'eau et d'énergie sont calculés en utilisant un pas de temps d'une demi-heure en faisant appel au software **EC-pack** développé par le groupe de météorologie et la qualité de l'air the Meteorology and Air Quality group, Université Wageningen (disponible pour le téléchargement <http://www.met.wau.nl/>).



Figure 2: Site du blé avec la tour des instruments.

D'autre part la fermeture du bilan énergétique est un indicateur important pour la performance d'un système d'Eddy Covariance. En ignorant le terme de stockage d'énergie dans le couvert à l'échelle journalière [6 ; 7] et en assumant le principe de conservation de l'énergie, la fermeture du bilan énergétique, définie par $R_n - H_{EC} - L_v E_{EC} - G = 0$. La figure 3 présente une comparaison entre les mesures de l'énergie disponible ($R_n - G$) et les valeurs de la somme des flux turbulents ($H_{EC} + L_v E_{EC}$) à l'échelle demi-horaire pour les parcelles B27 et B123. Pour la parcelle B130, l'évapotranspiration est déterminée du bilan d'énergie. La différence dans les surfaces sources des différents instruments, a le plus grand impact sur la fermeture du bilan d'énergie surtout pour des végétations clairsemées. La surface source du système d'Eddy Covariance est plus grande par rapport à celles du rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol. Elle peut être changée rapidement selon la vitesse et la direction du vent et les conditions de surface. Cependant, en comparant nos résultats avec ceux rapportés dans la littérature [7 ; 8], la fermeture est considérée bien vérifiée.

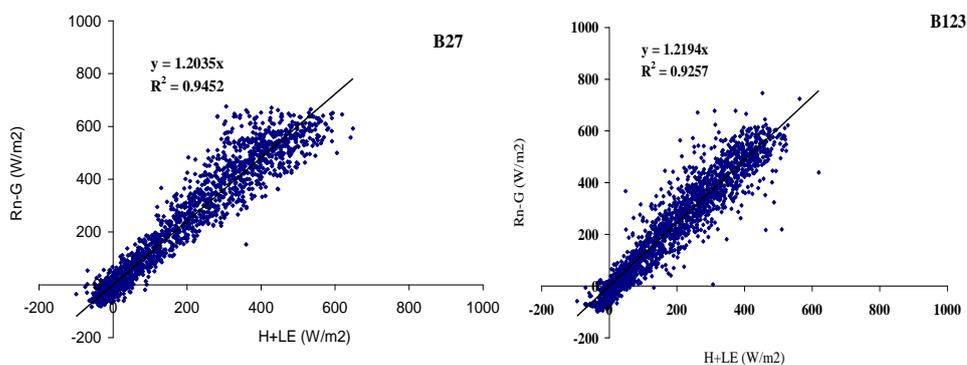


Figure 3: Comparaison entre les valeurs de l'énergie disponible ($R_n - G$) et les flux turbulents mesurés par le système d'Eddy Covariance.

4. Résultats et discussion

Un des objectifs principaux de ce travail est d'adapter le modèle AquaCrop aux conditions semi-arides de la plaine du Haouz. Vu la complexité et le grand nombre des paramètres d'entrée du modèle, un travail d'étalonnage et de choix des paramètres pertinents pour nos objectifs est important.

4.1. Evapotranspiration réelle

Elle est considérée comme la première variable d'intérêt majeur pour notre étude. Une comparaison entre l'évolution de l'évapotranspiration réelle simulée avec celle mesurée pour les trois parcelles du blé de la région Tensift Al Haouz pendant la saison 2002/2003 s'avère nécessaire afin de voir la fiabilité des résultats obtenus.

La figure 4 représente l'évolution de l'évapotranspiration réelle simulée par le modèle AquaCrop avec celle mesurée par Eddy covariance pour les trois parcelles de blé durant la saison 2002/2003. Cette figure montre que les ETR mesurées et simulées sont bien en phase ce qui reflète la bonne réaction du modèle aux apports d'eaux par irrigation et précipitation.

Les paramètres statistiques calculés à partir des valeurs journalières montrent que les écarts quadratiques moyennes ainsi que les coefficients de détermination pour les trois parcelles sont respectivement: RMSE=1.04 mm/j et $R^2=0.66$ pour la parcelle B27, RMSE=0.94 mm/j et $R^2=0.74$ pour B123 et finalement pour B130 RMSE=0.62 mm/j avec R^2 est égale 0.72. Aussi, les régressions linéaires sont très proches de la première bissectrice ; les pentes sont proches de 1 et les constantes sont faibles devant la moyenne de l'ETR.

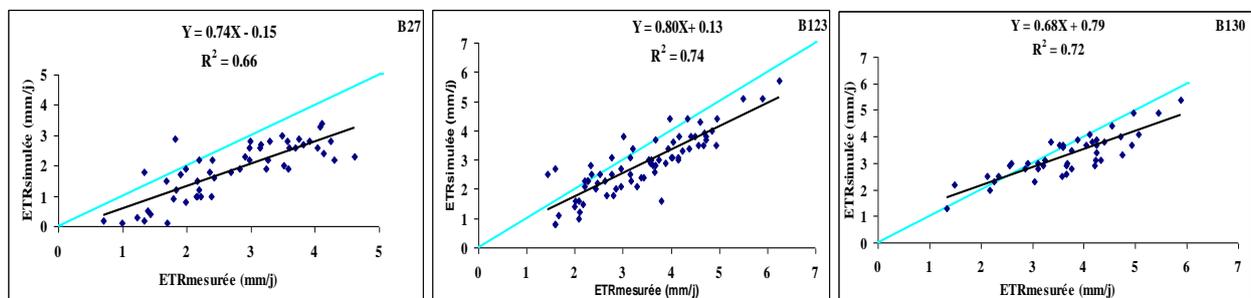


Figure 4 : Evaluation de l'évapotranspiration réelle ETR mesurée par Eddy covariance avec celle simulée par le modèle AquaCrop pour les trois parcelles de blé durant la saison 2002/2003

4.2. Utilisation d'AquaCrop pour la gestion de l'irrigation

Le modèle AquaCrop a été utilisé pour la suggestion des scénarios d'irrigation pour la parcelle B130, considérée bien irriguée, durant la saison 2002/2003. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 1. Ces résultats montrent que l'application des six irrigations (180 mm) n'était pas si nécessaire ni rentable, en comparaison avec quatre irrigations (120 mm) proposée par AquaCrop.

L'application de quatre irrigations avec une quantité de 120mm a donné un rendement proche de celui quand on applique six irrigations avec une quantité de 180 mm. Ce qui correspond à une préservation 60mm (soit 33%) de l'eau d'irrigation.

Concernant le rendement en grains, pour tous les scénarios de déficit hydrique, il a été légèrement réduit par rapport à l'irrigation complète, quand on passe d'une irrigation à une autre. Parmi les sept scénarios d'irrigation, la baisse du rendement était plus remarquable, lorsque l'irrigation a été évitée à tallage.

Cependant, même s'il pleut et que le sol soit bien humide, les agriculteurs irriguent leur parcelle par le gravitaire le même jour des précipitations sans tenir compte si le sol est suffisamment gorgé d'eau.

Normalement, les deux irrigations du 7 Avril et du 24 Mars de la même saison ne devaient pas avoir lieu, puisque l'une a eu lieu, le jour des précipitations et l'autre le jour qui suit.

Tableau 1 : Scénarios alternatifs d'irrigation mises en œuvre dans AquaCrop pour la parcelle B130 pour l'année 2002/2003.

Scénario	Date d'irrigation (DAS*)	Quantité d'irrigation (mm)	Rendement en grain (t/ha)
1	22-42-63-73-87-104	180	2.58
2	22-42-63-73-87-104	144	2.55
3	22-42-63-73-87-104	120	2.5
4	22-42-63-104	120	2.55
5	22-42-63-104	96	2.51
6	22-42-104	90	2.37
7	22-104	60	2.14

*DAS : Day After Sowing

5. Conclusion

L'objectif principal de ce travail était l'adaptation du modèle AquaCrop pour contribuer à l'amélioration de la gestion de l'eau d'irrigation dans la plaine semi-aride du Haouz de Marrakech. Les données qui ont servi à la validation du modèle ont été collectées dans le cadre du projet franco-marocain **SUDMED**. Trois parcelles de blé ont été étudiées pour réaliser ce travail.

Nous sommes intéressés par la comparaison de l'évapotranspiration simulée par le modèle avec celle mesurée par le système d'Eddy covariance. Cette comparaison a relevé quelques déviations. Ceci peut être expliqué par le fait que le modèle utilise des inputs à l'échelle locale comme l'irrigation et par conséquent simule l'évapotranspiration à l'échelle locale. Par contre le système d'Eddy Covariance mesure l'évapotranspiration sur une surface plus grande car son fetch peut aller jusqu'à 200m. Cependant, ces résultats peuvent être considérés très encourageants si on les compare avec ceux établis dans la littérature.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons de spatialiser ce modèle en utilisant les données issues des images satellites.

Nomenclature

<i>CC</i>	Canopy Cover, %	<i>ETR</i>	Evapotranspiration réelle, <i>mm/j</i>
<i>CGC</i>	Canopy Growth Coefficient, %	<i>K_s</i>	Coefficient de stress
<i>T_r</i>	Transpiration, <i>mm/j</i>	<i>ET_c</i>	Evapotranspiration maximal, <i>mm/j</i>
<i>B</i>	Biomasse, <i>t/ha</i>	<i>K_c</i>	Coefficient cultural
<i>WP</i>	Crop water productivity, <i>g/m²</i>		

Références

- [1] C. Guemimi, S. Ouskit, I. Atouf, Problématiques de la gestion des systèmes d'irrigation et de l'utilisation de l'énergie électrique en agriculture, Art 9 (136), 47, 2007.
- [2] M.A.D.R.E.F, Investir En Agriculture, Partie I - Le Secteur Agricole, http://agriculture.ovh.org/invest_2.pdf, 2000.
- [3] J.P. Goutorbe, T. Lebel, A.J. Dolman, P. Kabat, Y.H. Kerr, B. Monteny, S. D. Prince, J.N.M. Stricker, A. Tinga, J.S Wallace. An overview of HAPEX-Sahel: A Study In Climate and desertification, *Journal of Hydrology*, 188-189, 4-17, 1997.
- [4] A. Chehbouni, D.C. Goodrich, M.S. Moran, C.J. Watts, Y.H. Kerr, G. Dedieu, W.G. Kepner, W.J. Shuttleworth, S. Sorooshian, A Preliminary Synthesis of Major Scientific Results during The SALSA Program, *Agricultural and Forest Meteorology*, 105, 311-323, 2000.
- [5] D.C. Goodrich, A. Chehbouni, B. Goff, B. Macnish, T. Maddock, S. Moran, W.J. Shuttleworth, G. Williams, C. Watts, et al., Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program Special, *Agricultural And Forest Meteorology*, 1063, 3-20, 2000.
- [6] A. Chehbouni, J. Ezzahar, C. Watts, J.C. Rodriguez, J. Garatuza-Payan, Estimating area-averaged surface fluxes contrasted agricultural patchwork in a semi-arid region. In: Hill J, Röder A, (Eds.), Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment, Taylor and Francis, *Agricultural and Forest Meteorology*, 8, 73-86, 2009.
- [7] D.D. Baldocchi, L. Xu, N.Y. Kiang, How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123, 13-39, 2004.
- [8] T.E. Twine, W.P. Kustas, J.M. Norman, D.R. Cook, P.R. Houser, Meyers, T.P. Meyers, J.H. Prueger, P.J. Starks, M.L. Wesely, Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland, *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 279-300, 2000.