



Évaluation du modèle AquaCrop de la FAO en riziculture irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal

KALY Eric ^{1,2*}, MALOU Raymond ² AKPO Léonard Elie ¹

¹ Laboratoire Écologie Végétale et Ecohydrologie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal BP 5005 Dakar-fann

² Laboratoire d'hydrogéologie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal BP 5005 Dakar-fann

Correspondant email : kalyericak@yahoo.fr, kalyeric@gmail.com

Mots clés : riz irrigué ; modèle AquaCrop ; couverture canopée ; eau ; rendement ; Delta du Fleuve Sénégal.

Keywords: irrigated rice, AquaCrop model; canopy cover; water; yield; river Delta Senegal

1 RÉSUMÉ

Objectif : La maîtrise de la gestion de l'eau pour une agriculture durable dans le Delta du Fleuve Sénégal nécessite l'utilisation d'outils d'aide à la décision. L'objectif de l'étude est d'évaluer la capacité du modèle AquaCrop à simuler la croissance, le rendement et les besoins en eau du riz. Les travaux ont été effectués sur des parcelles irriguées au niveau de la cuvette de Ndelle dans le Delta du fleuve où la ressource en eau est disponible et les conditions favorables pour la riziculture.

Méthodologie et résultats : L'évaluation de la couverture de la canopée verte (CC) se fait toutes les semaines par la prise de photographies aériennes avec un appareil Canon Powershot G15 perché à une barre métallique en forme d'équerre à deux mètres au-dessus du sol. Le pourcentage de CC est obtenu suite au traitement automatique des images avec le logiciel Matlab. Les données obtenues lors du suivi des parcelles (pourcentage de CC, gestion des parcelles et données climatiques) sont utilisés pour une simulation avec le modèle AquaCrop. Les indicateurs statistiques que sont l'erreur type normalisée (*nRMSE*) et l'indice d'accord de Willmott (*d*) montrent que le modèle est très fiable pour la simulation de la biomasse et du rendement du paddy (faible *nRMSE* et indice *d* proche de 1). Pour la calibration et la validation de la CC les indicateurs statistiques sont respectivement ($R^2 = 0,91$; *nRMSE* = 14,70% et indice *d* = 0,93) et ($R^2 = 0,94$; *nRMSE* = 13,10% et indice *d* = 0,94). La relation entre le rendement observé et simulé a donné un indice *d* de 0,93 et un *nRMSE* de 14,78% (soit un rendement moyen de 8,91 tonnes/ha). Les résultats de la biomasse observée et simulée montrent que les valeurs observées sont proches de celles simulées avec $R^2 = 0,84$, un indice *d* = 0,98, un rendement moyen à l'hectare de la biomasse observée de 19,27 tonnes/ha et simulée de 17,87 tonnes /ha.

Conclusion et application de la recherche : Il a été retenu que AquaCrop serait un outil très utile, permettant aux utilisateurs sur le terrain, d'évaluer et d'optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation et le rendement de riz.



Evaluation of the FAO AquaCrop model for irrigated rice in the Senegal River Delta

Objectives: The control of the water management for sustainable agriculture in the Senegal River Delta requires the use of decision-support tool. This study assess the ability of the AquaCrop model to simulate the growth, yield and water requirements of the rice. It was conducted on irrigated plots at the Ndelle basin (river Delta of Senegal) where the water resource is available and the conditions favorable to rice cultivation.

Methodology and results : The measurement of the green canopy cover (CC) was done by aerial photography using a Canon Powershot G15 camera perched on a metal bar (with right angles) two meters above the ground. The percentage of CC was obtained after an automatic processing of the photo images with the Matlab software. Additional data collected during the plots monitoring that are the field management and climate data were used to calibrate the AquaCrop model. Statistical indicators such as the normalized Root Mean Squared Error (nRMSE) and the Willmott index of agreement (d) showed that the model is highly reliable to simulate the biomass and yield of paddy (low nRMSE and d-index near 1). For calibration of the CC ($R^2 = 0.91$; nRMSE = 14.70 % and d-index = 0.93) and validation ($R^2 = 0.94$; nRMSE = 13.10% and d-index= 0.94). The relationship between observed and simulated yield provided a d- index of 0.93 and nRMSE of 14.78 % (for an average yield of 8.91 ton/ha). The results showed a close relationship between observed and simulated biomass with $R^2 = 0.84$ and d-index = 0.98 (for an average observed and simulated biomass of 19.27 ton/ha and 17.87 ton/ha respectively).

Conclusion and application : The AquaCrop model could be a very useful tool to optimize the water use and improve the irrigated rice yield in the river Delta of Senegal.

2 INTRODUCTION

La riziculture irriguée au niveau du Sahel, joue un rôle important dans la lutte pour l'autosuffisance et la sécurité alimentaire. Le riz (*Oryza sativa* L.) irrigué représente 70 à 100% de la production rizicole des pays du Sahel Ouest-africain (Samba, 1998). Au Sénégal, la plupart des périmètres irrigués du Delta du Fleuve Sénégal sont orientés vers la production de riz d'autant plus que la construction des barrages de Diama et de Manantali a donné un nouvel essor à la culture irriguée, où de vastes domaines sont conquis (Gning, 2015). Cependant, malgré la superficie 240 000 ha aménagée (SAED, 2012), l'abondance de la ressource en eau et des sols à dominant argileux qui s'accommodent à la riziculture, les rendements restent toujours faibles dans le Delta du Fleuve Sénégal. Les rendements moyens annuels y sont de 5,5 à 6 t/ha (Ndiaye *et al.*, 2008), loin des rendements irrigués potentiels estimés entre 8 à 10 t/ha (Poussin *et al.*, 2005). Comme pour toute irrigation en milieu aride, celle dans le Delta du Fleuve Sénégal pose des problèmes de gestion de la ressource et de la

conservation des terres (Gning, 2015). En dépit de l'importance de cette culture dans le Delta du Fleuve Sénégal, il n'existe pas à notre connaissance des travaux de modélisation de la croissance, du rendement et des besoins en eau du riz cultivé. Il conviendrait donc d'étudier la performance de l'outil d'aide à la prise de décision (AquaCrop) en agriculture irriguée non seulement par rapport à une capacité de production immédiate, mais aussi par rapport à une durabilité des pratiques proposées. Les modèles de simulation offrent un moyen peu coûteux d'étudier un large éventail d'options de gestion (Wellens *et al.*, 2013). La FAO a conçu AquaCrop, un modèle de simulation eau-sol-plante pour servir d'outil d'aide à la prise de décisions dans la planification et l'analyse en culture irriguée (Hsiao *et al.*, 2009 ; Steduto *et al.*, 2009). Au Burkina Faso, ce modèle a été utilisé pour simuler avec succès la croissance, le rendement et les besoins en eau des cultures irriguées des choux (*Brassica oleracea* L.) (Wellens *et al.*, 2013) et du maïs (*Zea mays*) (Traoré, 2008). La



présente étude s'intéresse à un modèle de simulation de la croissance, du rendement et des besoins en eau du riz irrigué (AquaCrop). Le modèle simule la variation de la biomasse potentielle en réaction aux variations de l'humidité du sol. Bien que s'inspirant de processus biophysiques de base, AquaCrop utilise un nombre relativement faible de paramètres à adapter en fonction des situations et des cultures. Des variables d'entrée intuitives par défaut, qui peuvent être déterminées à l'aide de méthodes simples (Raes *et al.*, 2009 ; Steduto *et al.*, 2009), sont suffisantes et ne nécessitent pas

d'ajustements supplémentaires. Abedinpour *et al.*, (2012) et Stritevic *et al.*, (2011), ont donné un aperçu de la capacité d'AquaCrop à utiliser un minimum de données d'entrée comparativement aux modèles sophistiqués de croissance de culture, souvent spécifiques à certaines variétés. L'objectif de cette étude était d'adapter et de tester la capacité du modèle AquaCrop à simuler la couverture de la canopée verte et des rendements, et d'évaluer l'efficacité du calendrier d'irrigation du riz de la cuvette de Ndelle (Delta du Fleuve Sénégal).

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Présentation de la zone d'étude : Le Delta du Fleuve Sénégal se situe au nord-ouest du Sénégal, à 260 km de la capitale Dakar. Il est compris entre 16°00 et 14°40 de latitude nord et 15°30 et 16°30 de longitude ouest. Le Delta est une entité géographique de forme triangulaire. Il se présente sous forme d'une vaste plaine basse, limitée au nord par le fleuve Sénégal, à l'ouest par l'océan Atlantique, à l'est par le lac de Guiers, au sud-ouest par des cordons dunaires et au sud-est par la vallée du Ferlo (Figure1). La superficie du Delta est de 3500 km² et s'étend sur une longueur de 250 km de Richard-Toll à Saint Louis, dont les trois quarts se situent en rive gauche. Le Delta du Fleuve Sénégal est situé dans la zone nord sahélienne (Malou, 2004) où la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 400 mm/an et l'évaporation atteint 2500 mm/an (Diaw, 2008). Il est parcouru par un réseau hydrographique assez dense qui comprend la branche principale

du fleuve Sénégal qui présente de nombreux défluent. Le fleuve alimente aussi, via le canal de la Taoué, le lac de Guiers qui est une dépression de 300 km² (Fall, 2006). Ces différents défluent du fleuve ainsi que le lac permettent l'irrigation des nombreux périmètres agricoles par un système complexe de canaux à ciel ouvert. L'agriculture irriguée y est pratiquée depuis le début des indépendances en 1960 et s'est développé avec la construction de barrages sur le fleuve Sénégal (Diama en 1986 et Manantali en 1988) qui ont permis la disponibilité de l'eau douce et les activités agricoles durant toute l'année. Les eaux de drainage issues de ces périmètres sont évacuées via des canaux et rejetées dans les dépressions naturelles de Ndiaël, du Noar et de Krankaye (Figure1). Les périmètres rizicoles de Ndelle (Latitude. 16°09'50,81" Nord ; Longitude 16°18'01,46" Ouest) ont été choisis pour tester la performance du modèle (Figure1).

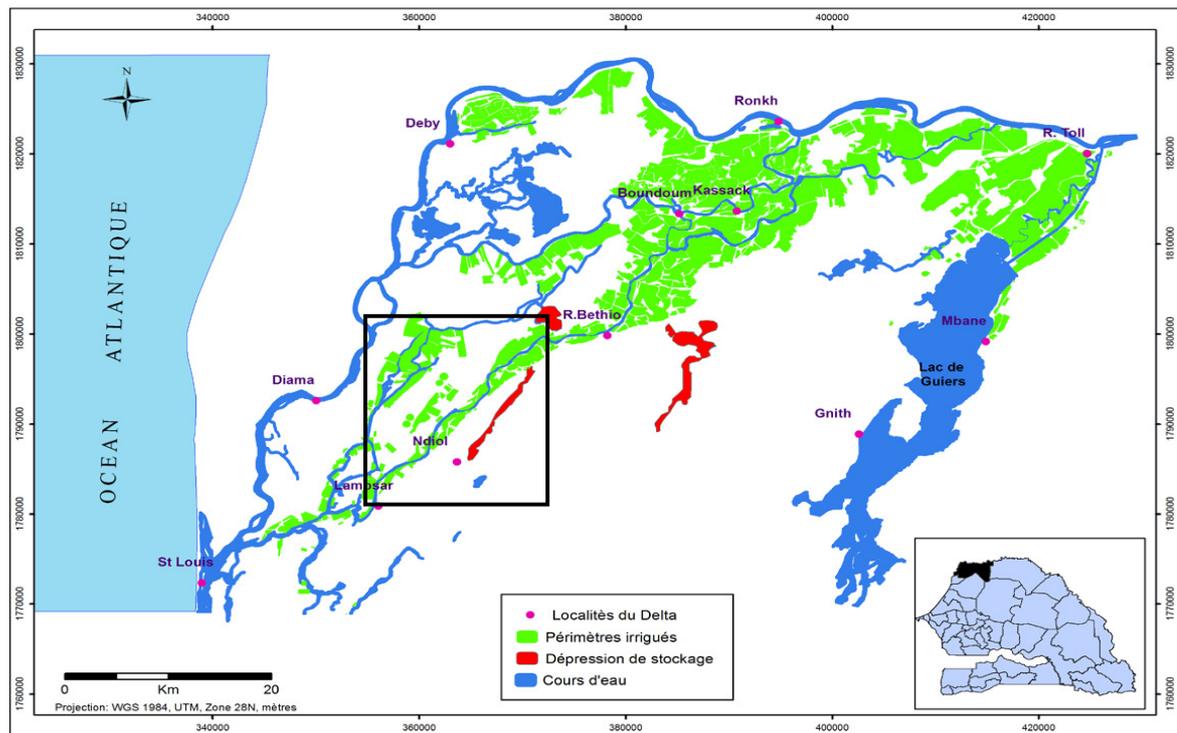


Figure 1 : Carte de localisation du Delta du Fleuve Sénégal et de la zone d'étude

3.2 Présentation du modèle AquaCrop :

Le modèle eau-sol-plante, AquaCrop suppose une relation linéaire entre le taux de croissance de la biomasse et la transpiration grâce à un paramètre de productivité de l'eau (WP). Pour un intervalle de temps donné, la biomasse accumulée est la résultante de WP et de la transpiration de la canopée (de Wit, 1958 ; Hsiao et Bradford, 1983 ; Steduto *et al.*, 2007). La productivité de l'eau est un paramètre spécifique, normalisé pour l'évaporation et la concentration atmosphérique de CO₂ afin de permettre l'application d'AquaCrop dans divers milieux. Le modèle n'inclut pas les processus hiérarchiques sous-jacents simulant les étapes intermédiaires conduisant à l'accumulation de la biomasse. En conséquence, la structure du modèle est simple avec peu de paramètres d'entrée (Steduto *et al.*, 2009). Le modèle utilise la couverture de la canopée, plus facile à obtenir que l'indice foliaire (LAI), comme base de calcul de la transpiration. AquaCrop différencie les paramètres conservateurs (fixes) et les paramètres non-

conservateurs. Les paramètres conservateurs ne changent pas avec la situation géographique et les pratiques de gestion des parcelles ; ils restent applicables aux conditions de stress via la modulation de leurs fonctions de réponse au stress (Steduto *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2009). Les paramètres conservateurs comprennent : la croissance et la diminution de la couverture de la canopée ; le coefficient de culture pour la transpiration de la couverture maximale de la canopée ; la WP pour la biomasse ; et les seuils de stress. Ces paramètres sont censés être applicables à un large éventail de conditions et ne sont pas spécifiques à une variété de culture donnée (Steduto *et al.*, 2012). Les paramètres non-conservateurs sont affectés par les conditions climatiques, la gestion de la parcelle ou les conditions du sol. Ils ne peuvent pas être appliqués sur une grande échelle et doivent être fournis par l'opérateur. Si ces paramètres ne sont pas disponibles, ils peuvent être estimés par le modèle (Raes *et al.*, 2009).



4 MÉTHODES D'ÉTUDE

4.1 Données météorologiques et pédologiques : Les données météorologiques proviennent de la station météorologique de Ndiaye (Latitude. 16°12.079 Nord ; Longitude. 16°16.078 Ouest ; Altitude. 13 m). Les mesures prises à un pas de temps journalier concernent: les températures minimales et maximales (°C), les précipitations (mm), la vitesse du vent (m/s) à 2 m au-dessus du sol, la radiation solaire et l'humidité relative. L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été calculée selon la méthode Penman-Monteith de la FAO (Allen *et al.*, 1998). Celle-ci nécessite comme données d'entrées la température (minimale et maximale), l'humidité (minimale et maximale) ainsi que la radiation solaire et la vitesse du vent à 2 mètres au-dessus du sol (Raes, 2009). Les températures minimales et maximales, les données relatives aux précipitations (jours de pluies) ainsi que l'évapotranspiration de référence sont converties respectivement en format PLU, TMP et ET_0 conformément aux exigences du modèle

AquaCrop. Des échantillons de sol ont été prélevés à 20 cm de profondeur à l'aide d'une tarière. Six (06) échantillons de sols ont été pris aléatoirement dans chaque parcelle (six parcelles au total). Les 36 échantillons ont été séchés à l'étuve à 105°C pendant 24h puis broyés et envoyés au « Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité » à La Hulpe (Belgique) pour y être analysés. Les teneurs en argile, en limon et en sable en moyennes sont respectivement de 55,7%, 30,9% et 13,4%. Aucun horizon distinct n'a été dénombré dans la zone racinaire des plants de riz et les mêmes caractéristiques hydrauliques ont donc été appliquées. À l'aide du logiciel informatique « SPAW Hydrology », une fonction de pédotransfer permet de déterminer les paramètres suivants : la teneur en eau à la capacité au champ (θ_{cc}), la teneur en eau à saturation (θ_{sat}), la teneur en eau au point de flétrissement permanent (θ_{pf}) et le coefficient de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) (Tableau 1).

Tableau 1 : Propriétés physiques du sol de la cuvette de Ndelle

θ_{CC} (-)	θ_{Sat} (-)	θ_{pf} (-)	K_{sat} (cm/j)
0,445	0,491	0,337	0,610

4.2 Données agronomiques : Six parcelles ont été étudiées et divers paramètres y ont été mesurés depuis la germination du riz jusqu'à la récolte. La variété Sahel 134 est utilisée pour la campagne contre-saison chaude 2013/2014. Les doses locales (200kg/ha d'urée + 100kg/ha de DAP 18-46-0) recommandées de nutriments ont été appliquées. Toutes les parcelles ont été régulièrement désherbées. Cette variété à un cycle court (120 jours) est utilisée pour la culture irriguée depuis 2007 et est caractérisée par une assez bonne résistance à la salinité (SAED, 2012). Les agriculteurs de la cuvette utilisent la technique du semis direct à la volée. L'évaluation de la couverture de la canopée foliaire a débutée trente (30) jours après la date de semis. L'évolution de la fraction de la couverture de la canopée a été suivie toute les semaines par prise de photos. Les photos ont été prises à chaque

fois au même niveau, identifié par des piquets. Sur chaque parcelle, dix photos ont été prises à deux (02) mètres au-dessus du couvert végétal (Hu *et al.*, 2007). Un appareil photographique de marque *Canon Powershot G15* muni d'un capteur d'une résolution de 12,1 méga pixels, a été utilisé. L'appareil a été accroché à une perche métallique en forme équerre. Ce dispositif permet de réaliser des clichés du haut de la canopée tout en évitant que l'ombre de l'opérateur ne soit visible sur la photographie. On suppose que la sénescence est atteinte lorsque le couvert végétal commence à diminuer, coïncidant avec le jaunissement des épis du riz. A la maturité, les carrés de rendement ont été utilisés pour évaluer la biomasse. Les carrés ont été choisis au niveau des piquets où les photographies ont été prises.

4.3 Traitement des photos: Les photographies de la canopée ont été analysées

pour déterminer le taux de couverture de la canopée verte par rapport au sol. Pour ce faire, un programme de traitement automatique a été codé dans le langage « Matlab ». Le principe général est d'utiliser une combinaison des différentes bandes spectrales (rouge, verte et bleu) et indices de couleur afin d'accentuer la couleur verte des plantes (Figure 2). Afin d'augmenter le contraste entre les plantes et le sol, un filtre a été appliqué (Figure 3). Cela se

traduit par des pixels très foncés pour constituer le fond (sol, paille, eau) et des pixels très clairs pour représenter les plantes (Figure 3). Une fois l'image contrastée à l'aide du filtre, la seconde étape a été de déterminer un seuil afin de discriminer les pixels appartenant respectivement au sol et aux plantes. Cela permis ensuite de quantifier le taux de couverture de la canopée par rapport à la surface échantillonnée.



Figure 2 : Vue de dessus de la parcelle avec une prise de photo

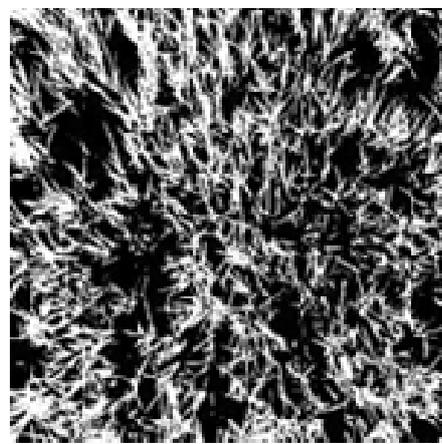


Figure 3 : Génération d'une image binaire à partir de la photo

Une fois l'image binaire obtenue, le pourcentage de la canopée verte est calculé. Un carré de 1 m de côté est créé au centre de l'image afin d'éviter les effets de bord et seuls les pixels se trouvant à l'intérieur de celui-ci sont comptabilisés (Figure 4). Dans le code « Matlab », le rapport du nombre

de pixels blancs (qui indiquent la présence de végétaux) sur le nombre total de pixels est établi (Figure 4). Les photographies prises chaque semaine à chaque piquet et dans chaque parcelle sont traitées simultanément pour bien observer l'évolution de la canopée verte à chaque date.

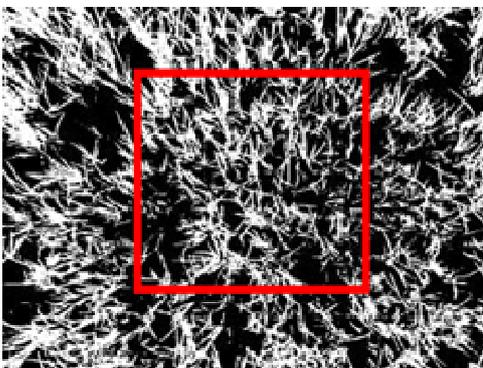


Figure 4 : Image binaire avec application d'un rectangle restrictif pour déterminer la couverture de la Canopée.



4.4 Calibration et validation du modèle :

La calibration de la couverture de la canopée est cruciale (Andarzian *et al.*, 2011). La couverture de chaque jeune plante a été estimée par le modèle. L'émergence à 90% a été mesurée à partir de nos graphiques de développement de la canopée produits à partir du logiciel Excel. Les paramètres de la couverture de la canopée ont été ajustés en utilisant l'ensemble des données. L'expansion de la couverture de la canopée a été estimée automatiquement, après la saisie des dates phénologiques, telles que les dates de semis, les dates de couverture maximale, les dates de la floraison et de la sénescence. L'effet du stress de fertilité du sol et l'effet du stress hydrique n'ont pas été évalués ici dans la mesure où on considère

que des nutriments ont été administrés aux cultures et qu'une lame d'eau est toujours présente dans les parcelles durant le cycle de développement des cultures. Les programmes d'irrigation ont été définis par les agriculteurs et la hauteur de la lame d'eau à chaque irrigation a été mesurée. Après une définition du set lors de la simulation par la méthode dite essai-erreur pour la calibration de la couverture de la canopée, la WP a été redéfinie pour le cas de la riziculture au Delta du Fleuve Sénégal (Tableau 3). Des données relatives à la biomasse tout au long de la croissance végétale sont disponibles. Tous les paramètres adaptés, qui diffèrent des paramètres par défaut utilisés pour le cas du riz du Delta du Fleuve Sénégal, sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 2 : Données de culture adaptés, calibrés et mesurés utilisés dans AquaCrop pour la simulation de la productivité du riz

Description	FAO Value	Value	Unités	Interprétation	Source
Température supérieure	30	35	°C	Au-dessus la croissance s'arrête	Calibré
Couverture initiale de la canopée à une émergence de 90%(CC ₀)		3.00	Cm ²		Adapté
Coefficient de croissance de canopée (CGC)	12.30	12.30	%	Croissance journalière	Calibré
Couverture maximale de la canopée (CCx)	entièrement couvert	70 - 95	%	Dépend de la densité des plantes	Mesuré
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)	9.30	9.30	%	Déclin journalier relatif à la CCx	Mesuré
Productivité de l'eau (WP*)	30-35	30	Gramme/m ²	Biomasse au-dessus du sol	Calibré
Indice de récolte de référence (HIo)	35-50	43	%		Mesuré
Temps du semis à la profondeur maximale d'enracinement		60	Jours		Mesuré
Temps du semis à la floraison		78	Jours		Mesuré
Temps du semis à la sénescence		103	Jours		Mesuré
Temps du semis à la maturité		118	Jours		Mesuré
Profondeur effective d'enracinement	0.60	0.30	mètre		Mesuré



4.5 Évaluation du modèle : L'évaluation du modèle est basée sur la comparaison entre les données simulées et observées, tout en faisant appel aux indicateurs statistiques. Toutefois, la couverture de la canopée et le rendement ont été pris en compte lors de l'évaluation du modèle. Les données observées (couverture de la canopée et rendement) par rapport aux données issues de la validation ont été comparées pour la couverture de la canopée. De même pour le rendement où les données observées et celles simulées ont été aussi comparées. La pertinence de ces comparaisons a été évaluée à l'aide des critères statistiques. Les critères utilisés sont : le coefficient de détermination (R^2) de l'ajustement linéaire, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée ($nRMSE$) et l'indice d'accord de Willmott (d).

4.6 Quantification des eaux d'irrigation :

La hiérarchisation du système hydraulique et les quantités d'eau apportées à la parcelle sont souvent difficiles à estimer. Dans certains cas,

cette estimation pourrait se faire à l'échelle de la station de pompage bien en amont des parcelles (SAED, 1999). Pour quantifier cette utilisation d'eau au niveau des parcelles, deux dispositifs ont été mis en place.

i) Des règles graduées ont été placées dans les parcelles permettant de relever la hauteur d'eau deux fois par semaine. Une fois la hauteur de la lame d'eau connue, toute une série de paramètres comme l'évapotranspiration, la percolation ou le drainage ont été prise en compte pour connaître la quantité d'eau réelle.

ii) Le second dispositif d'enregistrement des apports en eau est un « piézomètre de surface ». Une sonde de type BARO DIVER permet l'enregistrement de la pression atmosphérique. La compensation de la sonde DIVER permet d'avoir la lame d'eau au-dessus de la sonde. De cette valeur a été déduite la profondeur de l'appareil par rapport au sol pour avoir la lame d'eau au-dessus de la parcelle.

5 RÉSULTATS

5.1 Calibration et validation : Une fois que les données ont été réunies (taux de couverture de la canopée, données climatiques, données pédologiques, données rendement, informations sur la gestion des parcelles). Dans un premier temps le principe a consisté à utiliser la méthode dite "essai-erreur" avec le fichier riz de la FAO présent dans le modèle tout en ajustant l'ensemble des données du riz du delta du fleuve Sénégal: c'a été la calibration. Des sets (ensembles de données) séparés ont été créés dans le but d'établir une corrélation entre les données observées et simulées (Hsiao *et al.*, 2009). Les simulations ont été optimisées en utilisant toute une série de paramètres conservatifs pour le riz et en modifiant les paramètres non-conservateurs (durée des différents stades culturaux) de même qu'en

intégrant les observations faites sur le terrain. Elles peuvent varier pour différentes variétés de riz. Cela a été répété jusqu'à ce que chaque observation au sein du set (ensemble) de données soit utilisée une fois pour la validation (Hastie *et al.*, 2001). Une fois que l'opérateur a jugé que le "set" de paramètres encodé offre des résultats acceptables, le "set" est conservé. Pour chaque set de données d'entraînement, des jeux de paramètres ont été calibrés et les meilleurs résultats ont été appliqués. La validation a consisté ensuite à vérifier l'efficacité du modèle en utilisant le "set" défini lors de la méthode dite "essai- erreur" (Tableau 2). Les résultats de la simulation avec l'ensemble de données ont été comparés afin de faire une évaluation.



Tableau 3 : Liste des parcelles utilisées pour la validation d'AquaCrop pour le riz dans le delta fleuve Sénégal.

N° parcelle	Superficie (ha)	Variété	Dates de semis	Type d'irrigation	Densité des plantes (plantes/m ²)	couverture maximale canopée(%)	Dates de récolte
P1	0.80	Sahel 134	26/02/2014	submersion	164	75	26/06/14
P4	1.39	Sahel 134	06/03/2014	submersion	317	91	26/06/14
P 6	0.64	Sahel 134	04/03/2014	submersion	205	85	26/06/14
P 8	0.30	Sahel 134	25/02/2014	submersion	326	95	26/06/14
P 9	0.46	Sahel 134	23/02/2014	submersion	171	80	26/06/14
P10	0.44	Sahel 134	24/02/2014	submersion	152	78	26/06/14

5.1.1 Couverture de la canopée simulée et observée : Les résultats de la couverture de la canopée observée (600 sets au total) et simulée sont consignés dans les Figures 5 et 6. L'ensemble des données sont scindés en deux sous-sets. Les premiers sous-sets (70% des sets globaux) sont utilisés pour la calibration (sets de calibration) et les deuxièmes (30% des sets) pour la validation (sets de validation). Dans la mesure où le développement de la canopée est complet, cela traduit l'absence de stress des plantes de riz. Les valeurs de la couverture de la canopée

observées sont proches des valeurs simulées. L'ensemble des résultats issus de la calibration et de la validation sont sur la première bissectrice du graphe de la régression linéaire (Figures 5 et 6). Une légère différence est notée entre les critères statistiques de la calibration ($R^2 = 0,91$; $nRMSE = 14,70\%$ et indice $d = 0,93$) et de la validation ($R^2 = 0,94$; $nRMSE = 13,10\%$ et indice $d = 0,94$). Cette faible différence confirme la capacité du modèle à simuler avec précision la couverture de la canopée.

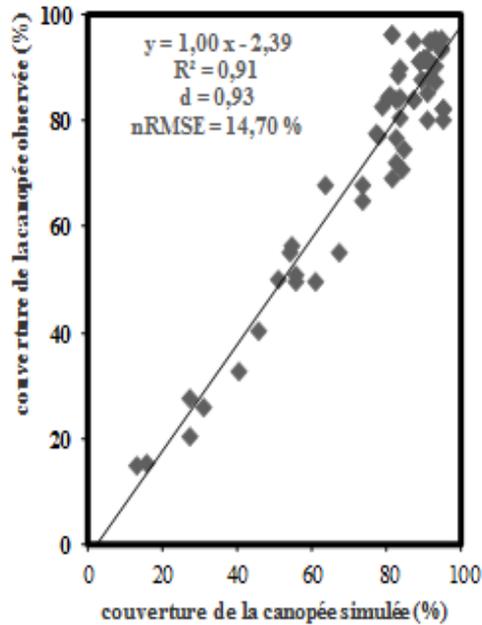


Figure 5 : couverture de la canopée observée et simulée avec l'ensemble des données des parcelles (calibration)

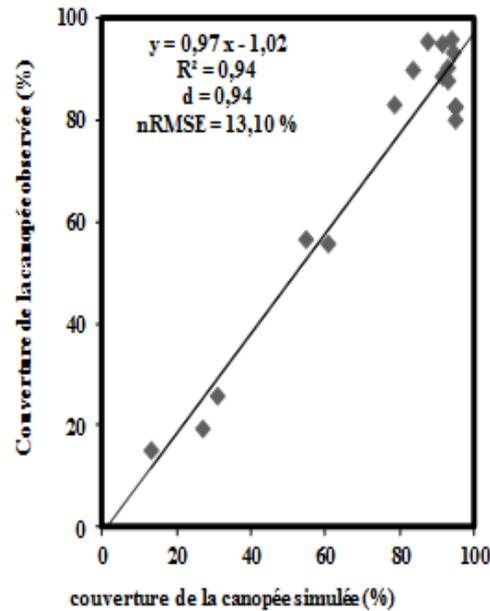


Figure 6 : couverture de la canopée observée et simulée avec les données des parcelles P 4 et P 10 (validation)

5.1.2 Biomasse simulée et observée : Les résultats de la biomasse au-dessus du sol aux différents stades de croissance des plantes suivent celles simulés (Figures 7 a ; b ; c). Durant les premières semaines du stade juvénile des plantes de riz (trois semaines après le semis), un léger écart est noté entre les résultats simulés et ceux

obtenus après traitement des photos. Cet écart sera compensé par l'occupation des plantes lors de la formation des touffes. Les résultats étant identique sur les six parcelles, nous avons jugés utile de représenté pour les trois Figures 7a, 7b et 7c.

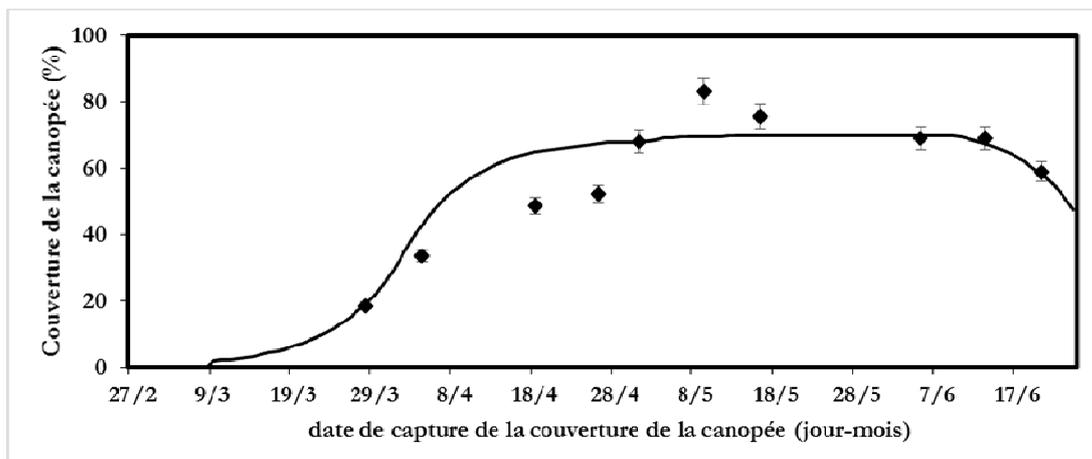


Figure 7 a

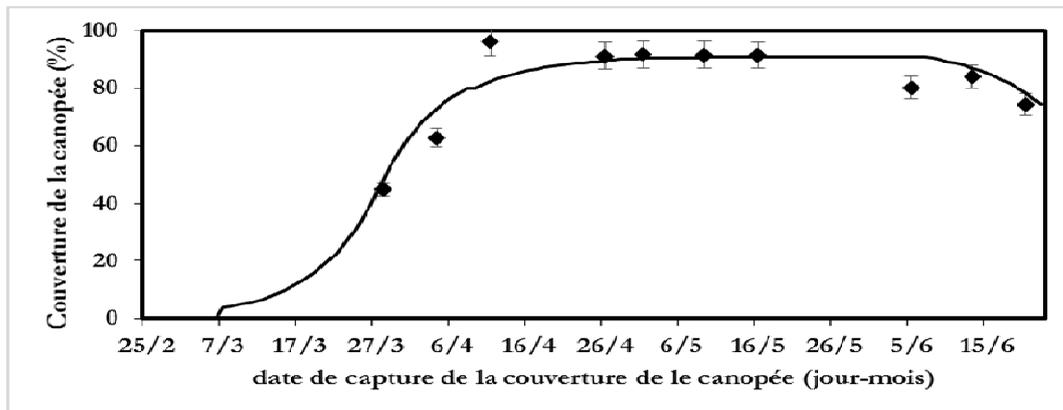


Figure 7 b

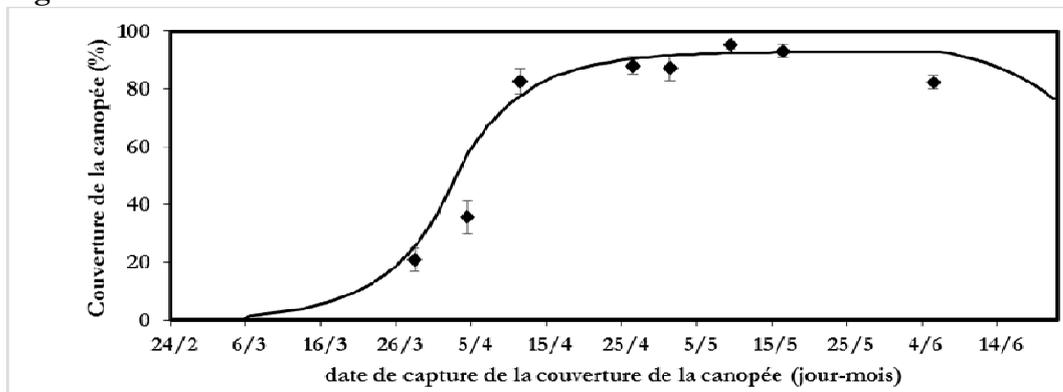


Figure 7c

Figure 7 : Couverture des canopées observées (points avec des barres d'erreur) par rapport aux couvertures simulées (ligne) pour trois parcelles. Chaque point représente une moyenne de 10-12 données et les barres verticales représentent des erreurs à un seuil de 5 %.

5.1.3 Biomasse et rendement observé et simulé : L'analyse des résultats des biomasses et des rendements par hectare a montré qu'il existait une relation entre le poids de la biomasse fraîche à la récolte et le poids du rendement en grain du paddy par hectare. Le rendement en grain du paddy par hectare correspondrait à la moitié du

poids totale de la biomasse fraîche tout juste après la récolte (Figure 8). Les tests statistiques et la régression linéaire montrent que le modèle AquaCrop était aussi capable de simuler avec précision le développement de la canopée et les biomasses finales au-dessus du sol.

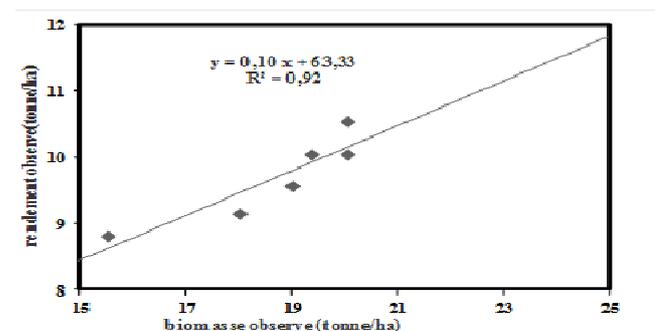


Figure 8 : Relation entre biomasses et rendement en grain observé à la fin de la saison

Le modèle a prédit bien le rendement en grain du paddy que pouvait attendre chaque agriculteur de la zone. L'équation de la droite de régression $y = ax + b$ déduite de l'analyse des rendements est meilleure lorsque la pente «a» tend vers 1 et

l'interception «b» tend vers 0. Les critères statistiques ($R^2 = 0,81$; $nRMSE = 14,78\%$ et $d = 0,93$) confirme la capacité du modèle à estimer le rendement moyen en grain du paddy de 8,91tonnes/ha (Figure 9)

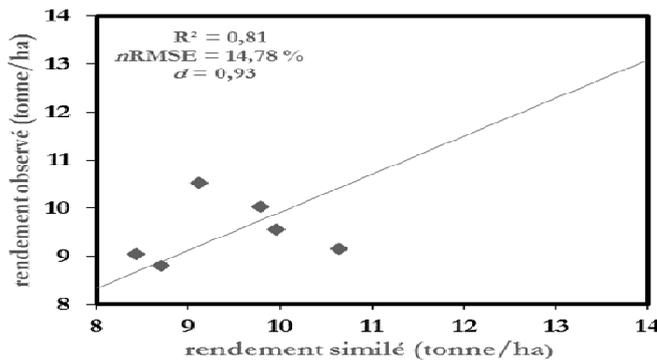


Figure 9 : Relation entre rendement en grain par hectare observé et simulé

L'analyse des résultats des biomasses observée et simulée par le modèle montre que les valeurs observées sont proches de celles simulées avec un R^2 de 0,84, un indice d de 0,98. Pour un

rendement moyen de la biomasse observée de 19,27 tonnes/ha, celle simulée par le modèle est de 17,87 tonnes /ha (Figure 10).

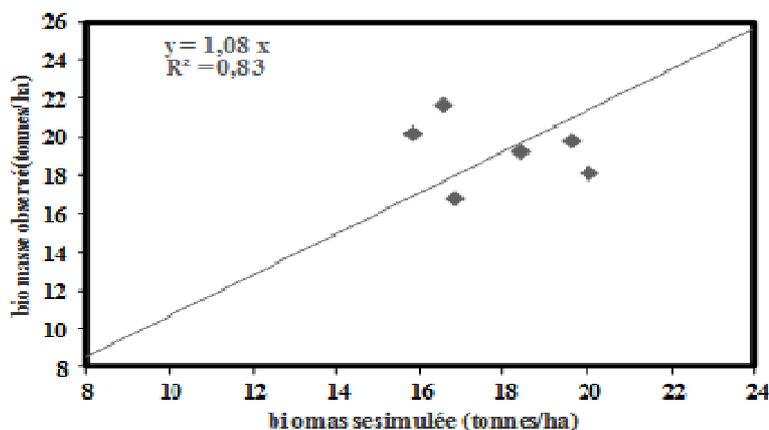


Figure 10 : Relation entre biomasse observée et biomasse simulée.

5.2 Apport d'eau d'irrigation dans les parcelles : La riziculture par submersion pratiquée dans le Delta du Fleuve Sénégal est très consommatrice d'eau. En effet durant toute la phase d'irrigation, une lame d'eau conséquente est maintenue au-dessus de la surface du sol. A partir des quantités d'eau enregistrées dans les

parcelles, une simulation a été faite par le modèle pour estimer les quantités d'eau strictement nécessaire pour un bon développement des plantes de riz. Le modèle a décelé une gestion non rationnelle des eaux d'irrigation au niveau de chaque parcelle (Tableau 4).



Tableau 4 : Apport d'eau et quantité d'eau simulée par le modèle pour chaque parcelle

Numéro des parcelles	Quantité (hauteur) d'eau utilisée par les agriculteurs (mm)	Quantité (hauteur) d'eau simulée par le modèle (mm)	Différence entre quantités d'eau utilisée et simulée (mm)
P1	358	298,3	59,7
P4	322	118,7	203,3
P6	617	219,5	397,5
P8	427	149,9	277,1
P9	525	121,1	403,9
P10	673	156,8	516,2

6 DISCUSSION

Dans les pays en développement, les modèles de simulation s'efforcent de trouver une pertinence en agriculture (Carberry *et al.*, 2004). Pour tenter de comprendre les différences de rendement entre les normes locales et nationales, des structures de gestion de l'agriculture irriguée (SAED) et des chercheurs ont uni leurs efforts dans le suivi des parcelles. L'originalité de la méthodologie appliquée dans cette étude réside dans l'utilisation d'un modèle de développement de culture, modèle AquaCrop, qui n'a jamais été utilisé au Sénégal et encore moins dans le Delta du Fleuve Sénégal. Le dispositif est similaire à celui utilisé au Burkina Faso par (Wellens *et al.*, 2013) et (Traoré, 2008) qui avaient travaillé respectivement sur la culture irriguée de chou et du maïs. Six parcelles ont été utilisées pour évaluer la performance du modèle. Le nombre de "sets" (ensemble de mesures, 60 par semaine) de données limité dans la présente étude n'influence pas sur la calibration et la validation du modèle. Deligios *et al.*, 2013 ont adapté et évalué avec succès un modèle de culture semblable, Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), portant sur le colza d'hiver à l'aide d'un "set de données" même légèrement plus petit. De même (Wellens *et al.*, 2013) sur l'évaluation de la performance du modèle AquaCrop pour la culture du chou sur des petites parcelles irriguées en milieu semi-aride ont utilisé le même nombre de parcelles que la présente étude (six parcelles). Le nombre limité de parcelle (six parcelles) lors de cette étude n'a cependant pas permis des procédures standards de calibration et de validation. Cependant, les sous-sets issus de la

couverture de la canopée ont été utilisés en conséquence. Des résultats, presque identiques pour la calibration et la validation, on peut conclure que dans ce cas l'absence de données n'a pas affecté la qualité des paramètres de culture obtenus. Les résultats montrent que le taux nette de la couverture de la canopée est faible en début saison, elle croît ensuite proportionnellement avec l'accumulation de biomasse. L'augmentation nette de la couverture de la canopée est très liée par ailleurs aux paramètres climatiques, notamment à l'eau disponible (Cornet, 1981). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par Wellens *et al.*, (2013) portant sur la culture de chou en zone sahélienne. La densité de semis varie d'une surface culture à un autre dans une parcelle vue la méthode de semis à la volée utilisée. Néanmoins une relation entre la densité de semis et la couverture maximale de la canopée existe. Les valeurs de la couverture maximale, dérivées des densités de plantes observées, ont été utilisées lors des simulations. Dans une parcelle, une surface culturale à forte densité donne un taux de couverture de la canopée importante. Il est à signaler que les parcelles à fortes densités et à taux de couverture de la canopée plus importante n'ont pas donné des rendements élevés. Contrairement aux travaux de Wellens *et al.*, (2013) sur la culture irriguée de choux au Burkina Faso où le rendement est estimé directement sur la base de la densité de semis. Cela pourrait s'expliquer d'une part par le fait que le rendement en biomasse dépend des micronutriments (quantité des intrants) disponibles dans le sol et ainsi que de l'eau utile.



D'autre part que le rendement en paddy n'est évalué après le processus de séchage et battage de l'ensemble (paille et grains). Alors que le rendement en chou s'évalue directement à partir de la biomasse fraîche. Les méthodes d'irrigation par submersion ou par bassin sont couramment utilisées en riziculture dans le Delta du Fleuve Sénégal. Cette technique d'irrigation par submersion est consommatrice d'eau. Les méthodes de suivi des eaux d'irrigation ont permis de quantifier ces apports. Les données météorologiques, pédologiques et de gestion culturales susmentionnées ont été utilisées afin d'optimiser le besoin d'eau au niveau de chaque parcelle à l'aide du modèle AquaCrop. Après une mise en eau des parcelles dans le but de la préparation un semis direct à la volée, une lame d'eau était maintenue supposée correspondre à la capacité au champ. La variation des quantités d'eau d'irrigation entre les parcelles est fortement liée au fait que l'irrigation est laissée à l'appréciation de l'agriculteur. Les quantités d'eau utilisées par les agriculteurs sont largement supérieures à celles prédites par le modèle. Cependant, des études antérieures ont montré que la hauteur de la lame d'eau a une influence

7 CONCLUSION

L'étude a permis de montrer que la gestion des eaux d'irrigation des cultures de riz et l'estimation des rendements dans le Delta du Fleuve Sénégal reste un phénomène complexe et non uniforme. Il ressort de cette étude que le modèle AquaCrop est capable de simuler de manière assez précise les quantités d'eaux nécessaires, la couverture potentielle de la canopée et le rendement potentiel de chaque parcelle irriguée. Cependant des calendriers d'irrigation doivent être mise en place afin que les conseils agricoles de la SAED puissent venir en aide aux paysans pour une amélioration des rendements. Plusieurs essais ont

sur le rendement. Selon Zeng *et al.*, (2003) cités par Gourlez de la Motte, (2012), le riz supporte mieux une lame d'eau de 10 cm. L'influence de la lame d'eau est plus importante pendant la phase de germination et de floraison que pendant la phase de maturation (Lacharme, 2001). Par ailleurs, une étude menée par Hammecker *et al.*, (2002) dans la cuvette de Ndelle a montré que la quantité d'eau nécessaire par parcelle pour avoir un bon rendement du riz serait de 213 mm/ha. Les résultats de (Hammecker *et al.*, 2002) viennent confirmer les nôtres obtenus lors de la simulation des besoins en eau par parcelle en riziculture. Les calendriers d'irrigation pourront être redéfinis afin d'apprécier leur impact sur le rendement. Cependant l'unique site expérimental et la seule variété de culture utilisée pour cette étude pourrait compromettre la calibration et validation. Néanmoins, AquaCrop a simulé de manière très précise la couverture de la canopée du riz au cours du développement. Les résultats obtenus pourront servir de socle pour d'autres études de simulation du riz et aussi de la culture de l'oignon qui est la deuxième après celle du riz et la première culture de rente de la zone étudiée.

indiqué que la calibration représente une étape critique dans la fiabilité du modèle. Les calibrages étant déjà fournis par la FAO pour les différentes cultures, peuvent exiger des améliorations locales additionnelles dans la gestion des périmètres irrigués dans le Delta du Fleuve Sénégal. AquaCrop a montré qu'il était un outil très polyvalent et capable d'être utilisé afin d'optimiser les apports d'eau alloués aux cultures, pour jouer sur le management de la parcelle dans le but de maximiser les rendements ou bien encore de servir comme outils de prospection d'expansion agricole.

8 REFERENCES

Abedinpour M, Sarangi A, Rajput TBS, Singh M, Pathak H. et Ahmad T: 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in semi-arid

environment. *Agricultural Water Management* 110: 55–66.

Allen R, Pereira LS, Raes D. et Smith, M : 1998. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. In:



- FAO Irrigation and Drainage Paper N_56, Rome, Italy. 300pp.
- Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, Mazraeh H, Barati ME, Barati MA. et Rahnema A: 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100: 1–8.
- Carberry P, Gladwin C. et Twomlow S : 2004. Linking simulation modelling to participatory research in smallholder farming systems. In: Dolve, R.J., Probert, M.E. (Eds.), *Modelling Nutrient Management in Tropical Cropping Systems*. Canberra, Australia, ACIAR Proceedings 114: 34–46.
- Cornet A : 1981. Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone sahélienne au Sénégal. *Acta Oecologica, Oecol., Plant*, Vol. 2 (16), **3**: 251-266.
- de Wit CT: 1958. Transpiration and crop yields. *Agricultural Research Reports* 64 (6). Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 88 pp.
- Deligios PA, Farci R, Sulas L, Hoogenboom G. et Ledda L : 2013. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: model adaptation at a field scale. *Field Crops Research* 144 :100–112.
- Diaw M : 2008. Approche hydrochimique et isotopique de la relation eau de surface/nappe et du mode de recharge dans l'estuaire et la basse vallée du fleuve Sénégal Thèse de Doctorat de 3ème cycle Université Cheikh Anta Diop de Dakar 209 pp.
- Fall S : 2006. La problématique de la gestion de l'eau à l'échelle des périmètres irrigués du Delta du fleuve Sénégal : Le bilan d'utilisation de l'eau et les coûts de l'irrigation dans les périmètres irrigués autour de l'axe hydraulique du Lampsar. Mémoire de DEA Université Gaston Berger de Saint Louis. 97 pp.
- Gning AA : 2015. Etude et Modélisation Hydrogéologique des Interactions Eaux de Surface-Eaux Souterraines dans un Contexte d'Agriculture Irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur Université de Liège et de Docteur ès Sciences Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 259 pp.
- Gourlez de la Motte L : 2012. Salinisation progressive des eaux et des sols liée aux conditions hydrogéologiques et aux pratiques d'irrigation dans une riziculture du Delta du fleuve Sénégal Travail de Fin d'Etudes Université de Liège.65 pp.
- Hammecker C, Maeght JL. et Boivin P: 2002. Etude expérimentale et numérique des transferts hydriques dans une parcelle rizicultivée de la région de Podor (vallée du fleuve Sénégal). In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation*. Cirad-IRD-Cemagref. 14pp.
- Hastie T, Tibshirani R. et Friedman J : 2001. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining Inference and Prediction*. Springer, New York, USA. 533 pp.
- Hsiao TC, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D. et Fereres E: 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response of water: III. Parameterization and testing for Maize. *Agronomy Journal* 101 (3): 448–459.
- Hu ZF, He J, Yin X, Lu S, Tang LW. et Li X: 2007. Estimation of fractional vegetation cover based on digital camera survey data and a remote sensing model. *Journal China University of Mining and Technology* 17 (1):116–120.
- Lacharme M : 2001. Le contrôle de la salinité dans les rizières : « Mémento Technique de Riziculture », V. 20 pp.
- Malou R : 2004. Impact du climat sur les ressources en eau souterraine en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat es Sciences Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 152p p.



- Ndiaye B, Molénat J, Ndoye S, Boivin P, Cheverry C. et Gascuel-Oudou C: 2008. Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 21 (3) : 325-336.
- Poussin JC, Diallo Y. et Legoupil J C ; 2005. Gestion collective et productivité des périmètres irrigués villageois. In *Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués*. Cirad. 22 pp
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC. et Fereres E: 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Journal of Agronomy* 101:438–447.
- SAED : 1999. Analyse des performances d'utilisation de l'eau d'irrigation dans le Delta du Fleuve Sénégal : cas des casiers rizicoles de Ndelle et de Ndiaye durant la contre saison chaude de 1998.
- SAED : 2012. Bulletin d'information sur la culture irriguée :
- Samba R : 1998. Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal: analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture. Thèse de Docteur- ingénieur en Géologie Appliquée Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 175 pp.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. et Raes D: 2012. Crop yield response to water. In: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, Italy. 500 pp.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D. et Fereres E: 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy* 101 : 426–437.
- Steduto PE, Hsiao TC. et Fereres E: 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrigation Science* 25 (3): 189–207.
- Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, Pejic B. et Maksimovic L: 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementary irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98: 1615–1621.
- Traoré A : 2008. Validation et calibration du logiciel aquaCrop pour l'évaluation des activités hydroagricoles au niveau de la parcelle. Mémoire de master institut international d'ingénieur de l'eau et de l'environnement Burkina Faso. 53 pp.
- Wellens J, Raes D, Traoré F, Denis A, Djaby B. et Tychon B: 2013. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment.
- Zeng L, Lesch SM, et Grieve CM: 2003. Rice growth and yield respond to changes in water depth and salinity stress. : *Agricultural Water Management* 59: 67-75.