

Adaptation du modèle «Mosaic» de croissance de la canne à sucre aux conditions de la région du Gharb au Maroc

Aabad M.^a, Martine J F.^b, Bouaziz A.^c et Falisse A.^d

^aCTCS/ORMVA du Gharb, Kénitra Maroc

^bCirad La Réunion, ^cIAV Hassan II Rabat

^dFac. Univ. Sciences Agronomiques, Gembloux, Belgique

Résumé

Dans le but d'extrapoler par une démarche de modélisation les résultats des expérimentations classiques sur canne à sucre, lourdes et coûteuses, à d'autres situations plus complexes (sites, années, stratégies,...), le modèle «Mosaic» a été adapté aux conditions de la région du Gharb au Maroc («Mosaic_Ma»). Mis au point par le CIRAD (France) dans les conditions du climat tropical de l'île de la Réunion, «Mosaic» a été construit pour estimer la croissance et la production de la canne en associant deux modules, un de bilan hydrique de type «Ceres» et l'autre de croissance végétative «Mosaic».

Le calage et la validation de «Mosaic» ont été effectués pour le cultivar CP70-321 sur la base des données de trois années d'expérimentations «in situ» et des enregistrements climatiques de la région du Gharb. Les paramètres génotypiques de «Mosaic_Ma» ont été déterminés à l'aide de variables d'état du couvert observées, notamment l'émission des limbes, le lai, la hauteur de tiges et le rendement en cannes usinables.

Les résultats de simulations ont abouti à des corrélations hautement significatives entre les valeurs observées et simulées des variables d'état. Comparés aux résultats de la littérature pour le modèle initial «Mosaic» et pour d'autres modèles, les écarts-types résiduels «rmse» et les coefficients de détermination «R²», calculés pour le calage et la validation, confirment les améliorations apportées au modèle. Ces améliorations résultent principalement de l'adoption d'un formalisme de calage plus approprié utilisant les températures horaires au lieu des températures moyennes journalières couramment utilisées dans la modélisation des processus de croissance.

La hauteur des tiges, facilement mesurable, a été calée et validée pour tenir compte des conditions du Gharb, différentes et plus contrastées par rapport à celles de La Réunion, ce qui confère à «Mosaic_Ma» plus de flexibilité et de facilité d'utilisation.

Le domaine de validité a été déterminé et le modèle peut être utilisé en tant qu'outil potentiel d'aide à l'exploration de données diverses permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation par la canne à sucre au Gharb, Maroc.

Mots clés: canne à sucre, calage, validation, modèle «Mosaic», rmse, simulation, Gharb, Maroc.

INTRODUCTION

Dans un contexte non plus de production maximale mais d'optimisation économique et durable de l'utilisation des ressources, les solutions recherchées font appel à des processus biophysiques et socio-économiques complexes et nécessitent souvent de tester une vaste gamme de scénarios dans des milieux très divers. Il en est ainsi pour toutes les cultures et en particulier pour la canne à sucre.

Parmi les outils disponibles, les modèles biophysiques occupent une place de choix. Leur essor s'est accru ces vingt dernières années (Martiné, 1999) du fait du développement des connaissances sur le fonctionnement des plantes, de la facilité de disposer de données nécessaires à la simulation et de l'acquisition d'outils informatiques puissants de traitement de ces données. Ces modèles, fondés sur l'organisation des connaissances acquises et des résultats expérimentaux, permettent de simuler, à posteriori comme à priori, de façon rapide et peu coûteuse, les effets de nombreux choix techniques sur les rendements et la qualité des produits agricoles.

Dans ce sens le modèle de croissance de la canne à sucre «Moscas» (couplé au module de bilan hydrique type «Ceres»), mis au point par le Cirad France sous climat tropical de l'île de La Réunion (Martiné 2003), a été retenu pour être adapté aux conditions marocaines.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1 Description du Modèle «Moscas»

- *Le module de Bilan Hydrique*

Le module de bilan hydrique adopté est celui inclus dans le modèle «CERES», (Ceres-Maize, Jones and Kiniry, 1986). Pour «Moscas», la version adaptée pour des plantes et des conditions tropicales différentes (DSSAT, Apsim-Sugar, Canegro) puis modifiée par Gabrielle et al. (1995) a été utilisée. Son fonctionnement se déroule en quatre étapes (figure 1): - calcul des flux de drainage dus à la gravité, suite aux apports d'eau de pluies et d'irrigation - calcul des pertes en eau dues à la demande climatique et à l'évaporation de la couche supérieure du sol - calcul des remontées capillaires conduisant à un rééquilibrage des potentiels hydriques - calcul, sur le profil racinaire, du stock d'eau utile et de la réserve utile. Les pertes par ruissellement sont négligées et se retrouvent en fait confondues avec le drainage.

Le bilan hydrique utilise l'indice foliaire «lai» calculé par le module de croissance (figure1) et procure à ce dernier la transpiration potentielle et le taux de satisfaction hydrique compris entre 0 et 1. Ce dernier correspond, sur le profil racinaire, à la fraction d'eau disponible ou stock utile par rapport à la réserve utile (Ritchie, 1981).

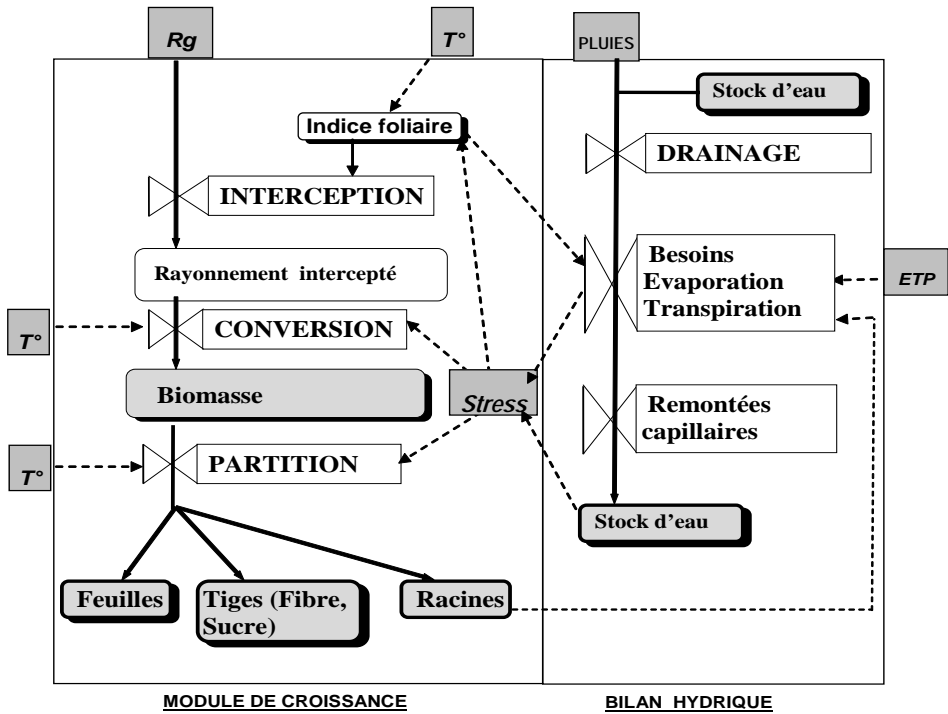


Figure 1. Schéma simplifié décrivant les principaux processus et variables d'états intégrés dans les deux modules de croissance et de bilan hydrique.

- Le module de croissance «Mosicas»

Le modèle «Mosicas» a été calé pour des repousses de la variété de canne R570 étudiée à La Réunion (Martiné, 1996, 1997, 1998 et 2003) et en Guadeloupe (Gay et Poulet, 1998) sur des sites climatiquement très contrastés. Ce modèle a été mis au point en conditions optimales d'alimentation minérale, en l'absence de maladies et de mauvaises herbes et dans deux situations hydriques différentes avec et sans déficit en eau.

«Mosicas» (figure 1) est organisé selon les trois principaux processus biologiques de fonctionnement de la plante: (i) l'interception du rayonnement utile par l'indice foliaire permettant de calculer le rayonnement utile intercepté, (ii) la conversion de ce dernier en biomasse et (iii) la partition de cette biomasse en ses différents compartiments (racines, feuilles, tiges et sucre). Les états du couvert végétal inclus dans le modèle intègrent en plus du lai, la biomasse totale et ses composantes: biomasse racinaire et biomasse aérienne (canne morte + canne vivante; tiges usinables, limbes, gaines et cannes en croissance).

1.2 Calage du modèle

Le principe consiste à caler les valeurs des paramètres génotypiques de la variété en utilisant les états du couvert comme variables à optimiser et en procédant dans l'ordre logique des trois processus internes au modèle. En premier seront calés les paramètres affectant l'interception et notamment ceux influençant l'apparition des feuilles, qui sert de base pour déterminer le temps thermique, puis l'indice foliaire. Ensuite seront calés les paramètres affectant la conversion du

rayonnement intercepté en matière sèche et enfin ceux affectant la partition de la matière sèche totale entre les organes et le rendement. La hauteur des tiges a été calée et ajoutée en tant que nouvelle variable au modèle.

Pour sa robustesse, la méthode d'optimisation statistique employée est celle du recuit-simulé basée sur le principe d'itération (Goffe et al., 1994) qui permet de minimiser la somme des distances entre valeurs observées et simulées. Contrairement aux méthodes du gradient et du simplex, les résultats d'optimisation par le «recuit simulé» fournissent les mêmes valeurs des paramètres calés (Nelder and Mead, 1965 et Martiné, 2003).

Les valeurs des paramètres génotypiques de la variété R570, sur laquelle le modèle a été initialement construit, ont servi de valeurs de base pour le re-paramétrage de «Moscicas» sur la variété CP70-321 dans les conditions du Maroc (Aabad, 2008).

- Utilisation de nouveaux formalismes de calage

Dans le modèle initial, calé à La Réunion, il a été utilisé, pour chaque processus où la température intervient, une formalisation classique basée sur les degrés jours et la température moyenne journalière. Ce mode de calcul est satisfaisant (figure 2A) lorsque les températures journalières minimum et maximum sont généralement comprises entre la température de base et la température optimale (Liu et al., 1998 et Inman-Bamber, 1995), ce qui est le cas sous climat tropical de La Réunion (Martiné et al., 1999). Par contre au Maroc, à climat méditerranéen semi-aride, l'amplitude thermique journalière est élevée et pour de longues périodes du cycle de la culture, les températures minimum journalières sont plus faibles que les températures seuils de croissance ou de développement de la canne (figure 2B), en particulier les températures de base d'apparition des limbes bltb, de croissance du lai (laitb) et de l'élongation des tiges (htvdtb).

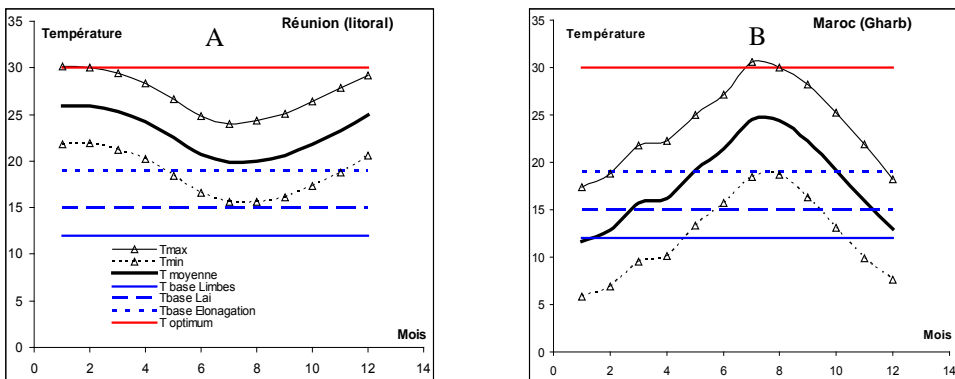


Figure 2. Comparaison entre l'évolution annuelle des différentes températures (1994-2004) dans les conditions de La Réunion, graphique A et au Maroc, graphique B.

Dans le but d'améliorer le calibrage du modèle vis-à-vis du facteur thermique en intégrant les effets secondaires des températures extrêmes, les effets des températures moyennes horaires ont été formalisés et introduits dans les principaux modules de croissance. Aussi, lors du calage de chaque processus de croissance de la plante deux ou trois algorithmes à caractère thermique, cités dans la littérature (Liu D. L. et al., 2001; Keating et al., 1999; Martiné, 2003 et O'Leary G.J., 2000), ont été testés et celui aboutissant au meilleur résultat a été conservé dans la version finale de «Moscicas_Ma». Les températures horaires sont automatiquement calculées à l'aide du modèle à partir des températures minimum et maximum journalières.

1.3 Validation du modèle

Après calage des paramètres, la validation du modèle consiste à comparer pour la même variété les valeurs des variables d'état du couvert simulées et observées sur des jeux de données indépendants de ceux ayant servi au calage du modèle, (Liu, 2001; Keating and al., 1999; Martiné, 1996 et Inman-Bamber, 1995).

Nous avons utilisé comme variables d'état le rendement en tiges usinables (rdcan, t.ha⁻¹) de la même variété CP70-321, ainsi que l'élongation des tiges (htvd, cm), qui est aussi un bon indicateur de croissance et de stress hydrique. Comparé à l'estimation du rendement, le suivi de l'élongation des tiges a l'avantage d'être non destructif, rapide et moins coûteux et donc confère plus de facilité et de flexibilité à la validation.

Les données utilisées ont été collectées au cours de deux cycles de repousse de canne (R1: 2005/06 et R2: 2006/07) sur les essais 2 et 3, dont les protocoles sont explicités ci-après. Ces essais ont été conduits dans des conditions (années climatiques, types de sol, régimes hydriques, systèmes d'irrigation et durées de cycle) différentes de celles des essais utilisés pour le calage.

1.4 Expérimentations

Le calage et la validation du modèle «Mosicas» ont été réalisés à partir d'une base de données (entrée du modèle) composée des enregistrements climatiques et des observations récentes de la plante et du sol. Ces données ont été collectées à partir de deux stations météorologiques aux voisines des sites d'expérimentations et dans trois types d'essais «in situ» installés et conduits sans contraintes majeures entre 2003 et 2007 dans la région du Gharb (Aabad 2008) selon les normes de l'itinéraire technique recommandé par le CTCS (CTCS, 1990 et 2000).

Pour le calage, les résultats de l'essai 1 sur la variété CP70-321 (semi-précoce, représentant plus de 50% de la superficie sous canne au Gharb, ORMVAG, 2003) ont été utilisés. Cet essai en troisième repousse de la culture, porte sur la position du cycle avec deux dates de coupe (mars et juillet) et deux régimes hydriques (60 et 100%ETM) appliqués par aspersion.

Pour la validation, les résultats de deux autres essais, collectés pendant deux repousses de canne (R1, 2005/2006 et R2, 2006/2007) ont été utilisés. L'essai 2 traite de la valorisation de l'eau d'irrigation par la même variété CP70-321 et comporte cinq régimes hydriques (allant de 17 à 100%ETM), alors que l'essai 3 porte sur la tolérance de dix variétés, dont CP70-321, au stress hydrique. Ces essais ont été irrigués par le système localisé (goutte à goutte), le contrôle des doses apportées étant assuré par des compteurs installés en tête des parcelles élémentaires.

- Calcul des besoins en eau

Les besoins en eau d'irrigation (BEI, mm) nécessaires pour compenser le déficit hydrique (DH mm) des trois essais ont été calculés en utilisant le bilan climatique (Aabad, 2008) où $BEI (mm) = DH (mm) = ETM - Pe$ (pluies efficaces). Ce bilan est basé principalement sur l'évaporation du bac classe A (Ebac), installé "in situ" au niveau du CTCS.

- Observations et mesures

- Plante

Au courant de chaque cycle de récolte des essais, sur 30 tiges choisies au hasard par unité expérimentale, le suivi des hauteurs (htvd, cm) et l'émission des limbes (feuilles/tige) ont été effectués à partir de la base de la tige jusqu'à la dernière articulation visible "TVD" (Terminal Visible Dewlap, Védié, 1993). L'estimation des rendements en tiges usinables (rdcan, t.ha⁻¹) et l'analyse de la qualité technologique ont été réalisés sur des placettes de 3 mètres linéaires par unité expérimentale comme recommandé par Gay et al. (1997). Vu sa fiabilité pour estimer le lai (m.m⁻¹), la technique directe basée sur la biomasse (Martiné, 1995 et Aabad, 2008) a été utilisée.

- Sol

L'humidité du sol a été suivie par la méthode gravimétrique tous les 25 à 30 jours sur une profondeur de 1.20 m. Les caractéristiques hydriques des sites d'essais (Hcc, Hsat), ainsi que la densité apparente ont été déterminées «in situ» pour chaque type de sol. L'Hpf, difficile à mesurer sur place, a été issue de l'équation établie pour le Gharb: $Hpf_{4.2} = -0.83 + 0.77(\%argile) - 0.0054 (\%argile)^2$ avec $R^2=94$ (Merzouk A. et al., 1987). La variation du stock en eau utile est ainsi calculée par horizon du sol.

2. Résultats et discussions

2.1 Calage du modèle

En vue d'améliorer la valeur prédictive du modèle, ce dernier a été calé en utilisant différents algorithmes. Ne sont présentés ici que les meilleurs résultats du calage (tableau 1) et des formalismes ayant abouti aux simulations des variables d'état les plus pertinentes, en particulier émission des limbes (nbltot), lai, hauteur de tiges (htvd) et rendement en cannes usinables (rdcan).

Les résultats statistiques (tableau 1) de l'ensemble des variables d'état calées et testées (pente=1 et ordonnée à l'origine=0, avec p value>0.05) sont hautement significatifs avec des coefficients de détermination très proches de 1 ($R^2 > 0,92$).

Tableau 1. Résultats statistiques du calage du modèle «Moscas»

Critères statistiques	nombre obs.	rmse	moyenne	R ²	origine	orig. min	orig. max	pente	pente min	pente max	seuil p=0.05	
Variables d'états optimisées	nbltot	36	1.2	18.4	0.98	0.73	-0.35	1.81	0.98	0.92	1.03	HS
	lai	36	0.5	3.4	0.92	0.29	-0.08	0.65	0.91	0.81	1.00	HS
	htvd	36	8.0	102.5	0.98	0.96	-5.07	6.99	0.99	0.94	1.05	HS
	rdcan	32	7.9	47.5	0.96	0.09	-5.34	5.52	0.99	0.98	1.10	HS

Il faut préciser d'abord que le calage du modèle «Moscas_Ma» a été effectué sur la base de paramètres déterminés à partir d'observations propres pour la variété CP70-321 au Maroc (tableau 2). Ainsi, les valeurs de ces paramètres, calés et validés pour la même variété, ont été intégrées dans la nouvelle version du modèle «Moscas_Ma».

Deux autres paramètres d'estimation du rendement ard et brd, non utilisés dans l'ancienne version du modèle (Martiné 2003), ont été également calés et validés puis ajoutés au modèle, ce qui a permis une amélioration significative de la prédiction du rendement en cannes usinables avec un coefficient de détermination très élevé $R^2=0,96$ (figure 3 C).

Tableau 2. Valeurs des paramètres calés pour les variétés CP70-321 Maroc et R570 Ile de La Réunion

Nom paramètres	début apparition feuilles	taux d'apparition feuilles (phylocrone)	température de base d'apparition des feuilles	température de base d'élongation	température maximale d'élongation	température optimale d'élongation	taux de croissance du lai	température base d'augmentation lai	début d'allocation nsa à la ms tiges	efficacité max conversion du Ru intercepté en biomasse	Paramètre sensibilité au stress hydrique d'accumulation biomasse	Paramètre sensibilité au stress hyd. de croissance	Paramètre 1 calcul du rendement	Paramètre 2 calcul du rendement
Code	bldeb	blk	bltb	htvdtb	htvdtm	htvdtol	laicroi	laibt	ptigdeb	ruemax	sthydbio	sthydcroi	ard	brd
Valeurs CP70-321	12	0.01	12	21.5	45	34.4	0.007	20.5	240	6.0	0.60	0.58	0.58	0.66
Valeurs R570 (Martiné, 2003)	100	0.01	12	20.0	45	33.0	0.035	12.6	500	3.2	0.43	0.61	Non calé	Non calé
Unités	°C.jour	feuille.(°C.jour) ⁻¹	°C	°C	°C	°C	(°C.jour) ⁻¹	°C	g.m ⁻²	g.MJ ⁻²	0-1	0-1	Sans	sans

- Améliorations apportées au modèle

Vu les amplitudes thermiques plus fortes en climat méditerranéen semi-aride du Gharb (Maroc) que dans les conditions du climat tropical de La Réunion (figure 1), plusieurs algorithmes de calcul de l'effet thermique ont été comparés (Aabad, 2008) en utilisant les températures horaires modélisées au lieu des températures moyennes journalières observées. Les critères statistiques (tableau 1) notamment l'écart-type résiduel «rmse» et le coefficient de détermination «R²», indiquent une meilleure qualité du calage utilisant des températures horaires.

La comparaison entre les résultats obtenus avant et après calage (figures 3) révèle une nette amélioration de la valeur prédictive du modèle adapté «Mosaic-Ma» pour simuler de manière très satisfaisante les différentes variables d'état du couvert végétal.

En effet, dans les conditions de l'essai 1 utilisé pour le calage, avec contrastes hydriques et de cycles de récolte, les droites de régression (figures 3) montrent également des relations très étroites entre les valeurs simulées et observées des variables d'état suivantes: émission des limbes ($nbltotobs = 0.98 \times nbltot\text{sim} + 0.73$; $R^2=0.98$), élongation des tiges ($htvdo\text{bs} = 0.99 \times htvdsim - 0.09$; $R^2=0.98$) et élaboration du rendement ($rdcanobs = 0.99 \times rdcansim - 0.09$; $R^2=0.96$).

Néanmoins, pour l'élaboration du lai, il subsiste une certaine disparité de simulation (figure 3). L'écart entre l'observé et le simulé est d'autant plus manifeste sous stress hydrique (60% ETM) par une surestimation du lai au-delà de 250 jours après la coupe précédente (lai d'environ 4,5). Ceci a peu d'effet sur la production de biomasse, l'interception du rayonnement étant quasi-complète pour des indices foliaires supérieurs à 4 (Martiné 2003). En effet, l'efficacité d'interception et la demande climatique pour la plante sont sensibles à des surfaces de feuilles inférieures à 4 m²m⁻² et peu sensibles au-delà (Vidié, 1993 et Martiné, 1996). Dans tous les cas, l'analyse des paramètres de la droite de régression, déterminés lors du calage, montre que la pente et l'ordonnée à l'origine ne sont pas respectivement significativement différentes de 1 et de 0 comme l'indique l'équation suivante: $laiobs = 0.91 \times laisim + 0.29$ (tableau 1, colonne lai). De plus, le coefficient de détermination est hautement significatif; $R^2=0.92$ avec un écart type résiduel faible $rmse=0.54$. Les valeurs de ces critères statistiques paraissent assez comparables à celles obtenues par le calage du lai à La Réunion: $R^2=0.89$ et $rmse=0.76$ (Martiné, 2003) et encore meilleures que celles du test de «Mosaic» réalisé par Soumayet (2000): $rmse=0.81$ et $R^2=0.86$ et les résultats rapportés dans la littérature (modèle APSIM: Keating et al., 1995 et 1999, Cheeroo-Nayamuth et al., 2000 et modèle QCANE: Keating et al., 1995, et Liu et Bull, 2001).

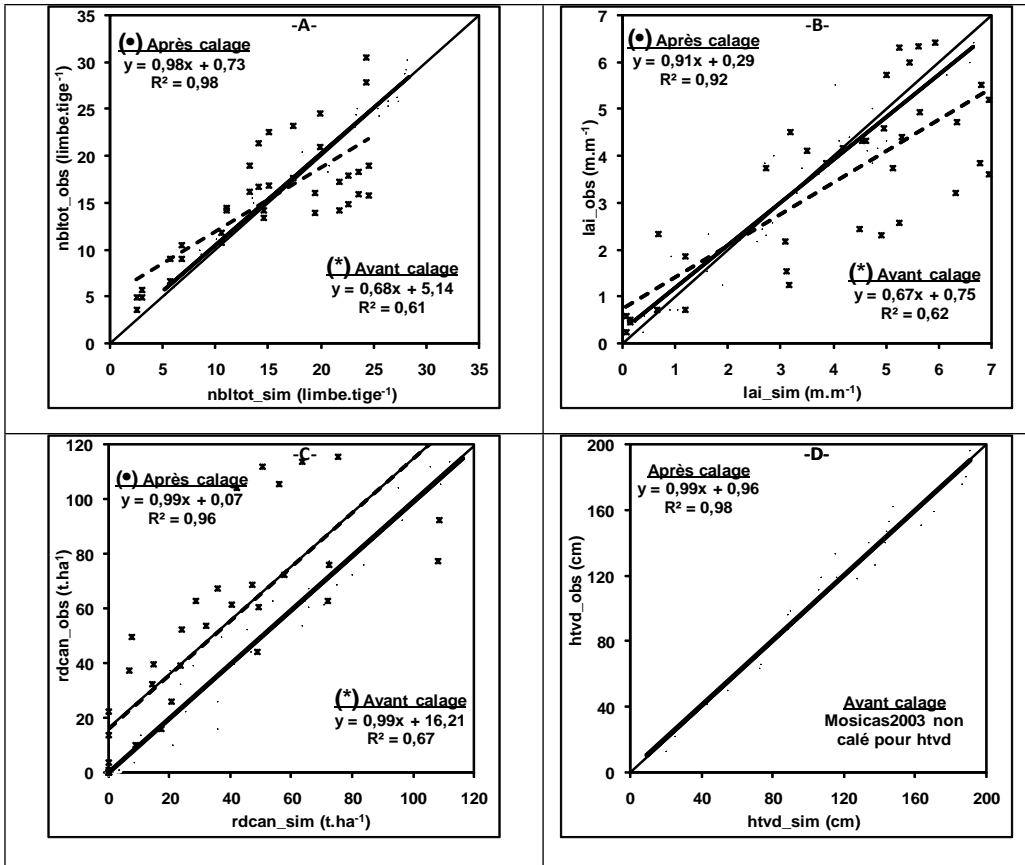


Figure 3. Droite de régression entre valeurs observées (Y) et simulées (X) avant (- - -) et après (—) calage des variables d'état du couvert: émission des limbes (nbltot), lai, hauteur tiges (htvd) et rendement canne (rdcan)

Le modèle est donc fiable et efficace pour simuler l'ensemble des variables d'état du couvert, en particulier le rendement en cannes usinables, la hauteur des tiges, l'émission des limbes ainsi que le lai.

2.2 Validation du modèle

- Etat du couvert végétal

L'analyse des paramètres des droites de régression linéaire (tableau 3), déterminés lors des deux validations du modèle pour les variables rendement en canne (rdcan) et la hauteur des tiges (htvd), montre que la pente et l'ordonnée à l'origine ne sont pas significativement différentes de 1 et de 0 respectivement. Aussi, les valeurs des critères statistiques R² et rmse sont très comparables aux résultats du calage et donc intéressants.

Tableau 3. Critères statistiques déterminés lors de la validation du modèle sur le rendement (rdcan) et la hauteur des tiges (htvd) effectuée en 1^{ère} et 2^{ème} repousse des cannes (R1 et R2)

variables	n	rmse	R ²	orig	orig.min	orig.max	pente	pente.min	pente.max
rdcan R1	23	7,67	0,93	9,65	-2,19	21,48	0,88	0,76	0,99
rdcan R2	38	8,35	0,92	10,98	0,01	7,82	0,87	0,00	0,09
htvd R1	50	17,10	0,95	-8,20	-18,51	2,12	1,03	0,96	1,11
htvd R2	38	10,09	0,93	1,26	0,87	15,40	0,99	0,00	0,10

n: nombre d'observations, *rmse*: écart-type moyen résiduel, *R²*: carré du coeff. corrélation

Ces résultats confirment bien ceux obtenus par le calage du modèle. Ils sont aussi améliorés par rapport aux résultats de la validation de «Mosicas» (Martiné, 2003) effectuée pour le rendement dans l'Île de La Réunion ($R^2=0.81$ et $rmse=12.7$) et meilleurs que ceux rencontrés dans la littérature (Aabad, 2008).

Néanmoins, il a été constaté en fin du cycle de la R2 une légère surestimation des rendements et des hauteurs des tiges relatifs aux traitements les plus stressés (50, 33 et 17%ETM). Cette constatation pourrait être liée à une surestimation des paramètres climatiques, notamment R_g et ET_0 , due au déplacement (six mois avant la fin de l'achèvement de R2) de la station météorologique automatique de son emplacement au niveau du Gharb.

Ceci a eu des répercussions sur la qualité des résultats de la validation effectuée en R2 comparativement à aux résultats de R1 (tableau 3).

Pour l'ensemble des traitements utilisés en R1 et R2, la régression linéaire (figures A et B) montre une liaison très étroite entre les rendements observés et simulés, avec des coefficients de détermination qui sont très élevés (0.93 et 0.92). Cette relation est encore meilleure pour l'estimation de la hauteur des tiges en R1 ($R^2=0.95$) et en R2 ($R^2=0.93$).

En somme, les résultats fort intéressants de la validation du modèle ajoutés à ceux du calage permettent de confirmer de manière très satisfaisante l'efficacité du modèle pour décrire l'état du couvert de la canne à sucre, notamment le rendement en cannes usinables et la hauteur des tiges.

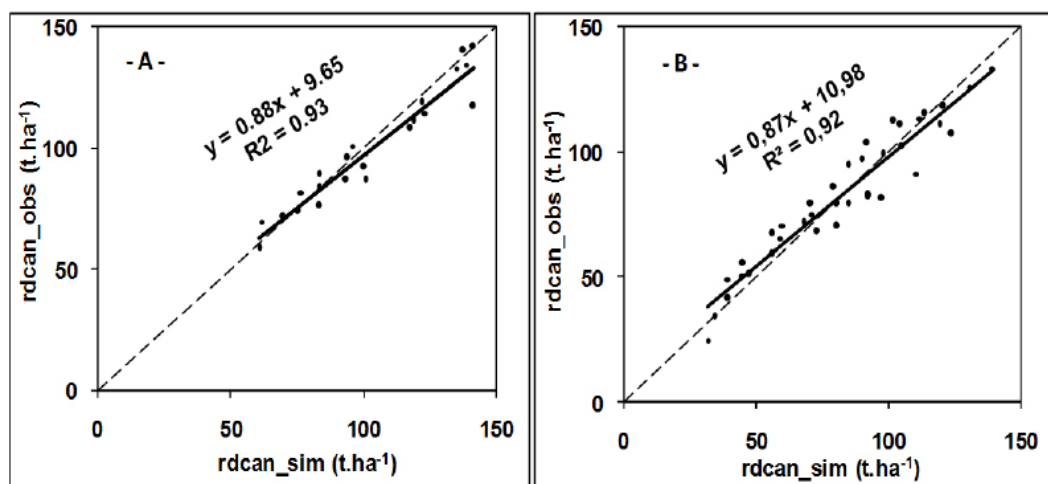


Figure 4. Valeurs observées et simulées du rendement canne (rdcan) en première repousse (A) et en deuxième repousse (B) dans les essais 2 et 3 (valorisation eau et stress hydriques x variétés)

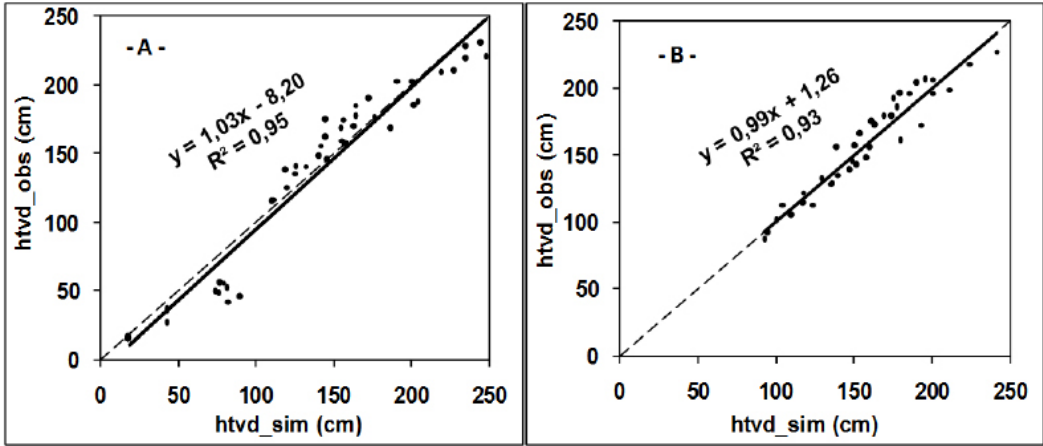


Figure 5. Valeurs observées et simulées de la hauteur des tiges (htvd) en première repousse (A) et en deuxième repousse (B) dans les essais 2 et 3 (valorisation eau et stress hydriques x variétés)

- Estimation du stock en eau du sol

Dans le but de déterminer les gains potentiels de production dus à l'irrigation, le modèle «Moscas», intégrant le module du bilan hydrique «CERES», a été testé et utilisé à plusieurs reprises, en pluvial comme en irrigué, dans des conditions pédoclimatiques diverses de La Réunion et de la Guadeloupe. Les résultats obtenus ont été très concluants (Langellier, 2005; Mariné, 2003; Todoroff et al. 2002 et Remand, 2002).

Les conditions du Maroc étant tout à fait différentes de celles de la Guadeloupe et de l'Île de La Réunion, un test de vérification et de validation du module d'estimation du stock en eau du sol a été effectué dans l'essai 2 (valorisation de l'eau d'irrigation par la canne à sucre).

Les observations effectuées durant les deux campagnes 2005/06 et 2006/07 ont révélé que le modèle restitue correctement l'état hydrique du sol selon les variations du climat de la région et des régimes d'irrigation. Les effets des restrictions en eau appliquées ainsi que l'influence des saisons sèches (situées vers le début du cycle) et humides (vers la fin du cycle) sur le niveau du stock en eau du sol ont été parfaitement estimés par le modèle (figures 6 A et B).

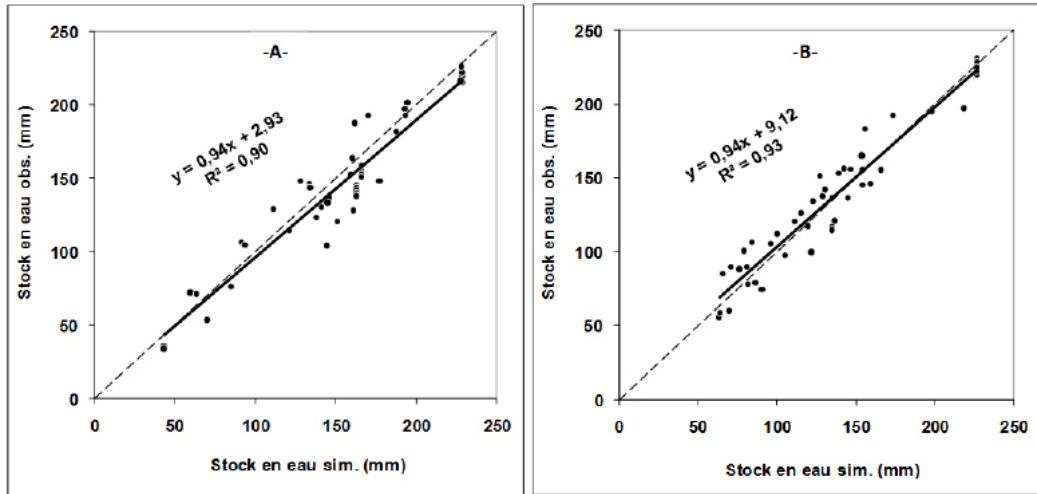


Figure 6. Valeurs du stock en eau du sol simulées et observées pour les deux campagnes 2005/06 (A) et 2006/07 (B) dans l'essai 2 (valorisation d'eau d'irrigation par la canne)

Le modèle est donc apte à décrire correctement les états de croissance du couvert végétal et les états de satisfaction hydrique; dans différentes conditions culturales, notamment d'alimentation hydrique. Il peut donc être utilisé pour simuler les effets de scénarios contrastés d'irrigation de la culture de canne à sucre dans les conditions du Gharb.

CONCLUSION

L'adaptation du modèle «Moscas» aux conditions du Gharb Maroc a été effectuée par le biais du calage et de la validation sur base de données d'expérimentations «in situ». L'ensemble des paramètres génotypiques ont été calés pour la variété CP70-321. La comparaison entre valeurs observées et simulées montre des coïncidences hautement significatives au seuil 5%. La qualité des critères statistiques déterminés lors du calage et de la validation, notamment l'écart-type résiduel «rmse» et le coefficient de détermination «R²» confirment les améliorations apportées au modèle par la nouvelle version «Moscas_Ma». C'est ainsi que pour une meilleure adaptation, les températures horaires ont été formalisées et intégrées dans le modèle en remplacement des températures moyennes journalières.

De plus, la hauteur des tiges, calée et validée dans les conditions du Gharb, a été ajoutée à l'ancienne version de «Moscas» 2003. Ceci confère plus de flexibilité et de facilités pour des adaptations ultérieures du modèle et pour des applications telles que la simulation de scénarios.

Le modèle permet aussi de simuler de manière très satisfaisante les stocks en eau du sol.

A l'issue de ce travail, le modèle est assez robuste. En effet, après avoir été calé en mode d'irrigation par aspersion, lors de la validation le modèle prédit de façon très satisfaisante les rendements dans des conditions très différentes du calage: irrigation localisée en goutte à goutte, dans des conditions hydriques encore plus contrastées, des types de sols, des années climatiques et des cycles de récoltes différents. Son usage ne pourrait cependant être étendu au mode gravitaire sans effectuer au moins un test d'évaluation du modèle dans ces conditions.

Le domaine de validité est ainsi défini et le modèle pourrait être utilisé en tant qu'outil pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation par la canne à sucre au Gharb, Maroc.

Références bibliographiques

- Aabad M., 2008. Stratégies d'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation par la canne à sucre au Gharb-Maroc, approches par expérimentations «*in situ*» et par adaptation et utilisation du modèle «MOSICAS». Thèse de doctorat de la Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux Belgique, 176p.
- Bull T. A., Tovey D. A., 1974. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 15p.
- Cheeroo-Nayamuth F.C., Robertson M.J., Wegener M.K., Nayamuth A.R.H., 2000. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. Field Crops Research 66.
- CTCS, 1990. Les journées scientifiques du Centre Technique des Cultures Sucrières, Kénitra Maroc.
- CTCS, 2000. Rapports des expérimentations du CTCS: convention sur le développement de la canne à sucre dans le Gharb 1995-2000.
- Gabrielle B., Menasseri S., Houot S., 1995. Analysis and field evaluation of the CERES models' water balance component. Soil Science Society of America Journal 59.
- Gay J.P., Chabalière P.F., Walter G. et Poulet J.L., 1997. Hétérogénéité, échantillonnage et estimation du poids de canne dans une parcelle. Communications du Congrès International de l'ARTAS-AFCAS 4, 335-352.
- Goffe, Ferrier, Rogers, 1994. Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing. Journal of Econometrics 60.
- Inman-Bamber N.G., 1995. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. Field Crops Research 36.
- Jones C.A., Kiniry J.R., 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, 194p.
- Keating B.A., Robertson M.J., Muchow R.C., Huth N.I., 1999. Modelling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. Field Crops Research 61.
- Langellier P., 2005. Identification des besoins en eau d'irrigation et des potentiels de production de la canne à sucre des terres à vocation agricole pour la zone de Saint Marie/Saint Suzanne, Réunion. UPR Systèmes cannières-Cirad-ca-Ta 71/09- Avenue Agropolis – 34398 Montpellier.
- Liu D.L. and Bull T.A., 2001. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. Ecological Modelling 144.
- Liu D.L., Kingston G. and Bull T.A., 1998. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. Agriculture and Forest Meteorology 90, 119-139.
- Martiné J.-F., 1999. Croissance de la canne à sucre et stress hydrique: les apports d'un modèle. Agriculture et développement 24, 21-28.
- Martiné J-F., 1995. Modélisation de la croissance de la canne à sucre, méthodes de mesure. Rapport de synthèse CIRAD-Réunion.
- Martiné J-F., 1997 et 1998. Opérations modélisation de la croissance de la canne à sucre. Rapports annuels filière canne à sucre, Cirad-Réunion.
- Martiné J-F., 1997. Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion– Utilisation du modèle de croissance Mosicas. Actes du congrès ARTAS/AFCAS. Saint Denis de la Réunion.
- Martiné J-F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Application du modèle. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, 131p.

- Merzouk A., Badraoui M. et Benyelloul, 1987. Estimations des caractéristiques hydriques de quelques sols marocains I. HCC et HpF 4,2. Actes Inst. Agron. Vet. 1 & 2 (7), 101-111.
- Muchow R.C. et Keating B. A., 1998. Assessing irrigation requirements in the Ord Sugar Industry using a simulation modelling approach. Australian Journal of experimental Agriculture 38.
- Nelder J.A., Mead R., 1965. A simplex method for function minimization. Computer Journal 7.
- O'Leary G.J., 2000. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. Field Crops Research 68.
- ORMVAG, 2003. Rapports annuels de la canne à sucre, 1999-2003. Kénitra, Maroc.
- Remond J. M., 2002. Validation d'un modèle de croissance de canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation. Mémoire DEA de l'Université des Antilles et de la Guyane, 43p.
- Ritchie J.T., 1981. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. Plant Soil 58.
- Todoroff, P., Remond, J.M. et MartinéJ.F., 2002. Application d'un modèle de croissance de la canne à sucre sur une exploitation sucrière: validation du modèle et optimisation d'un calendrier d'irrigation. Cirad-Agritrop: CD_BR12230, 15p.
- Védié H., 1993. Etude de l'élaboration de l'indice foliaire de la canne à sucre. Mémoire de DAA de l'ENSAM, Montpellier, 38p.