

DYNAMIQUE FOLIAIRE ET CROISSANCE DU MAÏS : APPLICATION DU MODELE «STICS» EN CONDITIONS TROPICALES EN RD-CONGO

M. M. LUFULUABO¹, R. V. KIZUNGU^{1,2} et K. K. NKONGOLO³

¹Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Kinshasa, B. P. 117, Kinshasa 11, RD-Congo.
E mail : knkongolo@laurentian.ca

²Institut National pour la Recherche et l'Etude Agronomiques (INERA), B. P. 2037, Kinshasa 1, RD-Congo ;

³Département des Sciences Biologiques, Université Laurentienne, Sudbury, Ontario, Canada, P3E 2C6

RESUME

Plusieurs modèles de simulation de la croissance foliaire ont été développés, surtout sous climat tempéré. Pour utiliser ces modèles en milieu tropical, une étude, conduite en RD Congo, se propose 1) de caractériser le couvert de 3 variétés de maïs adaptées en conditions locales et 2) d'ajuster le modèle de simulation de l'évolution de l'indice foliaire en fonction du temps thermique. Les observations ont servi à adapter le modèle de croissance de Baret dans le modèle Stics, par estimation des paramètres. La fréquence d'apparition des feuilles de maïs obtenue est une fonction non linéaire et le nombre total de feuilles a été de 14. Il a fallu 1761,5 °C j pour que la variété Mus atteigne la maturité et 1979,5 °C j pour Salongo 2 et la variété locale. Le module de croissance de modèle de culture Stics est applicable en régions tropicales, à condition d'ajuster certains paramètres. Les résultats de simulation ont permis de comparer les variétés investiguées, et d'en déterminer les stades phénologiques. Les variétés génétiquement améliorées ont présenté une courbe de croissance plus élevée que la locale. Les variétés ayant un indice foliaire (LAI) plus grand ont eu également un rendement en biomasse sèche et en grain plus élevé.

Mots clés : Simulation, indice foliaire, modèle Stics, maïs, RD-Congo.

ABSTRACT

CORN LEAF DEVELOPMENT AND PLANT GROWTH : ADAPTATION OF THE «STICS» SIMULATION MODEL TO TROPICAL CONDITIONS IN DR-CONGO

Several simulation models for leaf development and plant growth have been developed for temperate climate conditions. The main objectives of the present study are 1) to characterize the canopy of 3 corn varieties adapted to local tropical conditions in DR - Congo ; 2) to develop a simulation model for leaf area index as a function of thermal time. Data, obtained from field experiments on corn, were used to calibrate Baret plant growth model (in Stics simulation Model). Leaf appearance was a non-linear function of thermal time and the average total leaf number per plant for the 3 varieties was 14. Mus variety required 1761.5 °C days (growing degree day) to complete its developmental cycle. This value was 1979.5 °C days for the local and the Salongo 2 varieties. The initial simulation model has been modified and adapted to the studied conditions. Overall, the collected data were useful for a reliable analysis of the phenology of the three varieties. Genetically improved varieties showed growing patterns with higher coordinate values than local varieties. Moreover, larger leaf area indices (LAI) were associated with higher dry biomass weights and grain yields.

Key words : Simulation, leaf Area Index, STICS model, Corn, DR-Congo.

INTRODUCTION

L'indice foliaire (IF ou LAI, abréviation du terme anglophone : *Leaf Area Index*), défini comme la surface de feuilles vertes par unité de surface de sol, est parmi les diverses grandeurs représentatives de l'état d'une culture. C'est un indicateur pertinent du potentiel de croissance ou de l'état nutritionnel ou sanitaire de la culture (Denoroy *et al.*, 2000). Plusieurs travaux ont montré la corrélation entre la surface foliaire et le rendement des cultures (Ledent *et al.*, 1995 ; Sridhara and Prasad 2002 ; Beed *et al.*, 2007). En effet, la superficie foliaire verte est celle qui fixe la lumière et le CO₂ atmosphérique, utile à la photosynthèse.

L'indice est un paramètre important de sélection et d'amélioration des plantes (Ledent *et al.*, 1990 ; Affholder 2001 ; Festo *et al.*, 2003). Dans l'amélioration des variétés tropicales de maïs, l'on a constaté que les génotypes qui améliorent le rendement en grains tendent à maintenir, ou à augmenter excessivement la croissance végétative (Nyenguila et Paulson, 1983).

La dynamique du développement foliaire se fonde sur des relations mathématiques qui prennent en compte les caractéristiques génotypiques, l'importance de chaque feuille, le nombre et la température, pour différents scénarios environnementaux (Lafarge *et al.*, 2002). Le développement du maïs a été subdivisé en stades phénologiques, en rapport avec l'apparition et la durée d'activité des feuilles, pour les stades de croissance végétative et les stades reproducteurs (Stewart *et al.*, 1998 ; Fournier 2000 ; Laffite 2002).

Les modèles simulant la croissance foliaire, en fonction du temps thermique, sont nombreux : il y a, d'une part, les courbes sigmoïdales (Ameziane *et al.*, 1994 ; Cao *et al.*, 1998 ; Brisson *et al.*, 2002) et, d'autre part, les modèles en cloche (Dwyer et Steawart 1986 ; Colomb *et al.*, 2000 ; Elings 2000 ; Koertz *et al.*, 2005). En relation avec des modèles en cloche d'estimation de la surface foliaire du maïs, Elings (2000) rapporte que les coefficients d'estimation des courbes de croissance, pour les modèles en cloche, en réponse à la température, ont été déterminés sur la base des données provenant des essais menés en conditions favorables de cultures intensives mécanisées (avec application d'engrais, herbicides et insecticides) et non pour les cultivars, ni pour les conditions tropicales et subtropicales. Il est donc important d'estimer les paramètres du modèle pour des nouvelles

conditions, notamment des régions tropicales et subtropicales.

L'étude vise à contribuer à la caractérisation du couvert de 3 variétés de maïs adaptées aux conditions de Gandajika, dans le Kasai-Oriental en RD Congo et à adapter le modèle de simulation de l'évolution de l'indice foliaire en fonction du temps thermique (modèle de Baret repris dans le module de croissance du modèle de culture «Stics»).

MATERIEL ET METHODES

MATERIEL VEGETAL

Les travaux ont porté sur le maïs (*Zea mays*) dont 3 variétés sont étudiées. Parmi ces variétés, 2 sont génétiquement améliorées, Salongo 2 (110 à 120 j) et MUS (110 à 120 j) et une est locale (120 j).

La variété Salongo 2 est un mélange de 10 meilleures familles de Tuxtpeno cycle 11 sélectionnée au CIMMYT (Centre international d'amélioration du maïs et du blé) au Mexique. Cette variété a été introduite en RD Congo en 1976. La variété Mus a été développée par l'Institut National pour l'étude et la recherche agronomique de la RD Congo à partir d'un croisement entre la variété Z 206 et une variété locale jaune venant des meilleures S3. Elle a été vulgarisée en RD Congo en 1996. La variété locale composite utilisée est issue d'un mélange à partir des meilleures variétés locales cultivées à Gandajika.

METHODES

Site expérimental, dispositif et conduite de l'essai

L'expérimentation en champ a été réalisée dans le territoire de Gandajika (6° 45'S, 23° 57'E et à 792 m d'altitude), dans la province du Kasai oriental, en République Démocratique du Congo. Les trois variétés de maïs ont été semées selon un dispositif en blocs complets randomisés (BCR), à trois répétitions, avec un seul facteur qui est la variété de maïs, à 3 modalités (Salongo 2, Mus et Locale). Chaque bloc a eu pour dimensions 10 m x 5 m. Le semis a été fait manuellement aux écartements de 1 m x 1 m. Il n'y a pas eu d'apport de fumure et le contrôle des adventices a été fait manuellement ; le terrain a été labouré mécaniquement.

Mesures des paramètres

Le stade de levé a été noté lorsque 50 % des plantes avaient leurs coléoptiles visibles. Une vingtaine de plantes par répétition ont été choisies pour le suivi des dimensions des feuilles et de la hauteur totale des plants. Les mesures ont été effectuées tous les 14 j au matin, depuis la levée jusqu'à la maturation complète des grains.

Les paramètres phénologiques du maïs ont été basés sur l'apparition des feuilles visibles, qui ont été notées de la base vers le sommet. Une feuille est notée visible lorsque son extrémité apicale pointe hors du cornet. Les feuilles peuvent être numérotées de bas vers le haut, ou du haut vers le bas (Mollier 1999). Les mesures ont concerné la longueur visible (Lv) et la largeur maximale (Wm). La hauteur maximale du plant a été mesurée de la base à la dernière ligule, qui portera la panicule à la floraison. La surface foliaire d'une feuille individuelle (LA) a été calculée à l'aide de la formule de Montgomery (Bennouna *et al.*, 2005 ; Mollier 1999 ; Elings 2000) :

$$LA = Lv \times Wm \times K \quad (\text{Equation 1})$$

avec, K= 0,75 pour les feuilles ligulées, et 0,5 pour les feuilles non ligulées. Lv est la longueur visible et Wm la largeur maximum. La surface foliaire totale (LAt) a été estimée par sommation des surfaces des feuilles individuelles. Le couvert de chaque plant a été simulé à une feuille unique, dont la longueur et la largeur équivalent à la somme des longueurs et des largeurs des feuilles individuelles. L'indice de surface foliaire (LAI) a été calculé en multipliant LAt par le nombre de plants par m². La surface foliaire du maïs peut être mesurée suivant deux méthodes : la méthode manuelle, soit à l'aide d'un planimètre optique. C'est la méthode manuelle qui a été adoptée pour minimiser les coûts. La différence de mesures effectuées par les deux méthodes est significative (Francis *et al.*, 1969 ; Koetz *et al.*, 2005).

Calcul du temps thermique

En l'absence de stress hydrique, le développement foliaire est une simple fonction de la

température. L'échelle de temps physiologique est basée sur la notion de somme de degrés-jour. Le temps thermique a été calculé suivant la formule proposée par Bennouna *et al.* (2005) :

$$T = (T_{\max} + T_{\min})/2 - T_b \quad (\text{Equation 2})$$

Où, T_{max} et T_{min} sont, respectivement, la température maximale et minimale journalière de l'air, et T_b la température de base de la culture, en deçà de laquelle il n'y a pas croissance. Sa valeur pour le maïs est de 10 °C (Bennouna *et al.*, 2005) ; tandis que pour le modèle CERES cette valeur est de 8 °C. Le fichier des données climatiques a été fourni par la station météo de l'INERA/Gandajika (pour la période de culture : Janvier 2007 à Février 2008), située à environ 20 km du site.

Modèle de croissance et méthode d'analyse

La dynamique de croissance foliaire du maïs a été étudiée suivant le modèle semi-mécaniste de Baret (Koertz *et al.* 2005), dont l'équation est la suivante :

$$LAI = K * \left[\frac{1}{1 + e^{-b * (T - T_i)}} - e^{-a * (T - T_f)} \right] \quad (\text{Equation 3})$$

L'évolution de l'indice foliaire est décrite en deux parties, la croissance et la sénescence. La période de croissance est définie à l'aide de l'équation logistique, avec un paramètre b qui exprime le taux de croissance par rapport à T_i, qui est le cumul de temps thermique au point d'inflexion. La sénescence est déterminée au moyen d'une équation exponentielle, avec un paramètre a exprimant le rapport du taux de croissance et T_f, le temps thermique exprimé en cumul des températures, où toutes les feuilles sont sénescentes. Le paramètre k décrit l'amplitude maximale de l'indice de surface foliaire. La variable indépendante T représente l'accumulation des moyennes journalières de la température de l'air au dessus de 10 °C (8 °C pour Modèle de Baret), à partir du semis. Dans le module de croissance du modèle Stics,

pour le maïs les valeurs proposées sont les suivantes : $K = 4,27$ (valeur mesurée au planimètre) ; $b = 0,012$; $a = 0,0074$; $T_i = 647$ et $T_f = 1657$ (Ripoche 2002). Le modèle a à l'entrée le temps thermique et fournit à la sortie l'indice foliaire au temps t .

ADAPTATION DU MODELE DE CROISSANCE AUX CONDITIONS LOCALES DE GANDAJIKA

Les modèles de croissance peuvent être adaptés aux nouvelles conditions. Ceci constitue le calage qui consiste à estimer les paramètres les plus réalistes d'un modèle, en vue de son adaptation à de nouvelles conditions. Pour évaluer objectivement le degré d'adaptation des modèles de croissance aux conditions locales de Gandajika, les résultats obtenus lors des différentes simulations, au moyen des méthodes statistiques appropriées, ont été analysés. Pour ce faire, des traitements statistiques à l'aide du logiciel R et Excel ont été effectués sur la base des procédures de régression linéaire, suivant le modèle ci-après :

Valeur simulée = $b \times x$ (valeurs mesurées) + a

Où, b représente la pente de la droite de régression et a l'intercept.

Le modèle de croissance semi-mécaniste (Equation 1) a été utilisé pour la simulation de l'expansion foliaire. Son adaptation aux conditions locales a nécessité un ajustement non linéaire, par rapport aux valeurs observées.

L'ajustement non linéaire des courbes, de la forme $Y = X^b + e$, est basé sur le critère des moindres carrés comme suit :

$$S(b) = \sum_{i=1}^{i=n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{i=n} [y_i - x_i^b]^2 \quad (\text{Equation 5})$$

qu'il faut minimiser en fonction du paramètre (dans le cas où l'on en a qu'un seul, b). La solution ne peut être trouvée que par itération, à partir des valeurs initiales du paramètre.

Dans le cas des fonctions non linéaires à n paramètres, on constitue un vecteur, θ des n estimateurs. Le critère des moindres carrés s'écrit de la même façon :

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^{i=n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{i=n} [y - n(x_i; \theta)]^2 \quad (\text{Equation 6})$$

La solution se trouve avec un vecteur d'estimateurs qui minimisent $S(\theta_n)$ par itération. De nombreuses difficultés peuvent conduire à une estimation des paramètres imprécis et instables. Dans la pratique, pour les courbes de croissance, il convient de borner certains paramètres dans un intervalle de valeurs réalistes. Les paramètres sont ainsi estimés un à un, en maintenant les autres constants, et $S(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = \text{Cte}$ (Tomasson *et al.*, 1993). La constante que nous avons utilisée est la somme des carrés résiduels minimal, comparé chaque fois à la somme des carrés résiduels minimal de référence (Sceminref), qui vaut :

$$\text{Sceminref} = (k-1) * \text{var}(k) \quad (\text{Equation 7}).$$

k étant le nombre d'observations.

Les données de rendement ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) et de matières sèches à la récolte ont été soumises à l'analyse de variance et au test de comparaison multiple des moyennes de Tukey à l'aide du logiciel R and GenStat Discovery 3rd Eds.

RESULTATS

CINETIQUE DE CROISSANCE

Le cumul des précipitations pendant la période de l'essai a été de 433 mm avec une répartition régulière sur la période de croissance. Le minimum de 400 mm de précipitations nécessaires pour une bonne croissance du maïs durant la phase végétative, telle qu'indiqué par Ristanovic (2001) a été atteint. Il n'y a donc pas eu de stress hydrique en cours de culture.

La levée a été notée à 83 °C j, après semis pour l'ensemble des variétés, soit 5 j après semis. La floraison mâle a été notée à 960 °C j, pour la variété Mus, à 1 083,5 °C j, pour la variété Locale et, à 1 117 °C j pour Salongo 2. Ce qui représente 58, 66 et 68 j, respectivement après semis. Il a fallu 1 716,5 °C j, à partir du semis, pour que la variété Mus termine son cycle, et 1 979,5 °C j pour la variété Locale et pour Salongo 2 ; soit respectivement 105 et 120 j après semis, avec une température moyenne journalière de 26,5 °C durant le cycle de culture.

RYTHME D'APPARITION DES FEUILLES ET EVOLUTION DE L'INDICE FOLIAIRE

L'apparition des feuilles visibles présente l'allure d'un sigmoïde non symétrique (Figure 1). Les 6 premières feuilles apparaissent déjà à $460\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$ après la levée pour l'ensemble des variétés. La variété Mus a été plus rapide que les autres et a atteint le nombre maximum de feuilles à $860\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$, alors que les deux autres ont évolué moins vite, à un rythme plus ou moins régulier, et ont atteint le nombre maximal de feuilles à $1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$. Au-delà du maximum, le nombre de feuilles apparues a stagné.

Les vitesses moyennes d'apparition des feuilles ont été calculées à l'aide d'une régression linéaire. L'apparition des feuilles visibles paraît moins régulière pour la variété Mus. Elle est plus lente pour les 6 premières feuilles ($0,0073 \pm 0,0006$) ($R^2 = 0,9$), puis un rythme plus rapide ($0,01522 \pm 0,0015$) ($R^2=0,99$). Le phyllochrone pointe de feuille (qui est le temps nécessaire pour l'apparition de deux feuilles successives) a été de $65,7\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$ pendant la phase linéaire. Pour la variété Salongo 2, le rythme a été plus ou moins régulier : $y = 0,013x \pm 0,12$ ($R^2=0,98$). Le phyllochrone pointe de feuilles a été de $76,9\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$ dans ce dernier cas. De même, la variété locale a eu un rythme plus ou moins régulier de ($0,013 \pm 0,0009$) ($R^2=0,98$), avec un phyllochrone pointe de $77\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$. Le stade foliaire 'six-feuilles' prédit sur la base des modèles de régression a été de $400\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$; $452\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$ et $461\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$, respectivement, pour les 3 variétés Mus, Salongo 2 et Locale.

PARAMETRES DU MODELE

Les paramètres de croissance, d'hauteur et les dimensions foliaires, présentés dans le tableau 1 représentent les moyennes des observations à 70 j après le semis (Tableau 1). A ce stade toutes les variétés avaient déjà fleuri et les paramètres de croissance devraient avoir atteint leurs valeurs maximales. Pour la variété Salongo 2, la plupart des individus n'avaient pas atteint leur hauteur maximale au même moment. Ceci avait augmenté la moyenne à 84 j. Les mesures foliaires ont été faites selon la méthodologie de Mollier (1999). Les valeurs observées peuvent être atteintes à des rythmes différents selon les potentialités de chaque variété. L'évolution de l'indice foliaire en fonction du nombre des feuilles visibles est présentée à la Figure 2.

Les valeurs présentées au Tableau 2 sont estimées après 80 itérations et une scemin de 20,85 pour la variété locale, 100 itérations et scemin de 53,9 pour la variété Mus et 90 itérations et une scemin de 104 pour la variété Salongo 2. En général, le critère de qualité de la régression était satisfait. Les valeurs initiales ont été estimées par itération, à partir des valeurs expérimentales. En recherchant, dans un intervalle des valeurs réalistes, la valeur minimale de a et b conduisant au minimum global qui satisfasse le critère des moindres carrés, il était inutile de s'écarter des valeurs proposées par les auteurs du modèle stics. Les résultats montrent que le modèle a tendance à surestimer les valeurs de LAI pour les variétés Locale et Salongo 2, et sous-estimer celles de la variété MUS. Le modèle prédit la fin du cycle de croissance de la variété Mus qui a été plus précoce que les deux autres, ($1\ 440\text{ }^{\circ}\text{C j}^{-1}$ après la levée, soit 92 j après semis) (Figure 3). La variété Mus a terminé sa phase juvénile plus tôt que les deux autres, et atteint le LAI maximum a $16,5\text{ m}^2$ des feuilles vertes par m^2 de sol. Ces valeurs ont été de 13,9 et 17,8, pour la variété locale et Salongo 2, respectivement. Les courbes de simulation de l'expansion foliaire des variétés locale et Salongo 2 ont eu la même allure, bien que la hauteur maximale atteinte par cette dernière variété ait été supérieure à celle de la Locale.

En terme de jour après semis, le modèle a permis de simuler le stade AMF (date de fin de phase juvénile), à 32 j pour la variété Mus et à 42 j après semis pour les deux autres. Le stade LAX (date à laquelle l'indice foliaire a atteint sa valeur maximale, pour le cycle et, qui a correspondu à la floraison mâle) a été prédit à 62 j après semis pour Mus, alors qu'il a été observé à 58 j pendant l'expérimentation. Pour les variétés Locale et Salongo 2, le modèle a prédit la floraison à 66 et 75 jours après semis, respectivement, alors qu'il a été noté à 66 j, pour la variété Locale et 68 j pour Salongo 2. Le stade SEN (date de début de sénescence nette qui correspond à la décroissance de l'indice foliaire) a été simulé à 84 j pour Mus et 96 j pour les variétés Locale et Salongo 2. Le stade MAT (maturité physio-logique) a été simulé après forçage du paramètre TF (temps auquel les feuilles sont séniles). Les valeurs calculées pour cette phase ont été de 105 j après semis pour Mus et 120 j pour les deux autres.

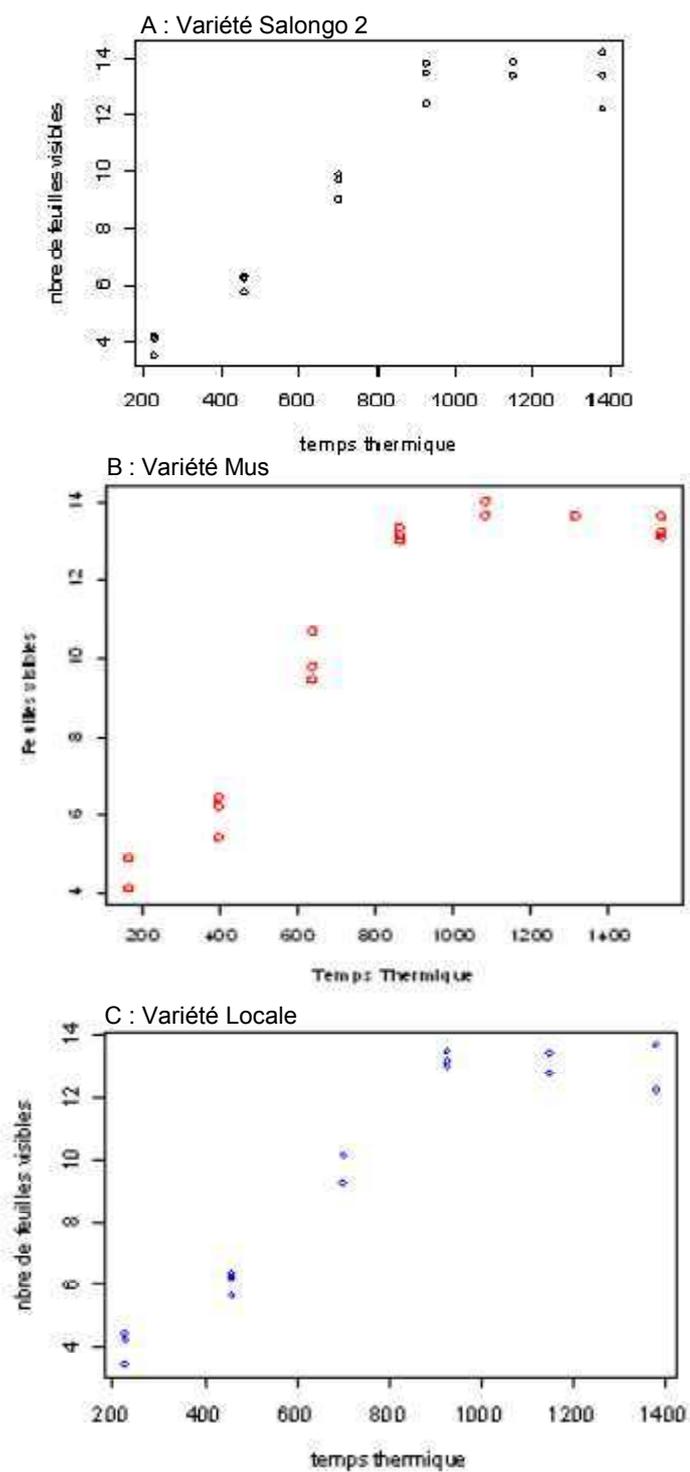


Figure 1 : Apparition des feuilles visibles en fonction du temps thermique pour les différentes variétés utilisées.

Leaf appearance as a function of thermal time for the different varieties used.

Tableau 1 : Paramètres de croissance à 70 j après semis des 3 variétés de maïs utilisées.*Growth parameters assessed 70 days after seeding of the 3 maize varieties.*

Variétés	Nb.Tot.f.vis.	Hauteur (cm)	L.f.vis (cm)	l.f.vis (cm)	LAI (m ² /m ²)
Locale	13,03±0,4	160,9±10,7	785±16,7	87,7±7,6	12,97±1,25
Mus	13,8±0,3	160,5±2	814±12	97,5±5	17,88±1,32
Salongo2	13,65±0,3	169±5,2	950±21	103,7±5	14,83±6,8

Nb.Tot.f.vis. : nombre total des feuilles visibles, L. f.vis : Longueur total des feuilles visibles, l.f.vis : largeur total des feuilles visibles, LAI : leaf area index ou indice de surface foliaire.

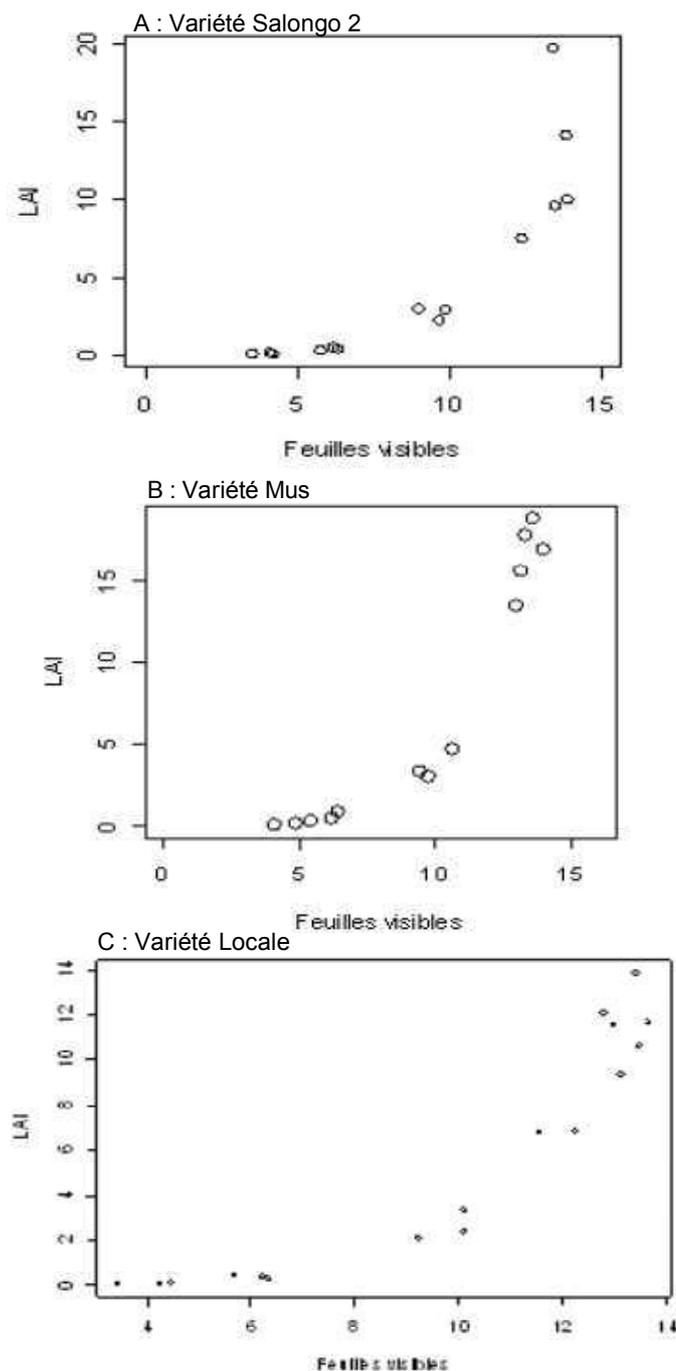
**Figure 2** : L'indice foliaire (LAI) en fonction du nombre des feuilles visibles des 3 variétés de maïs utilisées.*Leaf area index as a fonction of leaf number for the 3 maize varieties used.*

Tableau 1 : Estimation des paramètres du modèle pour les 3 variétés de maïs utilisées.*Estimated values for model parameters for the 3 maize varieties used.*

	Paramètres	K	Ti	b	a	Tf	Scemin	Sceminref	Itérations	intervalle
Variété	Stics	4,27	647	0,012	0,0074	1657	-	-	-	-
	Initiales	14	770	0,012	0,0074	1913				
Locale	Estimés	14,8	770	0,011	0,0067	1446	20,85	428	80	
	Ajustés	14,8	770	0,011	0,0067	1446				
Mus	Initiales	18,8	650	0,012	0,0074	1700				
	Estimés	16,5	656	0,06*	0,059*	1334	53,9	854,975	100	b[0,01 ; 0,1] et a[0,005 ; 0,01]
	Ajustés	16	645	0,012	0,0074	1332				
Salongo2	Initiales	19,7	721	0,012	0,0074	1913				
	Estimés	17,8	817	0,0094	0,0069	1429	104	590,7	90	
	Ajustés	17,8	817	0,0094	0,0069	1429				

Scemin : somme des carrés minimum des erreurs, Sceminref : somme des carrés minimum des erreurs de référence, Ti : Temps auquel la moitié de la valeur k est atteinte, b : taux d'accumulation de la matière sèche au cours de la période de croissance (en mg de matière sèche / mg de matière fraîche, a : taux d'accumulation de matière sèche pendant la phase de sénescence, Tf : temps auquel toutes les feuilles sont séniles. Il correspond à la date où la maturité physiologique est atteinte.

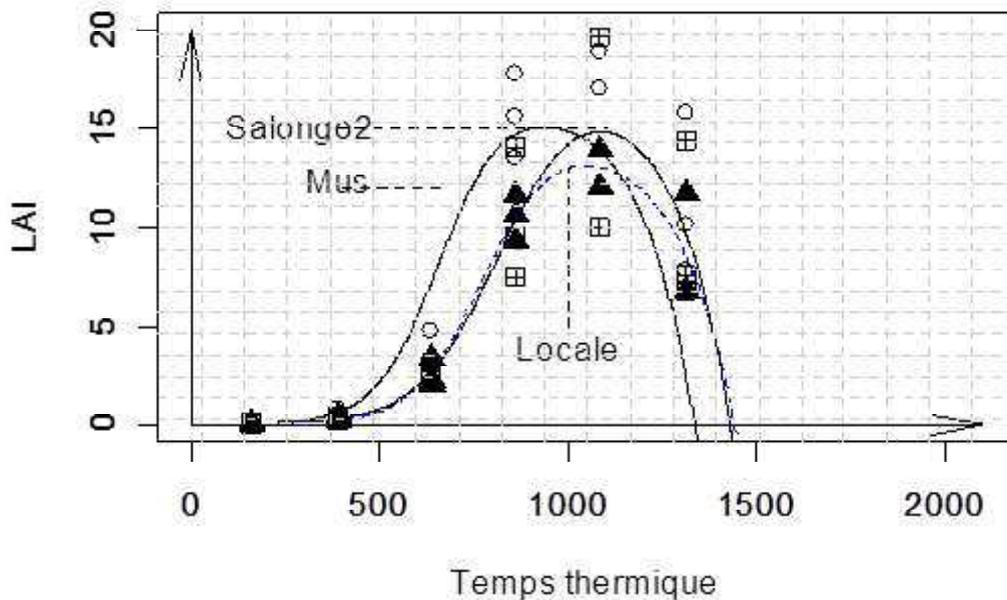


Figure 3 : Simulation de l'expansion foliaire des 3 variétés de maïs en fonction du temps thermique après adaptation du modèle aux conditions expérimentales. LAI représente l'indice foliaire.

Simulation of leaf expansion of the 3 maize varieties as a function of thermal time after model adaptation to local experimental conditions. LAI represent leaf area index.

BIOMASSE AERIENNE ET RENDEMENT

Les résultats de la biomasse aérienne sèche obtenue à la fin du cycle, ainsi que les rendements et les indices de récolte sont présentés dans le tableau 3. On constate que la tendance a été la même que pour les observations faites sur l'indice foliaire : une moyenne de 8 237,8 kg de matières sèches.ha⁻¹, avec un indice foliaire maximal de 18,8 pour la variété Mus. Ces valeurs ont été de 7 548,8 kg de matières sèches.ha⁻¹ et 19,7 de LAI pour Salongo 2 et de 5 545 kg de matières sèches.ha⁻¹ et un indice LAI de 13,9 pour la variété locale. Le rendement en grains semble corrélér à l'indice foliaire. En moyenne, les rendements étaient de 1 895 kg de grains.ha⁻¹ pour Mus, de 2 172 kg.ha⁻¹ pour Salongo 2 et

de 1 384 kg/ha pour la variété Locale. L'accumulation de la matière sèche dans les graines (indice de récolte) augmente linéairement entre le stade DRP et MAT. Pour les 3 variétés, cette phase a été plus longue pour la variété Salongo 2, suivie de Mus et de la variété Locale.

En considérant la biomasse aérienne sèche à la récolte, l'analyse de la variance a révélé une différence significative entre les variétés, au seuil de 5 %. Le test de comparaison des moyennes par le critère de Tukey, a révélé des différences significatives entre les variétés Mus et Locale. Aucun effet de la LAI sur le rendement des variétés n'a été observée. Toutefois, il ressort des analyses, que les variétés ayant un LAI plus grand ont eu également un rendement plus élevé.

Tableau 3 : Indice foliaire observé, biomasse sèche à la récolte et rendement en grain pour 3 variétés de maïs utilisées.

Measured Leaf area index, dry biomass at harvest and grain yield for 3 corn varieties used.

Variétés	LAI _{max}	Biomasse sèche à la récolte (Kg/ha)	Rendement (kg / ha)	Indice de récolte
Mus	18,8	8237,9 ± 1568b	1895,3±92b	0,23
Salongo 2	19,7	7548,8 ± 567b	2172 ± 62,9b	0,29
Locale	13,9	5545.1 ± 67,8a	1384,7 ± 487a	0,25

Les moyennes portant la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes u seuil de probabilité de P = 0.05 selon le test de comparaison multiple de Tukey.

DISCUSSION

Les données de croissance en fonction du degrés-jours illustrent une différence entre la variété Mus, comparée aux deux autres. Pour la variété Mus 1 716,5 °C j ont été requis pour compléter le cycle végétal, tandis que pour Salongo 2 et la variété Locale, cette valeur a été 15 % plus élevée (soit 1 979,5 °C j). Chafic (1999) a rapporté qu'il avait fallu 2 700 °C j pour atteindre la maturité physiologique d'un maïs de 120 j (avec une température moyenne journalière de 22,64 °C et le temps thermique calculé en base 8) dans les conditions de Bekaa au Liban. Quant à la phénologie, l'auteur a décrit la fin de la phase juvénile (au stade 6 feuilles) à 460 °C j, la floraison mâle à 900 °C j et 1 300 °C j pour la formation des grains. Il faut noter que les données sur les stades de développement foliaires et d'autres stades de croissance sont des estimations. Un facteur qui affecte la fiabilité

de ces données est la présence ou non de stress limitant la croissance. Par exemple, un stress très prononcé de la plante réduit généralement l'élongation des tiges et de la gaine foliaire, retardant ainsi l'émergence de feuilles.

Dans l'ensemble, les résultats montrent que même le rythme d'apparition des feuilles visibles de la phase linéaire, allant de 65,7 à 77 °C j⁻¹, a été plus lent que celui décrit par d'autres chercheurs. En effet, Bennouna *et al.* (2005) rapportent que le rythme d'apparition des feuilles visibles, dans les conditions du Haouz (au Maroc), était assez régulier, avec une vitesse moyenne de 0,029 ± 0,002 (R² = 0,98) feuilles visibles par °C J⁻¹ (soit un phyllochrone pointe de 37 °C J⁻¹). Ils ont observé, en outre, que la phase linéaire intervenait après les 5 premières feuilles. C'est la même tendance observée dans la présente étude, bien que les stades phénologiques décrits ne se basent pas sur les feuilles ligulées, mais plutôt sur les pointes de

feuilles ou feuilles visibles. Au Liban, Chafic (1999) a constaté que la période d'apparition des feuilles, en fonction du temps thermique a été traduite en fonction linéaire $y = 0,0112x + 1,8357$ avec $R^2 = 0,985$. Le nombre de feuilles visibles influence la surface foliaire totale et donc l'indice de surface foliaire suivant une relation exponentielle et non linéaire tel que rapporté par Bennouna *et al.* (2005).

Le modèle tiré de l'approche 'Epic' et 'Stics' ne prévoit pas directement la sénescence après LAX (date à laquelle l'indice foliaire atteint sa valeur maximale pour le cycle) (Affholer 2001). Au stade SEN débute la sénescence qui évolue linéairement jusqu'à la maturité physiologique (MAT : date de fin d'augmentation de l'indice de récolte, ou date de maturité physiologique et l'indice foliaire devient nul). Ce stade survient plus tôt pour la variété Mus et, un peu plus tard, pour les deux autres variétés.

La surface foliaire du maïs peut être mesurée suivant deux modalités : la méthode non destructrice du végétal appelée manuelle et la méthode destructive qui fait recours à l'usage du planimètre optique. Dans la présente étude, l'adaptation du modèle en conditions tropicales, a conduit à suggérer des légères modifications. Dans l'ensemble, les valeurs de l'indice de surface foliaire sont supérieures à celles mesurées au planimètre décrites dans la littérature. Une différence significative entre les mesures manuelles et celles du planimètre ont été aussi rapportées par Koertz *et al.* (2005). Il faudra donc comparer des résultats des études utilisant la même méthode de collection de données. Toutefois, les deux méthodes (manuelle et avec planimètre) permettent de comparer, de façon fiable, les différentes variétés entre elles.

CONCLUSION

L'adaptation du modèle de Baret, repris par Brisson dans le module de croissance du modèle de culture Stics, pour la simulation de la croissance ou expansion foliaire a conduit à une estimation des paramètres du modèle. Le critère des moindres carrés a été retenu comme

critère de qualité. Des ajustements avec ces valeurs bornées ont été quelques fois utiles pour retrouver un vecteur d'estimateurs plus réalistes, et qui satisfait le critère de qualité. Avec ces paramètres des caractéristiques thermiques, nous avons obtenu des courbes s'ajustant et passant le mieux que possible dans le nuage des observations en satisfaisant le critère des moindres carrés. Le modèle prédit un cycle plus court pour la variété Mus, suivie de la Salongo2, puis de la Locale. Pour les deux variétés améliorées, la prédiction sur le cycle approche la réalité. La simulation du LAI montre que les variétés améliorées ont une superficie foliaire et donc un indice foliaire plus grand que la variété locale. Le rendement en maïs grain suit l'évolution du LAI des variétés étudiées.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'adaptation des modèles de cultures aux conditions éco-climatique en Afrique sub-saharienne, en général et en RD Congo, en particulier. En effet, la croissance aérienne n'est qu'un des modules du modèle de culture Stics (et tant d'autres) que nous souhaitons utiliser dans la suite, pour la simulation du bilan hydrique, azoté et l'élaboration du rendement des cultures. Face au changement climatique et ses impacts sur l'environnement, l'agriculture en particulier, le domaine des simulations reste une arme non négligeable permettant de comprendre le fonctionnement des systèmes afin de proposer des solutions.

REMERCIEMENT

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un partenariat interinstitutionnel entre l'Université Laurentienne (Ontario, Canada) et l'Université de Kinshasa (RD Congo), sous les auspices du programme PUCD (Partenariat Universitaire en Coopération et Développement) géré par l'Association des Universités et Collèges du Canada (AUCC). Le soutien financier de l'Agence Canadienne pour le Développement Internationale a été très apprécié. Nous remercions madame Melanie Mehes-Smith et Sr. Nicole Ntumba pour leur assistance technique.

REFERENCES

- Affholder F. 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. 217 p.
- Ameziane E., T. Hassani, E. Persoon. 1994. Bases physiologiques de l'élaboration du rendement. *In* : Hatier-Aupelf.Uref (Eds.). Agronomie Moderne. Bases de la production végétale. Paris, France. 544 pp.
- Beed F. D., N. D. Paveley and B. Sylvester. 2007. Predictability of wheat grown and yield in light-limited conditions. *J. Agric. Sci.* 145 : 63 - 79.
- Bennouna B., A. Lahrouni and S. Khabba. 2005. Paramètres de croissance du maïs dans le Haouz de Marrakech (Maroc). *Cahiers Agricultures*. 14 : 437 - 446.
- Brisson N., F. Ruget, P. Gate, J. Lorgeau, B. Nicoulaud, X. Tayot, *et al.* 2002. STICS : a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances : Model validation for wheat and maize. *Agron. Sustain. Dev.* 22 : 69 - 92.
- Cao J., J. D. Hesketh, B. Zur and J. F. Reid. 1998. Leaf area development in Maize and soybean plants. *Biotronics* 17 : 9 - 15.
- Castelan-Estrada M. 2001. Répartition de la Biomasse chez *Vitis vinifera* L. Rendement de Conversion du Rayonnement Solaire Global et Coûts Energétiques. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. 126 p.
- Chafic S. 1999. Modélisation de la croissance et de la production d'une culture de maïs (*Zea Mays*) au moyen du modèle CERES dans les conditions de la plaine de la Bekaa. *Mém. DEA. Université Libanaise*. 55 p.
- Colomb B., J. R. Kiniry and P. Debaek. 2000. Effect of Soil Phosphorus on Leaf Development and Senescence Dynamics of Field-Grown Maize. *Agron. J.* 92 : 428 - 435.
- Conesa A. and M. Sedrat. 1994. La croissance végétative et développement. *In* : Hatier-Aupelf.Uref (Eds.). Agronomie Moderne. Bases de la production végétale. Paris, France. 544 pp.
- Cornu M. 2000. Dynamique des populations bactériennes en cultures mixtes. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard. Lyon 1, France. 198 pp.
- Denoroy P., E. Justes and G. Gosse. 2000. Mesure du taux de couverture du sol pour estimer les principales caractéristiques d'une culture de colza avant montaison. *Oléagineux, Corps Gras, Lipide*. 7 : 118 - 23.
- Dwyer L. M. and D. W. Steward. 1986. Leaf Area Development in Field-Grown Maize. *Agron. J.* 78 : 334 - 343.
- Elings A. 2000. Estimation of leaf area in tropical maize. *Agron. J.* 92 : 436 - 444.
- Fao. 1988. Synthèse Agronomique des Essais de fertilisation dans la province du Kasaï-Oriental (République Démocratique du Congo). Rapport technique. Rome, Italy. 61 p.
- Festo J. M., S. N. Azam-Ali and J. A. Roberts. 2003. The impact of the temperature on leaf appearance in Bambara Groundnut Landraces. *Crop Sci.* 43 : 1375 - 1379.
- Fournier C. 2000. Modélisation des interactions entre plantes au sein des peuplements. Application à la simulation des régulations de la morphogenèse aérienne du maïs (*Zea mays* L.) par la compétition pour la lumière. Thèse de Doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. 157 p.
- Francis C. A., J. N. Ruget and A. F. E. Palmer. 1969. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays*). *Crop Sci.* 9 : 537 - 539.
- Garcia de Cortázar et I. Atauri. 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à de la France. Thèse de doctorat. Ecole Supérieure Nationale d'Agronomie de Montpellier, France. 347 pp.
- Koetz B., F. Baret, H. Poilve and J. Hill. 2005. Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sens. of Environ.* 95 : 115 - 124.
- Lafarge T. and F. Tardieu. 2002. A model coordinating the elongation of all leaves of a sorghum cultivar was applied to both Mediterranean and Sahelian conditions. *J. Exp. Botany*. 53 : 715 - 725.
- Laffite H. R. 2002. Physiologie du maïs tropical. *In* : Collection FAO. Le maïs en zones tropicales. Amélioration et production. Rome, Italy. 367 p.
- Ledent J. F., T. Henkart and B. Jacobs. 1990. Phénologie du maïs, visualisation de la croissance et du développement. *Revue de l'Agriculture*. 43 : 391 - 408.

- Ledent J. F. et P. Girardin. 1995. Ecophysiologie et amélioration des plantes, une relation utile ? *In* AUPELF-UREF (Eds.). Quel avenir pour l'amélioration des plantes. John Libbey Eurotext Paris, France : pp 23 - 30.
- Mollier A. 1999. Croissance racinaire du maïs (*Zea mays* L.) sous déficience en Phosphore. Etude expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat. Université de Paris XI Orsay. Paris, France. 200 p.
- Nyenguila M. and G. M. Paulson. 1983. Effet of selecting versus yield efficiency on morphological and physiological traits of tropical maize. *Euphytica*. 32 : 659 - 667.
- Ripoche D. 2002. Stics : Version 5.0. Notice utilisateur WINSTICS. Ed. INRA, Unité Climat, Sol et Environnement. INRA Domaine St. Paul, Site Agroparc. 84914 Avignon Cedex 09. Dépôt Agence pour la protection des Programmes N° 99 17002600.
- Ristanovic D. 2001. Maïs (*Zea mays* L.). *In* : Raemaekers R.H. (Eds.). Crop production in tropical Africa. DGIC (Directorate General for International Cooperation), Ministry of foreign Affairs, External Trade and International Cooperation, Brussels, Belgium : pp 23 - 45.
- Sridhara S. and T. Prasad. 2002. A combination of mechanistic and empirical models to predict growth and yield of sunflower as influenced by irrigation and moisture stress. *Helia*. 25 : 39 - 50.
- Stewart D. W. and L. M. Dwyer. 1998. Phenological temperature response of Maize. *Agron. J.* 90 : 73 - 79.
- Tomasson R., C. Dervin and J. P. Masson. 1993. Biométrie, Modélisation des phénomènes biologiques. Masson. Paris, France. 638 p.