



Effet de la densité de semis sur l'évolution du coefficient d'extinction de la lumière et de l'efficacité de conversion du rayonnement absorbé par le couvert végétal de deux variétés de mil de longueur de cycle différente

Laopé Ambroise Casimir SIENE^{1,2*}, Bertrand MULLER^{1,3} et Séverin AKE²

¹Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse, BP 3320 Thiès, Sénégal.

²Laboratoire de Physiologie Végétale de l'UFR Biosciences à l'Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

³CIRAD, Avenue Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5, France.

* Auteur correspondant, E-mail : silamca@yahoo.fr / Tel : (00225) 08 82 30 34

RESUME

La production de la biomasse chez les cultures est fonction de la quantité de rayonnement intercepté ou absorbé par le couvert végétal et de l'efficacité de conversion de ce rayonnement en matière sèche. Dans cette étude, l'effet de la densité de semis sur la croissance et l'interception du rayonnement ainsi que son impact sur l'évolution du coefficient d'extinction de la lumière ($K_{df_{\text{jour}}}$) et de l'efficacité de conversion du rayonnement (ϵ_b) absorbé en biomasse ont été examinés. Les variétés SOUNA3 (améliorées de cycle court, 90 jours) et SANIO (traditionnelle de cycle long, 120 jours) ont été utilisées à 3 densités de semis ($D1 = 40\ 000$ poquets. ha^{-1} ; $D2 = 12\ 346$ poquets. ha^{-1} et $D3 = 5\ 917$ poquets. ha^{-1}) en 2006 et 2007. L'indice de surface foliaire (LAI) a été calculé à partir de mesures de surface foliaire. La fraction de rayonnement photosynthétiquement actif, transmis sous le couvert (PART), a été mesurée et le $K_{df_{\text{jour}}}$ ainsi que le coefficient de conversion (ϵ_b) ont été calculés au cours du cycle. La densité de semis a affecté les valeurs de LAI et de PART. Le $K_{df_{\text{jour}}}$ a varié au cours du cycle, mais n'a pas été affecté par la densité de semis. Une corrélation positive a été obtenue entre les valeurs de $K_{df_{\text{jour}}}$ et celles de LAI qui est d'ailleurs beaucoup plus importante pour la variété SOUNA3 que pour la SANIO. Il a été montré que les valeurs de $K_{df_{\text{jour}}}$ sont plus élevées quand il y a des panicules. L'efficacité de conversion a varié au cours du cycle, mais n'a pas été affectée par la densité de semis. Néanmoins, elle a été plus forte au niveau des fortes densités.

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Mil, densité de semis, rayonnement photosynthétique, coefficient d'extinction de la lumière, efficacité de conversion, biomasse sèche aérienne.

INTRODUCTION

La production de biomasse chez les cultures est fonction de la quantité de rayonnement interceptée par le couvert, en relation à l'importance et à la répartition de la surface foliaire (position et orientation des feuilles), et de l'efficacité de conversion de ce

rayonnement en matière sèche (Norman et Arkebauer, 1991; Van Oosterom et al., 2002; Lindquist et al., 2005). On modélise cette interception, en se référant par analogie à la loi de Beer Lambert (Flénet et al., 1996; Denoroy et al., 2002). Cette loi fait appel à un

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

coefficient empirique dit coefficient d'extinction de la lumière (Kdf) qui détermine la fraction du rayonnement incident intercepté par le couvert, pour un indice de surface foliaire donné (Van Oosterom et al., 2002; Ayaz et al., 2004; Anda et Loke, 2005) :

$$PAR_i = PAR \times (1 - \exp(-Kdf \times LAI)) \dots (1)$$

où PAR est le rayonnement photosynthétiquement actif incident, PAR_i sa part interceptée, et LAI l'indice de surface foliaire.

En principe, la loi de Beer n'est valable qu'en milieu homogène (Denoroy et al., 2002) et donc avec un couvert homogène dans l'espace : or ce n'est pas le cas pour de nombreuses cultures qui sont semées en rangs ou en poquets assez éloignés les uns des autres, comme le mil. Ceci pose donc la question des modalités d'utilisation de cette relation, et en particulier des valeurs de Kdf à considérer dans le temps en relation au développement du couvert et à son évolution d'un état discontinu à un état continu. Alors que diverses études ont montré que le Kdf variait au cours du cycle entre 0,40 et 0,66 dans un couvert bien développé de maïs en zone tempérée (Tsubo et Walker, 2002; Birch et al., 2003; Lizaso et al., 2003; Lindquist et al., 2005), il ne semble pas exister de référence sur l'évolution du Kdf au cours du cycle pour le mil. Pour cette culture (mil) les auteurs citent des valeurs moyennes de Kdf, pour toute la période semis-floraison : on peut mentionner ainsi des valeurs moyennes de 0,29, 0,33, 0,5, 0,57 et 0,63 respectivement citées par Squire et al., (1984), Ong et Monteith (1985), Jovanovic et Annandale (1997) et van Oosterom et al. (2002). Par ailleurs, ces derniers auteurs n'ont pas trouvé de différence au niveau du Kdf, entre différentes densités de semis et différents cultivars. Par comparaison, différentes références sur maïs indiquent pourtant que la densité de semis peut agir sur le Kdf (Flénet et al., 1996; Maddonni et al., 2001; Stewart et al., 2003; Lindquist et al., 2005). En ce qui concerne le sorgho, nous

n'avons trouvé que des valeurs moyennes de Kdf, sur lesquelles certains auteurs indiquent une influence de la densité de semis (Flénet et al., 1996), alors que d'autres ne montrent pas cette influence de la densité de semis sur le Kdf (Lafarge et Hammer, 2002). En réalité il semble que ce soit plutôt la géométrie de semis qui puisse avoir un effet sur le coefficient d'interception, en particulier, quand la culture est semée en lignes, l'écart entre les lignes semble pouvoir jouer sur le Kdf (Flénet et al., 1996; Maddonni et al., 2001). Enfin, il faut souligner qu'aucun auteur ne fait précisément référence à un éventuel impact des panicules sur l'interception du rayonnement et par suite sur la valeur du Kdf, alors que cet impact est pourtant reconnu (Tetio-Kagho et Gardner, 1988; Maddonni et Otegui, 1996).

La question se pose donc de savoir si le Kdf du mil peut-être considéré comme constant ou non et indépendant ou non de la densité et la géométrie de semis.

La bonne détermination de l'interception du rayonnement est importante pour le calcul de l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse (ϵ_b) qui est définie comme la quantité de matière sèche produite par unité d'énergie solaire absorbée. En fait, une erreur sur la première entraîne une erreur sur la seconde.

En pratique l'efficacité de conversion correspond au ratio de biomasse produite entre deux dates, en relation au rayonnement reçu entre ses deux dates (Tsubo et al., 2001; Lindquist et al., 2005). De très nombreuses références existent dans la littérature concernant ce paramètre (ϵ_b), mais il faut faire attention à leur signification. En effet, les valeurs de ϵ_b peuvent avoir été déterminées en relation à la biomasse totale ou, plus souvent, à la biomasse aérienne seule, en considérant le rayonnement solaire global, ou uniquement le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), et enfin en considérant la fraction de rayonnement réellement absorbée ou, plus souvent, en l'approximant par la fraction

interceptée (Bonhomme, 2000). Quoiqu'il en soit, divers auteurs indiquent que l'efficacité varie au cours du cycle de la culture (Begue et al., 1991; Cavéro et al., 2000; Ayaz et al., 2004). Plusieurs études ont montré que l'efficacité de conversion du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), plante du type C4, est considérablement plus élevée que celle des plantes en C3. Gosse et al. (1986) donnent des valeurs moyennes de ϵ_b de 2,51 g.MJ⁻¹ pour les plantes en C4 et de 1,93 g.MJ⁻¹ pour les plantes en C3. Pour le mil, Ong et Monteith (1985) ont obtenu des valeurs qui ont varié entre 2 g.MJ⁻¹ et 2,5 g.MJ⁻¹ de rayonnement global intercepté pour la production de biomasse aérienne. Récemment, Van Oosterom et al. (2002) ont obtenu une valeur de 1,90 g.MJ⁻¹ de rayonnement global intercepté en conditions optimales de culture pour la production de biomasse aérienne, qui est proche des 2,0 g.MJ⁻¹ déterminés par Reddy et Willey (1981). Begue et al. (1991) citent en milieu paysan au Niger des valeurs plus faibles : de 3,1 g.MJ⁻¹ de PAR intercepté et de 2,9 g.MJ⁻¹ de PAR absorbé en moyenne sur tout le cycle pour la production de biomasse aérienne, ce qui donne des valeurs de l'ordre de 1,5 g.MJ⁻¹ de biomasse aérienne en relation au rayonnement global intercepté. Ces valeurs plus faibles s'expliquent sans doute par les conditions de culture.

Le peu de références existant sur le mil à ces sujets, et en particulier en relation à la géométrie et à la densité de peuplement, nous ont conduit à étudier les évolutions des valeurs du coefficient d'extinction de la lumière (Kdf) et de l'efficacité de conversion (ϵ_b) au cours des cycles de deux idéotypes variétaux contrastés et semés selon 3 densités différentes.

Les deux idéotypes considérés sont la variété SOUNA3 et le mil paysan de type SANIO, qui se distinguent par leur cycle et morphologie (voir descriptions plus détaillées plus avant), et qui sont des variétés représentatives de la quasi-totalité des variétés semées par les paysans du Sénégal. En ce qui

concerne le peuplement végétal, nous avons opté pour une seule géométrie de semis, « en carrés » (mêmes écarts entre lignes et entre poquets sur la ligne), qui a donc été déclinée selon 3 densités. En effet, on constate au Sénégal, ainsi que dans de nombreuses zones d'Afrique de l'Ouest, que le mil est le plus souvent semé ainsi ou avec des écarts entre lignes et entre poquets très proches. Par ailleurs nous avons considéré comme densité intermédiaire la densité la plus répandue pour le mil au Sénégal en milieu paysan, 12 346 poquets à l'hectare, qui correspond à des écartements entre poquets de 0,90 m.

Au cours de cette étude on s'intéressera successivement aux évolutions :

- des biomasses aériennes et indices de surface foliaire (LAI) des cultures ;
- des interceptions du rayonnement ;
- des coefficients d'extinction de la lumière (Kdf) ;
- des efficacités de conversion (ϵ_b).

MATERIEL ET METHODES

Site expérimental

Les expérimentations ont été menées lors des saisons des pluies 2006 et 2007 sur la station expérimentale du Centre National de Recherche Agronomique de Bambey (14°42'N, 16°28'W, altitude 20 m) située au Centre Ouest du Sénégal. Le climat de cette zone est sahélien avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 550 mm, répartie au cours des mois de juin à septembre. Le sol est sableux (plus de 90% de sable), appelé localement « Dior », représentatif de la région nord du Sénégal : selon la classification française c'est un sol ferrugineux tropical développé sur matériaux sableux quaternaires. Les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent sont respectivement de l'ordre de 0,13 cm³.cm⁻³ et 0,04 cm³.cm⁻³, donnant une réserve utile de l'ordre de 90 mm.m⁻¹ (Affholder, 1997).

Dispositif expérimental et facteurs étudiés

Deux expérimentations ont été mises en place le 29 juillet 2006 et le 20 juillet 2007. A chaque fois, deux variétés de mil de cycle et morphologie différents ont été utilisées : un mil paysan de la région de Fatick de type SANIO, variété traditionnelle photopériodique à cycle long (entre 120 et 140 jours), à taille haute (3 à 3,5 m) et au tallage important ; et la variété SOUNA3, issue de la recherche agronomique, de type SOUNA, à cycle court (90 jours), non photopériodique, de taille moyenne (2 à 2,5 m) et à tallage modéré. Les semences de SOUNA3 ont été obtenues auprès des services semenciers de l'ISRA. Les semences de SANIO ont été recueillies en milieu paysan dans la zone de Fatick à environ 70 km au sud de Bambey (à noter qu'il n'y a pratiquement plus de présence de mil SANIO dans la moitié nord du Sénégal et on souhaitait travailler sur un mil SANIO qui était potentiellement cultivable dans cette région).

Un dispositif en blocs complets randomisés à 4 répétitions et 2 facteurs a été utilisé : la variété, à deux modalités : SOUNA3 et SANIO ; et la densité de semis, à trois niveaux : D1 = 40 000 poquets.ha⁻¹ (géométrie « en carrés », écartements de 0,5 m), D2 = 12 346 poquets.ha⁻¹ (« en carrés », écartements de 0,9 m) et D3 = 5 917 poquets.ha⁻¹ (« en carrés », écartements de 1,3 m) ; soit 6 traitements. Les parcelles, au nombre de 24, avaient un même nombre de poquets et par suite des dimensions différentes (D1 = 81 m² ; D2 = 262,44 m² et D3 = 547,56 m²).

Conduite de la culture

L'expérimentation a été conduite en 2006 sur des précédents culturaux d'arachide et de mil. Un labour superficiel et un épandage de fumier ont été réalisés sur l'ensemble des parcelles avant le semis. Quant à celle mise en place en 2007, elle a été conduite après une jachère de 3 ans. Les semences ont été préalablement traitées au

fongicide Spinox-T (Captafol 10%, Benomyl 10%, Carbofuran 20%) avant chaque semis en humide. Le démariage s'est fait à 3 plants par poquet. En 2006, un épandage d'engrais N-P-K (20-10-10) en raison de 150 kg.ha⁻¹ a eu lieu au 11^{ème} jour après semis (JAS) (avec 1,21 kg pour les parcelles élémentaires de la densité de semis D1 ; 3,94 kg pour celles de la D2 et 8,21 kg pour celles de la D3, du fait de leurs dimensions variables). Deux apports d'urée à la dose de 50 kg.ha⁻¹ (à chacun des apports) ont été effectués. Ces apports d'urée ont eu lieu respectivement juste après le démariage au 16^{ème} JAS et au 37^{ème} JAS correspondant à la période de montaison du SOUNA3 et de tallage du SANIO (avec 0,405 kg.ha⁻¹ pour la D1 ; 1,31 kg.ha⁻¹ pour la D2 et 2,73 kg.ha⁻¹ pour la D3). En 2007, un épandage d'engrais de même quantité a été fait sur toutes les parcelles au semis, selon les dimensions des parcelles des densités D2 (265 m²), comme référence.

Ainsi, il a été appliqué 200 kg.ha⁻¹ de N-P-K (6-20-10) en raison de 4 kg par parcelle élémentaire ; 1,9 kg d'urée par parcelle et de 0,8 kg de K₂O (sulfate de potassium) par parcelle. Deux apports d'urée à la dose de 50 kg.ha⁻¹ (1,325 kg par parcelle) ont été effectués respectivement au début du tallage et à la montaison. Les sarclo-binages, les traitements phytosanitaires et la protection anti-aviaire ont été assurés, afin de minimiser les contraintes sur les cultures.

Les essais ont été conduits en conditions d'évapotranspiration maximale avec des irrigations de complément. Cependant, en 2007 il y a eu une défaillance du système d'irrigation à la floraison du SANIO et les plantes ont été confrontées à un stress en fin de cycle.

Mesures et observations

Biomasses aériennes et surfaces foliaires

Les biomasses aériennes et surfaces foliaires ont été déterminées de façon hebdomadaire sur chaque parcelle élémentaire, à partir de mesures effectuées sur

6 poquets prélevés par parcelle à chaque date d'observation. Pour les biomasses aériennes on a distingué les biomasses (i) des tiges (comprenant les plateaux de tallage bien nettoyés des racines et du sol), (ii) des feuilles vertes, (iii) des feuilles sénescentes et/ou sèches, et (iv) des chandelles. La distinction entre « feuilles vertes » et « feuilles sénescentes et/ou sèches » était faite visuellement sur le terrain au moment des mesures de rayonnement transmis en distinguant la strate de feuilles « vraiment vertes » et en déterminant sa limite inférieure. Cependant, à partir d'un moment il ne devient plus possible, du fait de la progression de la sénescence, de distinguer une strate « réellement verte », et on a considéré alors comme « feuilles vertes » les feuilles avec moins de 25% de sénescence. Les surfaces foliaires des feuilles vertes ont été mesurées, tout de suite après séparation des tiges au laboratoire, à l'aide d'un planimètre Delta-T MK2 (type AMS, Devices, Ltd, Cambridge, England). Les biomasses ont été pesées après un pré-séchage dans une serre pendant plusieurs jours (voire semaines) puis un passage à l'étuve à 65 °C durant 48 heures. Les indices de surface foliaire (*leaf area index* (LAI)) ont été déterminés en tenant compte des surfaces moyennes occupées par les poquets, en relation aux densités de semis de poquets à l'hectare, par la relation suivante :

$$LAI = \text{surface foliaire poquet} / (\text{10000} / \text{densité de poquets}) \quad \dots (2)$$

Rayonnements incidents et autres paramètres climatiques

Les paramètres climatiques journaliers standards (températures maximale et minimale, humidités relatives maximale et minimale, vitesse moyenne du vent, durée d'insolation) ont été recueillis au niveau de la station météorologique de Bambey (station faisant partie du réseau nationale de la météorologie du Sénégal) située à environ 100 m de l'essai. Le rayonnement solaire (rayonnement global, Rg) journalier a été directement mesuré à l'aide d'un capteur

Delta-T ES2 monté sur une station météorologique automatique Delta-T, avec des mesures toutes les 15 minutes. La qualité des données fournies par ce capteur a été vérifiée par comparaison avec un capteur de référence (CNR1 Kipp et Zonen) placé en parallèle sur le site, de juillet à décembre 2007. Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), correspondant à la partie visible (400 à 700 nm) du rayonnement global (Bonhomme, 1994), a été estimé à partir des valeurs de rayonnement global (Rg). D'après la littérature le PAR représente en moyenne 48% à 50% du Rg (Kiniry, 1999; Sinclair et Muchow, 1999; Bonhomme, 2000; Tsubo et al., 2005). Nous avons considéré une valeur de 48% établie par Bégué et al. (1991) en saison des pluies au Niger dans des conditions proches des nôtres. Nous avons donc déterminé le PAR par l'équation suivante :

$$PAR = 0,48 \times Rg \quad \dots (3)$$

Rayonnement PAR transmis (PART) et absorbé par le couvert (PARa)

La fraction du rayonnement photosynthétiquement actif incident (PAR) absorbée par le couvert (PARa) a été déterminée, en l'assimilant à la fraction interceptée par le couvert (PARi) et en négligeant la fraction réfléchiée par le couvert vers le ciel (Bonhomme, 2000; Van Oosterom et al., 2002). Sous ces hypothèses usuelles, on peut écrire :

$$PARa = PARi = PAR - PART \quad \dots (4)$$

$$FPARt = PART / PAR \quad \dots (5)$$

$$PARa = PARi = PAR \times (1 - FPARt) \quad \dots (6)$$

$$FPARi = PARi / PAR \quad \dots (7)$$

$$FPARi = 1 - FPARt \quad \dots (8)$$

où PART est le rayonnement qui arrive au sol, dit rayonnement transmis, FPARt la fraction du rayonnement incident transmis au sol, et FPARi la fraction du rayonnement incident interceptée par le couvert.

Les mesures des rayonnements incidents (PAR) et transmis au sol (PART) ont été réalisées en 2006 par un Sunfleck Ceptometer (Decagon devices, Inc., Pullman, Wa) et en 2007 par un SunScan Delta-T

Canopy Analysis System (SS1-UM-1.05, Delta-T Devices LTD, Cambridge CB5 OEJ, U.K). Ces deux appareils donnent des mesures du PAR exprimées en MJ.m⁻². Les mesures ont été faites hebdomadairement, en parallèle aux mesures de biomasses et surfaces foliaires, entre 11 heures et 14 heures quand le rayonnement solaire est pratiquement au zénith. Pour chaque parcelle on a procédé à chaque fois à 3 séquences successives de mesures constituées chacune d'une mesure au dessus du couvert du rayonnement incident (PAR) suivie de 4 mesures du rayonnement transmis arrivant au sol (PARt). Les mesures de PARt ont été effectuées en diagonale entre les poquets de façon à intégrer la variabilité spatiale du rayonnement transmis. Une autre mesure du rayonnement incident a été faite au dessus du couvert pour contrôler une éventuelle variation du rayonnement incident au cours de la séquence. En fait, les mesures en dessous du couvert ont, à partir d'un moment, été faites à une certaine hauteur au dessus de la strate foliaire sénescence ou sèche, de façon à ne tenir compte que de l'interception par les feuilles vertes. A partir d'un moment, quand la sénescence s'accroît, il est devenu difficile de distinguer réellement la strate verte et on a alors arrêté les mesures. Chaque séquence permet de déterminer une valeur de la fraction du rayonnement incident transmise au sol (FPARt) et les 3 valeurs obtenues sur chaque parcelle sont moyennées pour déterminer la valeur moyenne de FPARt de la parcelle, à la date d'observation.

Coefficient d'extinction de la lumière (Kdf) par le couvert végétal

Les valeurs de Kdf ont été ponctuellement déterminées à partir des mesures de LAI et de FPARt sur la base des équations 1, 4 et 5 :

$$Kdf = - \ln (FPARt) / LAI \dots\dots (9)$$

Il s'agit des valeurs déterminées lorsque le soleil est au zénith (Kdf_{midi}). Or la littérature indique que ces valeurs sont plus petites que la valeur réelle moyenne du Kdf au

cours de la journée (Begue et al., 1991; Sinclair et Muchow, 1999; Van Oosterom et al., 2002; Sinclair, 2006). Pour estimer les valeurs moyennes journalières des Kdf (Kdf_{jour}) nous avons procédé à une correction de nos valeurs déterminées au zénith, en reprenant une équation empirique proposée par Sinclair (2006) :

$$Kdf_{jour} = 0,762 * Kdf_{midi} + 0,216 \dots\dots (10)$$

Certaines valeurs de Kdf, manifestement aberrantes (proches ou supérieures à 1), obtenues pour les toutes premières observations sur certaines parcelles des densités de semis D2 et D3 ont été écartées. En effet, ces valeurs ont été obtenues pour des LAI extrêmement faibles et, dans ces conditions, il est difficile d'obtenir des mesures précises du LAI et des fractions transmises (FPARt), et par ailleurs la moindre erreur de mesure a un effet important sur la valeur du Kdf.

Les Kdf_{jour} moyens au cours d'un cycle ont également été déterminés, en recherchant d'abord les valeurs moyennes de Kdf_{midi} permettant d'ajuster au mieux une relation conforme à l'équation (1), pour l'ensemble des valeurs observées de LAI et de fractions de rayonnement PAR interceptées (FPARi) mesurées à midi. Ainsi, l'optimisation de la valeur du paramètre Kdf_{midi} a été faite par la méthode classique de la minimisation de la somme des écarts au carré entre les valeurs mesurées de FPARi et les valeurs estimées par l'équation (1) pour le LAI correspondant. Une fois le Kdf_{midi} moyen déterminé, on l'a corrigé à l'aide de l'équation (10) pour estimer le Kdf_{jour} moyen pour le cycle.

Efficiéce de conversion du rayonnement PAR en biomasse aérienne

Le suivi journalier du rayonnement global, l'équation (3), et les valeurs mesurées de LAI et Kdf_{jour} permettent de déterminer les quantités de rayonnement PAR absorbées par le couvert (PARa). Les valeurs hebdomadaires des biomasses aériennes permettent de déterminer les productions de biomasses, d'une date à l'autre. En rapportant la

production de biomasse aérienne entre 2 dates quelconques à la quantité de rayonnement PAR absorbée entre ces deux dates, on peut donc déterminer des valeurs d'efficacité de conversion (eb) du rayonnement PAR absorbé en biomasse aérienne.

On a également déterminé les valeurs moyennes sur le cycle des efficacités de conversion en établissant des régressions linéaires entre les jeux de valeurs de variation de biomasse, entre deux dates et les quantités de rayonnement PAR absorbées par le couvert, entre ces mêmes dates (Lafarge et Hammer, 2002; Lindquist et al., 2005).

Analyses statistiques

Le logiciel Statistix 8.1 (Analytical, 2005) a été utilisé pour les différentes analyses de la variance (ANOVA).

RESULTATS

Evolutions des biomasses aériennes et LAI

Les évolutions des LAI ont été semblables, en termes de dynamiques et de différences entre variétés, densités de semis et années, à celles des biomasses foliaires et des biomasses aériennes. Pour cela, nous avons donc choisi de ne montrer ici que celles des LAI. Ainsi, les valeurs de LAI ont été plus élevées en 2007 qu'en 2006 chez les deux variétés, avec également un développement plus rapide en 2007 (Figure 1). Pour chaque année, on note par ailleurs des valeurs de LAI plus élevées pour la variété SANIO que pour la variété SOUNA3. Les valeurs de LAI obtenues en 2007 pour la variété de mil SANIO ont été particulièrement plus élevées, avec des valeurs de 6 en D2 et de 9 en D1. En 2006, aussi bien chez la variété SOUNA3 que chez la variété SANIO, l'effet de la densité de semis a été significatif sur le LAI (Figures 1a et b), du 46^{ème} JAS (avant la montaison) au début de l'épiaison. En 2007, l'effet de la densité de semis sur le LAI a été observé aussi bien chez la variété SOUNA3 que chez la variété SANIO (Figure 1c et d), à partir du 27^{ème} JAS (avant la montaison). Le LAI a été plus élevé en D1 qu'en D2, et plus en D2

qu'en D3, à partir de ces dates (JAS) ; cela, même si par poquet les plantes ont développé moins de surface foliaire en D1 qu'en D2, et moins en D2 qu'en D3 (résultats non montrés).

Evolutions des fractions de rayonnement transmises au sol (FPART)

Les fractions de lumière transmises au sol (FPART) diminuent régulièrement au cours des cycles, à partir d'une valeur maximale proche de 1 en début de cycle pour atteindre des valeurs minimales autour de la floraison pour la variété SOUNA3 (Figures 2a et c) et avant la floraison pour la variété SANIO (Figures 2b et d). Elles ré-augmentent légèrement par la suite plus en SANIO. Pour une même date d'observation, les différences observées entre les densités de semis (FPART plus faibles en D1 qu'en D2 et plus faibles en D2 qu'en D3), entre les variétés (plus faibles en SANIO qu'en SOUNA3), et entre les années (plus faibles en 2007), ont été conformes aux différences constatées entre les développements des couverts (Figures 1a, b, c et d). En 2006 les valeurs initiales ont été très proches entre elles, malgré les différences entre les densités de semis. Cependant, les valeurs se différencient plus rapidement et plus clairement en 2007, pour les deux variétés.

Evolutions des Kdf_{jour}

Les valeurs du Kdf_{jour} ont évolué très peu au cours du cycle en 2006 pour les deux variétés (Figures 3a et b). Les mêmes évolutions sont observées en 2007, les valeurs de Kdf ont augmenté légèrement au cours du cycle chez le SOUNA3, pour diminuer bien après la floraison (Figure 3c). Chez le mil SANIO, elles ont augmenté un peu en début de cycle, puis diminué ensuite, ce avant la floraison (Figure 3d). La densité de semis n'a pas eu d'effet significatif sur les valeurs de Kdf_{jour} : seules quelques valeurs ponctuelles observées chez SANIO, avec la densité D3 diffèrent des autres. En général les valeurs de Kdf_{jour} ont été un peu plus faibles en D3

qu'avec les autres densités de semis. Par contre elles n'ont pas été toujours plus faibles en D2 qu'en D1. En 2006, les Kdf_{jour} moyens ont varié entre 0,4 et 0,56, pour la variété de mil SOUNA3 et entre 0,37 et 0,55, pour la variété SANIO. En 2007, ils ont varié entre 0,38 et 0,68, pour la variété SOUNA3 et entre 0,36 et 0,54, pour la variété SANIO.

Lorsque l'on met en relation les valeurs de Kdf_{jour} avec celles de LAI, en faisant également la distinction entre les valeurs obtenues avant épiaison et celles obtenues après (Figures 4a et 4c), on observe pour les deux variétés une corrélation positive entre les valeurs de Kdf_{jour} et celles de LAI, qui est d'ailleurs beaucoup plus importante pour le SOUNA3 que pour la SANIO. Pour un même LAI, les valeurs de Kdf_{jour} sont plus élevées quand il y a des panicules, et il n'y a pas de différence en relation aux densités. Il pourrait donc y avoir un effet des panicules sur le Kdf. Cependant, lorsque l'on se rapporte aux jours après semis, on peut noter que les valeurs de Kdf_{jour} augmentent régulièrement au cours du cycle, avec une tendance plus forte chez SOUNA3 que chez SANIO.

Toutefois, c'est plutôt « l'évolution en âge » qui pourrait expliquer le fait que les valeurs de Kdf ont été plus importantes quand il y a des panicules (Figures 4b et 4d). On note que ces variations ont été plus marquées chez le mil SOUNA3 que chez le SANIO, pour lequel les valeurs de Kdf ont évolué assez peu. On peut retenir également que pour un même LAI ou pour une même date d'observation, les Kdf ont été très légèrement supérieurs chez le SOUNA3 que chez le SANIO (comparaisons directes non montrées).

Valeurs moyennes des Kdf

Les valeurs moyennes de Kdf_{jour} déterminées par ajustements (Figures 5a et b) pour les deux variétés et sur l'ensemble des données disponibles ont été égales à 0,52 pour le SOUNA3 et 0,44 pour le SANIO. On peut cependant penser que la valeur déterminée pour le SANIO est légèrement sous-estimée

dans la mesure où il y a peu d'observations après épiaison dans notre jeu de données. Ainsi, chez le SOUNA3 la valeur moyenne de Kdf_{jour} a été égale à 0,46, seulement si l'on écarte les valeurs mesurées après épiaison, soit un écart de 0,06 par rapport à la valeur moyenne générale. Il n'est pas possible d'estimer de combien la valeur du Kdf_{jour} moyen a été sous-estimée pour le SANIO, mais certainement elle l'a été de moins que 0,06. Ceci, parce qu'il a été vu que les valeurs ont évolué moins chez le SANIO que chez le SOUNA3. La valeur moyenne du Kdf_{jour} du mil SANIO pourrait donc se situer autour de 0,47-0,48.

Evolutions des efficacités de conversion

Les valeurs des efficacités de conversion (ϵb) ponctuellement déterminées entre deux dates d'observation ont été affectées d'une forte variabilité (Figures 6a, b, c et d). Elles ont augmenté au cours de la phase végétative, pour diminuer après la floraison. Les valeurs mesurées avec la densité de semis D1 ont été souvent plus importantes que celles obtenues avec D2 et D3. Cependant, les différences n'ont pas été significatives, sauf pour une seule valeur sur le SOUNA3, en 2006 et 2007 (Figure 6a et c). Les valeurs maximales ponctuellement observées ont été de 5,2 g.MJ⁻¹ et 7,4 g.MJ⁻¹, respectivement chez les variétés SOUNA3 et SANIO en 2006, et de 5,9 g.MJ⁻¹ et 4,2 g.MJ⁻¹ respectivement en 2007. On constate que les valeurs mesurées chez le SANIO en 2007 ont été plus faibles qu'en 2006. C'est pareil pour la variété SOUNA3, si l'on négligeait le seul point plus élevé de la densité de semis D1 (entre le 50^{ème} et le 60^{ème} JAS).

Valeurs moyennes des (ϵb)

L'établissement des régressions linéaires, pour déterminer les valeurs moyennes des efficacités de conversion (Figures 7a, b, c et d), confirme que les efficacités ont été plus importantes pour le traitement D1 que pour les traitements D2 et

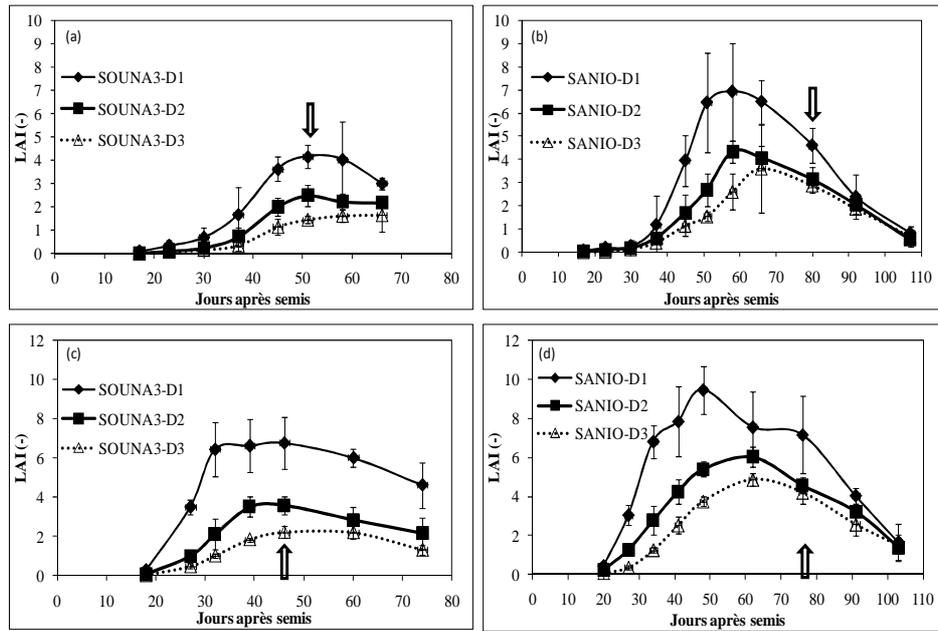


Figure 1: Evolutions des indices de surface foliaire (LAI), en relation aux densités de semis : variétés de mil SOUNA3 (a = 2006 et c = 2007) et SANIO (b = 2006 et d = 2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison.

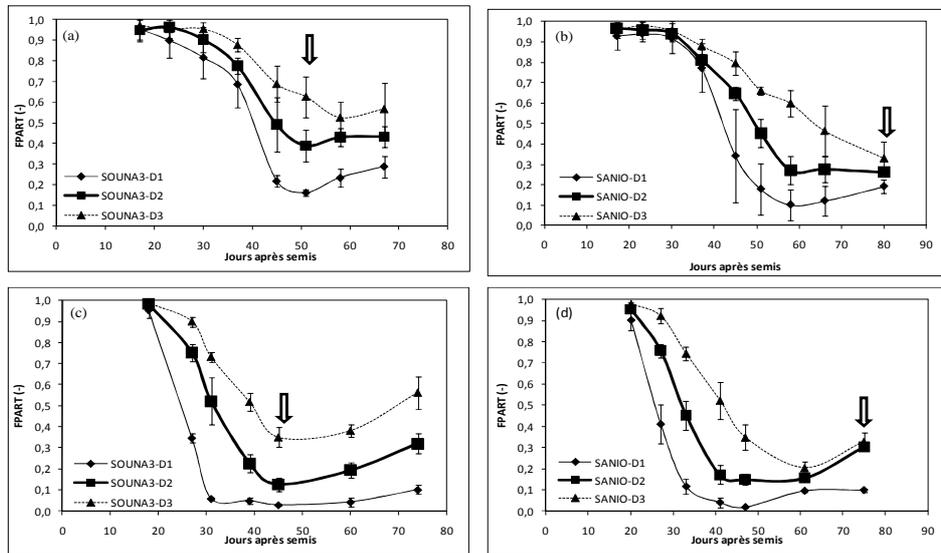


Figure 2: Evolutions des fractions de rayonnement PAR transmis au sol (FPART) à midi, en relation aux densités : SOUNA3 (a = 2006 et c = 2007) et SANIO (b = 2006 et d = 2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison.

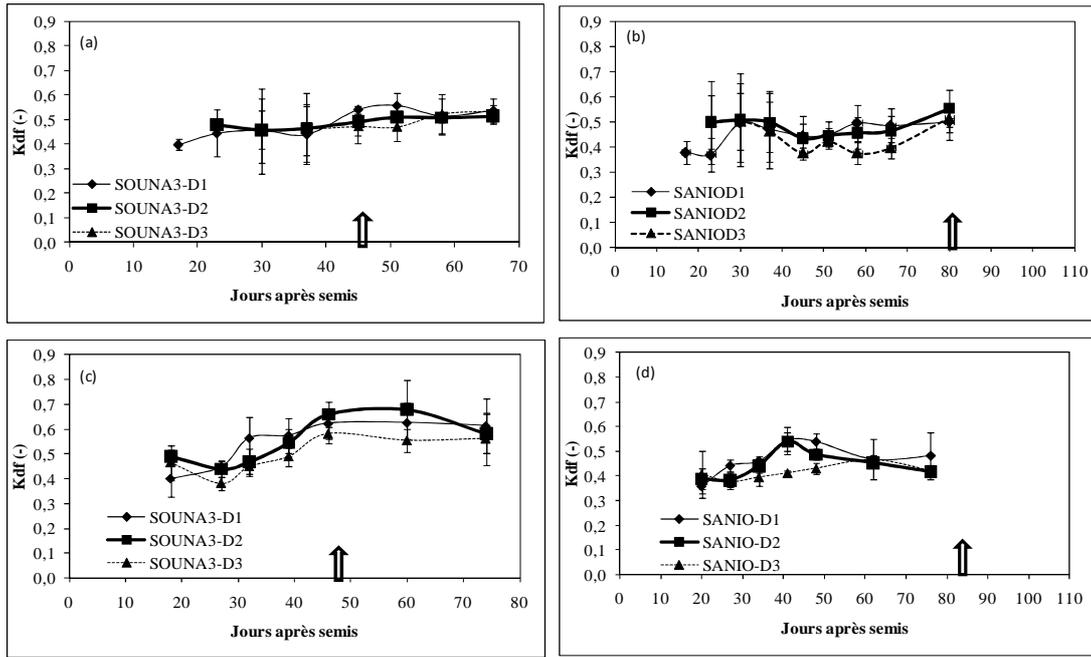


Figure 3: Evolutions des Kdf_{jour} , en relation aux densités de semis D1, D2 et D3 : variétés de mil SOUNA3 (a = 2006 et c = 2007) et SANIO (b = 2006 et d = 2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison.

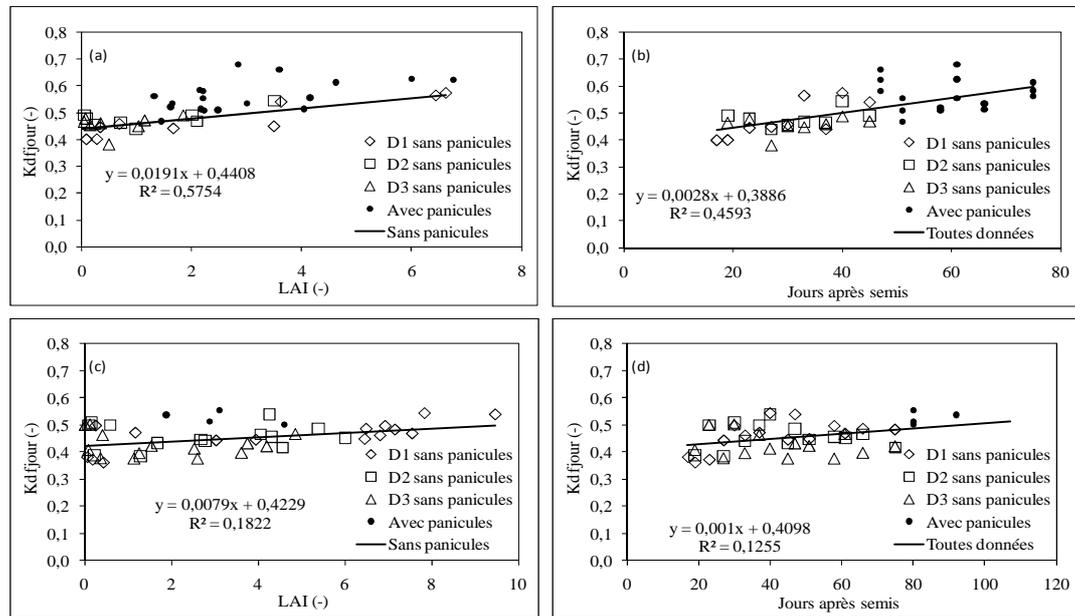


Figure 4: Valeurs de Kdf_{jour} en relation au LAI, à l'âge, à la densité de semis et à la présence ou pas de panicules : SOUNA3 (a et b) et SANIO (c et d). Les points ronds noirs (avec panicules) représentent les valeurs moyennes de Kdf des trois densités de semis confondues.

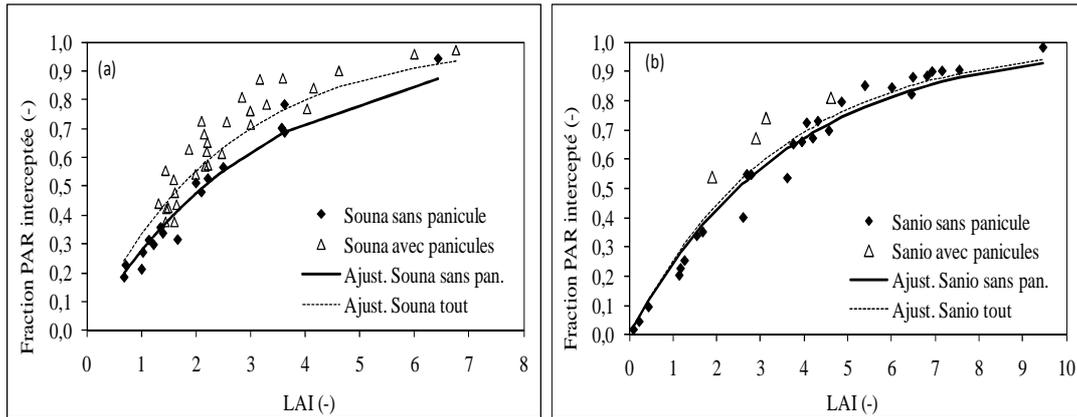


Figure 5: Ajustements entre la fraction de PAR interceptée (FPARi) et le LAI, en distinguant avec et/ou sans panicules : SOUNA3 (a) et SANIO (b).

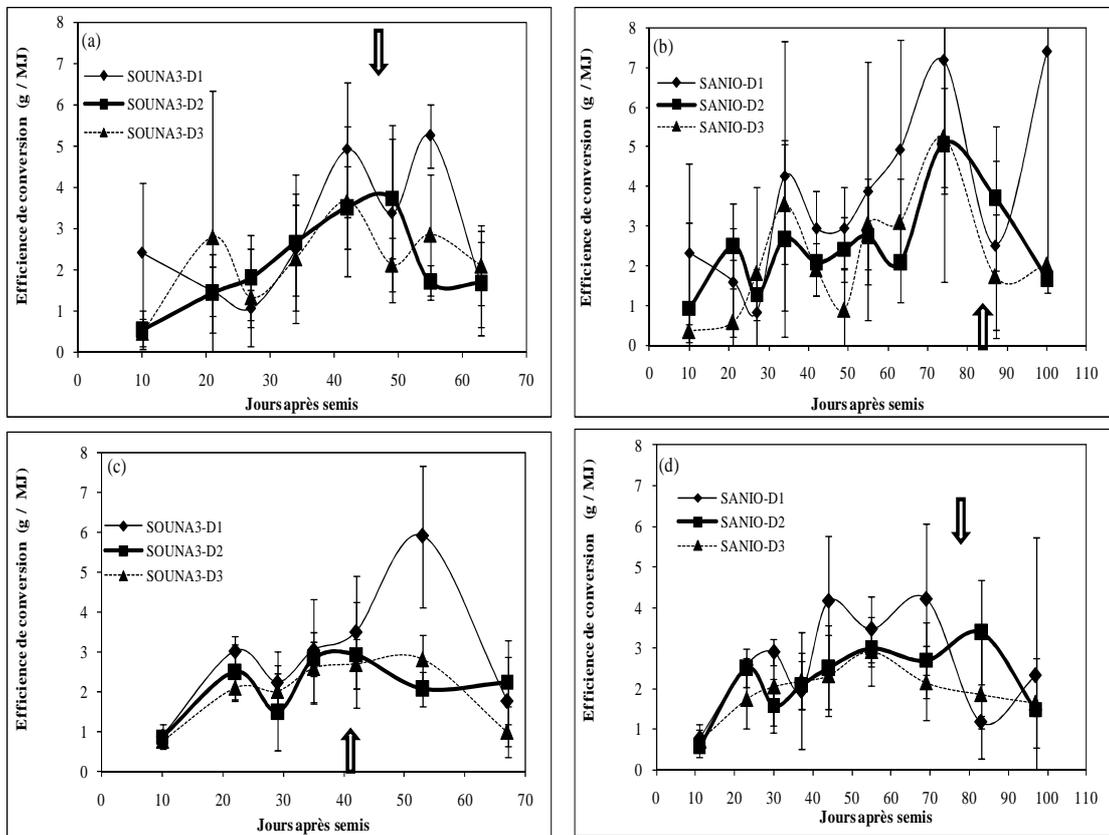


Figure 6: Evolutions des efficacités de conversion (ϵ_b) en relation aux densités de semis D1, D2 et D3 : SOUNA3 (a = 2006 et c = 2007) et SANIO (b = 2006 et d = 2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison.

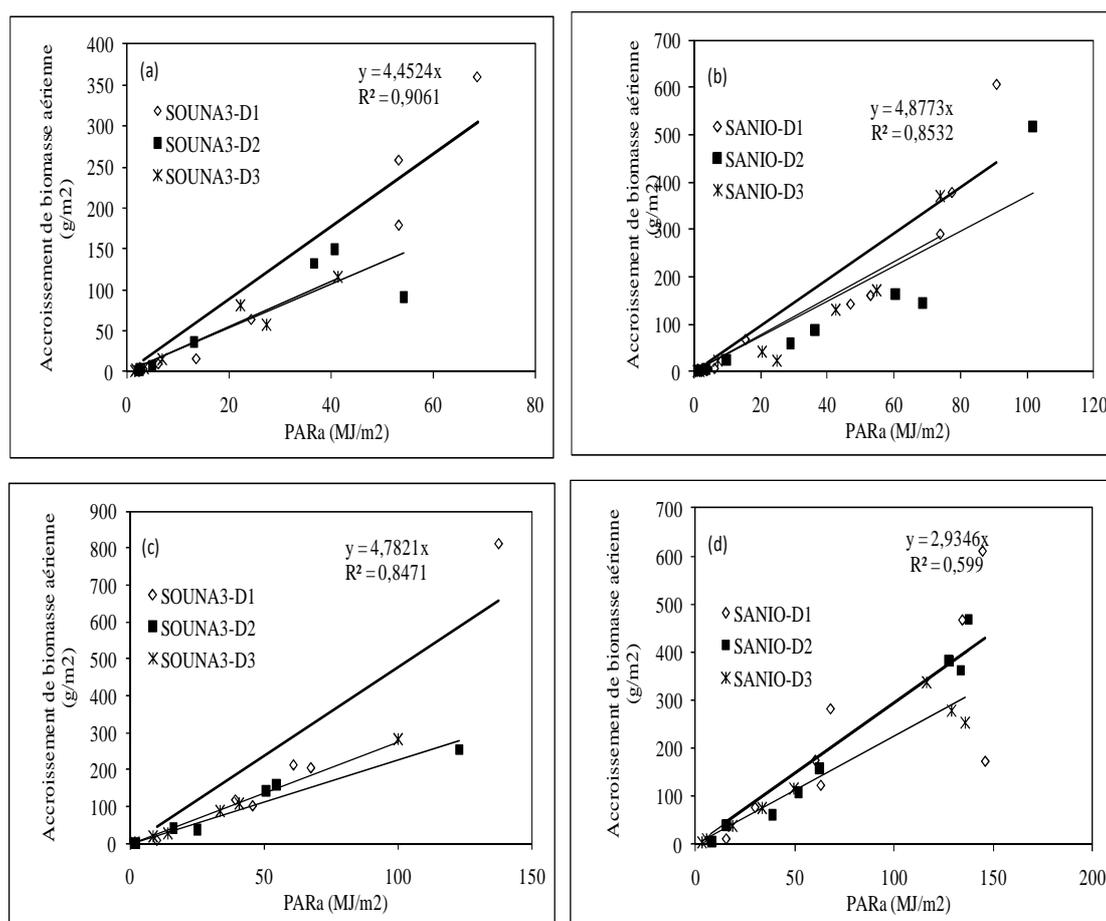


Figure 7: Relations linéaires entre les accroissements de biomasse aérienne (g.m^{-2}) et les rayonnements PAR absorbés (MJ.m^{-2}) entre deux dates d'observation avant épiaison : SOUNA3 (a = 2006 et c = 2007) et SANIO (b = 2006 et d = 2007). En trait épais : traitement D1. En trait simple : traitements D2 et D3. Seules les équations correspondantes au traitement D1 sont indiquées.

D3, sauf pour le SANIO en 2007 qui présente des efficacités faibles. Les efficacités moyennes déterminées sur la période levée-épiaison pour le traitement D1 ont été en 2006 de $4,45 \text{ g.MJ}^{-1}$ et $4,88 \text{ g.MJ}^{-1}$, respectivement chez les variétés SOUNA3 et SANIO, et de $4,78 \text{ g.MJ}^{-1}$ et $2,93 \text{ g.MJ}^{-1}$ respectivement en 2007. Les efficacités moyennes déterminées sur les traitements D2 et D3 ont été plus faibles : les meilleures ont été $2,67 \text{ g.MJ}^{-1}$

(SOUNA3-D3) et $3,87 \text{ g.MJ}^{-1}$ (SANIO-D2), en 2006 et $2,77 \text{ g.MJ}^{-1}$ (SOUNA3-D3), en 2007.

DISCUSSION

Biomasses aériennes et LAI

Chez les deux variétés et pour toutes les densités de semis, les développements des biomasses aériennes et LAI ont été plus importants en 2007 qu'en 2006, et plus

rapides également en début de cycle en 2007. D'après nos observations de terrain le retard de développement constaté en 2006 s'explique certainement par un manque d'azote lors des premières semaines, du fait de l'application tardive de fumier sur les parcelles. A cela nous pouvons ajouter l'effet des précédents culturaux qui ont été différents entre 2006 et 2007. Des valeurs de LAI, plus élevées dans les fortes densités de semis ont également été obtenues par d'autres auteurs (Westgate et al., 1997; Maddonni et al., 2001; Tabo et al., 2002). Le fort taux de recouvrement foliaire, au niveau des densités de semis élevées, entraîne une fermeture rapide du couvert, qui augmente leur LAI (Ayaz et al., 2004).

Fractions de rayonnement transmises au sol (FPART)

Les évolutions des fractions de rayonnement transmises au sol (FPART) sont à mettre en relation avec celles des LAI : la diminution des valeurs de FPART au cours du cycle s'explique par l'augmentation du taux de couverture des plants, et par ailleurs on note également l'effet de la densité. Ces résultats sont parfaitement logiques et en accord avec ceux de Westgate et al. (1997) et Anda et Loke (2005). Par ailleurs, pour une même densité, la diminution des valeurs de FPART est plus forte chez la variété SANIO, du fait de son fort développement.

Coefficients d'interception (Kdf)

Nos résultats rejoignent ceux de certains auteurs qui ont montré que le Kdf varie entre 0,40 et 0,66, dans un couvert très développé de culture de maïs en zone tempérée au cours du cycle (Fernando et al., 2000; Tsubo et Walker, 2002; Birch et al., 2003; Lizaso et al., 2003; Lindquist et al., 2005). D'après Lizaso et al. (2003) les faibles valeurs de Kdf obtenues en début de cycle

sont dues au fait qu'à ce stade les feuilles sont pratiquement en position verticale et plus concentrées dans la couronne foliaire, ce qui ne leur permet pas d'intercepter beaucoup de rayonnement.

Par ailleurs la densité de semis n'a pas eu d'effet sur l'évolution du Kdf au cours des cycles. Anda et al. (2005) ont montré chez le maïs qu'il existerait une différence entre les densités de semis et les variétés, mais cette différence ne serait pas significative. Pour Maddonni et al. (2001), la densité de semis aurait un impact réel sur le Kdf, pour les plants qui se développent à une densité de peuplement qui n'a pas atteint le LAI critique. Ceci pourrait s'expliquer par l'effet de la géométrie de semis sur le LAI et par conséquent sur le coefficient d'interception (Flénet et al., 1996; Maddonni et al., 2001; Stewart et al., 2003; Lindquist et al., 2005).

L'étude de la relation entre le Kdf_{jour} et le LAI ainsi que celle entre Kdf_{jour} et l'âge de la culture ont montré l'existence de corrélation positive entre ces paramètres. Elle a également montré que les valeurs de Kdf ne sont pas directement affectées par la densité de semis, mais elles augmentent plutôt en relation au degré de développement du couvert (importance du LAI) et probablement au stade de développement (âge) de celui-ci. Lizaso et al. (2003) ont montré que seul le stade phénologique affecte le Kdf, et que ni la variété, ni l'espacement entre rang et ni la densité de peuplement n'affectent l'évolution du Kdf. De même, Lindquist et al. (2005) ont observé sur le maïs un effet du stade de développement sur l'évolution moyenne globale du Kdf, pour la période comprise entre la levée et la floraison ($Kdf = 0,49$) puis entre la floraison et la maturité physiologique ($Kdf = 0,70$), avec une tendance à l'augmentation des valeurs du Kdf.

Nous pouvons soupçonner un effet des chandelles sur le Kdf, mais nous n'avons pas les données pour le démontrer formellement. Tetio et Gardner (1988) de même que Gallo et al. (1993) ont montré l'effet de l'épi chez le maïs, mais chez le maïs il y a présence de feuilles au-dessus de l'épi. De fait, on ne pourrait démontrer une influence directe des panicules sur le Kdf qu'en comparant des mesures avec et sans panicules (après les avoir coupées). On retiendra donc que les valeurs de Kdf ne sont pas directement affectées par la densité, mais qu'elles augmentent en relation au degré de développement du couvert (importance du LAI) et également semble-t-il avec le stade de développement (âge) de celui-ci.

Les valeurs moyennes de Kdf_{jour} déterminées par ajustement se rapprochent des valeurs de 0,57 et 0,63 respectivement déterminées par Jovanovic et Annandale (1997) et par van Oosterom et al. (2002), qui semblent avoir été établies en incluant des observations avec présence de chandelles. La littérature indique des valeurs moyennes de Kdf plus importantes sur le sorgho de 0,56 pour Lafarge et Hammer (2002). Sur maïs, Gallo et al. (1993) ont déterminé une valeur de Kdf de 0,52. Lindquist et al. (2005) ont obtenu des évolutions moyennes globales du Kdf de 0,49 pour la période comprise entre la levée et la floraison puis une valeur moyenne de Kdf de 0,67 au cours du cycle.

Nous retiendrons donc que nos observations donnent des Kdf qui ont tendance à augmenter au cours du cycle, en relation au développement foliaire jusqu'à l'épiaison. Toutefois nous n'avons pas observé de différence significative entre densités et variétés, même si les Kdf observés chez la variété SOUNA3 sont légèrement plus importants que ceux de la variété SANIO.

Efficiences de conversion (ϵb)

Nos résultats corroborent ceux de Varlet-Grancher et al. (1982) qui ont montré, chez le maïs, que l'efficacité de conversion calculée sur des périodes courtes peut être très variable au cours du cycle. Selon Ayaz et al. (2004) cette variation s'expliquerait par la variabilité de l'intensité des processus physiologiques (respiration, croissance) au cours du cycle. La diminution de l'efficacité de conversion à partir de la floraison serait due à la sénescence foliaire et à la remobilisation des protéines vers les épis (Gosse et al., 1986).

Les densités élevées (D1) présentent des valeurs d'efficacité de conversion plus fortes que celles faibles (D2 et D3) : cela montre que l'on n'a pas atteint le potentiel physiologique sur les densités de semis D2 et D3. Ayaz et al. (2004) ont également obtenu des coefficients de conversion élevés au niveau des plants de forte densité de semis.

Par ailleurs la variété SANIO présente les valeurs maximales de (ϵb) les plus élevées, sauf en 2007, du fait du déficit hydrique observé en fin de cycle. L'effet de la réduction de l'efficacité de conversion par le déficit hydrique a été montré par Farre et al. (2000) et Anda et Loke (2005) sur maïs. Nos résultats corroborent par ailleurs ceux de Major et al. (1991) et Westgate et al. (1997) qui ont montré, chez le maïs, que les (ϵb) sont plus élevés chez les variétés à cycle long que chez celles à cycle court. Ces valeurs pourraient être attribuées au statut nutritif (niveau de la fertilité du sol et la disponibilité en eau) et aux potentialités intrinsèques de la variété à développer plus de feuilles. Lecoeur et Ney (2003) ont montré que (ϵb) serait aussi lié au niveau de développement de la plante qui est lui-même dépendant du niveau de la fertilité du sol, de la disponibilité en eau, de l'activité

photosynthétique et des conditions phytosanitaires.

Les valeurs moyennes d'efficacité de conversion obtenues sur la forte densité de semis (D1) sont du même ordre, mais légèrement plus élevées que celles mentionnées dans la littérature sur la période levée-floraison. En effet, si l'on considère le rayonnement global intercepté, on a obtenu des valeurs moyennes du même ordre que celles obtenues (2 g.MJ^{-1} et $2,5 \text{ g.MJ}^{-1}$) par Ong et Monteith (1985). Par ailleurs, Reddy et Willey (1981) ont obtenu une valeur de $2,0 \text{ g.M}^{-1}$ contre une valeur de $1,90 \text{ g.MJ}^{-1}$ obtenue par Van Oosterom et al. (2002). Quant à Alagarswamy et Bidinger (1985) ils ont obtenu des valeurs de $2,43 \text{ g.MJ}^{-1}$, pour le mil haut et de $2,10 \text{ g.MJ}^{-1}$, pour le mil nain. Ajoutons que Begue et al. (1991) a déterminé en milieu paysan au Niger des valeurs de l'ordre de $1,5 \text{ g.MJ}^{-1}$ de biomasse aérienne en relation au R_g intercepté. Chez le sorgho, Lafarge et Hammer (2002) ont montré que cette relation était indépendante de la densité de semis, avec une valeur moyenne de (ϵ_b) de $1,24 \text{ g.MJ}^{-1}$ de R_g intercepté.

Conclusion

Les valeurs de coefficients d'interception (Kdf) et d'efficacité de conversion (ϵ_b) que nous avons déterminées sont du même ordre que celles de la littérature. Les valeurs de Kdf ont eu tendance à augmenter au cours des cycles, en relation au développement foliaire jusqu'à l'épiaison. Les valeurs n'ont pas différé de façon significative, aussi bien en relation aux densités de semis qu'en fonction des variétés. Cependant les Kdf observés chez la variété SOUNA3 sont légèrement plus importants que ceux de la variété SANIO. Les densités de semis élevées (du genre D1) présentent des

valeurs d'efficacité de conversion plus fortes que les faibles densités (du genre D2 et D3).

Il serait important de démontrer dans des études futures l'influence directe des panicules sur le Kdf en comparant des mesures avec et sans panicules (après les avoir coupées). Pour les études de comparaison des efficacités de conversion, il faudra tenir compte des précédents culturaux qui pourraient avoir une influence sur la fertilité des sols, car entraînant une hétérogénéité de la fertilité du sol d'une parcelle à une autre.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à l'appui financier du projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine). Nos remerciements vont à l'endroit du DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst ou German academic exchange service) pour la bourse octroyée au premier auteur. Nos remerciements vont également à l'endroit d'Ibrahima N'DONG du service technique du CERAAS à Bambey (Sénégal) et à travers lui tous les autres agents dudit service

REFERENCES

- Affholder F. 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semi arid regions. *Field Crops Research*, **52**: 79-93.
- Alagarswamy G, Bidinger FR. 1985. The influence of extended vegetative development and d2 dwarfing gene in increasing grain number per panicle and grain yield in pearl millet. *Field Crops Research*, **11**: 265-279.
- Analytical S. 2005. Statistix 8.1. In. www.statistix.com.
- Anda A, Loke Z. 2005. Radiation Balance Components of Maize Hybrids Grown at Various Plants densities. *J. Agronomy & Crop Science*, **191**: 202-209.

- Ayaz S, McKenzie BA, McNeil DL, Hill GD. 2004. Light interception and utilization of four grain legumes sown at different plant populations and depths. *Journal of Agricultural Sciences*, **142**: 297-308.
- Begue A, Desprat JF, Imbernon J, Baret F. 1991. Radiation use efficiency of pearl millet in the sahelian zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, **56**: 93-110.
- Birch CJ, Vos J, Van Der Putten PEL. 2003. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperate environment in the field. *European Journal of Agronomy*, **19**: 173-188.
- Bonhomme R. 1994. Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal. In *Agronomie Moderne - Bases Physiologiques et Agronomiques de la Production Végétale*, Hatier (ed). APELF-UREF ; 25-48.
- Bonhomme R. 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. *Field Crops Research*, **68**: 247-252.
- Cavéro J, Farre I, Debaeke P, Faci JM. 2000. Simulation of Maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT Models. *Agron. J.*, **92**: 679-690.
- Craufurd PQ, Bidinger FR. 1988. Effect of the duration of the vegetative phase on crop growth, development and yield in two contrasting millet hybrids. *J. Agric. Sci. Camb.*, **110**: 71-79.
- Denroy P, Thiebeau P, Gosse G. 2002. Une méthode pour estimer l'interception du rayonnement par un couvert bas: application au colza avant montaison. *OCL*, **9**: 54-63.
- Farre I, Van Oijen M, Leffelaar PA, Faci JM. 2000. Analysis of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain. *Eur. J. Agron.*, **12**: 225-238.
- Fernando HA, Otegui ME, Vega C. 2000. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agron. J.*, **92**: 92-97.
- Fischer KS, Wilson GL. 1975. Studies of grain production in Sorghum bicolor (L.Moench).V. Effects of planting density on growth and yield. *Aust. J. Agric. Res.*, **26**: 31-41.
- Flénet F, Kiniry JR, Board JE, Westgate ME, Reicosky DC. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *Agron. J.*, **88**: 185-190.
- Gallo KP, Daughtry CST, Wiegand CL. 1993. Errors in measuring absorbed radiation and computing crop radiation use efficiency. *Agron. J.*, **85**: 1222-1228.
- Gosse G, Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, Allirand J-M, Lemaire G. 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie Tropicale*, **6**: 47-56.
- Jovanovic NZ, Annandale JG. 1997. Measurement of radiant interception of crop canopies with the LAI-2000 plant canopy analyser. *S. Afr. J. Plant Soil*, **15**: 6-13.
- Kiniry JR. 1999. Response to questions raised by Sinclair and Muchow. *Field Crops Research*, **62**: 245-247.
- Lafarge TA, Hammer GL. 2002. Predicting plant leaf area production: shoot assimilate accumulation and partitioning, and leaf area ratio, are stable for a wide range of sorghum population densities. *Field Crops Research*, **77**: 137-151.

- Lecoœur J, Ney B. 2003. Change with time in potential radiation use efficiency in field pea. *Eur. J. Agron.*, **19**: 91-105.
- Lindquist JL, Arkebauer TJ, Walters DT, Cassman KG, Dobermann A. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agron. J.*, **97**: 72-78.
- Lizaso JI, Batchelor WD, Westgate ME, Echarte L. 2003. Enhancing the ability of CERES-maize to compute light capture. *Agric. Sys.*, **76**: 293-311.
- Maddonni GA, Chelle M, Drouet JL, Andrieu B. 2001. Light interception of contrasting leaf azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions : simulations and crop measurements. *Field Crops Research*, **70**: 1-13.
- Maddonni GA, Otegui ME. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Res.*, **48**: 81-87.
- Maddonni GA, Otegui ME, Cirilo AG. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Research*, **71**: 183-193.
- Major DJ, Beasley BW, Hamilton RI. 1991. Effect of maize maturity on radiation-use efficiency. *Agron. J.*, **83**: 895-903.
- Monteith JL, Huda AKS, Midya D. 1989. RESCAP : a resource capture model for sorghum and Pearl millet. *Modelling the Growth and the Development of Sorghum and Pearl Millet*, ICRISAT (ed). Research Bulletin, n° **12**; 30-34.
- Muchow RC, Davis R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in Semi-arid Tropical Environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.*, **18**: 17-30.
- Norman JM, Arkebauer TJ. 1991. Predicting canopy photosynthesis and light use efficiency from leaf characteristics. In *Modeling Crop Photosynthesis from Biochemistry to Canopy*, KJ Boote, RS Loomis (eds). CSSA Spec. Publ. 19. CSSA : Madison, WI; 75-94.
- Ong CK, Monteith JL. 1985. Response of pearl millet to light and temperature. *Field Crops Research*, **11**: 141-160.
- Payne WA, Wendt CW, Hossner LR, Gates CE. 1991. Estimating pearl millet leaf area and specific leaf area. *Agron. J.*, **83**: 937-941.
- Reddy MS, Willey RW. 1981. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut. *Field Crops Research*, **4**: 13-24.
- Sinclair TR. 2006. A Reminder of the Limitations in Using Beer's Law to Estimate Daily Radiation Interception by Vegetation. *Crop Sci.*, **46**: 2343-2347.
- Sinclair TR, Muchow RC. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.*, **65**: 215-263.
- Squire GR, Gregory PJ, Marshall B, Terry AC, Monteith JL. 1984. Response to temperature in a stand of pearl millet. VI. Light interception and dry matter production. *J. Exp. Bot.*, **35**: 599-610.
- Stewart DW, Costa C, Dwyer LM, Smith DL, Hamilton RI, Ma BL. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agron. J.*, **95**: 1465-1474.
- Tetio-Kagho F, Gardner FP. 1988. Responses of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. *Agron. J.*, **80**: 930-935.
- Tsubo M, Walker S. 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric. For. Meteorol.*, **110**: 203-215.

- Tsubo M, Walker S, Mukhala E. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Research*, **71**: 17-29.
- Tsubo M, Walker S, Ogindo HO. 2005. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions. I. Model development. *Field Crops Research*, **93**: 10-22.
- Van Oosterom EJ, O'Leary GJ, Carberry PS, Craufurd PQ. 2002. Simulating growth, development, and yield of till ring pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research*, **79**: 85-106.
- Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, Artis P. 1982. Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta. Oecol. Plant*, **17**: 3-26.
- Westgate ME, Forcella F, Reicosky DC, Somsen J. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US Corn Belt: Radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Research*, **49**: 249-258.