



Etude du développement et de la répartition de la biomasse chez deux variétés de mil de longueur de cycle différente sous trois densités de semis

[Study of development and distribution of biomass in two millet varieties with different maturity cycles under three different planting densities]

SIENE Laopé Ambroise Casimir^{1,2*}, Bertrand MULLER^{1,3}, AKE Séverin²

¹Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS, Thiès, Sénégal), B.P. 3320 Thiès-Escale, Sénégal, E-mail : ceraas@orange.sn; 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, Tel: (33) 4 67 61 58 00, www.cirad.fr, France Montpellier, France Montpellier, France

*Contact des auteurs: silamca@yahoo.fr (+ bertrand.muller@cirad.fr; ake_severin@yahoo.fr; akes@ci.refer.org)
Original submitted on 19th August 2010. Published online at www.biosciences.elewa.org on November 8, 2010

RESUME

Objective : L'accumulation de matière sèche aérienne chez le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), à travers la production de talles est tributaire de la densité de semis et des conditions d'alimentation hydrique et minérale. Dans cette étude, l'effet de la densité de semis sur le développement et la croissance de deux variétés de mil de longueur de cycle différente, ainsi que son impact sur la répartition des biomasses (relations allométriques) ont été examinés.

Méthodologie et résultats : Les variétés SOUNA3 (améliorée de cycle court, 90 jours) et SANIO (traditionnelle de cycle long, 120 jours) ont été utilisées à 3 densités de semis (D1 = 40 000 plants. ha⁻¹; D2 = 12 346 plants. ha⁻¹ et D3 = 5 917 plants. ha⁻¹) en 2006 et 2007. Des mesures de hauteurs de plants, de nombre de talles et de production de biomasse sèche aérienne ont été effectuées. L'indice de surface foliaire (LAI) a été calculé à partir de mesure de surface foliaire. A la récolte, le rendement et ses composantes ont été déterminés. Les densités élevées ont produit les plus grandes biomasses sèches aériennes en g.m². Ce résultat est à mettre en relation avec le taux de tallage, qui a été plus élevé au m² au niveau de ces densités. La variété SANIO a produit le plus grand nombre de talles et par conséquent des valeurs de LAI et de biomasses végétatives plus élevées. La densité de semis n'a pas affecté la relation entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne chez la variété SOUNA3. Par contre, la relation entre le ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » et biomasse aérienne est affectée par la densité, quelque soit la variété.

Conclusion et application des résultats : La relation linéaire établie entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne serait influencée par la dynamique de tallage alors que le quotient (Biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison dépend de la densité de semis. Lorsqu'il n'y a pas de contrainte hydrique et de la fertilisation, on peut augmenter la densité fortement et augmenter le rendement, par contre les effets d'un stress seront d'autant plus négatifs avec une forte densité. On pourrait peut-être imaginer dans le futur des systèmes de culture où l'on commencerait avec une densité élevée, surtout si la saison démarre bien (ou que les prévisions climatiques sont optimistes), et en cas de

contrainte hydrique on procéderait à l'élimination de certains poquets (par exemple tu sèmes à 50 cm et ensuite tu élimines 1^e ligne sur 2) pour que les restants aient de l'eau pour terminer leur cycle. Il serait aussi intéressant de savoir jusqu'à quel stade de développement l'application d'engrais pourrait avoir un effet significatif sur le développement du mil. Cela permettrait de jouer, en plus de la densité, sur la fertilisation pour gérer le niveau de développement de la culture en fonction des pluies reçues et des prévisions pour la fin du cycle.

Mots clés : Mil, tallage, densité de semis, biomasse sèche aérienne, relation allométrique.

ABSTRACT

Objectives: Dry matter accumulation in millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) through the production of tillers is dependent on the planting densities and the supply of water and mineral nutrients. In this study, the effect of plant density on development and growth of two varieties of millet of different maturity cycles and its impact on the distribution of biomass (allometric relationship) were examined.

Methodology and results: Two varieties SOUNA3 (improved short-cycle, 90 days) and SANIO (traditional long-cycle, 120 days) were used at 3 planting densities (D1 = 40 000 hills.ha⁻¹, D2 = 12 346 hills.ha⁻¹ and D3 = 5 917 hills.ha⁻¹) in 2006 and 2007. Plant height, number of tillers and production of above ground dry matter were measured. The leaf area index (LAI) was calculated from measurements of leaf area. At harvest, yield and its components were determined. The results showed that high densities produced the greatest dry matter (g.m²). This result is correlated to the rate of tillering, which was higher per square meter at these densities. The variety SANIO produced the greatest number of tillers and hence values of LAI and vegetative biomass. The density did not affect the relationship between leaf dry matter and above ground dry matter for variety SOUNA3. On the other hand, the relationship between the ratio of "leaf dry matter / above-ground dry matter", above-ground dry matter is affected by the density, regardless of the variety.

Conclusion and application of results: The linear relationship established between leaf biomass and biomass would be influenced by the dynamics of tillering so that the ratio (leaf biomass / aboveground biomass) and biomass before flowering depends on the planting densities. When there is no water stress and fertilization we can increase the planting density and strongly increase the yield, on the other hand the effects of stress will be more negative with a high density. One could perhaps imagine in the future of farming systems where you start with a high planting density, especially if the season starts well (or that climate forecasts are optimistic), and in case of water stress we would proceed to the elimination of some hills (e.g. you sow to 50 cm and then you eliminate one line of 2) for the remaining have water to complete their life cycle. It would also be interesting to know to what stage of development the application of fertilizer could have a significant effect on the development of millet. This would play, in addition to the density on fertilization to manage the level of development of culture based on rains and forecasts for the end of the cycle.

Key words: Millet, tillering, plant density, above-ground dry matter (biomass), allometric relationship

INTRODUCTION

Le mil à chandelle, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., est une plante de la famille des graminées dont le cycle végétatif varie de 48 à 120 jours (Powers *et al.*, 1980). C'est une céréale fondamentale pour les nombreuses populations des zones semi-arides d'Afrique et d'Inde où sa culture occupe respectivement une superficie de 11,5 Mha et 14,7 Mha (FAO, 1997). Au Sénégal, il

représente 75% des surfaces emblavées et 60% de la production agricole (FAO, 1997). Mais ses rendements sont plus faibles (400-600 Kg ha⁻¹ de grains) que ceux des autres céréales (80% du rendement moyen des céréales qui est de l'ordre de 800 kg ha⁻¹) alors que son potentiel atteint 2500 à 3000 Kg.ha⁻¹ (McIntire et Fussel, 1989; Christianson *et al.*, 1990; Diouf, 2000). La

faiblesse des rendements a pour cause principale la situation agro-écologique médiocre marquée par une pluviométrie déficitaire et irrégulière aggravée par une baisse de la fertilité des sols.

Sa production de biomasse sèche aérienne est essentiellement liée à sa capacité à développer des talles (Buerkert *et al.*, 1995 ; Buerkert *et al.*, 2001). Le nombre de talles émises varie selon la longueur du cycle. Il est plus élevé chez les variétés à cycle long tant que l'eau n'est pas un facteur limitant (Amadou, 1994 ; Diop, 1999). Le tallage se déroule entièrement pendant la phase végétative pour les cycles tardifs, alors qu'il se trouve progressivement décalé pendant la phase reproductrice pour les cycles précoces (Lambert, 1983).

Le taux de tallage chez le mil varie fortement avec la densité de semis (Diouf, 1990 ; Van Oosterom *et al.*, 2001). Cette dépendance de la production de talles vis-à-vis de la densité de semis affecte par conséquent le nombre d'épis à la récolte (Anonyme, 1993). Le nombre de talles est également lié aux conditions de nutrition azotée, carbonée et hydrique (Diouf, 1990). L'apparition d'une compétition pour l'azote ou la lumière provoque un ralentissement de la croissance de toutes les talles, variable selon leur âge (Masle-Meynard, 1981). Van Oosterom *et al.* (2002) ont montré que la répartition de la biomasse avant la floraison se faisait suivant un modèle de répartition de la biomasse entre feuille et tige. En effet, ces études se font à travers les relations allométriques qui servent à piloter les développements des biomasses dans les modèles de culture.

En général, la fraction d'assimilats disponibles, qui est affectée aux feuilles est élevée en début de

cycle, mais baisse graduellement au fur et à mesure que l'élongation de la tige commence (Jones et Kiniry, 1986 ; Borrell *et al.*, 1989). L'arrêt de l'allocation de la matière sèche aux feuilles correspond à l'apparition de la feuille drapeau (Van Oosterom *et al.*, 2002). D'autres études ont également montré que l'on pouvait utiliser pour différentes céréales, dont le mil et le sorgho, une relation linéaire entre le quotient (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison (Samba *et al.*, 2001 ; Anonyme, 2002 ; Alhassane, 2009). Cette relation ne serait pas affectée par le stress hydrique et ne dépendrait que du stade de développement de la plante (Samba *et al.*, 2001 ; Anonyme, 2002). La dépendance de la production de biomasse sèche vis-à-vis de la densité de semis et des conditions environnementales (alimentation hydrique et fertilité du sol) entraîne très souvent une différence dans la croissance et le développement du mil d'une parcelle à l'autre et même d'une année à une autre. Il serait donc nécessaire d'étudier l'effet de ces différences de croissance sur les relations allométriques en fonction des densités de semis. Il s'agira dans cette étude :

1. d'étudier l'impact de la densité de semis sur la production de biomasse de deux variétés de mil. Ce faisant, les différences de développement morphologique des deux variétés de mil, que l'on a choisie très contrastées : une précoce et à développement « moyen », une plus tardive, à développement plus important seront comparées.
2. d'étudier l'impact des différentes densités sur les répartitions des biomasses et surfaces foliaires. Les évolutions des SLA seront étudiées. A cet effet, différentes relations allométriques seront testées.

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 au-dessus du niveau de la mer) située au Centre Ouest du Sénégal. Le climat de cette zone est sahélien avec une saison sèche qui dure 8 mois. Les précipitations varient entre 400 et 800 mm par an. Par ailleurs, il est noté un fort pourcentage de sable (91-

94%) se traduisant par une capacité de rétention hydrique peu élevée. Le sol dudit site a une humidité au point de flétrissement permanent et une capacité au champ de 14 et 134,5 mm.m⁻¹ respectivement, ce qui lui confère une réserve utile de l'ordre de 120 mm.m⁻¹ (Sarr *et al.*, 1999).

Dispositif expérimental et facteurs étudiés : Deux expérimentations ont été mises en place le 29 juillet 2006 et le 20 juillet 2007. Deux variétés de mil de cycle

et morphologie différents ont été utilisées : le mil SANIO, variété traditionnelle à cycle long (120 jours), de taille haute (3,42 m) et le mil SOUNA3, variété améliorée à cycle court (90 jours) et de taille plus courte (2,42 m). 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 : en effet il n'y a pratiquement plus de présence de SANIO dans la moitié nord du Sénégal et on souhaitait travailler sur un SANIO qui était potentiellement cultivable dans cette région. Le dispositif en bloc complet randomisé à 4 répétitions et 2 facteurs a été utilisé : la variété à deux modalités : SOUNA3 et SANIO et la densité à trois niveaux : D1 = 40 000 plants.ha⁻¹ (écartement : 50 cm x 50 cm); D2 = 12 346 plants.ha⁻¹ (écartement : 90 cm x 90 cm) et D3 = 5 917 plants.ha⁻¹ (écartement : 130 cm x 130 cm) {soit 6 traitements}. Les parcelles (espacées de 1 m) au nombre de 24 furent de dimensions variables (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 pour contrôler les pathogènes. 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 (avec 1,21 Kg pour la D1 ; 3,94 Kg pour la D2 et 8,21 Kg pour la D3, du fait de leurs dimensions variables). Deux apports d'urée à la dose de 50 Kg.ha⁻¹ ont été effectués. Ces apports d'urée ont eu lieu respectivement juste après le démariage 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 ; 1,9 Kg d'urée par parcelle et de 0,8 Kg de K₂O 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 sarco-binages, les traitements phytosanitaires et la

protection anti-aviaire ont été assurés afin de minimiser l'incidence de ces différents facteurs sur les cultures. Il était prévu que les essais soient 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 de la variété de mil SANIO. Les plantes de la variété SANIO, ont donc été confrontées à un stress hydrique de la floraison et la fin du cycle de la culture.

Mesures et observations

Suivis des stades phénologiques et du développement des variétés : La hauteur des plants, le nombre de talles par poquet, ainsi que les dates d'apparition des différents stades phénologiques ont été suivis sur 7 poquets par parcelle, choisis près du carré de rendement afin de pouvoir suivre le développement des plants.

Mesure des biomasses sèches aériennes : La production de la biomasse sèche aérienne totale et sa répartition dans les différents organes (tiges, feuilles, épis, grains) ont été suivies de façon hebdomadaire à partir du 18^{ème} JAS jusqu'au dernier prélèvement avant la récolte en considérant et prélevant une placette de 6 poquets par parcelle à chaque date de mesure. Après prélèvement on sépare les différentes biomasses des poquets prélevés. A noter que l'on a considéré les biomasses des plateaux de tallage qui ont été ajoutées aux biomasses des tiges. On a également distingué les biomasses des feuilles vertes des feuilles sèches et sénescents (cf. point suivant). Les biomasses sont mises à sécher en serre plusieurs semaines pour un pré-séchage, puis elles sont séchées à l'étuve à 65°C durant 48 h avant d'être pesées.

Mesures des LAI et SLA : La surface foliaire a été contrôlée de façon hebdomadaire en faisant des mesures des surfaces des feuilles des poquets prélevés pour les suivis des biomasses. On a séparé les feuilles vertes des feuilles sénescents (nous avons considéré les feuilles dont plus de 25% de la surface étaient sèches comme sénescents et/ou sèches). Les surfaces foliaires des feuilles vertes ont été mesurées tout de suite après séparation des tiges (et triage par rapport aux sénescents et sèches) au laboratoire à l'aide d'un planimètre Delta-T MK2 (type AMS, Devices, Ltd, Cambridge, England). L'indice de surface foliaire des plantes (*leaf area index (LAI)*), exprimant leur surface foliaire ramenée au m² a été calculé par la relation suivante :

LAI = surface foliaire / surface de sol occupée par un poquet

La surface foliaire massique (*specific leaf area (SLA)*) est le ratio entre la surface foliaire et sa biomasse. Elle est obtenue par la relation suivante : $SLA = SF \text{ TotF} / PS \text{ TotF}$ Avec : SF TotF = surface totale des feuilles et PS TotF = poids sec total des feuilles.

Les SLA établis pour les feuilles vertes ont été utilisés pour déterminer les surfaces foliaires des feuilles sèches et sénescentes.

Rendement et ses composantes : A la récolte, le rendement et ses composantes ont été déterminés dans chaque parcelle élémentaire : nombre de poquets au m², nombre de chandelles, poids des chandelles, poids des grains et poids de mille grains.

Etude des relations allométriques : Les relations allométriques permettent de mieux apprécier la répartition des assimilats dans les différentes parties de la plante. Les biomasses sèches aériennes totales et

les biomasses feuilles observées jusqu'à la floraison ont été mises en relation selon différentes modalités :

- ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » en fonction de biomasse aérienne ;
- biomasse feuille en fonction de biomasse sèche aérienne.

Ces relations ont été établies à partir des données recueillies au cours des deux expérimentations dans lesquelles les variétés étaient étudiées sous trois densités de semis.

Analyses statistiques : Le logiciel Statistix 8.1 (Analytical, 2005) a été utilisé pour les différentes analyses de la variance (ANOVA). La séparation des moyennes a été faite par la méthode de Tuckey au seuil de 5%. La comparaison des pentes des équations des différentes relations allométriques a été faite à partir des analyses de covariance (ANCOVA) par le logiciel R 8.1.

RESULTATS

Hauteurs des plants : D'une année à l'autre, une différence a été observée entre les valeurs de hauteur des plants aussi bien chez la variété SOUNA3 que la variété SANIO. Elles ont été plus élevées en 2007 (Figures 1a et b). La densité n'a pas affectée les valeurs de hauteur des plants en 2006. Par contre en 2007, l'effet de la densité a été significatif au cours de la montaison chez la variété SOUNA3 et en début de montaison chez la variété SANIO (Figures 1a et b). Les valeurs les plus élevées ont été obtenues durant ces périodes au niveau des densités élevées. Comparativement à la variété SOUNA3, la variété SANIO a présenté les valeurs de hauteurs les plus élevées. Les hauteurs moyennes ont été respectivement pour la SOUNA3 et la SANIO de 182 cm et 244 cm en 2006, et de 224 cm et 336 cm en 2007.

Nombre de talles : Une différence de dynamique de tallage a été observée entre années chez les deux variétés. Le démarrage du tallage a été plus lent en 2006 alors qu'en 2007 le nombre de talle maximal a été atteint beaucoup plus rapidement. Le nombre de talles a été plus importante en 2006 alors que, nous le verrons, les biomasses ont été plus importantes en 2007. Une différence de dynamique de tallage a été observée au cours des deux expérimentations entre les

deux variétés. Le tallage va jusqu'à la floraison chez la variété SOUNA3 et s'arrête avant la montaison chez la variété SANIO. En 2006, il n'y a pratiquement pas de différence de cinétiques entre les variétés : le nombre de talles maximal est atteint au même moment quelle que soit la densité (à floraison chez SOUNA3 ; avant montaison chez SANIO). Mais en 2007, le nombre de talles maximal est atteint plus tôt en D1 qu'en D2 et D3. L'effet de la densité a été significatif sur le nombre de talles par poquet chez la variété SOUNA3 au cours de la montaison aussi bien en 2006 qu'en 2007 (Figures 2a et b). Chez la variété SANIO, ces différences significatives ont été observées avant la montaison au cours de ces années (Figures 2c et d). A partir de ces dates, les faibles densités de semis ont été plus favorables au tallage. Par contre, la production de talles par m² (Figures 3a - d) a été plus élevée au niveau des densités élevées. Comparativement à la variété SOUNA3, la variété SANIO a produit plus de talles aussi bien par poquet que par m² au niveau des trois densités. Mais, cette production de talles a été suivie par une importante dégénérescence sur les trois densités au cours de la montaison. Cela est plus marqué en 2007, conséquence d'une forte mortalité de talles à mettre sans doute en relation avec le stress hydrique.

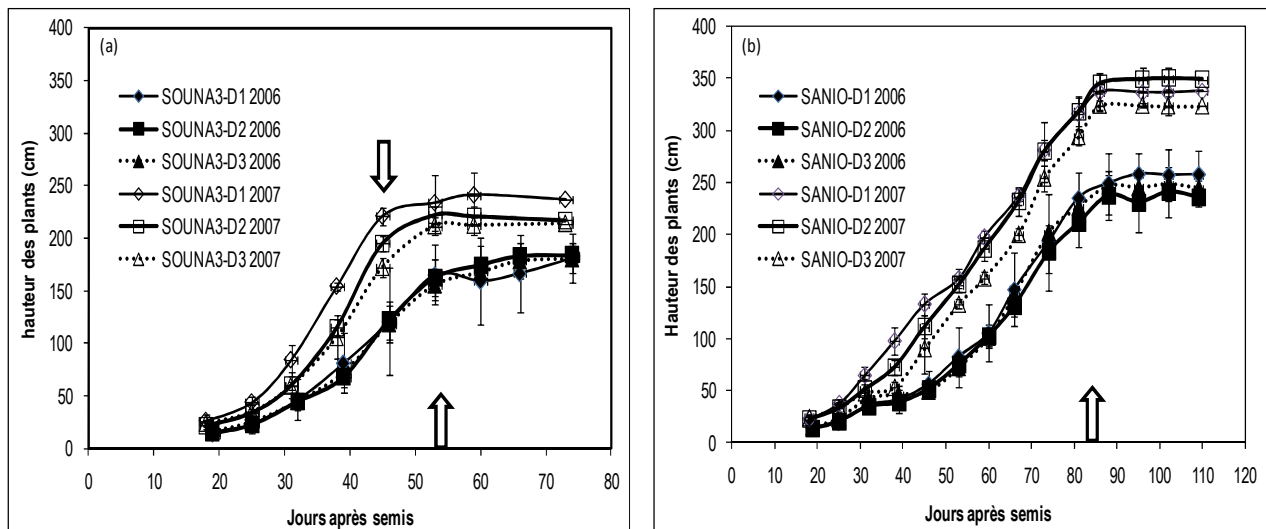


Figure 1. Effet de la densité de semis sur la hauteur des plants de mil variétés SOUNA3 (a) et SANIO (b) par poquet en 2006 et en 2007. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

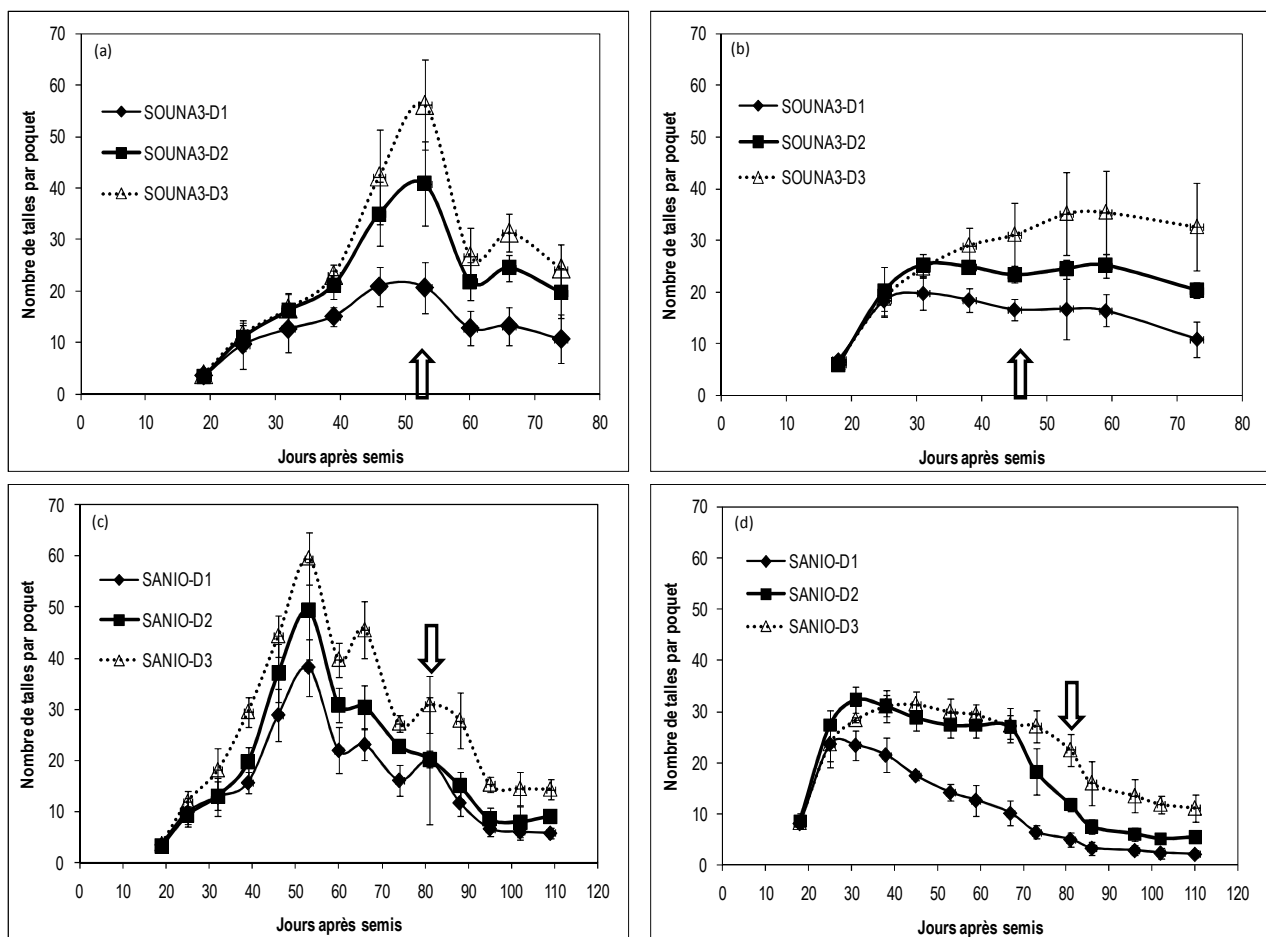


Figure 2 : Effet de la densité de semis sur la production et l'évolution du nombre de talles par poquet des plants de mil variétés SOUNA3 en 2006 (a) et 2007 (b) et de SANIO en 2006 (c) et 2007 (d).

Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

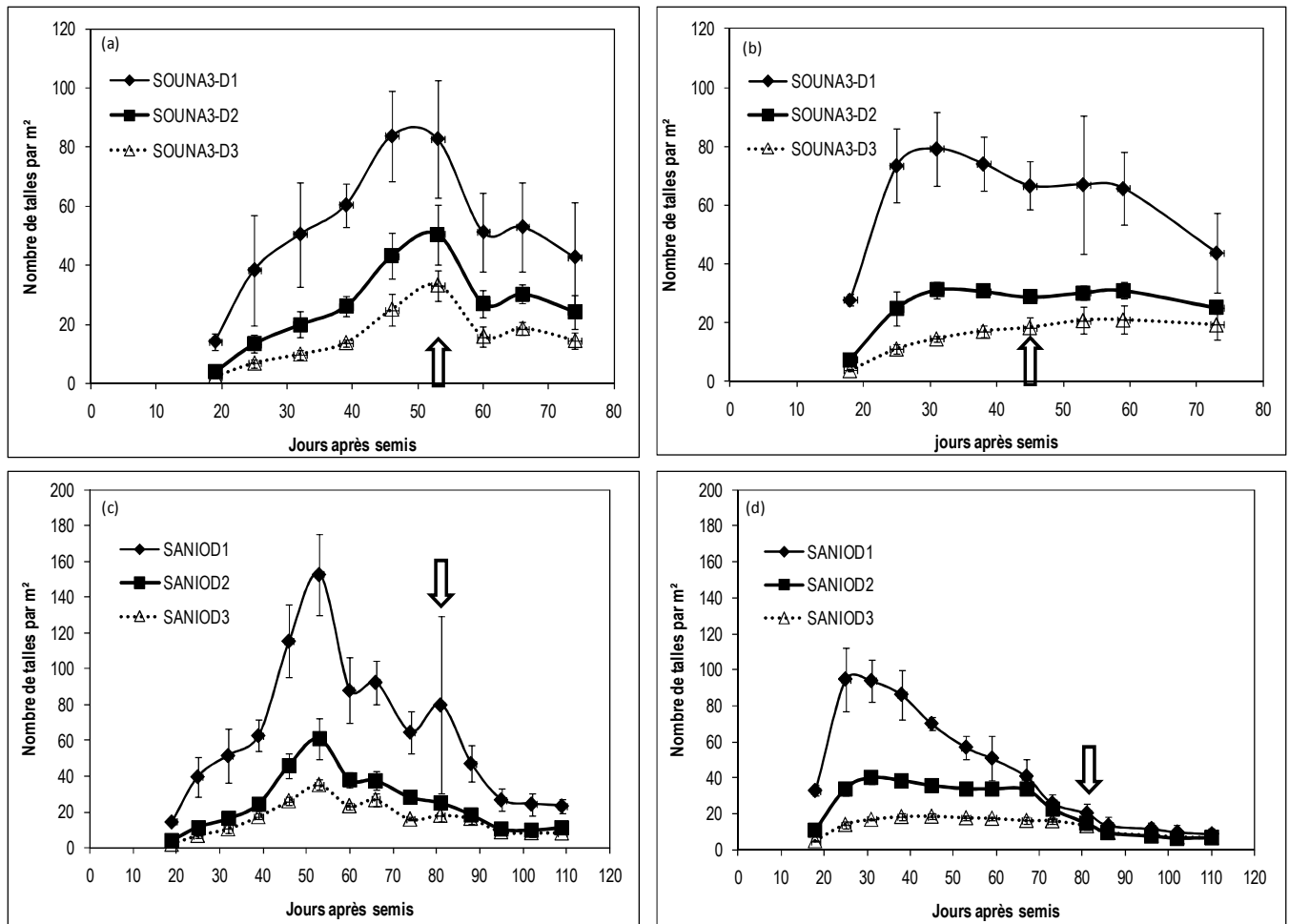


Figure 3 : Effet de la densité de semis sur la production et l'évolution du nombre de talles par m² des plants de mil variétés SOUNA3 en 2006 (a) et 2007 (b) et de SANIO en 2006 (c) et 2007 (d). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

Biomasses aériennes et poids moyen des talles par plante : Les quantités de biomasses sèches aériennes (g.m⁻²) augmentent au cours des cycles pour les deux variétés et les trois densités jusqu'à ce que les sénescences entraînent une forte diminution des biomasses végétaives. Le développement des biomasses a été beaucoup plus rapide et plus important en 2007 pour les deux variétés, quelle que soit la densité. L'effet de la densité a été observé sur la biomasse aérienne en 2006 à partir du 46^{ème} JAS (à l'épiaison) chez la variété SOUNA3 et à partir du 81^{ème} JAS (à la floraison) chez la variété SANIO (Figures 4a et c). En 2007, il a été observé plus tôt au 18^{ème} JAS, au tallage aussi bien chez la variété SOUNA3 que chez

la variété SANIO (Figures 4b et d). A partir de ces dates, les densités élevées (D1) ont produit plus de biomasses sèches aériennes au m² par rapport aux deux autres densités. Cela, même si par poquet les plantes ont développé moins de biomasses sèches aériennes en D1 qu'en D2, et moins en D2 qu'en D3 (données non montrées ici). Il faut noter que ces données n'ont pas été présentées parce que les mêmes types de dynamiques et de différences sont observés si l'on considère les biomasses foliaires et les biomasses des tiges. Comparativement à la variété SOUNA3, la variété SANIO a produit les biomasses aériennes en g.m⁻² les plus élevées. Les figures (5a, b, c et d) montrent l'évolution des poids moyens de talles

par plante. Il n'existe pas de différences entre les densités quelle que soit la variété et l'année, tout au long du cycle. La variété SANIO présente les plus

grosses tiges. Le poids moyen des tiges a été plus élevé en 2007 qu'en 2006.

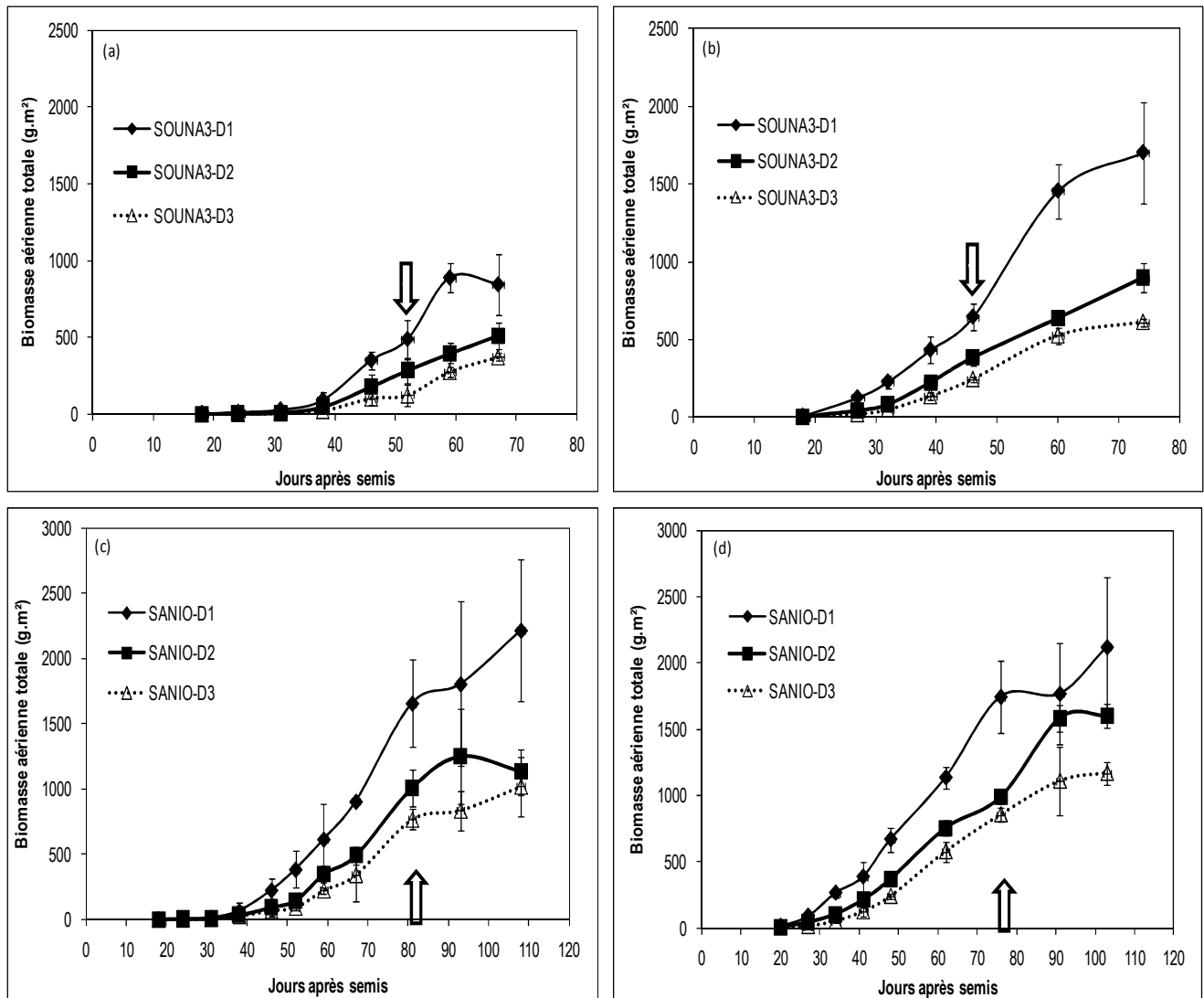


Figure 4 : Effet de la densité de semis sur la production de biomasse aérienne (g.m^{-2}) des plants de mil variétés SOUNA3 en 2006 (a) et 2007 (b) et de SANIO en 2006 (c) et 2007 (d). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

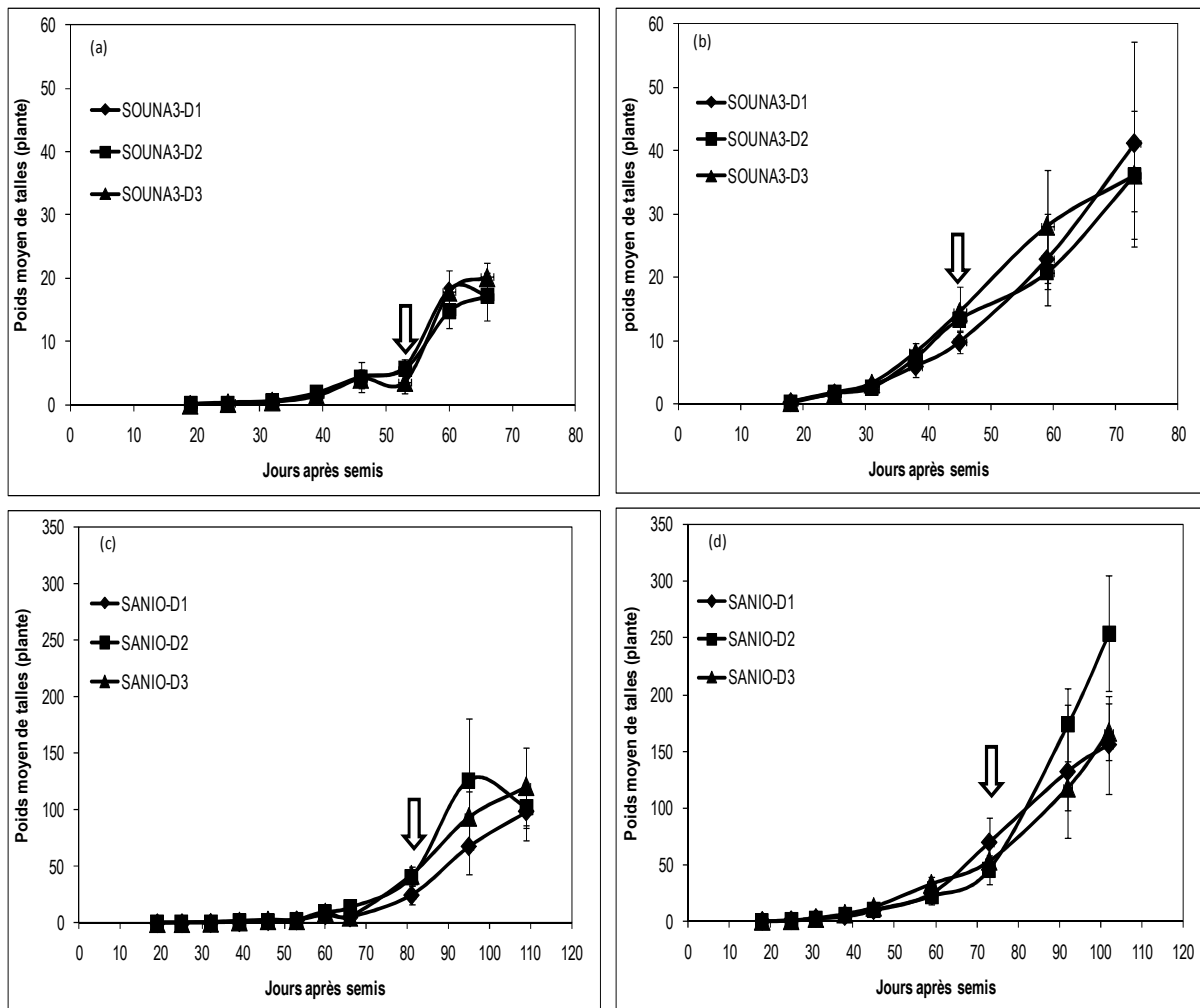


Figure 5 : Evolution des poids moyen des talles par plante au cours du cycle en fonction de la densité : mil variété SOUNA3 (a=2006 et b=2007) et variété SANIO (c=2006 et d=2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

Indice de surface foliaire et SLA : Les évolutions des LAI sont de mêmes types que celles des biomasses aériennes (en $g.m^2$). Les valeurs de LAI ont été plus élevées en 2007 chez les deux variétés. En 2006, aussi bien chez la variété SOUNA3 que chez la variété SANIO, l'effet de la densité a été significatif sur le LAI (Figures 6a et c) à partir du 46^{ème} JAS (respectivement en début d'épiaison et avant la montaison). En 2007, l'effet de la densité sur le LAI a été observé aussi bien chez la variété SOUNA3 que chez la variété SANIO (Figures 6b et d) à partir du 27^{ème} JAS (respectivement

en début et 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 (non montré). Comparativement à la variété SOUNA3, la variété SANIO a obtenu les valeurs de LAI les plus élevées. Il faut noter que les valeurs de LAI obtenues en 2007 en SANIO sont particulièrement élevées, atteignant des valeurs de 8 en D2 et de 14 en D1.

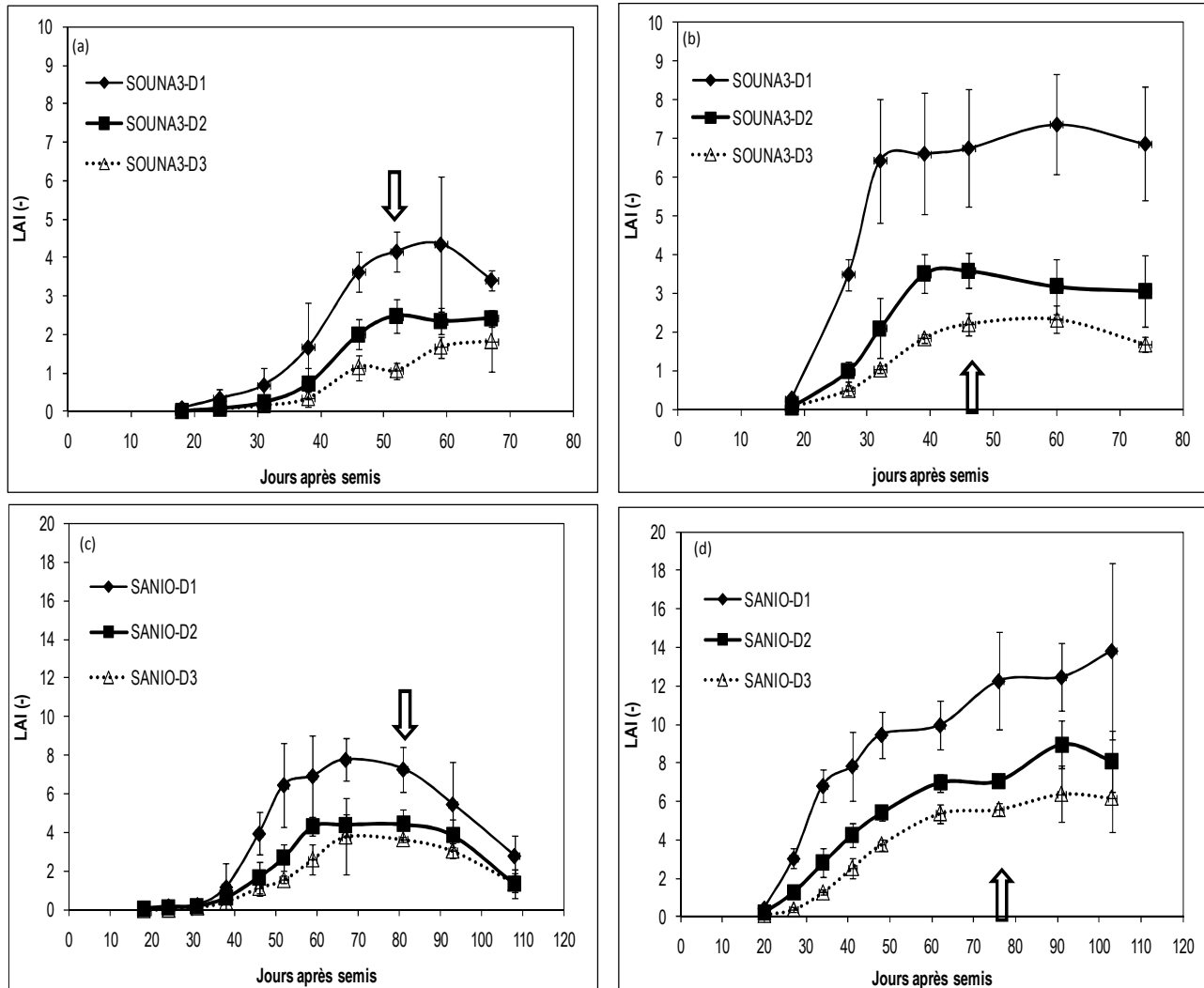


Figure 6 : Effet de la densité de semis sur l'indice de surface foliaire des plants de mil variétés SOUNA3 en 2006 (a) et 2007 (b) et de SANIO en 2006 (c) et 2007 (d). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5% et les flèches blanches indiquent les dates de floraison. D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

La surface foliaire spécifique (SLA) est élevée pendant la phase juvénile, puis diminue régulièrement au cours du cycle. A noter que sa valeur diminue même au-delà de la mise en place complète des surfaces foliaires (et de la floraison) du fait qu'il y a perte des feuilles les plus basses, qui étaient les premières formées et qui avaient les SLA les plus élevés. La densité de semis n'a pas eu d'effet significatif sur les valeurs de SLA pour les deux variétés. Les valeurs moyennes de SLA obtenues au cours des deux expérimentations toutes

densités confondues ont varié de 525,63 à 159 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour la variété SOUNA3 (Figures 7a et c). Pour la variété SANIO, elles ont variées de 578,29 à 103,85 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (Figures 7b et d). Les SLA du SANIO sont légèrement différents de ceux du SOUNA3 pour la toute première date d'observation, mais n'est pas significatif. En fin de cycle, les valeurs ont été plus faibles chez les variétés SANIO avec une valeur de 103,85 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, à mettre en relation avec une durée de cycle plus longue.

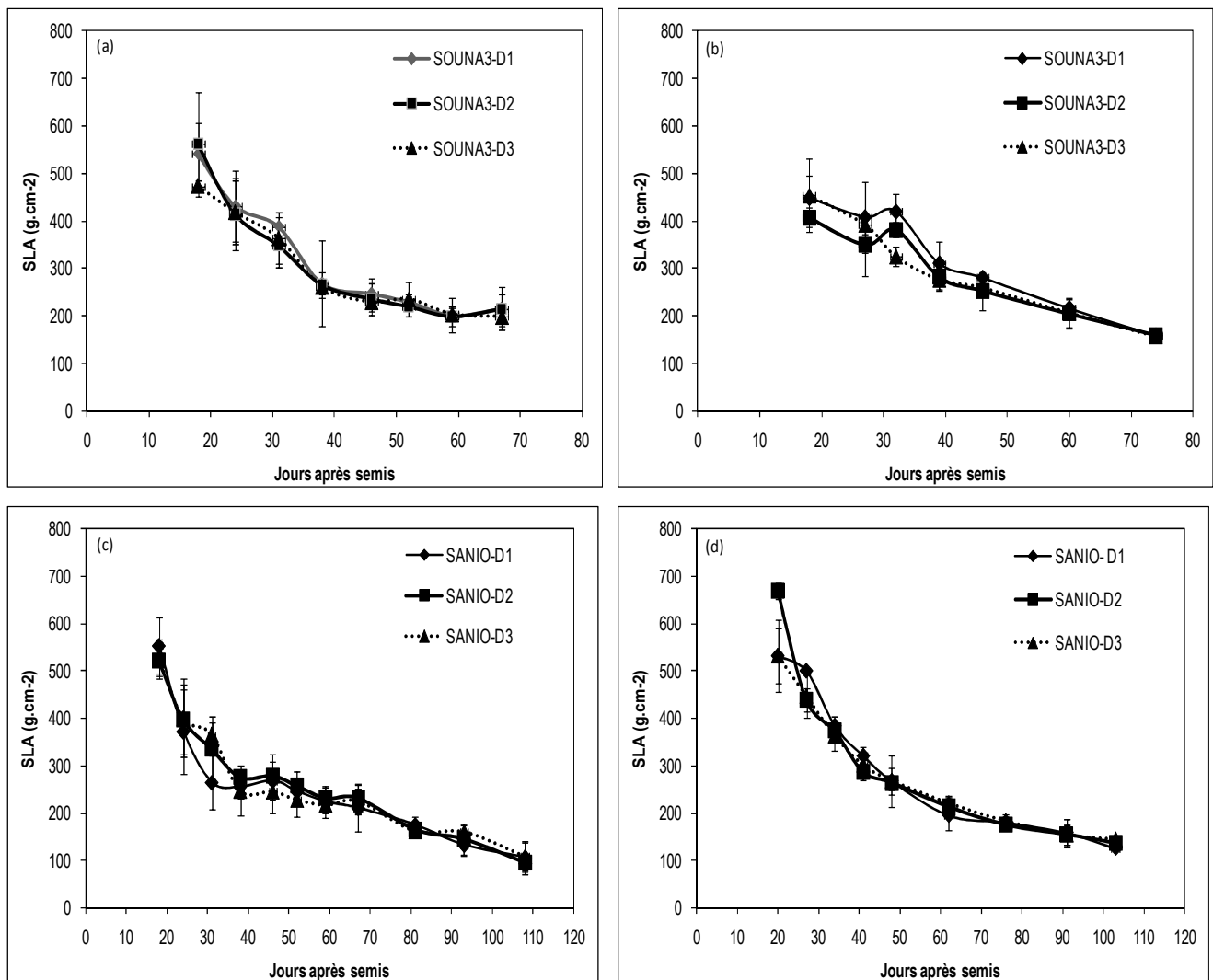


Figure 7 : Evolutions des valeurs de SLA calculées au cours du cycle en relation avec la densité chez des variétés de mil : SOUNA3 (a = 2006 et b = 2007) et SANIO (c = 2006 et d = 2007). Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance au seuil de 5%.

Rendement et ses composants : Le nombre de poquets par m², le nombre d'épis par poquet et le nombre d'épis par m² sont les composants qui expliquent bien les rendements. Le nombre de poquet par m² a été plus élevé dans les fortes densités quelles que soient la variété et l'année (Tableaux 1 et 2). Le nombre d'épis par poquet a significativement diminué avec l'augmentation de la densité (Tableaux 1 et 2). Il a été plus élevé en 2006 chez les deux variétés. En 2006, le nombre d'épis par m² a été significativement supérieur chez les densités élevées (Tableau 1). Par contre en 2007, il n'a pas été affecté par la densité (Tableau 2). Mais, les densités élevées ont obtenu en tendance les meilleurs résultats. Le poids de 1000

grains (PMG) n'a pas été affecté par la densité de semis (Tableaux 1 et 2), mais a diminué en tendance avec l'augmentation de la densité. Les valeurs maximales de PMG ont été atteintes en 2006. Les figures (8a et b) montrent que la densité a eu un effet significatif sur le rendement en 2006.

Le meilleur rendement a été obtenu au niveau de la densité élevée (2486 Kg.ha⁻¹ pour la SOUNA3 et 3525 Kg.ha⁻¹ pour la SANIO). La variété SANIO a obtenu un rendement supérieur à celui de la variété SOUNA3 pour toutes les densités. En 2007, la densité n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement (Figures 8a et b). En tendance, les densités intermédiaires (D2) ont obtenus les rendements les plus élevés (2620 Kg.ha⁻¹ pour la

SOUNA3 et 1744 Kg.ha⁻¹ pour la SANIO) et les fortes densités les plus faibles rendements (2502 Kg.ha⁻¹ pour la SOUNA3 et 1197 Kg.ha⁻¹ pour la SANIO). La variété SANIO a obtenu un rendement très inférieur à celui de la SOUNA3 pour toutes les densités. Par ailleurs, chez la SOUNA3 en 2007 le rendement a été supérieur à

celui obtenu en 2006 sauf en D1 où ils ont été équivalents (2486 Kg.ha⁻¹ en 2006 et 2502 Kg.ha⁻¹ en 2007). Pour la variété SANIO en 2007, le rendement est nettement moins bon qu'en 2006 sur les trois densités.

Tableau 1 : Composantes du rendement de deux variétés de mil à trois densités de semis en 2006

	Nbre pq.m ⁻²	Epis.pq ⁻¹	PG.pq ⁻¹	Epis.m ⁻²	PG1Epi	NGEpi	PMG	PG.m ⁻²
TRAI.	P<0.05	P=0.0002	<i>P=0.0797</i>	P=0.0080	<i>P=0.4135</i>	<i>P=0.4287</i>	<i>P=0.4951</i>	P=0.0022
SOUND1	4.00 a	5.000 c	62.17 a	20.033 a	25.232 a	2719.3 a	9.3300 a	248.67 a
SOUND2	1.23 b	11.300 b	68.07 a	13.933 b	28.803 a	3061.3 a	9.4067 a	84.00 b
SOUND3	0.59 c	15.700 a	103.27 a	9.300 b	19.038 a	1995.7 a	9.5433 a	61.13 b
TRAI.	P<0.05	P=0.0027	P=0.0119	P=0.0131	<i>P=0.5133</i>	<i>P=0.7710</i>	<i>P=0.8386</i>	P=0.0274
SAND1	4.00 a	5.000 b	88.17 b	19.933 a	29.884 a	3395.3 a	8.8600 a	352.53 a
SAND2	1.23 b	7.500 b	130.00 b	9.233 b	31.360 a	3649.7 a	8.6533 a	160.50 b
SAND3	0.59 c	16.167 a	325.73 a	9.567 b	34.600 a	3844.7 a	9.0533 a	192.70 ab

Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Tukey ; P= probabilité d'effet significatif, TRAI.= traitement ; SOUND1 = SOUNA3-D1, SOUND2 = SOUNA3-D2, SOUND3 = SOUNA3-D3, SAND1 = SANIO-D1, SAND2 = SANIO-D2 et SAND3 = SANIO-D3, Nbre pq.m⁻² = nombre de poquet par mètre carré, Epis.pq⁻¹ = nombre d'épis par poquet, PG.pq⁻¹ = poids de grains par poquet, Epis.m⁻² = nombre d'épis par mètre carré, PG1Epi = poids de grains par épis, NGEpi = nombre de grains par épis, PMG = poids de mille grains et PG.m⁻² = poids de grains par mètre carré.

Tableau 2. Composantes du rendement de deux variétés de mil à trois densités de semis en 2007

	Nbre pq.m ⁻²	Epis.pq ⁻¹	PG.pq ⁻¹	Epis.m ⁻²	PG1Epi	NGEpi	PMG	PG.m ⁻²
TRAI.	P<0.05	P=0.0016	P=0.0007	P=0.0012	P=0.0191	<i>P=0.2098</i>	P=0.0245	<i>P=0.6812</i>
SOUND1	4.00 a	4.167 b	55.95 c	17.865 a	23.237 b	3203.0 a	7.2295 b	246.05 a
SOUND2	1.23 b	8.975 b	212.25 b	11.050 b	31.590 a	4024.8 a	7.8600 ab	261.97 a
SOUND3	0.59 c	15.560 a	387.51 a	9.181 b	33.837 a	4018.2 a	8.4523 a	229.45 a
TRAI.	P<0.05	P=0.0016	P=0.0007	P=0.0050	P=0.0271	P=0.0311	<i>P=0.4766</i>	<i>P=0.0881</i>
SAND1	4.00 a	2.869 c	30.73 c	11.398 a	16.514 b	2541.2 b	6.4471 a	119.88 a
SAND2	1.23 b	7.100 b	141.32 b	8.775 b	26.125 a	3859.0 a	6.7525 a	174.50 a
SAND3	0.59 c	11.151 a	228.56 a	6.770 b	24.968 ab	3788.4 ab	6.5448 a	135.83 a

Pour une variable et un effet donné, les moyennes affectées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%, test de Tukey ; P= probabilité d'effet significatif, TRAI.= traitement ; SOUND1 = SOUNA3-D1, SOUND2 = SOUNA3-D2, SOUND3 = SOUNA3-D3, SAND1 = SANIO-D1, SAND2 = SANIO-D2 et SAND3 = SANIO-D3, Nbre pq.m⁻² = nombre de poquet par mètre carré, Epis.pq⁻¹ = nombre d'épis par poquet, PG.pq⁻¹ = poids de grains par poquet, Epis.m⁻² = nombre d'épis par mètre carré, PG1Epi = poids de grains par épis, NGEpi = nombre de grains par épis, PMG = poids de mille grains et PG.m⁻² = poids de grains par mètre carré.

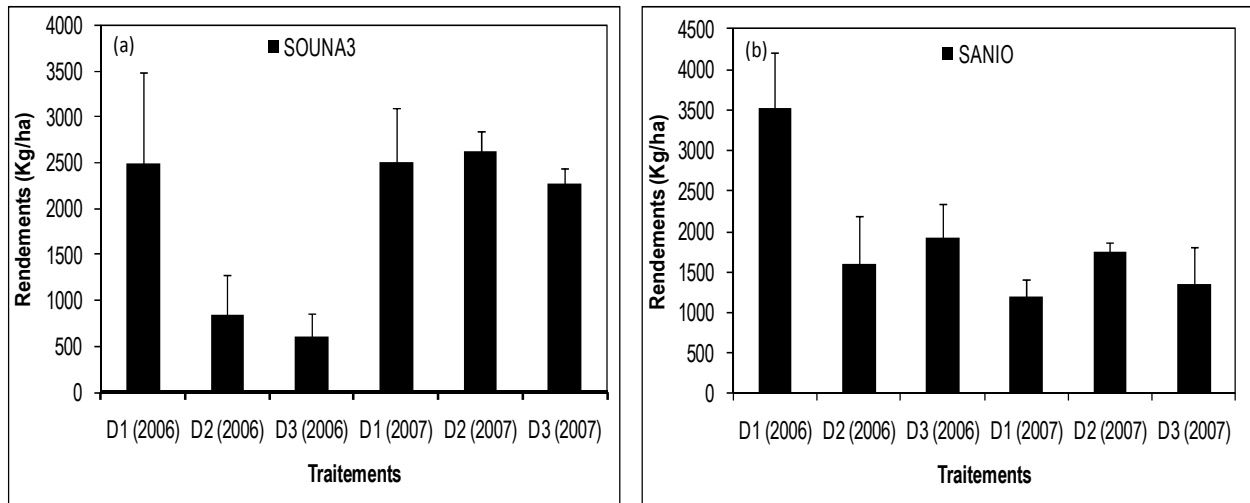


Figure 8 : Les rendements obtenus au niveau des deux variétés de mil en 2006 et 2007 : SOUNA3 (a) et SANIO (b). D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

Dynamique de répartition de la biomasse : les relations allométriques : Les figures (9a et b) montrent que l'on peut toujours établir une relation linéaire entre le ratio (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne ($g.m^{-2}$) jusqu'à la floraison. Les régressions linéaires entre les deux paramètres étudiés ont permis de définir des équations linéaires différentes selon les densités. Il a été montré une différence significative entre ces droites de régression. Les tests de corrélation ont permis d'obtenir

des coefficients de corrélation (r) significatifs au seuil de 1% par la table de Bravais-Pearson aussi bien pour la SOUNA3 ($n=11$) que pour la SANIO ($n=16$). La relation testée ici dépend donc de la variété mais également, pour une variété donnée, de la densité : cela s'explique par le fait que la biomasse aérienne (utilisée en X) varie en fonction de la densité alors que le ratio (biomasse feuille / biomasse aérienne) (utilisé en Y) est sans dimension.

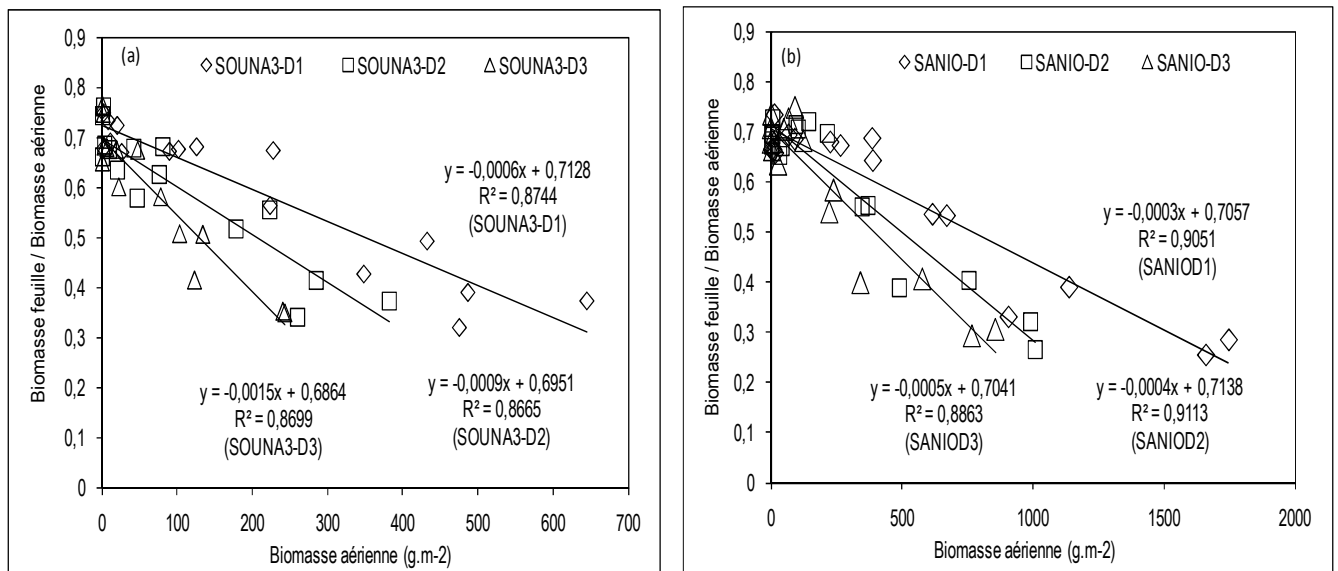


Figure 9 : Régressions linéaires entre le rapport biomasse feuille / biomasse aérienne et la biomasse aérienne chez les variétés de mil SOUNA3 (a) et SANIO jusqu'à la floraison en fonction des densités (toutes les années confondues). D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

Des résultats différents ont été obtenus selon les variétés pour la relation établie directement entre la biomasse feuille ($g.m^{-2}$) et la biomasse aérienne ($g.m^{-2}$) jusqu'à la floraison. Pour la variété SOUNA3, aucune

différence significative n'a été montrée entre les trois droites de régression. Une équation linéaire unique a pu être définie pour toutes les densités (Figure 10). Le test de corrélation a permis d'obtenir un coefficient de corrélation (r) significatif au seuil de 1% (n=33) par la table de Bravais-Pearson.

Pour la variété SANIO, jusqu'à la floraison, chaque densité a été définie par une équation polynomiale

d'ordre 2 avec des coefficients de détermination (R^2) de 0,9853 ; 0,992 et 0,9894, respectivement, pour les densités D1, D2 et D3 (Figure 11a). Par contre, jusqu'en début de montaison, ces relations s'ajustent à une régression linéaire unique pour toutes les densités (Figure 11b). Le test de corrélation a permis d'obtenir un coefficient de corrélation (r) significatif au seuil de 1% (n=36) par la table de Bravais-Pearson.

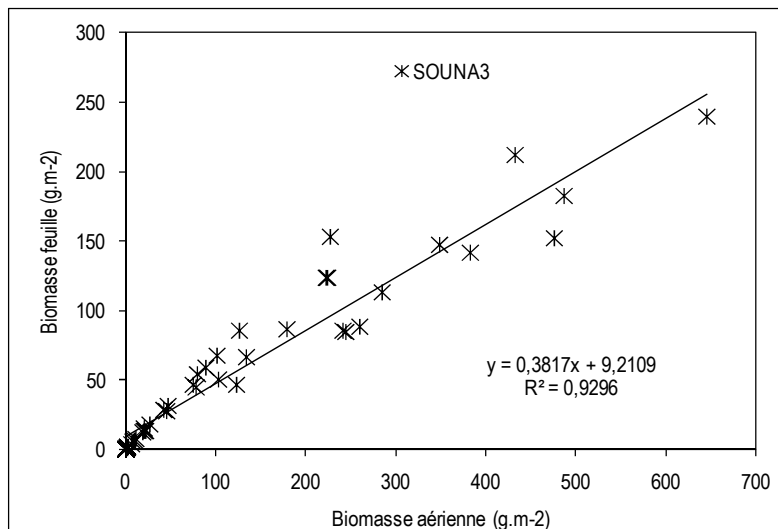


Figure 10 : Régression linéaire entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne chez la variété de mil SOUNA3 en fonction des densités (toutes les années confondues). D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

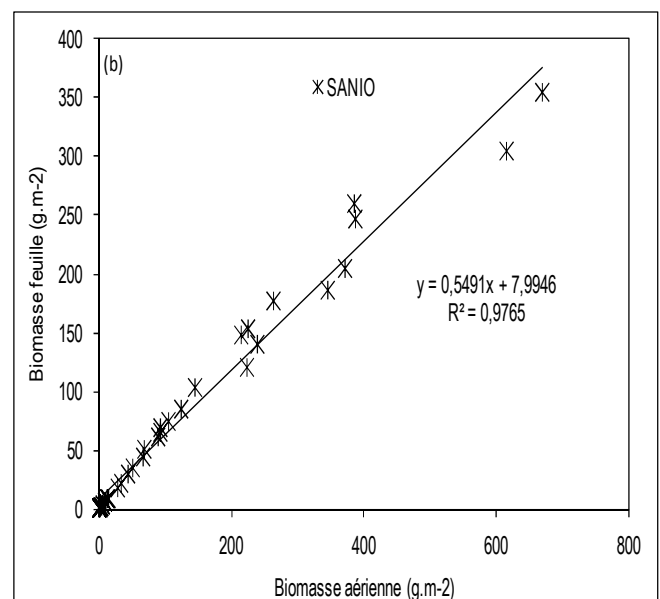
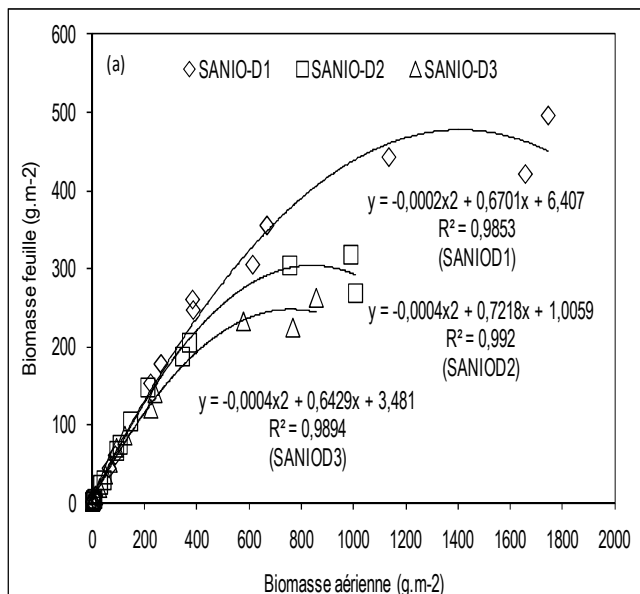


Figure 11 : Relations polynomiales d'ordre 2 entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne chez la variété de mil SANIO jusqu'à la floraison (a) et régression linéaire entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne chez les variétés SANIO (b) jusqu'en début de montaison en fonction des densités (toutes les années confondues). D1 = densité de semis D1, D2 = densité de semis D2 et D3 = densité de semis D3.

DISCUSSION

Les différentes hauteurs obtenues, corroborent ceux de Pandey *et al.* (2001). Ils ont montré que dans la zone semi-aride, la taille de la tige se situe entre 0,5 et 3,5 m selon la variété, la date de semis, le climat et la nature du sol. Les valeurs potentielles des hauteurs des plantes sont d'origine génétique (Alhassane, 2009). L'effet de la densité observé au cours de la montaison au niveau des densités élevées (D1) en 2007, serait une conséquence du fort développement végétatif des plants, qui a provoqué une compétition entre les plants pour la lumière au cours de la montaison.

Le retard de développement constaté en 2006 s'explique selon nous par un manque d'azote lors des premières semaines du fait d'un phénomène de « faim d'azote » en conséquence de l'application trop tardive de fumier sur les parcelles. Le nombre total de talles émises est d'autant plus élevé que le cycle variétal est long. Le tallage s'est déroulé avant la montaison chez la variété SANIO et s'est poursuivi jusqu'à la floraison pour la variété SOUNA3. Ces résultats corroborent ceux de Lambert (1983). Le fort développement des plants en 2007 a entraîné une fermeture précoce du couvert. Ce fort développement observé en 2007 est à mettre en relation avec le mode de fertilisation adopté cette année. Cela a provoqué l'émission d'un faible nombre de talles. Les densités les plus élevées (D1) ont produit par poquet moins de talles.

Plusieurs auteurs ont montré la diminution du nombre de talles avec l'augmentation de la densité (Tetio-Kagho et Gardner, 1988 ; Moulia *et al.*, 1999). La forte densité de semis accentuerait le taux de recouvrement foliaire qui entraverait le développement des jeunes talles basales par limitation de la réception de la lumière vers la base des plants. L'inverse est observé avec les faibles densités (Whaley *et al.*, 2000 ; Van Oosterom *et al.*, 2001). En effet, la réduction de la densité de peuplement prolongerait la période de production des talles, retardant ainsi le début de la mort des talles en conditions non limitantes en eau. La dégénérescence des talles observée chez la variété SANIO est due à un ralentissement et à un arrêt d'émission de talles juste avant et pendant la montaison, et la mort d'une part des talles préexistants pendant la montaison (Pascal, 1989). La production de talles par m² a été plus élevée au niveau des densités élevées, du fait de la densité. Cela est d'une grande importance, car présentant un effet positif sur le nombre d'épis récoltable (Anonyme, 1993 ; Pale, 2001).

Les biomasses aériennes en 2007 sont plus importantes qu'en 2006 malgré qu'il y ait plus de talles en 2006 qu'en 2007 car les biomasses par talle sont beaucoup plus importantes en 2007. Les résultats ont montré que la biomasse a été plus importante dans les densités élevées (D1). Cela se justifie, par le fait que les densités élevées ont présenté un nombre de talles plus élevé par unité de surface occupée par le poquet. Lafarge et Hammer (2002) et Alhassane (2009) ont également obtenu des valeurs de matières sèches aériennes au m², plus élevées avec la forte densité de semis.

La densité de peuplement affecterait les composantes aériennes de la plante (Maddoni *et al.*, 2001b), suite à l'apparition des contraintes, que subiraient les plantes au cours de leur développement. La variété SANIO a obtenu les valeurs de biomasse sèche aérienne les plus élevées. Cela est d'autant plus vrai, que la variété SANIO a produit beaucoup plus de biomasse que la variété SOUNA3 en relation au nombre de talles plus important au m² et à une biomasse moyenne par talle beaucoup plus importantes également.

L'indice de surface foliaire des plantes a été plus élevé en 2007. Conséquence directe de l'important développement des plants. Les valeurs de LAI, plus élevées dans les fortes densités de semis ont également été obtenues par d'autres auteurs (Westgate *et al.*, 1997 ; Maddoni *et al.*, 2001a ; Maddoni *et al.*, 2001b). Le fort taux de recouvrement foliaire, au niveau de ces densités élevées entraîne une fermeture rapide de leur couvert ; ce qui augmente leur LAI (Ayaz *et al.*, 2004). Comme pour la chute du nombre de talles, la diminution du LAI observée en fin de cycle chez la variété SANIO pourrait être probablement due au déficit hydrique enregistré durant cette période couplé à la compétition intrinsèque.

Les différences entre les valeurs des LAI découlent donc essentiellement des différences entre les valeurs des biomasses foliaires (non montrées) car l'analyse n'a pas montré de différence significatives entre les SLA en relation aux densités, ni entre les années en relation à la date, ce malgré des dynamiques de développement des biomasses très différentes, ni entre les variétés. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Lafarge et Hammer (2002) qui ont montré que la SLA restait stable quelle que soit la densité chez le sorgho. Ceci pourrait s'expliquer par deux composantes majeures qui déterminent la SLA :

l'épaisseur des feuilles et leur contenu en matières sèches (Wilson *et al.*, 1999).

Dingkhun *et al.* (1999) et Kropff et Lotz (1993) ont respectivement montré chez le riz et des céréales que la SLA diminuait graduellement quelle que soit la variété au cours du cycle de développement. Dingkhun *et al.* (1999) ont montré chez des variétés de riz ayant des durées de cycle différentes que les mesures de la SLA faites à des dates communes correspondaient nécessairement à différents stades de développement. La valeur de SLA serait donc vraisemblablement élevée chez les variétés à cycle long et faible chez les variétés à cycle court (Dingkhun *et al.*, 1998 ; Dingkhun *et al.*, 1999). Sa valeur dépendrait donc des caractéristiques génétiques de la plante et serait liée à la vigueur végétative de la plante (Schnier *et al.*, 1990 ; Dingkhun *et al.*, 1991 ; Dingkhun *et al.*, 1999)

Les valeurs de PMG obtenues ont été inférieures au PMG potentiels obtenus par Fofana (1997) et Marathée (1971). Ces auteurs ont obtenus des PMG variant entre 8 g et 9,3 g pour la variété SOUNA3 et entre 10 g et 12 g pour la variété SANIO. Ce qui aurait fortement réduit les poids de grains par épis. En effet, les meilleurs rendements ont été obtenus en D1, sauf en 2007, où les fortes densités (D1) ont obtenu les moins bons résultats, surtout en SANIO. Coulibaly *et al.* (1988) ont montré, que les fortes doses d'azote associées aux fortes densités de semis augmenteraient la mortalité des talles et affecteraient négativement le remplissage des grains, en cas de déficit hydrique. Par ailleurs, on

CONCLUSION

La relation linéaire établie entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne serait influencée par la dynamique de tallage alors que le quotient (Biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison dépend de la densité de semis.

Sur le plan physiologique, quand les conditions agronomiques sont favorables (eau+fertilisation) l'augmentation de la densité a pour seul effet de diminuer le nombre d'épis par poquet, mais cela est largement compensé par l'augmentation du nombre d'épis par m² du fait de la densité, et il n'y a pas diminution de la taille des épis en terme de nombres de grains et poids de grains.

Les résultats montrent que quand il n'y a pas de contrainte hydrique et de la fertilisation, on peut augmenter la densité fortement et augmenter le

peut constater que les variations de poids de grains sont liées uniquement aux nombres de grains par épis, et non pas aux poids individuels des grains. D'après Erchidi *et al.* (2009), le rendement serait plus lié à la fertilité de l'épi qu'à la taille du grain.

Nos résultats, ont mis en évidence que le quotient (Biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison aurait une équation spécifique à chaque densité de semis chez les deux variétés. Et cela, malgré les différences de production de biomasse d'une année à l'autre. La relation linéaire établie entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne serait constante et non affecté par la densité de semis d'une année à l'autre chez la variété SOUNA3, malgré les différences de développement et de production de biomasse. Ce qui n'est pas le cas chez la variété SANIO, où la relation est influencée par la densité de semis à partir de la montaison. Ces différences observées dans la relation entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne pourraient s'expliquer par la dynamique de production de talles. En effet, chez la variété SOUNA3, cette production de talles à lieu jusqu'à la floraison, alors qu'elle s'arrête en début de montaison chez la variété SANIO. La production de talles étant accompagnée d'émission de feuilles, on pourrait conclure, que cette formulation simple pourrait être utilisée plus aisément pour les variétés à cycle court comme le SOUNA3, dont le tallage se poursuit jusqu'à la floraison.

rendement, mais que par contre les effets d'un stress seront d'autant plus négatifs avec une forte densité.

On pourrait peut-être imaginer dans le futur des systèmes de culture où l'on commencerait avec une densité élevée, surtout si la saison démarre bien (ou que les prévisions climatiques sont optimistes), et en cas de contrainte hydrique on procéderait à l'élimination de certains poquets (par exemple tu sèmes à 50 cm et ensuite tu élimines 1 ligne sur 2) pour faire que les restants aient de l'eau pour terminer leur cycle.

Il serait aussi intéressant de savoir jusqu'à quel stade de développement l'application d'engrais pourrait avoir un effet significatif sur le développement du mil. Cela permettrait de jouer, en plus de la densité, sur la fertilisation pour gérer le niveau de développement de la culture en fonction des pluies reçues et des prévisions pour la fin du cycle.

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

- Alhassane A, 2009. Effets du climat et des pratiques culturales sur la croissance et le développement du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) au sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. UFR Biosciences-Laboratoire de physiologie végétale-Université de Cocody-Abidjan. 236 pp.
- Amadou M, 1994. Analyse et modélisation de l'évapotranspiration d'une culture de mil en région aride sahélienne. Université Paris XI ORSAY. 106 pp.
- Analytical S, 2005. Statistix 8.1. www.statistix.com.
- Anonyme, 1993. L'agrométéorologie du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) Leeke). Rapport commission de météorologie agricole (CMAg) N° 56, Genève, septembre 1993. 124 pp.
- Anonyme, 2002. Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières. Mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal. Rapport technique du Fonds National de Recherches Agricoles et Agroalimentaires (FNRAA). 25 pp.
- 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.
- Borrell AK, Incoll LD, Simpson RJ, Dalling MJ, 1989. Partitioning of dry matter and dry matter and the deposition and use of stem reserves in a semi-dwarf wheat crop. *Annals of Botany* 63: 527-539.
- Buerkert A, Bationo A, Piepho HP, 2001. Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa. *Field Crops Research* 72: 1-15.
- Buerkert A, Stern RD, Marschner H, 1995. Post stratification clarifies treatment effects on millet growth in the sahel. *Agronomy Journal* 87: 752-761.
- Christianson CB, Bationo A, Baethgen WE, 1990. The effect of soil tillage and fertilizer use of pearl millet yields in Niger. *Plant Soil* 123, 51-58.
- Coulibaly A, Sogodogo D, Shetty SVR, 1988. L'intensification des systèmes de culture du mil au Mali. In Mil et Sorgho au Mali. Communications présentées au séminaire du 4 au 8 octobre 1988 à Bamako, organisé par l'IER et l'ICRISAT en collaboration avec l'USAID. 356 pp.
- Dingkhun M, Johnson DE, Sow A, Audebert AY, 1999. Relationship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Research* 61: 79-95.
- Dingkhun M, Jones MP, Johnson DE, Sow A, 1998. Growth and yield potential of *Oryza sativa* and *O. glaberrima* upland rice cultivars and their interspecific progenies. *Field Crops Research* 57: 57-69.
- Dingkhun M, Schnier HF, De Datta SK, Doerffling K, Javellana C, 1991. Relationship between ripening phase productivity and crop duration, canopy photosynthesis and senescence in transplanted and direct seeded lowland rice. *Field Crops Research* 26: 327-345.
- Diop M, 1999. Caractérisation du facteur hydrique en agriculture pluviale au Sénégal: le cas de l'arachide et du mil. UNRS UPRESA climatologie de l'espace tropical. Université de Bourgogne. 185 pp.
- Diouf O, 2000. Réponses agrophysiologiques du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse : influence de la nutrition azotée. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles.
- Diouf M, 1990. Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. INA Paris Grignon. 227 pp.
- Erchidi AE, Benbella M, Talouizte A, 2009. Croissance du grain chez neufs cultivars de blé dur. <http://ressources.ciheam.org>.

- Fofana A, 1997. Fiches descriptives des principales variétés de mil. ISRA/CRZ de Kolda. 6 pp.
- Jones CA. and Kiniry JR, 1986. Ceres-Maize. A simulation model of maize growth and development. College Station, Texas A&M University press, College station, TX, 194 pp.
- Kropff MJ. and Lotz LAP, 1993. Eco-physiological characterization of the species. In Modelling crop-weed interactions. MJ Kropff and HH Van Laar (Editors). pp 83-104. CAB International, Wallingford, UK and IRRI, Los Banos, Philippines.
- 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.
- Lambert C, 1983. Influence de la précocité sur le développement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubbard.) en conditions naturelles. I-Elaboration de la touffe. Agronomie Tropicale 38: 7-25.
- Maddoni GA, Chelle M, Drouet JL, Andrieu B, 2001a. Light interception of contrasting leaf azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. Field Crops Research 70: 1-13.
- Maddoni GA, Otegui ME, Cirilo AG, 2001b. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. Field Crops Research 71: 183-193.
- Marathée JP, 1971. Etat d'avancement des travaux d'amélioration du mil et du sorgho au Sénégal. IRAT/CNRA, Bambey. 11 pp.
- Masle-Meynard J, 1981. Relations entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition. Agronomie (1): 365-374.
- McIntire J, Fussel LK, 1989. On-farm experiments with millet in Niger: Crop establishment, yield loss factors and economics analysis. Exp. Agric. 25, 217-233.
- Moulia B, Loup C, Chartier M, Allirand JM, Edelin C, 1999. Dynamics of architectural development of isolated plants of maize (*Zea mays* L.) in a non limiting environment: the branching potential of modern maize. Annals of Botany 84: 645-656.
- Pale S, 2001. Planting date and row spacing of pearl millet (M. S. Thesis). In INTSORMIL, Sorghum/Millet collaborative Research Support Program (Editors). pp 49-55. Annual report.
- Pandey RK, Maranville JW, Bako Y, 2001. Nitrogen fertilizer response and use efficiency for three cereal crops in Niger. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32: 1465-1482.
- Pascal F, 1989. Modèle de croissance et de développement d'un peuplement de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) en phase végétative et reproductrice. Volume I : Texte. Mémoire de fin d'études. 28 pp.
- Powers D, Kanemasu ST, Sing P, Kreittner G, 1980. Floral development of pearl millet. Field Crops Research 3: 245-266.
- Samba A, Sarr B, Baron C, Goze E, Maraoux F, Clerget B, Dingkhun M, 2001. La prévision agricole à l'échelle du Sahel. In Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision. E Malezieux, G Trebreil and M Jaeger (Editors). pp 243-261. Cirad-INRA.
- Sarr B, Diouf O, Diouf M, Roy - Macauley H, Ndiendole S, 1999. Suivi de l'état hydrique du sol et de la température du couvert de maïs au Sénégal. Sécheresse 10: 129 - 135.
- Schnier HF, Dingkhun M, De Datta SK, Mengel K, Wijangco E, Javellana C, 1990. Nitrogen economy and canopy CO₂ assimilation in tropical lowland rice. Agronomy Journal 82: 451-459.
- Tetio-Kagho F. and Gardner FP, 1988. Responses of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. Agronomy Journal 80: 930-935.
- Van Oosterom EJ, Carberry PS, Hargreaves JNG, O'Leary GJ, 2001. Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet. II. Simulation of canopy development. Field Crops Research 72: 67-91.
- Van Oosterom EJ, O'Leary GJ, Carberry PS, Craufurd PQ, 2002. Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. Field Crops Research 79: 85-106.
- 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.
- Whaley JM, Sparkes DL, Foulkes MJ, Spink JH, Semere T, Scott RK, 2000. The physiological response of winter wheat to reductions in plant density. *Annals of Applied Biology* 137: 165-177.
- Wilson PJ, Thompson K, Hodgson JG, 1999. Specific leaf area and dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist* 143: 155-162.